

การประเมินความสัมพันธ์เชิงสถิติและการวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลาของค่าความขุ่นด้วยข้อมูลดาวเทียมแบบอนุกรมเวลา บริเวณแม่น้ำกก จังหวัดเชียงราย

ภูมิพัฒน์ อุ่นบ้าน^{1*}, อพิชญา กันเกิด², คัมภีร์ ชีระเวช¹ และ นิตศน์ นิลฉวี¹

Statistical Relationship Assessment and Temporal Variability Analysis of Water Turbidity Using Satellite Time-Series Data in the Kok River, Chiang Rai Province

Phummipat Oonban^{1*}, Apichaya Kangerd², Kumpee Teeravech¹ and Nitat Ninchawee²

¹ Faculty of Computer Science and Information Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi, 22000

² Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000

* Corresponding author: phummipat.o@rbru.ac.th

Received: 1 January 2026; Revised: 13 March 2026; Accepted: 20 April 2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างค่าความขุ่นของน้ำกับค่าการสะท้อนแสงจากข้อมูลภาพดาวเทียม และวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลาของค่าความขุ่นในแม่น้ำกกจากข้อมูลดาวเทียมเซนติเนล-2 แบบอนุกรมเวลา ระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2566 ถึง 31 มีนาคม 2568 โดยผ่านการประมวลผลบนแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงอันดับระหว่างค่าความขุ่นภาคสนาม (NTU) กับดัชนี NDSSI พบว่ามีความสัมพันธ์สูงในทิศทางตรงข้าม โดยมีค่าสหสัมพันธ์แบบอันดับสเปียร์แมน และสหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์ เท่ากับ -0.83 และ -0.64 ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDSSI กับการเปลี่ยนแปลงเชิงลำดับของค่าความขุ่นในแม่น้ำกก สำหรับการวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลา ค่าความขุ่นแสดงรูปแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยมีค่าความขุ่นระดับต่ำถึงปานกลางในช่วงฤดูแล้งและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในฤดูฝน โดยพบค่าความขุ่นสูงสุดในชุดข้อมูลเท่ากับ 6,150 NTU ขณะที่ค่าดัชนี NDSSI ต่ำสุดที่ตรวจพบมีค่าเท่ากับ -0.52 ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่าผิดปกติพบว่าความขุ่นของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน โดยค่าความขุ่นที่มากกว่า 720 NTU ถูกจัดอยู่ในกลุ่มค่าผิดปกติด้านบวก ขณะที่ค่าดัชนี NDSSI ต่ำกว่า -0.13 ถูกจัดเป็นค่าผิดปกติด้านลบ ทั้งนี้การตรวจจับค่าผิดปกติของ NDSSI อ้างอิงจากช่วงเวลาที่ข้อมูลภาพดาวเทียมเท่านั้น เนื่องจากในช่วงมรสุมหลักบางเดือนของฤดูฝนไม่มีภาพที่ผ่านเงื่อนไขการคัดเลือก ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลดัชนี NDSSI จากภาพดาวเทียมแบบอนุกรมเวลาสามารถใช้ประกอบการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความขุ่นและการตรวจจับค่าความขุ่นที่ผิดปกติในบริเวณแม่น้ำกก จังหวัดเชียงราย

คำสำคัญ: ความขุ่น, ดัชนี NDSSI, ข้อมูลอนุกรมเวลา, กูเกิลเอิร์ธเอนจิน

¹ คณะวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี 22000

² สาขาภูมิสารสนเทศศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

Abstract

This study aims to evaluate the statistical relationship between water turbidity and surface reflectance derived from satellite imagery and to analyze the temporal variability of turbidity in the Kok River using time-series Sentinel-2 satellite data acquired between 1 January 2023 to 31 March 2025, processed on the Google Earth Engine (GEE) platform. The rank correlation analysis between field turbidity (NTU) and NDSSI showed a strong inverse relationship, with Spearman's rank correlation and Kendall's rank correlation coefficients of -0.83 and -0.64 , respectively, indicating an association between NDSSI values and the ordinal variation of turbidity in the Kok River. Temporal analysis revealed a seasonal pattern in turbidity, with low to moderate levels during the dry season and a rapid increase during the rainy season. The maximum turbidity observed in the dataset was 6,150 NTU, while the minimum NDSSI value detected was -0.52 , occurring at different times. Anomaly analysis indicated that turbidity tended to increase during the rainy season. Turbidity values exceeding 720 NTU were classified as positive anomalies, whereas NDSSI values lower than -0.13 were classified as negative anomalies. However, anomaly detection for NDSSI was limited to periods with available satellite imagery, as some months during the main monsoon season did not meet the image selection criteria. Overall, the results suggest that time-series NDSSI derived from satellite imagery may be useful for examining turbidity variation trends and identifying anomalous turbidity conditions in the Kok River, Chiang Rai Province.

