



การผลิตแบบจำลองระดับตื้นจากภาพถ่ายดาวเทียม
กรณีศึกษาท่าเรือน้ำลึก นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

SATELLITE DERIVED BATHYMETRY PRODUCTION

CASE STUDY AT DEEPWATER PORT OF MAPTAPHUT INDUSTRIAL PARK RAYONG

เทพชัย ศรีน้อย^{1*}, ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์², ไพศาล สันติธรรมนนท์³ และประจวบ เรียบร้อย⁴

¹นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²นักวิจัย, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁴วิศวกรสำรวจอาวุโส บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)

*Corresponding author, E-Mail: thepchai.rinoi@gmail.com

บทคัดย่อ

แบบจำลองระดับตื้นที่ได้นำจากภาพถ่ายดาวเทียมเป็นทางเลือกหนึ่งของการทำข้อมูลค่าระดับบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลที่กว้างขวาง เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยา สภาพแวดล้อมของชายฝั่งทะเล ตลอดจนการจัดการคมนาคมทางเรือบริเวณ ท่าเรือน้ำลึก ซึ่งค่าระดับบริเวณนั้นจำเป็นต้องลึกกว่าบริเวณชายหาดตามปกติ การศึกษาครั้งนี้เป็นการหาแนวทางการผลิต แบบจำลองจากข้อมูลดาวเทียมเซนทิเนล-2 กับค่าระดับจากเรือหยั่งความลึกบริเวณท่าเรือน้ำลึก นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เลือกภาพที่เหมาะสมในช่วงเวลา 3 เดือน โดยพิจารณาการทำแบบจำลองจากสมการเชิงประจักษ์ของไลเซนก้า และสตัมป์ กับการเลือกใช้ข้อมูลช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (แบนด์ที่ 1 กับ 2 จากข้อมูลดาวเทียมเซนทิเนล-2) ที่เหมาะสมเพื่อความถูกต้อง ของแบบจำลองที่ดีกว่า ผลการศึกษาพบว่า ความถูกต้องของแบบจำลองอยู่ในระดับ 2 – 5 เมตร แบบจำลองอัลกอริทึมของ ไลเซนก้าได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับอัลกอริทึมของสตัมป์ และแบนด์สีน้ำเงินในแบบแบนด์ที่ 2 ให้ความถูกต้องของแบบจำลองได้ดีกว่า แบบแบนด์ที่ 1 ข้อจำกัดหลักของการทำแบบจำลองในครั้งนี้คือการมีตะกอนในน้ำทะเลจำนวนมากส่งผลทำให้แบบจำลอง ประมาณความลึกได้น้อยกว่าความลึกในภาคสนาม ส่งผลต่อความถูกต้องที่น้อยลงในพื้นที่การศึกษานี้

คำสำคัญ: การรับรู้ระยะไกลเชิงทัศน; แบบจำลองค่าระดับตื้นน้ำ; แบบจำลองของไลเซนก้า; แบบจำลองของสตัมป์; เซนทิเนล-2

Thepchai Srinoi^{1*}, Thirawat Bannakulpiphat², Pisan Santitamnont³ and Prajuab Riabroy⁴

¹Graduate Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

²Researcher, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

³Associate Professor, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

⁴Senior Survey Engineer, Italian-Thai Development Public Company Limited

ABSTRACT

The satellite-derived bathymetry model (SDB) is an alternative way of making elevation data for large nearshore areas. This is essential for geological study, coastal environment, and transportation management in deepwater ports because the nearshore depth around the port should be deeper than on a typical beach. This study is about finding the bathymetry production method using Sentinel-2 imagery and depth data from a bathymetry boat at Maptaphut Industrial Area Deepwater Port, Rayong. The suitable images were downloaded over a three-month period. This study investigated the model production from Lyzenga and Stumpf's empirical formulas and blue band selection (bands 1 and 2 from the sentinel-2 image) for better model accuracy. The results showed that model accuracy is about 2–5 m, Lyzenga algorithm was probably same with Stumpf algorithm and the blue band in band 2 was better than band 1. The main limitation of model production in this study was that a lot of turbidity covered the water surface, so the depth estimation model was shallower than field depth data, resulting in lower accuracy in these areas.

KEYWORD: Optical Remote Sensing; Satellite Derived Bathymetry (SDB); Lyzenga Model; Stumpf Model, Sentinel-2

1. บทนำ

ข้อมูลระดับท้องทะเลโดยเฉพาะท้องน้ำตื้นริมชายฝั่งทะเลเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญทั้งทางด้านการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณไหล่ทวีป (Continental Shelf) การติดตามการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเล สภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล การท่องเที่ยว ตลอดจนการคมนาคมขนส่งทางเรือ โดยเฉพาะบริเวณท่าเรือน้ำลึกซึ่งต้องมีระดับที่เหมาะสมกับเรือที่เข้าจอดเทียบท่า แนวทางการจัดทำข้อมูลชุดนี้คือการออกภาคสนามรังวัดค่าระดับทั้งวิธีงานระดับสำหรับบริเวณริมชายฝั่ง และท้องน้ำตื้นมาก ซึ่งทำได้ในพื้นที่จำกัด [1] การใช้อากาศยานไร้คนขับซึ่งมีการติดตั้งไลดาร์สำรวจห้วงความลึกน้ำ (Bathymetry UAV) การติดตั้งไลดาร์ซึ่งสามารถสำรวจค่าระดับสิ่งปกคลุมดิน เช่น ดาวเทียมไอซ์แซท-2 (ICESat-2) โดยข้อมูลที่ได้บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลพบว่า นอกจากบันทึกผิวน้ำแล้วยังสามารถทะลุน้ำลงไปยังท้องน้ำได้ [2] การใช้เรือห้วงความลึกน้ำ (Bathymetry SONAR) ด้วยหลักการสะท้อนของคลื่น สำหรับพื้นที่ท้องน้ำตื้นน้อยกว่าจนถึงท้องน้ำลึก ตลอดจนการใช้ดาวเทียมวัดความโน้มถ่วง (Satellite Gravimetry) เพื่อหาความลึกในพื้นที่มหาสมุทร [3] การใช้เรือห้วงความลึกน้ำเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องของค่าระดับสูง แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง และใช้เวลารังวัดที่ยาวนานสำหรับพื้นที่กว้าง ปัจจุบันนี้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเชิงทัศน (Optical Satellite Imagery) สามารถเข้าถึงได้ง่ายและมีหลายผลิตภัณฑ์ซึ่งเปิดให้ผู้ใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย เช่น เซนทิเนล-2 (Sentinel-2) หรือ แลนด์แซท 9 (Landsat 9) เป็นภาพถ่ายดาวเทียมมัลติสเปกตรัม (Multispectral image) ซึ่งมีภาพในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและสีเขียวที่สามารถทะลุพื้นที่ท้องน้ำตื้นได้ โดยสีน้ำเงินลงไปมากกว่า 30 เมตร โดยประมาณ ได้ลึกกว่าสีเขียวซึ่งลงไปได้มากกว่า 20 เมตรโดยประมาณ อันเนื่องมาจากความยาวคลื่นที่มากกว่า ภาพถ่ายได้น้ำจึงมีลักษณะภาพเฉดสีน้ำเงิน [4] มีการวิจัยว่าสามารถใช้วิธีการทางสถิติ (Statistical method) นำค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นดังกล่าวประกอบกับค่ารังวัดค่าระดับในภาคสนาม คำนวณสัมประสิทธิ์สมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation) ซึ่งแปลงค่าการสะท้อนจากภาพถ่ายให้เป็นค่าประมาณระดับท้องน้ำในบริเวณนั้น ได้แบบจำลองระดับท้องน้ำจากภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Derived Bathymetry Model) บริเวณกว้างได้ในระยะเวลาสั้น และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ ปัจจัยซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองนั้นสามารถมาจากการสะท้อนจากท้องน้ำและสิ่งแวดล้อม

การตรวจแก้ข้อผิดพลาดของบรรยากาศ ความขุ่นของตะกอนในน้ำทะเล ปัจจุบันนี้มีการวิจัยสมการเชิงวิเคราะห์ซึ่งขึ้นกับกระบวนการทางกายภาพ เพื่อความถูกต้องสูง มีการวิจัยแบบจำลองจากการส่งผ่านการแผ่รังสีเชิงฟิสิกส์ (Radiative Transfer Physics based model) นอกจากนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมมัลติสเปกตรัมแล้วยังมีการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมไฮเพอร์สเปกตรัม (Hyperspectral image) และยังมีวิธีการใช้ภาพเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture RADAR : SAR) สำหรับความลึก 10 – 100 เมตร อีกด้วยแต่มีความถูกต้องต่ำไม่เป็นที่น่าเชื่อถือ ที่เป็นที่ยอมรับกว่าซึ่งใช้ในระดับลึกมากเป็นการวัดระดับด้วยเรดาร์ (RADAR Altimetry) ซึ่งใช้ในการหาค่าระดับผิวน้ำ และประมาณความลึกน้ำกลางทะเล [5]

การทำแบบจำลองความลึกท้องน้ำขึ้นด้วยสมการเชิงประจักษ์มีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ท้องน้ำที่มีลักษณะอุดมคติ ความใสของน้ำทะเล ความเรียบของทรายท้องน้ำ ในประเทศไทยได้มีการทดลองทำในพื้นที่ศึกษาชายฝั่งอ่าวไทยโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท 8 (Landsat 8) ด้วยสมการเชิงประจักษ์ของสตัมป์ (Stumpf Equation) แบบจำลองเข้ากันได้ดีในพื้นที่ชายฝั่งทะเลแต่ให้ผลไม่ดีนักบริเวณปากแม่น้ำ อ่าวไทยรูปตัว ก [6] ส่วนกรณีทำเรือน้ำลึกซึ่งท้องน้ำไม่ตื้นนักใกล้ชายฝั่ง และปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อลักษณะของน้ำทะเลทำให้ภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้ไม่สามารถประมาณค่าระดับท้องน้ำได้ง่ายนัก เป็นความท้าทายของการศึกษาทำแบบจำลองความลึกท้องน้ำขึ้นเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันได้มีเครื่องมือช่วยในการทำงานอย่าง Google Earth Engine ที่ทำให้สามารถสืบค้นภาพถ่ายดาวเทียมที่เปิดใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายได้สะดวกขึ้น การเข้าถึงภาพถ่ายดาวเทียมจึงทำได้ง่าย ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ภาพเซนทิเนล-2 ซึ่งมีความละเอียดของจุดภาพที่ละเอียดกว่าแลนด์แซท 8 ได้ สามารถคัดเลือกภาพที่เหมาะสมในบริเวณที่สนใจได้ ศึกษาภาพได้ในหลายช่วงเวลาตามคาบของการกลับมาถ่ายที่เดิมของดาวเทียม ข้อจำกัดของการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเชิงทัศนคือบางช่วงเวลามีเมฆปกคลุมภาพจากการเป็นการรับรู้ระยะไกลแบบพาสซีฟ (Passive Remote Sensing) แสงอาทิตย์ ทำให้อาจไม่สามารถเลือกภาพที่บันทึกเวลาใกล้เคียงกับช่วงเวลานับที่ข้อมูลภาคสนามได้ เกิดความไม่สอดคล้องกันเชิงเวลาของข้อมูล การศึกษาครั้งนี้ทำการค้นภาพในช่วงเวลา 3 เดือน ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลานับที่ข้อมูลภาคสนาม เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้รูปแบบสมการเชิงประจักษ์สำหรับการทำแบบจำลองนั้นมีแบบจำลองที่ได้รับความนิยมคือแบบจำลองของไลเซนก้า (Lyzenga Model) กับแบบจำลองของสตัมป์ (Stumpf Model) ทั้งสองแบบจำลองนี้มีการศึกษาเปรียบเทียบในหลายพื้นที่บนโลก [7] แต่ละพื้นที่ที่มีผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบแบบจำลองที่แตกต่างกัน เช่น พื้นที่ประจักษ์แห่งหนึ่งในทะเลชวา อินโดนีเซีย แบบจำลองแบบไลเซนก้าให้ผลดีกว่าสตัมป์เล็กน้อย [8] แต่พื้นที่ชายฝั่งทะเลแห่งหนึ่งในมาเลเซีย แบบจำลองของสตัมป์ดีกว่าไลเซนก้า [9] เกิดประเด็นศึกษาว่าควรเลือกใช้แบบจำลองใดในพื้นที่ศึกษา และข้อมูลจาก เซนทิเนล-2 มีผลบันทึกการสะท้อนในช่วงสีน้ำเงิน 2 แบนด์ให้เลือกใช้ได้ คือแบนด์ที่ 1 (Coastal Blue) และแบนด์ที่ 2 (Blue) มีการศึกษาในพื้นที่ชายฝั่งตะวันออกของเกาะชวาพบว่า การใช้แบนด์ที่ 1 ให้ผลลัพธ์ความถูกต้องที่ดีกว่าแบนด์ที่ 2 [10] เกิดประเด็นศึกษาต่อมาว่าหากเป็นพื้นที่ทำเรือน้ำลึกใกล้ชายฝั่งให้ผลลัพธ์เดียวกันหรือไม่ การศึกษานี้เป็นการทดลองทำแบบจำลองระดับท้องน้ำขึ้นบริเวณท่าเรืออุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ด้วยค่าระดับตัวอย่างจากเรือบขความลึกน้ำ กับภาพถ่ายดาวเทียมเซนทิเนล-2 ที่เหมาะสมในช่วงสามเดือน โดยสนใจศึกษาประเด็นเรื่องของความถูกต้องของแบบจำลองที่มีความแตกต่างกันในสมการเชิงประจักษ์ และประเด็นการเลือกใช้แบนด์สีน้ำเงินนำผลลัพธ์ที่ได้ประเมินแนวทางการทำแบบจำลอง ต่อขอการศึกษาการทำแบบจำลองในพื้นที่ชายฝั่งทะเลในบริเวณอื่น ๆ และการติดตามการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำขึ้นในการก่อสร้างปรับปรุงท่าเรือน้ำลึกต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองระดับท้องน้ำจากภาพถ่ายดาวเทียม มีพื้นฐานมาจากความเข้าใจโดยทั่วไปว่า สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลท้องน้ำตื้นที่น้ำใสมาก ท้องน้ำเรียบราบแล้ว ความเข้มของสีน้ำทะเลบ่งบอกความลึกของน้ำทะเล หมายความว่ายิ่งสีน้ำทะเลเข้มมาก แสดงว่าบริเวณนั้นน้ำทะเลมีความลึกมาก สามารถเห็นได้จากการวิเคราะห์จากภาพถ่ายในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและสีเขียว การสร้างแบบจำลองเป็นการหาอัลกอริทึมในการแปลงค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องจากภาพถ่ายดาวเทียมเป็นค่าความลึกหรือค่าระดับ ซึ่งมีทั้งรูปแบบสมการเชิงประจักษ์และสมการเชิงฟิสิกส์ซึ่งซับซ้อนกว่า ใช้ข้อมูลเพิ่มเติมนอกเหนือจากภาพถ่ายดาวเทียม

กำหนดให้ค่าการสะท้อนด้วยเลขดิจิทัลในแต่ละช่องพิกเซลของภาพถ่ายทางดาวเทียมภาพหนึ่ง ถ้าค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงินเป็น L_B และมีค่าในช่วงคลื่นสีเขียวเป็น L_G บริเวณนั้นมีค่าความลึกเป็น H ตัวอย่างสมการเชิงประจักษ์คือสมการของไลเซนกับสตัมป์ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบสมการค่ารังวัด (Observation Equation) ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