Keywords: Turbidity, NDSSI Index, Time-Series Data, Google Earth Engine

Introduction

ความขุ่นของน้ำ (Turbidity) เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพน้ำที่สะท้อนถึงปริมาณตะกอนแขวนลอย (Suspended Sediments) หรืออนุภาคแขวนลอยในน้ำ อันมีผลโดยตรงต่อการส่งผ่านแสงและกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ระดับความขุ่นที่มีค่าสูงทำให้คุณค่าทางสุนทรีย์ของแหล่งน้ำเสื่อมลงและกระทบต่อการใช้น้ำเพื่อการนันทนาการ และเพิ่มต้นทุนในการบำบัดน้ำดื่ม ดังนั้นตะกอนแขวนลอยถือเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่การเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำอย่างรุนแรงในหลายพื้นที่ทั่วโลกซึ่งเชื่อมโยงกับปัญหาทางนิเวศวิทยาและเศรษฐกิจ (Sahoo & Anandhi, 2023; Bilotta & Brazier, 2008) อีกทั้งยังอาจเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่สัมพันธ์กับสุขภาพของมนุษย์ (U.S. Geological Survey, 2018)

แม่น้ำกกเป็นแม่น้ำสายสำคัญในจังหวัดเชียงรายและเป็นหนึ่งใน 17 ลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำโขงเหนือ (Chiang Mai University, 2023) โดยมีต้นกำเนิดจากรัฐฉาน ประเทศเมียนมา ไหลเข้าสู่ประเทศไทยที่อำเภอแม่สาย (จังหวัดเชียงใหม่), อำเภอเมืองเชียงราย, อำเภอเวียงชัย, อำเภอเวียงเชียงรุ้ง, อำเภอแม่จัน, อำเภอดอยหลวง และอำเภอเชียงแสน ก่อนไหลลงสู่แม่น้ำโขงต่อไป ดังนั้นจึงทำให้แม่น้ำกกเป็นแหล่งน้ำสำคัญที่หล่อเลี้ยงชีวิตและเศรษฐกิจของชุมชนในพื้นที่โดยเฉพาะพื้นที่การเกษตรริมฝั่งแม่น้ำที่ครอบคลุม 19 ตำบลและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงถึงประมาณ 3,239 ล้านบาทต่อปี (Rocket Media Lab, 2025)

รายงานจาก Shan Human Rights Foundation (2024) ระบุว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2566 มีการทำเหมืองทองคำในหลายพื้นที่บริเวณริมแม่น้ำกกทางตอนใต้ของเมืองห้วยทราย ประเทศเมียนมา ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวได้ก่อให้เกิดกากสารพิษ (Toxic Residue) และตะกอนจำนวนมากที่ไหลลงสู่แม่น้ำกกโดยตรง การติดตามการเปิดหน้าดินโดย Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization) (2025) พบการเปิดหน้าดินขนาดใหญ่กว่า 40 แห่งในช่วงปี พ.ศ. 2566 – 2567 ซึ่งสอดคล้องกับการขยายตัวของกิจกรรมเหมืองแร่และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ต้นน้ำฝ่งประเทศเมียนมา ผลกระทบด้านสุขภาพจากการปนเปื้อนดังกล่าวจากงานวิจัยของนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงพบการสะสมของสารหนูในเล็บและเส้นผมของชาวบ้านร้อยละ 17.78 จากตัวอย่างทั้งหมด 90 ตัวอย่าง โดยผู้ที่ได้รับผลกระทบมีอาการอาเจียน คลื่นไส้ ผื่นคัน ผื่นแพ้ (Transborder News, 2026) ในด้านเศรษฐกิจถูกประเมินว่ามลพิษในแม่น้ำกกอาจก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจประมาณ 1.3 พันล้านบาทต่อปี โดยส่งผลกระทบต่อภาคการประมง การท่องเที่ยว และการเกษตรกรรมในพื้นที่ (The Nation, 2025) ด้วยเหตุนี้ความขุ่นของน้ำจึงไม่ได้เป็นเพียงตัวเลขทางวิทยาศาสตร์ แต่ยังเป็นตัวชี้วัดเชิงพื้นที่ที่สะท้อนถึงความเปราะบางของพื้นที่ชายแดนอันเกิดจากพลวัตของกิจกรรมต้นน้ำ