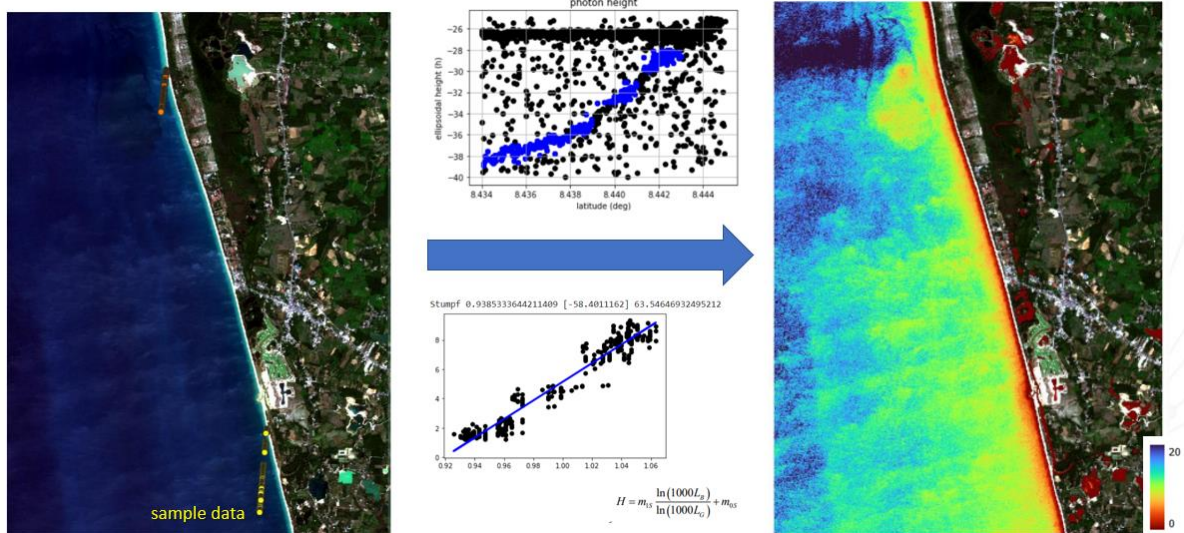
สมการเชิงประจักษ์ของไลเซนกับ (Lyzenga Algorithm) เป็นสมการคำนวณค่าระดับแบบผลรวมลอการิทึมของการสะท้อนเชิงคลื่น (Linear Band SDB) [11] รูปแบบทั่วไปอยู่ในรูปของลอการิทึมของการสะท้อนในช่วงคลื่นซึ่งถือว่ามาจากการสะท้อนเหนือผิว (above surface reflectance) ลบกับการสะท้อนจากน้ำลึก (deep water radiance) ซึ่งค่าหลังจากการสมมติว่าการสะท้อนที่ผิวน้ำทะเล การกระเจิงเชิงปริมาตรในน้ำทะเล ผลจากแสงอาทิตย์และการกระเจิงด้วยชั้นบรรยากาศ เพื่อความง่ายกว่าจึงใช้สมการในรูปแบบดัดแปลงตามงานวิจัย [12] ซึ่งเขียนเป็นผลบวกลอการิทึมของการสะท้อน

$$H = m_{2L} \ln(L_B) + m_{1L} \ln(L_G) + m_{0L} \quad (1)$$

สมการเชิงประจักษ์ของสตัมป์ เป็นสมการคำนวณค่าระดับแบบผลหารลอการิทึมของการสะท้อนเชิงคลื่น [13]

$$H = m_{1S} \frac{\ln(nL_B)}{\ln(nL_G)} + m_{0S} \quad (2)$$

เมื่อ m_{2L} , m_{1L} , m_{0L} , m_{1S} , m_{0S} เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการ สามารถคำนวณได้จากการทำการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ร่วมกับค่าระดับตัวอย่างจากภาคสนาม และ n เป็นค่าคงตัวปรับตัวเลข (งานวิจัยนี้เลือกใช้ $n = 1000$) ตัวอย่างผลลัพธ์การทำแบบจำลองความลึกท้องน้ำตื้นบริเวณชายฝั่งทะเลโดยใช้แบบจำลองของสตัมป์กับภาพถ่ายดาวเทียมเซนทิเนล-2 และค่าระดับจากไลดาร์บนดาวเทียมไอซ์แซท-2 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการผลิตแบบจำลองความลึกท้องน้ำบริเวณหาดท้ายเหมือง จังหวัดพังงา ด้วยภาพถ่ายดาวเทียมเซนทิเนล-2 และค่าระดับจากดาวเทียมไอซ์แซท-2 ผ่านสมการเชิงประจักษ์ของสตูมป์

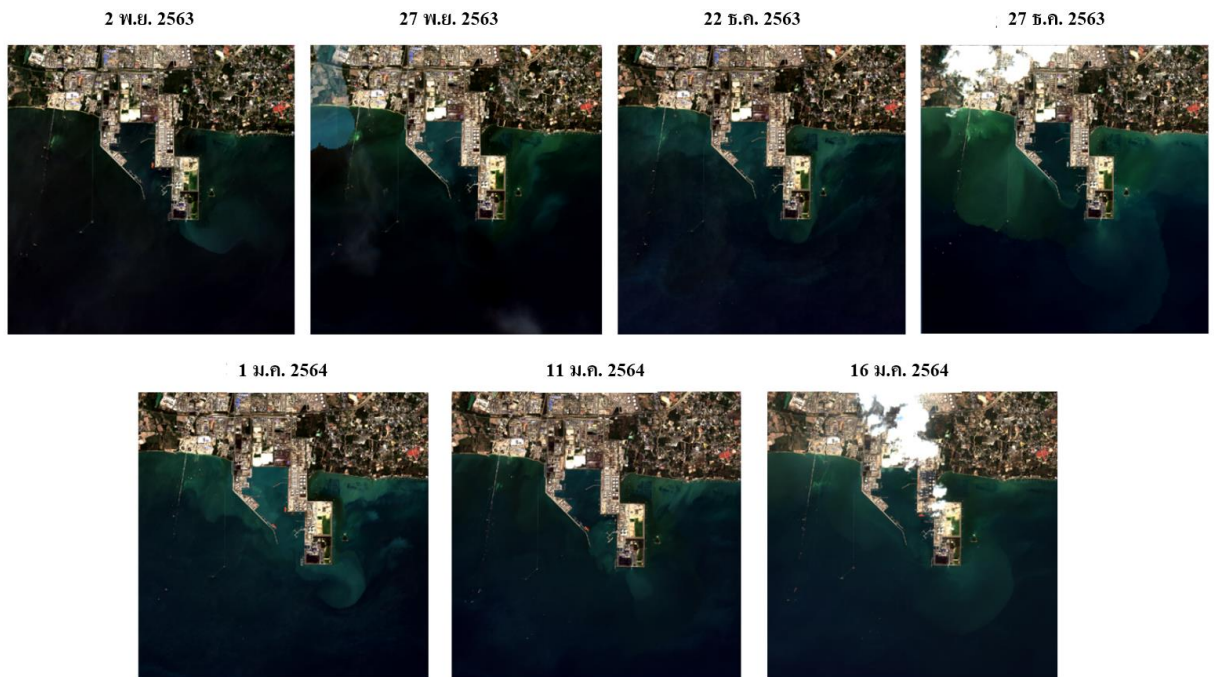
ภาพถ่ายดาวเทียม เซนทิเนล-2 เป็นข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนแบบมัลติสเปกตรัลในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและอินฟราเรด มีแบนด์ที่สามารถใช้ทำแบบจำลองประมาณระดับท้องน้ำได้เป็นไปตามตารางที่ 1 [14] พบว่ามีช่วงคลื่นน้ำเงินให้เลือกสองแบนด์ ความแตกต่างคือความละเอียดเชิงพื้นที่ซึ่งแบนด์ที่ 1 Ultra-blue (60 เมตร) น้อยกว่าแบนด์ที่ 2 Blue (10 เมตร) ส่วนแบนด์ 11 Short wave infrared 1 ใช้คำนวณดัชนี Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) เพื่อกรองเลือกพื้นที่น้ำในภาพ

ตารางที่ 1 ข้อมูลเกี่ยวกับแบนด์ในเซนทิเนล-2 บางส่วนสำหรับการทำแบบจำลอง

แบนด์ ดาวเทียม	ความยาวคลื่น	คำอธิบาย	ความละเอียดจุดภาพ
B1	443.9 nm (S2A) 442.3 nm (S2B)	Ultra-Blue (Coastal and Aerosol)	60 m
B2	496.6 nm (S2A) 492.1 nm (S2B)	Blue	10 m
B3	560 nm (S2A) 559 nm (S2B)	Green	10 m
B11	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	Shortwave infrared 1	20 m

3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและวิธีการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยภาพถ่ายดาวเทียมจาก เซนทิเนล-2 ค่าระดับตัวอย่างในภาคสนามจากเรือหยั่งความลึกน้ำ บริการที่ใช้ดาวินโฮลด์และคำนวณภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth Engine จากนั้นนำเข้าซอฟต์แวร์ภาพพาไพรอนที่พัฒนาขึ้นในการคำนวณสัมประสิทธิ์แบบจำลองและความถูกต้องของแบบจำลอง และซอฟต์แวร์ QGIS สำหรับการวิจัยเพิ่มเติม



รูปที่ 2 ภาพถ่ายดาวเทียม เซนทิเนล-2 จำนวน 7 ภาพที่เลือกมาศึกษาการทำแบบจำลองความลึกท้องน้ำดิน

การเลือกภาพถ่ายดาวเทียม เซนทิเนล-2 แบบ L2A Bottom of the Atmosphere ซึ่งมีการตรวจแก้อิทธิพลจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งบันทึกภาพในช่วงเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม พ.ศ. 2563 และมกราคม พ.ศ. 2564 ผ่านระบบบริการ Google Earth Engine เลือกภาพที่ไม่มีเมฆปกคลุมท้องน้ำดิน ได้ภาพถ่ายมา 7 ภาพ โดยบันทึกภาพในวันที่ 2 และ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 วันที่ 22 และ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2563 และวันที่ 1, 11 และ 16 มกราคม พ.ศ. 2564 ลักษณะของภาพถ่ายดาวเทียมในแต่ละวันที่เลือกมา แสดงดังรูปที่ 2

ภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละภาพทำการคำนวณฟังก์ชัน maskS2cloud โดยใช้ข้อมูลแบนด์ QA60 เป็น bitmask band ซึ่งช่วยกรองเมฆไปได้ทั้งเมฆก้อนหรือเมฆริ้วต่อไปเป็นการคำนวณภาพก่อนนำเข้าทำแบบจำลอง ตามงานวิจัย [15] เริ่มต้นค่าที่ได้จากระบบเป็น Mosaic Surface Reflectance (ρ) ทำการแปลงเป็น Remote Sensing Reflectance (R) [16] ดังสมการที่ (3)

$$R = \frac{\rho}{\pi} \quad (3)$$

จากนั้นคำนวณ Below surface remote sensing (r) ซึ่งตรวจแก้ผลกระทบของพื้นผิวน้ำกับอากาศ [17] ดังสมการที่ (4)

$$r = \frac{R}{0.52 + 1.7R} \quad (4)$$

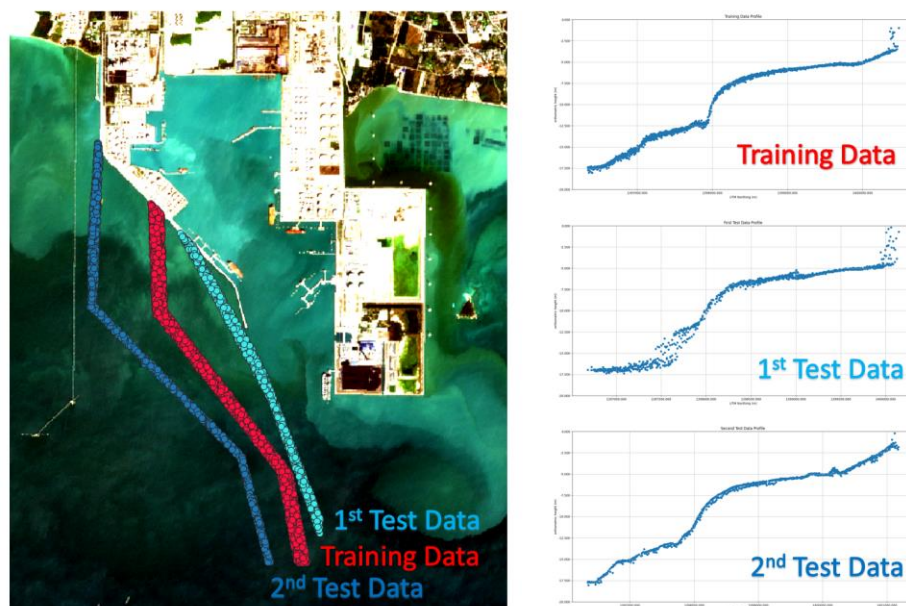
ต่อมาเป็นการเลือกส่วนที่เป็นพื้นที่น้ำ ด้วยการคำนวณดัชนีแบบ Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [18] ใช้ข้อมูลแบนด์สีเขียว (r_{GREEN}) กับ แบนด์อินฟราเรดคลื่นสั้น (r_{SWIR}) คำนวณผ่านสมการที่ (5)

$$MNDWI = \frac{r_{GREEN} - r_{SWIR}}{r_{GREEN} + r_{SWIR}} \quad (5)$$

ในงานวิจัยนี้เลือก $MNDWI > 0$ ให้ถือว่าเป็นพื้นน้ำ ทำการใส่หน้ากากให้กับบริเวณที่มี $MNDWI < 0$ เสมือนดึงข้อมูลออกในช่องพิกเซลนั้น เหลือเฉพาะข้อมูลในพิกเซลที่สอดคล้องเงื่อนไขที่ถือว่าเป็นพื้นน้ำ

จากนั้นนำไปคำนวณแบนด์เพื่อเตรียมเข้าทำแบบจำลอง สัดส่วนของลอการิทึมของการสะท้อนสีน้ำเงินเทียบกับสีเขียว ตามสมการเชิงประจักษ์ของสดัมป์ โดยทำทั้งกรณีที่เลือกสีน้ำเงินจากแบนด์ 1 คู่กับสีเขียวจากแบนด์ 3 (คู่แบนด์ 1 – 3) กับสีน้ำเงินจากแบนด์ 2 คู่กับสีเขียวจากแบนด์ 3 (คู่แบนด์ 2 - 3) จากนั้นเตรียมแบนด์ลอการิทึมธรรมชาติของแบนด์ 1, 2 และ 3 เพื่อนำเข้าคำนวณสัมประสิทธิ์ตามสมการเชิงประจักษ์ของไลเซนก้า ส่งออกภาพจาก Google Earth Engine เป็นไฟล์ GeoTiff

ค่าระดับจากเรือหยั่งความลึกน้ำแบบลำแสงเดี่ยว (Single Beam Echo Sounder) ความถี่สูง ค่าพิกัดได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม บันทึกลงเป็นค่าพิกัดทางราบแบบระบบพิกัดกริดแผนที่ยูทีเอ็ม (EPSG:32647) และค่าพิกัดทางตั้งแบบ Orthometric Height ประมวลผลด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematics) เทียบกับหมุดควบคุมของ กนอ. (GPS จท. 816 กรมเจ้าท่า) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด บันทึกลำรังวัดเมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 นำค่าระดับตัวอย่างมาศึกษาผ่าน QGIS แสดงผลดังรูปที่ 3 ทางซ้าย คัดเลือกค่าระดับตัวอย่าง 3 แนว (รูปทางขวา) แนวกลางใช้สำหรับทำแบบจำลอง (Training Data : สีน้ำเงิน) 2000 จุด และอีกสองแนวซ้ายขวาใช้ทดสอบความถูกต้อง (Test Data) รวม 2000 จุด



รูปที่ 3 ค่าระดับตัวอย่างในภาคสนาม (ซ้าย) และแนวของค่าระดับสำหรับทำและทดสอบแบบจำลอง (ขวา)

การกรองค่าระดับแบบ Orthometric Height เลือกส่วนที่อยู่ระหว่าง -20 เมตร ถึง 0 เมตร จากนั้นนำข้อมูลค่าระดับไปคำนวณหาค่าในภาพถ่ายดาวเทียมที่จัดเตรียมไว้แล้ว นำส่วนที่ใช้ทำแบบจำลอง (training data) ทำการถดถอยเชิงเส้น (linear

regression) คำนวณสัมประสิทธิ์ของสตั้มป์และไลเซนก้า ในชุดแบบที่ได้จัดไว้ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ แล้วทำการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองด้วยการทดสอบกับข้อมูลที่จัดทำแบบจำลอง จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ที่ได้สร้างแบบจำลอง แล้วค้นค่าระดับของแบบจำลองในส่วนที่ใช้ทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับค่าระดับในภาคสนาม ทำการคำนวณความถูกต้องของแบบจำลองด้วย Root Mean Square Error (RMSE) และมีการวัด R-square เพื่อประเมินความสอดคล้องของค่าระดับตัวอย่างกับค่าระดับจากแบบจำลอง ค่าในช่วง 0 ถึง 1 หากเข้ากันได้ดี ค่า R-square เข้าใกล้ 1 แต่ถ้าไม่เข้ากันค่า R-square เข้าใกล้ 0