โดยทั่วไปการวัดคุณภาพน้ำด้วยวิธีภาคสนามให้ความแม่นยำสูงแต่มีข้อจำกัดด้านเวลา ด้านค่าใช้จ่าย และการเก็บข้อมูลที่จำกัดเฉพาะจุดตรวจวัด ส่งผลให้ไม่สามารถอธิบายภาพรวมในระดับพื้นที่ได้ (Jaywant & Arif, 2024) ดังนั้นเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนของพื้นโลกที่ครอบคลุมทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2562 – 2567 ข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนล-2 ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการติดตามคุณภาพน้ำเนื่องจากมีความละเอียดเชิงพื้นที่และเชิงเวลาสูง ทำให้เหมาะสมกับการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในลำน้ำและเขื่อน (Ngamile, Madonsela & Kganyago, 2025) ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนล-2 ในการประเมินค่าความขุ่นของน้ำ (Caballero et al., 2018; Pisanti et al. 2022; & Garg et al., 2020) นอกจากนี้แพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine: GEE) ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ เนื่องจากสามารถจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว (Gorelick et al., 2017) แม้ว่าการวิจัยด้านการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อติดตามความขุ่นจะมีอยู่ทั่วโลก แต่สำหรับแม่น้ำกกยังไม่ปรากฏการศึกษาในลักษณะการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนล-2 วิเคราะห์ค่าความขุ่นในแม่น้ำกกแบบอนุกรมเวลา งานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะเติมเต็มช่องว่างทางความรู้ดังกล่าว โดยใช้ชุดข้อมูลการตรวจวัดค่าความขุ่นภาคสนาม (Nephelometric Turbidity Units: NTU) ควบคู่กับข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2 แบบอนุกรมเวลาเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับค่าการสะท้อนแสงจากข้อมูลดาวเทียม และอธิบายความแปรผันเชิงช่วงเวลาของค่าความขุ่นในแม่น้ำกก

Objectives

1. เพื่อประเมินความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างค่าความขุ่นและดัชนี NDSSI จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2 แบบอนุกรมเวลา
2. เพื่อวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลาของค่าความขุ่นร่วมกับข้อมูล ภาพถ่ายจากเซนติเนล-2 แบบอนุกรมเวลา พ.ศ. 2566 – 2568 บริเวณแม่น้ำกก จังหวัดเชียงราย

Study Area

บริเวณศูนย์กลางของพื้นที่ศึกษามีตำแหน่งภูมิศาสตร์ที่ละติจูด 19.921205° เหนือ และลองจิจูด 99.817630° ตะวันออก ซึ่งตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทยในเขตจังหวัดเชียงราย ครอบคลุมส่วนหนึ่งของแม่น้ำกก ซึ่งมีต้นกำเนิดจากพื้นที่ภูเขาทางตะวันออกของภูเขาน้ำทิพย์ สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา แล้วไหลเข้าสู่ประเทศไทยทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ผ่านอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงใหม่ ต่อเนื่องเข้าสู่จังหวัดเชียงราย อีกทั้งลุ่มน้ำกกเป็นหนึ่งในลุ่มน้ำสาขาที่สำคัญของแม่น้ำโขง (สบกก) โดยไหลผ่านตัวเมืองเชียงรายและบรรจบแม่น้ำโขงที่อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงรายต่อไปดังแสดงใน Figure 1

ลักษณะทางกายภาพของบริเวณที่ศึกษาเป็นช่วงแม่น้ำที่มีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 100 เมตร ลำน้ำมีลักษณะคดเคี้ยวและเปลี่ยนทิศทางไหลตามภูมิประเทศโดยรอบ พื้นที่สองฝั่งแม่น้ำส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ชุมชนซึ่งมีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลากหลาย ตำแหน่งที่สนใจดังกล่าวถูกเลือกเป็นพื้นที่ศึกษาเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับสถานีควบคุมการผลิตน้ำประปา ของการประปาส่วนภูมิภาค สาขาเชียงราย ซึ่งเป็นจุดเก็บบันทึกข้อมูลคุณภาพน้ำและค่าความขุ่นของแม่น้ำกก ทำให้เหมาะสมต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำและความขุ่นของแม่น้ำทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา

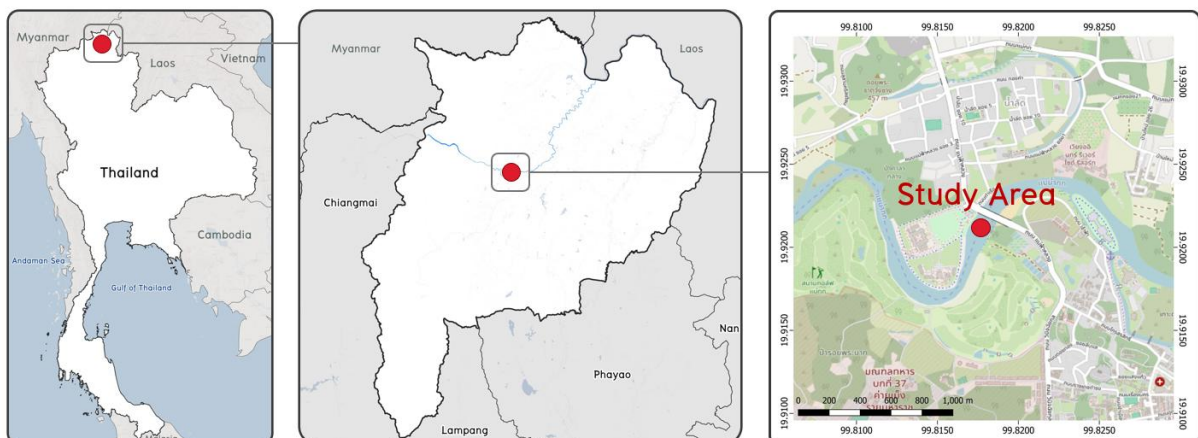


Figure 1 Map showing the study area in the Kok River at latitude 19.918564° N and longitude 99.821838° E

Methodology

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นภาคสนามกับดัชนี Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI) ที่คำนวณจากภาพดาวเทียมเซนติเนล-2 และวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลาของค่าความขุ่นในแม่น้ำกก ในส่วนนี้จะครอบคลุมตั้งแต่ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา การคำนวณดัชนี การสกัดค่าการสะท้อนแสง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ การวิเคราะห์ความผันแปรเชิงช่วงเวลา และการระบุค่าผิดปกติ ดังแสดงรายละเอียดใน Figure 2

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ค่าความขุ่นภาคสนาม

การตรวจวัดค่าความขุ่นภาคสนามในครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนข้อมูลจากรายงานผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำแหล่งน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค สาขาเชียงราย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ณ สถานีผลิตน้ำประปา โรงกรองน้ำวังคำ (19.918564° เหนือ และลองจิจูด 99.821838° ตะวันออก) ครอบคลุมช่วงเวลาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 – 31 มีนาคม พ.ศ. 2568 โดยบันทึกข้อมูลวันละ 3 ครั้ง (08:00, 16:00 และ 22:00 น.) พารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่บันทึกประกอบไปด้วย ค่า pH, สี, กลิ่น, แอมโมเนีย, คลอไรด์ และค่าความขุ่นในหน่วยวัด NTU โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติในงานวิจัยนี้ใช้ค่า NTU เป็นตัวแปรเปรียบเทียบกับค่าดัชนี NDSSI ที่คำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้ค่าจริงจากการตรวจวัด แม้ว่าการตรวจวัดจะดำเนินการที่สถานีผลิตน้ำประปา แต่ข้อมูลดังกล่าวยังสามารถใช้เป็นตัวแทนของค่าความขุ่นในแม่น้ำกกได้ เนื่องจากน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาถูกสูบน้ำจากแม่น้ำกกโดยตรงและไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนการตรวจวัด ดังนั้นค่าความขุ่นที่บันทึกได้จากภาคสนามจึงสะท้อนสภาพของน้ำดิบในแม่น้ำกก ช่วงเวลานั้น ๆ และสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ร่วมกับค่าการสะท้อนแสงจากข้อมูลดาวเทียมเซนติเนล-2 ได้

ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2

ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือผลิตภัณฑ์ Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (SR) (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) ให้บริการบนแพลตฟอร์ม GEE ซึ่งเป็นข้อมูลที่ผ่านการแก้ไขบรรยากาศด้วยอัลกอริทึม Sen2Cor เพื่อปรับค่าการสะท้อนแสงให้อยู่ในระดับพื้นผิว (Surface Reflectance) ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการสืบค้นและเตรียมข้อมูลโดยดำเนินการตามขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย (1) Spatial subsetting เพื่อกำหนดขอบเขตพื้นที่เฉพาะบริเวณพื้นที่ศึกษา, (2) Temporal Filtering จำกัดช่วงเวลาการสืบค้นให้ครอบคลุมระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2568 เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม, (3) Cloud Filtering กำหนดให้คัดเลือกเฉพาะภาพที่มีเมฆปกคลุมน้อยกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพเพียงพอต่อการวิเคราะห์, (4) Cloud Masking ดำเนินการคัดจุดภาพที่ถูกเมฆหรือเมฆเซอร์สปกคลุมไม่นำเข้าสู่กระบวนการคำนวณโดยใช้ QA60 เป็นตัวกรองคุณภาพของภาพเพื่อคัดเลือกเฉพาะจุดภาพที่ปราศจากเมฆในบริเวณพื้นที่ศึกษา และ (5) Reflectance Scaling โดยดำเนินการหารค่าการสะท้อนแสงด้วย 10,000 เพื่อปรับให้อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน 0 – 1

การคำนวณดัชนี และการสกัดค่าการสะท้อนแสง

ดัชนี NDSSI ถูกพัฒนาโดย Hossain et al. (2010) เพื่อใช้ประเมินความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำ โดยอาศัยค่าการสะท้อนแสงจากช่วงคลื่นสีน้ำเงิน ($0.450\text{--}0.515\text{ }\mu\text{m}$) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ($0.750\text{--}0.900\text{ }\mu\text{m}$) ของดาวเทียม Landsat 7 ETM+ สำหรับการศึกษานี้ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนล-2 ซึ่งแม้จะมีความแตกต่างของช่วงความยาวคลื่น แต่มีคุณสมบัติใกล้เคียงและสามารถใช้ทดแทนช่วงคลื่นของ Landsat 7 ETM+ เพื่อการตรวจจับตะกอนแขวนลอยในน้ำได้อย่างเหมาะสม โดยใช้ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน ($0.496\text{ }\mu\text{m}$ สำหรับเซนติเนล-2A และ $0.492\text{ }\mu\text{m}$ สำหรับ เซนติเนล-2B) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ($0.835\text{ }\mu\text{m}$ สำหรับ เซนติเนล-2A และ $0.833\text{ }\mu\text{m}$ สำหรับ เซนติเนล-2B) แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Kavan et al., 2022; Sankaran et al., 2023) และใช้สมการเดียวกับที่ Hossain et al. (2010) ได้กำหนดไว้ ดังแสดงใน Equation 1

$$NDSSI = \frac{Blue - NIR}{Blue + NIR} \quad (\text{Equation 1})$$

โดยที่ *Blue* หมายถึง ค่าการสะท้อนแสงจากช่วงคลื่นสีน้ำเงิน และ *NIR* หมายถึง ค่าการสะท้อนแสงจากช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ค่าของ NDSSI จะอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 โดยค่าที่ใกล้ +1 แสดงถึงน้ำใสและมีความเข้มข้นของตะกอนต่ำ ในทางตรงกันข้ามค่าที่ใกล้ -1 แสดงถึงสภาวะน้ำขุ่นและมีความเข้มข้นของตะกอนสูง

นอกจากนี้ การเลือกใช้ดัชนี NDSSI เป็นดัชนีหลักในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nontapon et al. (2025) ที่ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของดัชนีหลายประเภท ได้แก่ NDSSI, Normalized Suspended Material Index (NSMI) และ Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) สำหรับการประมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (SSC) ในแม่น้ำโขง โดยผลการศึกษาพบว่าดัชนี NDSSI ให้ค่าความสัมพันธ์กับข้อมูลภาคสนามสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.723 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 20.20 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้แม่น้ำกักเป็นลำน้ำสาขาที่ไหลลงสู่แม่น้ำโขง ซึ่งมีลักษณะการไหลตามฤดูกาลที่ได้รับอิทธิพลจากมรสุมคล้ายคลึงกัน อีกทั้งพื้นที่ต้นน้ำโดยรอบประกอบด้วยการใช้ประโยชน์ที่ดินด้านเกษตรกรรม พื้นที่ชุมชน และพื้นที่ป่า ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในกลุ่มน้ำตอนบนของแม่น้ำโขง ส่งผลให้กระบวนการพัดพาตะกอนแขวนลอยและความแปรผันของความขุ่นของน้ำมีลักษณะใกล้เคียงกันจึงทำให้การประยุกต์ใช้ดัชนี NDSSI มีความเหมาะสมสำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ศึกษา

สำหรับการสกัดค่าการสะท้อนแสงเพื่อวิเคราะห์ความขุ่นของน้ำในแม่น้ำกัก เริ่มจากการสกัดค่าดัชนี NDSSI ที่คำนวณไว้ในส่วนก่อนหน้า โดยกำหนดจุดสนใจที่พิกัดละติจูด 19.921205° เหนือ และลองจิจูด 99.817630° ตะวันออก ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณโรงกรองน้ำวังคำ ทั้งนี้ การเลือกใช้ข้อมูลจากตำแหน่งดังกล่าวเพียงหนึ่งจุดภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ลดความเสี่ยงจากการปะปนของสัญญาณสะท้อนแสงที่ไม่ต้องการ เช่น พืชพรรณริมตลิ่ง สันดอนทราย สิ่งปลูกสร้างริมแม่น้ำ หรือผลกระทบจากเมฆ และเงาของเมฆ ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าการสะท้อนแสงของแม่น้ำกักได้ โดยดำเนินการบนแพลตฟอร์ม GEE ด้วยฟังก์ชัน `reduceRegions` เพื่อสกัดค่าดัชนี NDSSI ของแต่ละภาพที่ผ่านเงื่อนไขการสืบค้น ผลลัพธ์ที่ได้คือข้อมูลแบบอนุกรมเวลาของ NDSSI ซึ่งสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำและถูกใช้เชื่อมโยงกับค่าความขุ่นภาคสนามในการวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลาในขั้นตอนถัดไป

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Parametric) และข้อมูลที่ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Non-Parametric) เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ทั้งความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและความสัมพันธ์เชิงอันดับ โดยวิธีการทางสถิติที่นำมาใช้ในการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับความสัมพันธ์เชิงเส้นประยุกต์ใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient : r) ซึ่งพัฒนาจากสูตร Coefficient Of Correlation ของ Pearson (1895) ใช้เพื่อประเมินระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและคำนวณสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) เพื่อบ่งชี้สัดส่วนของความแปรปรวนในค่าความขุ่นที่อธิบายได้โดย NDSSI และสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความแข็งแกร่งและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Zhou et al., 2023) ดังแสดงใน Equation 2

$$r = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{[n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2][n(\Sigma y^2) - (\Sigma y)^2]}} \quad (\text{Equation 2})$$

โดยที่ r หมายถึง ตัวเลขที่แสดงขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง, n หมายถึง จำนวนชุดข้อมูล (x, y) ที่นำมาวิเคราะห์, Σx หมายถึง ผลรวมของค่า x , Σy หมายถึง ผลรวมของค่า y , Σxy หมายถึง ผลรวมของการคูณ x และ y , Σx^2 หมายถึง ผลรวมของค่า x ยกกำลังสอง, Σy^2 หมายถึง ผลรวมของค่า y ยกกำลังสอง

นอกจากนี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) ที่พัฒนาโดย Draper&Smith (1998) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร ดังแสดงใน Equation 3

$$Y = b_0 + b_1x \quad (\text{Equation 3})$$

โดยที่ Y หมายถึง ค่าที่คาดการณ์ ของตัวแปร Y ที่จะได้เมื่อทราบค่า x , x หมายถึง ตัวแปรอิสระใช้ในการอธิบายหรือทำนายการเปลี่ยนแปลงของ Y , b_0 หมายถึง ค่าคงที่ หรือ จุดตัดแกน Y เป็นค่าที่คาดการณ์ของ Y เมื่อ x มีค่าเท่ากับศูนย์ Y , b_0 หมายถึง สมประสิทธิ์การถดถอย หรือ ความชัน

สำหรับการตรวจสอบความสัมพันธ์ที่ไม่จำเป็นต้องเป็นเชิงเส้นการศึกษานี้ใช้ สหสัมพันธ์แบบอันดับสเปียร์แมน (Spearman's Rank Correlation) ดังแสดงใน Equation 4 (Spearman, 1904) และสหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์ (Kendall's Tau) เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ในกรณีที่ข้อมูลไม่เป็นปกติหรือมีค่าซ้ำ ดังแสดงใน Equation 5 (Kendall, 1938)

$$r_s = 1 - \frac{6\Sigma d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (\text{Equation 4})$$

โดยที่ r_s คือสหสัมพันธ์แบบอันดับสเปียร์แมน n หมายถึง จำนวนคู่ของการสังเกต d_i หมายถึง ผลต่างระหว่างอันดับ ของตัวแปรทั้งสองคู่ที่ i

$$T = 1 - \frac{(C-D)}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (\text{Equation 5})$$