4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

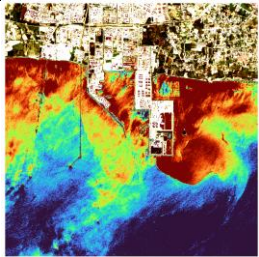
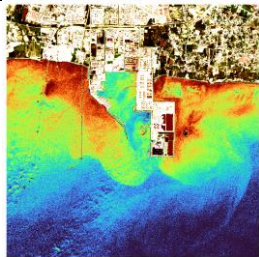
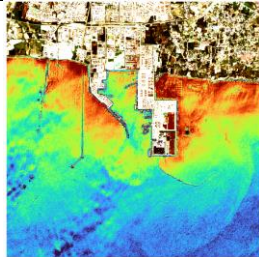
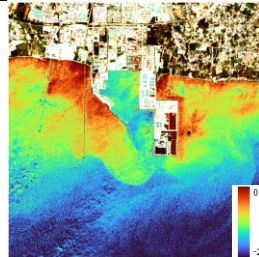
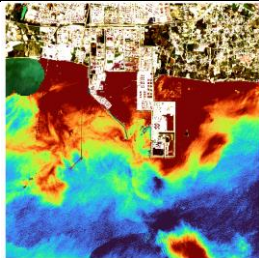
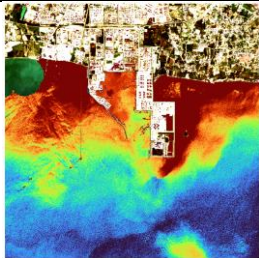
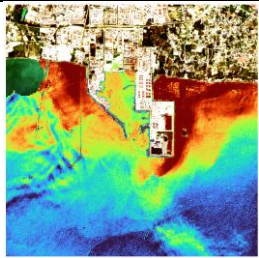
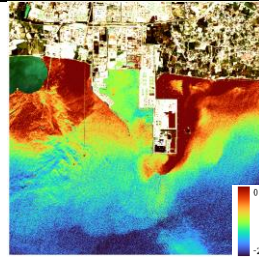
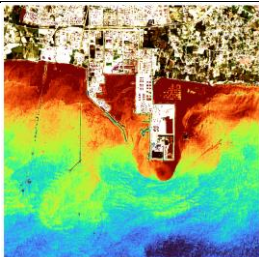
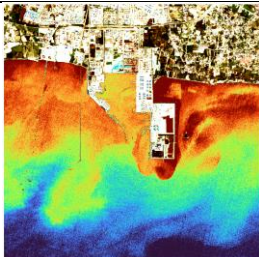
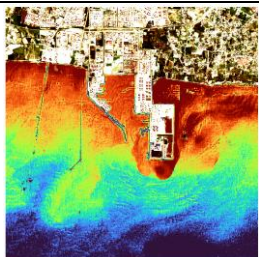
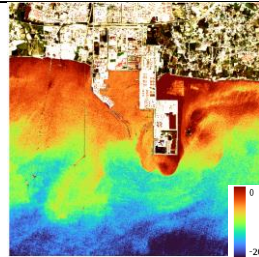
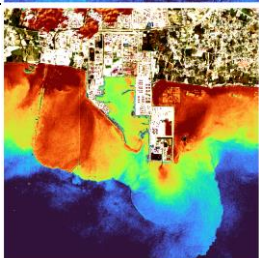
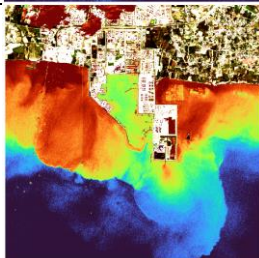
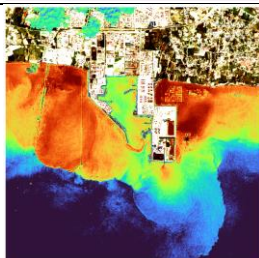
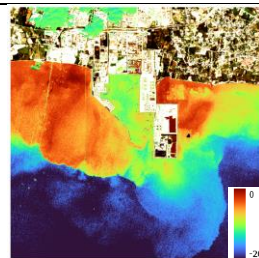
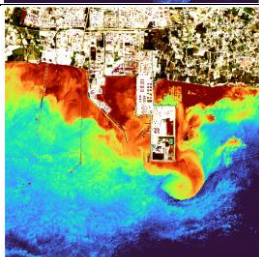
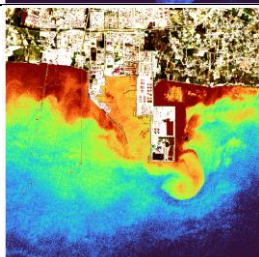
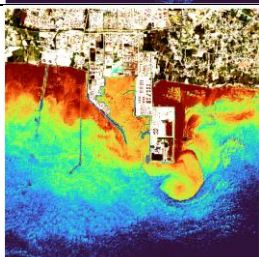
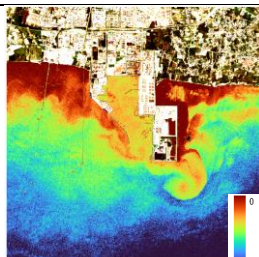
เริ่มต้นที่การคำนวณสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไลเซนก้าและสตั้มป์ ทั้งสองแบบจำลองนั้นถือได้ว่าเป็นสมการเชิงเส้นจากชุดภาพที่เตรียมมาต่างเวลาจำนวน 7 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ แล้วทำการทดสอบกับค่าระดับที่นำมาทำแบบจำลอง ได้ผลดังตารางที่ 2 ในภาพรวมพบว่า การใช้แบนด์น้ำเงินจากแบนด์ที่ 2 ให้ความถูกต้องที่ดีกว่าแบนด์ที่ 1 ความถูกต้องของแบบจำลองอยู่ที่ 1 ถึง 4 เมตร ในภาพรวม พบว่าแบบจำลองเข้าได้ดีในทุกรูปแบบอัลกอริทึมกับทุกรูปแบบการใช้แบนด์สีน้ำเงินในภาพวันที่ 27 ธันวาคม โดยสามารถได้ความถูกต้องลงไปต่ำสุดที่ 1.386 เมตร สำหรับแบบจำลองไลเซนก้าที่ใช้คู่แบนด์ 2 - 3 ค่า R-square เท่ากับ 0.91 แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีกับแบบจำลอง ทั้งนี้ยังไม่ตัดสินผลลัพธ์ ต้องทำการทดสอบกับข้อมูลทดสอบทั้งสองต่อไป การนำข้อมูลทำแบบจำลองมาตรวจสอบก่อนทำให้ประเมินได้ว่าความถูกต้องลงไปได้เพียงใด เมื่อนำข้อมูลทดสอบอีกชุดมาทดสอบคาดว่าจะผลลัพธ์ไม่ดีไปกว่านี้ นำสัมประสิทธิ์ที่ได้คำนวณสร้างแบบจำลองระดับท้องน้ำออกมาเป็นข้อมูลราสเตอร์แสดงผลได้ดังตารางที่ 3 สำหรับผลลัพธ์ในแต่ละชื่อแบบจำลองและรูปแบบการเลือกใช้แบนด์สีน้ำเงิน

ต่อมาทำการทดสอบความถูกต้องกับข้อมูลทดสอบ เป็นแถบรังวัดค่าระดับทางซ้ายและขวาของแถบที่ใช้ทำแบบจำลอง ได้ผลดังตารางที่ 4 กราฟแท่งแยกระหว่างชุดทดสอบสองชุดแสดงดังรูปที่ 4