โดยที่ T หมายถึง สหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์, n หมายถึง จำนวนคู่ของการสังเกต C หมายถึง จำนวน คู่ที่สอดคล้องกัน (อันดับของทั้งสองตัวแปรมีทิศทางไปทางเดียวกัน) D หมายถึง จำนวน คู่ที่ไม่สอดคล้องกัน (อันดับของทั้งสองตัวแปรมีทิศทางตรงกันข้าม)

การเลือกใช้วิธีการทางสถิติข้างต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุม ทั้งในกรณีที่ข้อมูลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน (สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย) และในกรณีที่ข้อมูลมีความซับซ้อนหรือไม่เป็นไปตามการแจกแจงปกติ (สหสัมพันธ์แบบอันดับสเปียร์แมน และสหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์) วิธีการทางสถิติดังกล่าวรวมกันจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลค่าความชุกภาคสนามกับดัชนี NDSSI ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

การวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลา

เพื่อตรวจสอบพลวัตของค่าความชุกในแม่น้ำกทึงจากข้อมูลค่าความชุกภาคสนามและค่าดัชนี NDSSI ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาวโดยใช้กราฟอนุกรมเวลา (Time-Series Graph) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองชุด และตรวจจับช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของค่าความชุกในแม่น้ำกทึง โดยส่งออกข้อมูลกราฟอนุกรมเวลาจากแพลตฟอร์ม GEE ในรูปแบบไฟล์ CSV สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ภายนอกแพลตฟอร์ม จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวจัดทำกราฟอนุกรมเวลาเพื่อแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ NDSSI และค่าความชุกภาคสนาม โดยอธิบายผ่านกราฟความหนาแน่น (Density Plot) และกราฟไวโอลิน (Violin Plot) เพื่อแสดงรูปแบบการกระจายและความหนาแน่นของข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้เห็นความแตกต่างของข้อมูลชัดเจนยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีประโยชน์ต่อการทำความเข้าใจลักษณะการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของค่าความชุก

การระบุค่าผิดปกติ

เพื่อทำการตรวจสอบความผิดปกติของค่าความชุก ผู้วิจัยได้ใช้กราฟแสดงค่าความผิดปกติในการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา เพื่อระบุค่าที่มีแนวโน้มสูงหรือต่ำผิดปกติเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยระยะยาวของชุดข้อมูล โดยใช้เกณฑ์ทางสถิติเป็นพื้นฐานในการประเมินความผิดปกติ ทั้งนี้ได้คำนวณค่าเฉลี่ย (Average) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่าความชุกทั้ง 2 ชุดข้อมูล

สำหรับข้อมูลค่าความชุกภาคสนามกำหนดให้ค่าใด ๆ ที่มีค่ามากกว่าผลรวมของค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะถูกจัดเป็นค่าผิดปกติในเชิงบวก (Positive Anomalies) เนื่องจากค่าความชุกในหน่วย NTU มีค่าเป็นบวกเสมอ ในขณะที่ข้อมูลค่าดัชนี NDSSI การระบุค่าผิดปกติจะพิจารณาจากค่าใด ๆ ที่ต่ำกว่าผลต่างของค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะถือเป็นค่าผิดปกติในเชิงลบ (Negative Anomalies) ทั้งนี้เนื่องจากค่าดัชนี NDSSI มีค่าผกผันกับค่า NTU การที่ค่า NDSSI ลดต่ำลงจึงสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความชุกอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ