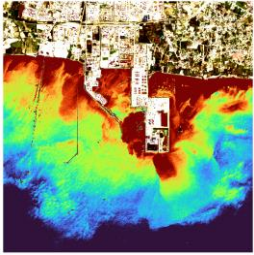
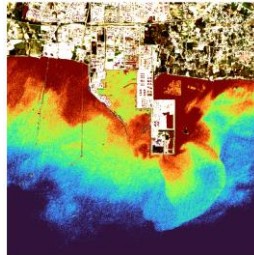
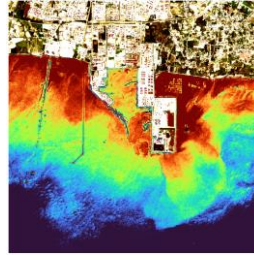
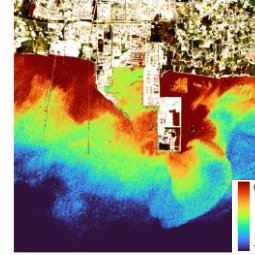
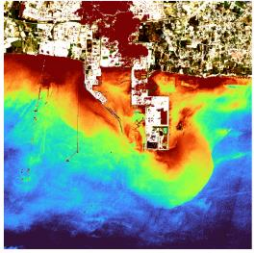
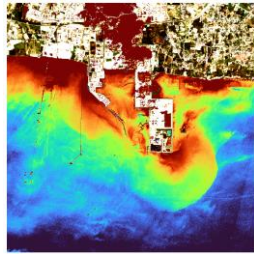
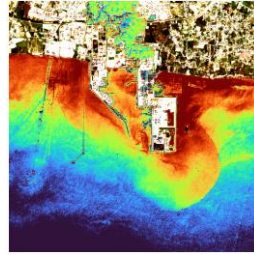
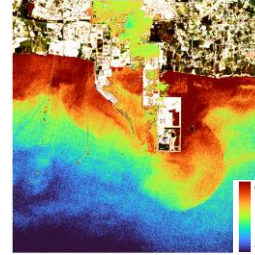
ตารางที่ 2 การประเมินความถูกต้องกับข้อมูลที่จัดทำแบบจำลอง

วันที่	สมการเชิงประจักษ์ของไลเซนก้า				สมการเชิงประจักษ์ของสตั้มป์			
	คู่แบนด์ 1 – 3		คู่แบนด์ 2 – 3		คู่แบนด์ 1 – 3		คู่แบนด์ 2 – 3	
	R ²	RMSE (m)	R ²	RMSE (m)	R ²	RMSE (m)	R ²	RMSE (m)
2 พ.ย.	0.55	3.068	0.79	2.117	0.56	2.997	0.78	2.119
27 พ.ย.	0.55	3.052	0.65	2.714	0.40	3.519	0.61	2.836
22 ธ.ค.	0.66	2.660	0.78	2.139	0.76	2.243	0.76	2.209
27 ธ.ค.	0.90	1.473	0.91	1.386	0.87	1.636	0.83	1.855
1 ม.ค.	0.69	2.551	0.76	2.253	0.72	2.424	0.77	2.186
11 ม.ค.	0.58	2.970	0.67	2.611	0.59	2.924	0.68	2.574
16 ม.ค.	0.63	2.781	0.63	2.781	0.61	2.840	0.54	3.089

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์แบบจำลองระดับท้องน้ำ

วันที่	สมการเชิงประจักษ์ของไลเซนก้า		สมการเชิงประจักษ์ของสตัมป์	
	คู่แบนด์ 1 – 3	คู่แบนด์ 2 – 3	คู่แบนด์ 1 – 3	คู่แบนด์ 2 – 3
2 พ.ย.				
27 พ.ย.				
22 ธ.ค.				
27 ธ.ค.				
1 ม.ค.				

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์แบบจำลองระดับท้องน้ำ (ต่อ)

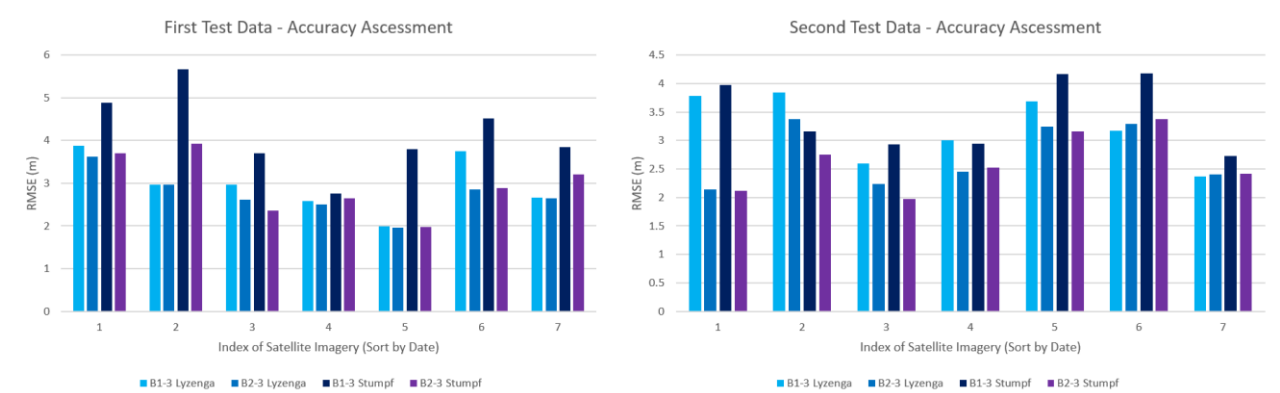
วันที่	สมการเชิงประจักษ์ของไลเซนก้า		สมการเชิงประจักษ์ของสตัมป์	
	รูปแบบที่ 1 – 3	รูปแบบที่ 2 – 3	รูปแบบที่ 1 – 3	รูปแบบที่ 2 – 3
11 ม.ค.				
16 ม.ค.				

จากกราฟแท่งในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลภาคสนามเดียวกันกับภาพที่บันทึกเวลาต่างกันทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ต่างกัน แต่ว่าการเลือกภาพใกล้เคียงกับเวลาบันทึกข้อมูลภาคสนามไม่จำเป็นต้องให้ความถูกต้องที่สุด ชุดทดสอบแรกมีแนวโน้มว่าภาพที่ 4 (27 ธันวาคม 2563) หรือภาพที่ 5 (1 มกราคม 2564) เป็นภาพที่เหมาะสมในการทำแบบจำลอง กรณีวันหลังไม่ควรใช้แบนด์ 1 แทนสีน้ำเงิน ทำแบบจำลองของสตัมป์ ส่วนชุดทดสอบที่สองนั้นรูปแบบไม่ชัดเจนเท่าชุดที่หนึ่ง แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเรื่องปัจจัยสภาพแวดล้อมในการบันทึกภาพต่างเวลาที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องของแบบจำลองนอกจากเรื่องเวลาบันทึกภาพ โดยภาพรวมแล้วการใช้แบนด์ที่ 2 แทนสีน้ำเงิน ให้ความถูกต้องสูงกว่าการใช้แบนด์ที่ 1 เมื่อพิจารณาแต่ละชุดทดสอบแล้วพบว่าชุดทดสอบแรกนั้นภาพวันที่ 1 มกราคม 2564 ให้ผลลัพธ์ความถูกต้องต่ำสุดจากการใช้แบนด์ 2 แทนสีน้ำเงินในการทำแบบจำลองของสตัมป์ (1.966 เมตร) แต่เมื่อใช้กับชุดทดสอบที่ 2 แล้ว ความถูกต้องกลับไม่ดีที่สุด โดยภาพวันที่ 22 ธันวาคม การใช้แบนด์ 2 แทนสีน้ำเงินในการทำแบบจำลองของสตัมป์ (1.975 เมตร) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สรุปได้ว่าแบบจำลองของสตัมป์ให้ความถูกต้องที่ดีกว่าไลเซนก้า เมื่อพิจารณาในหลายช่วงเวลา

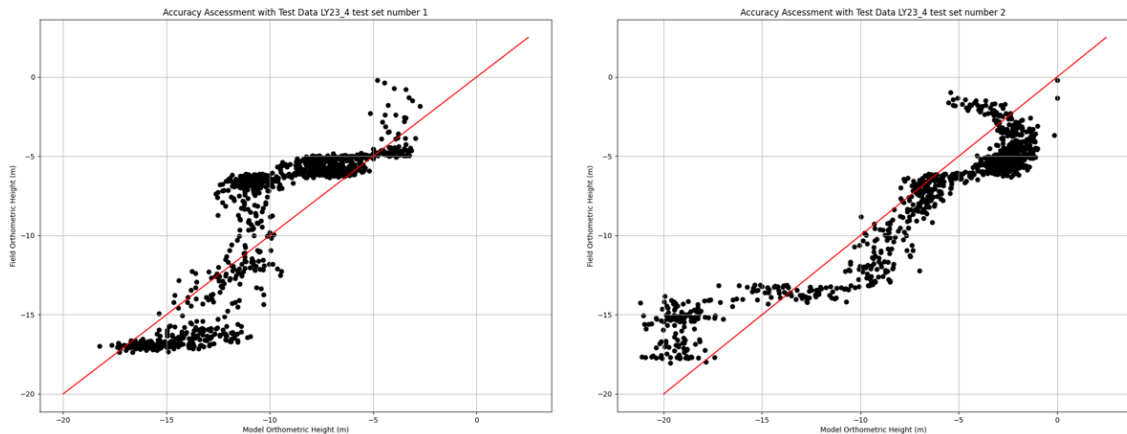
ในทางปฏิบัติ หากกำหนดว่าแบบจำลองระดับท้องน้ำที่คาดหวังควรมีความถูกต้องไม่เกินกว่า 3 เมตร นั้น ภาพที่บันทึกในวันที่ 27 ธันวาคม 2563 เป็นภาพที่เหมาะสมที่สุด โดยในวันนั้นการใช้แบนด์ 2 แทนสีน้ำเงินในการทำแบบจำลองของไลเซนก้าเป็นวิธีการที่ให้ความถูกต้องสูงสุด (2.505 เมตร จากการทดสอบชุดที่ 1 กับ 2.409 เมตร จากการทดสอบชุดที่ 2) แต่ทว่าค่าที่ได้ต่างจากแบบจำลองของสตัมป์น้อย (2.648 เมตร จากการทดสอบชุดที่ 1 กับ 2.520 เมตร จากการทดสอบชุดที่ 2) ไม่สามารถฟันธงได้ชัดว่าแบบจำลองไลเซนก้าดีกว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าระดับจากแบบจำลองเทียบกับภาคสนามแสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ตารางประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

วันที่	สมการเชิง ประจักษ์	ข้อมูลทดสอบที่หนึ่ง (First Test Data)				ข้อมูลทดสอบที่สอง (Second Test Data)			
		คู่แบนด์ 1 – 3		คู่แบนด์ 2 – 3		คู่แบนด์ 1 – 3		คู่แบนด์ 2 – 3	
		R2	RMSE (m)	R2	RMSE (m)	R2	RMSE (m)	R2	RMSE (m)
2 พ.ย.	ไลเซนก้า	0.35	3.872	0.50	3.618	0.29	3.781	0.77	2.137
	สตัมป์	0.17	4.881	0.49	3.696	0.31	3.980	0.77	2.115
27 พ.ย.	ไลเซนก้า	0.69	2.972	0.71	2.964	0.64	3.846	0.67	3.383
	สตัมป์	0.01	5.664	0.35	3.929	0.54	3.166	0.66	2.755
22 ธ.ค.	ไลเซนก้า	0.61	2.971	0.71	2.615	0.66	2.593	0.78	2.237
	สตัมป์	0.44	3.711	0.76	2.367	0.60	2.932	0.81	1.975
27 ธ.ค.	ไลเซนก้า	0.74	2.577	0.77	2.505	0.84	3.003	0.89	2.459
	สตัมป์	0.70	2.760	0.76	2.648	0.72	2.945	0.75	2.520
1 ม.ค.	ไลเซนก้า	0.85	1.984	0.85	1.966	0.50	3.694	0.60	3.242
	สตัมป์	0.45	3.800	0.84	1.982	0.41	4.165	0.62	3.159
11 ม.ค.	ไลเซนก้า	0.48	3.748	0.77	2.853	0.49	3.176	0.58	3.294
	สตัมป์	0.29	4.511	0.76	2.888	0.32	4.185	0.57	3.374
16 ม.ค.	ไลเซนก้า	0.78	2.664	0.77	2.646	0.80	2.374	0.80	2.409
	สตัมป์	0.35	3.853	0.62	3.204	0.73	2.724	0.76	2.423

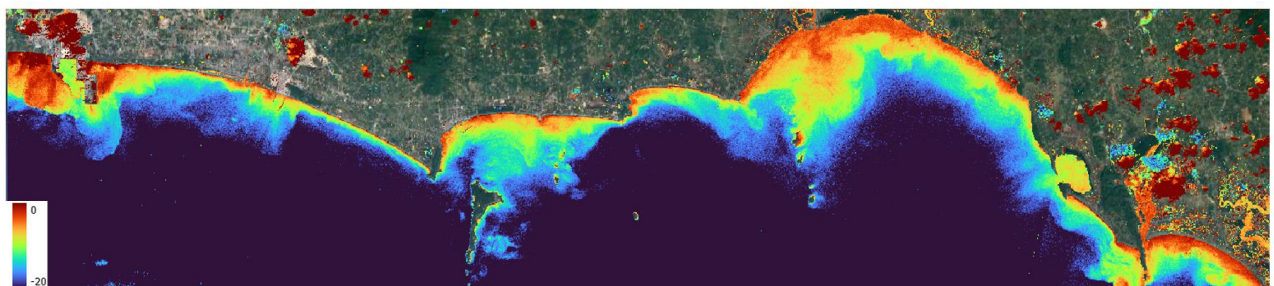


รูปที่ 4 กราฟแท่งเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองตามอัลกอริทึมและการเลือกใช้แบนด์ เทียบสองแนวทดสอบ



รูปที่ 5 กราฟการกระจายของค่าระดับจากแบบจำลองเทียบกับภาคสนามจากการใช้แบนด์ 2 แทนสีน้ำเงิน ในการทำแบบจำลองไลเซนก้าของวันที่ 27 ธันวาคม 2563 เส้นสีแดงแสดงแนวเส้นที่ค่าจากแบบจำลองตรงกับภาคสนาม ความชันเป็น 1

เห็นได้ว่าแบบจำลองระดับท้องน้ำแต่ละวันที่เลือกมานั้นมีลักษณะของพื้นผิวน้ำทะเลที่แตกต่างกัน ตลอดจนลักษณะของตะกอนซึ่งส่งผลต่อแบบจำลองระดับที่ได้เห็นเป็นริ้วคลื่น กับ กองตะกอนที่มีค่าระดับ แสดงถึงข้อจำกัดของการทำ แบบจำลองระดับท้องน้ำจากภาพดาวเทียมในพื้นที่ที่ไม่ได้เรียบง่าย ลักษณะผิวน้ำกับสิ่งปกคลุมผิวน้ำแปรเปลี่ยนไปได้ตามกาลเวลา นอกจากนี้ยังมีประเด็นเรื่องของอิทธิพลจากแสงอาทิตย์และชั้นบรรยากาศ ทำให้การทำแบบจำลองต้องคำนวนสัมประสิทธิ์ใหม่กับค่าระดับตัวอย่าง การใช้สัมประสิทธิ์เดิมอาจไม่เหมาะสมหากปรารถนาความถูกต้องมาก แต่ถ้าใช้แบบจำลองระดับเพื่อประเมินศักยภาพเป็นข้อมูลพื้นฐานซึ่งไม่ต้องการความถูกต้องมาก สามารถทำได้ ข้อดีของวิธีนี้คือการที่ทำการสำรวจค่าระดับแค่พื้นที่จำกัดแล้วสามารถนำผลที่ได้ใช้ในพื้นที่กว้างซึ่งอยู่ในภาพเดียวกันซึ่งมีลักษณะอิทธิพลปัจจัยเชิงรังสีที่ใกล้เคียงกันได้ ตัวอย่างเมื่อนำผลลัพธ์การทำแบบจำลองภาพวันที่ 27 ธันวาคม ขยายผลลัพธ์ไปตามแนวชายฝั่งระยอง - จันทบุรี ได้ผลดังรูปที่ 6 เห็นได้ว่าแบบจำลองระดับนี้มีความเหมาะสมกับกรณีท้องน้ำตื้น ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ทำแบบจำลองเองมีค่าระดับไม่เกิน -20 เมตร โดยทั่วไปจึงไม่เหมาะสมกับพื้นที่ส่วนซึ่งเป็นน้ำลึก การนำไปใช้งานต่ออาจต้องทำการกรองแบบมัธยฐาน (Median Filter) เพื่อขจัดค่านอกเกณฑ์เมื่อเทียบกับค่าพื้นที่ข้างเคียง นำไปสร้างเส้นชั้นความลึกท้องน้ำตื้นเพื่อการวางแผนเดินเรือต่อไปในพื้นที่กว้าง



รูปที่ 6 แบบจำลองระดับท้องน้ำบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยช่วงระยอง - จันทบุรี

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทำแบบจำลองความลึกท้องน้ำขึ้นด้วยภาพถ่ายดาวเทียมประกอบกับค่าระดับจากเรือหยั่งความลึกน้ำ บริเวณพื้นที่ศึกษานิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ผ่านการเปรียบเทียบแบบจำลองสมการเชิงประจักษ์แบบไลเซนส์กับสถัมป์นั้น โดยทั่วไปแบบจำลองให้ผลความถูกต้องในระดับ 2 – 5 เมตร การเลือกคู่มือน้ำเงิน – เขียว (คู่มือน้ำเงิน 2 - 3) จาก เซนทิเนล-2 ให้ผลความถูกต้องสูงกว่าแบบคู่มือน้ำเงิน – เขียว (คู่มือน้ำเงิน 1 - 3) และจากการวิเคราะห์ตัวอย่างภาพต่างเวลาในช่วงสามเดือนประกอบกับการคำนึงการใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติพบว่ายังไม่สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสถัมป์หรือไลเซนส์ดีกว่ากัน ลักษณะของสิ่งปกคลุมน้ำเป็นสิ่งที่บ่งชี้ความลึกที่แท้จริงของท้องน้ำขึ้นให้ได้มากที่สุด เป็นข้อจำกัดของการทำแบบจำลองประมาณระดับท้องน้ำขึ้นด้วยวิธีดังกล่าว การหาทางเลือกใช้ภาพถ่ายหรือแนวทางการตรวจแก้ภาพที่ลดปัจจัยดังกล่าวออกได้เป็นประเด็นศึกษาที่น่าสนใจในการพัฒนาความถูกต้องของแบบจำลองให้ดีขึ้น การติดตามการวัดค่าระดับตัวอย่างยังคงจำเป็นต้องทำ เพื่อคำนวณแบบจำลองสำหรับวันดังกล่าว คำแนะนำในทางปฏิบัติคือควรค้นภาพที่ปราศจากเมฆในพื้นที่งาน ในช่วงตั้งแต่ก่อนเดือนกันยายนถึงหลังเดือนกันยายนค่าระดับ หากพื้นที่งานเป็นพื้นที่ที่มีตะกอน แสดงได้ชัดถึงความผันแปรของลักษณะตะกอนในภาพที่นำมาใช้อัลกอริทึมทั้งสองแบบ โดยเลือกคู่มือน้ำเงินจากแบบ 2 ของ เซนทิเนล-2 ทำแบบจำลอง เลือกแบบจำลองที่ให้ผลความถูกต้องดีที่สุด ด้วยการตั้งเกณฑ์ที่ยอมรับได้เบื้องต้นในการทำงาน สุดท้ายนี้หากเป็นการทำงานทางวิศวกรรมเพื่อข้อมูลความถูกต้องสูงในพื้นที่จำกัด แบบจำลองระดับวิธีนี้ไม่เหมาะสมนัก แต่ถ้าความถูกต้องที่ต้องการอยู่ในระดับเมตร ต้องการศึกษาลักษณะท้องน้ำขึ้นในพื้นที่กว้างเพื่อการศึกษา วางแผนการเดินเรือ แบบจำลองระดับท้องน้ำขึ้นจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนันทน์ สำหรับการถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ แนวทางการทำงานวิจัย ตลอดจนการติดต่อขอข้อมูลตัวอย่างอันเป็นต้นน้ำสำคัญ ขอขอบพระคุณ คุณประจวบ เรียบร้อย จากบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด สำหรับข้อมูลต้นน้ำค่าระดับตัวอย่างในภาคสนาม การมีข้อมูลค่าระดับความถูกต้องสูงนี้เป็นแรงบันดาลใจในการทำวิจัยนี้ และท้ายสุดขอขอบคุณคุณฉัตรวิวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ รุ่นพี่ที่เป็นกำลังใจ คอยเสนอแนะ ผลักดัน กระตุ้นให้ทำงานตีพิมพ์บทความวิชาการแรกในชีวิตจนได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiyoshi Horikawa et. al. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes: Theory, Measurement, And Predictive Models*, Tokyo: University of Tokyo Press, 1988.
- [2] Parrish, C.E. Magruder, L.A. Neuenschwander, A.L. Forfinski-Sarkozi, N. Alonzo, M. Jasinski, M. Validation of ICESAT-2 ATLAS Bathymetry and Analysis of ATLAS's Bathymetric Mapping Performance. *Remote Sensing*, 2019, 11 (14). Available from: <https://doi.org/10.3390/rs11141634> [Accessed 14 February 2023].

- [3] Gottfried Mandlbauer. *A Review of Active and Passive Optical Methods in Hydrography*, 2022. Available from: <https://ihr.iho.int/articles/a-review-of-active-and-passive-optical-methods-in-hydrography/> [Accessed 14 February 2023].
- [4] Chiang, J.Y., Chen, Y.C., Chen, Y.F. *Underwater Image Enhancement: Using Wavelength Compensation and Image Dehazing (WCID)*, 2011. Available from https://doi.org/10.1007/978-3-642-23687-7_34 [Accessed 14 February 2023].
- [5] Duplančić Leder, T. Baučić, M. Leder, N. and Gilić, F. Optical Satellite-derived Bathymetry: An Overview and WoS and Scopus Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*, 2023, 15(5):1294. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs15051294> [Accessed 14 February 2023].
- [6] ชนัดพงศ์ เสืองามเอี่ยม และ ศิริวิไล ชีระโรจนารัตน์. การหยังความลึกน้ำทะเลจากการรับรู้ระยะไกลในอ่าวไทยด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท 8. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, 2565.
- [7] Ashphaq, M. Srivastava, P.K. and Mitra, D. Review of Near-shore Satellite Derived Bathymetry: Classification and Account of Five Decades of Coastal Bathymetry Research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2021, 6 (4), pp. 340-359
- [8] Meliala, L. Wibowo, W A and Amalia, J. Satellite Derived Bathymetry on Shallow Reef Platform: A Preliminary Result From Semak Daun, Seribu Islands, Java Sea, Indonesia. *The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration*, 2019, pp 192-202. DOI: 10.18502/keg.v4i3.5849
- [9] Najhan Md Said, Mohd Razali Mahmud and Rozaime Che Hasan. Satellite-derived Bathymetry: Accuracy Assessment on Depths Derivation Algorithm for Shallow Water Area. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017.
- [10] Gasica, T. A. and Pratomo, D. G. Shallow Waters Depth Estimation Using Empirical Satellite Derived Bathymetry and Sentinel-2 Data, Case Study: East Coastal Waters of Java Island. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, pp. 93–99. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-93-2022
- [11] Lyzenga, D. R. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 1978, 17(3), 379–383
- [12] Geyman, E.C. and Maloof, A.C. A Simple Method for Extracting Water Depth From Multi Spectral Satellite Imagery in Regions of Variable Bottom Type. *Earth and Space Science*, 2019, 6, pp. 527–537. <https://doi.org/10.1029/2018EA000539>
- [13] Stumpf, R.P. Holderied, K. and Sinclair, M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1), pp. 547–556.
- [14] Google Developers. *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*, 2022. Available from: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR [Accessed 1 July 2022].
- [15] Li, J. Knapp, D.E. Lyons, M. Roelfsema, C. Phinn, S. Schill, S.R. Asner, G.P. Automated Global Shallow Water Bathymetry Mapping Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13081469>
- [16] Vanhellemont, Q. Daily Metre-scale Mapping of Water Turbidity Using Cubesat Imagery. *Optics Express*, 2019, 27.
- [17] Lee, Z. Weidemann, A. Arnone, R. Combined Effect of Reduced Band Number and Increased Bandwidth on Shallow Water Remote Sensing: the Case of Worldview 2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013, 51 (5), pp. 2577–2586.
- [18] Xu, H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14), pp. 3025–3033.