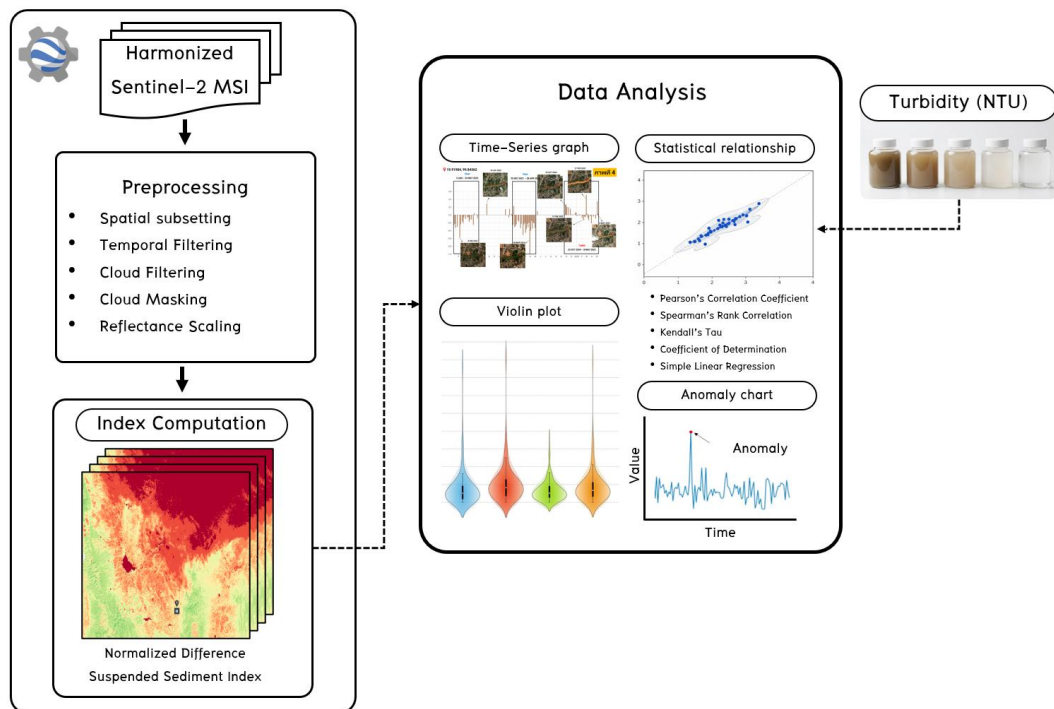


Figure 2 Conceptual framework and methodological workflow of the study

Results

หลังจากดำเนินการสืบค้น เตรียมข้อมูล และประมวลผลตามระเบียบวิธีที่กำหนดไว้แล้วเสร็จ ส่วนนี้จึงนำเสนอผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเชิงช่วงเวลาตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี NDSSI และค่าความขุ่นภาคสนามโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการสืบค้นภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2

จากกระบวนการสืบค้นและประมวลผลภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2 ตามขั้นตอนและเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยสามารถรวบรวมและคัดเลือกภาพถ่ายที่ผ่านเงื่อนไขได้จำนวนทั้งสิ้น 80 ภาพ ซึ่งครอบคลุมระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2568 อย่างไรก็ตามภายหลังจากการตรวจสอบพบว่ามีจำนวน 19 ภาพ ไม่เหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์และอาจส่งผลกระทบต่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เช่น จุดภาพบริเวณพื้นที่ศึกษาได้รับผลกระทบจากเงาเมฆ หรือจุดภาพได้รับการบดบังจากเมฆ ดังแสดงใน Figure 3 (a) และ Figure 3 (b) ตามลำดับ ทั้งนี้ หากมีการสกัดค่าข้อมูลจากหลายจุดภาพในภาพจะส่งผลให้เกิดการปะปนกันของข้อมูลและมีผลกระทบให้ค่าการสะท้อนแสงของน้ำมีความแปรปรวนสูง ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงดำเนินการคัดภาพดังกล่าวออกจากกระบวนการวิเคราะห์ส่งผลให้มีภาพที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 61 ภาพโดยแสดงตัวอย่างภาพที่สามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์ได้ในภาพใน Figure 3 (c)

เมื่อพิจารณาการกระจายเชิงเวลาของภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2 พบว่าจำนวนภาพที่ใช้ได้มีความแปรผันตลอดทั้งปี โดยมีภาพจำนวนมากในช่วงฤดูแล้งและลดลงหรือไม่พบเลยในช่วงฤดูฝนของทุกปี ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนของภาคเหนือประเทศไทยที่มีเมฆปกคลุมหนาแน่นในฤดูฝน ส่งผลให้ไม่สามารถสืบค้นภาพตลอดเมฆตามเกณฑ์ที่กำหนดได้

เมื่อพิจารณารายเดือนพบว่าเดือนกุมภาพันธ์ทั้งในปี พ.ศ. 2567 และ พ.ศ. 2568 มีจำนวนภาพมากที่สุดเท่ากับ 6 ภาพต่อเดือน ขณะที่เดือนสิงหาคมและกันยายนของทุกปีไม่ปรากฏภาพที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพสำหรับการวิเคราะห์ โดยภาพส่วนใหญ่จะพบในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤษภาคมของแต่ละปี และลดลงอย่างมากในช่วงกลางปีระหว่างเดือนมิถุนายนถึงกันยายน ซึ่งเป็นช่วงที่มีเมฆปกคลุมพื้นที่ศึกษาเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด สำหรับช่วงปลายปีระหว่างเดือนตุลาคมถึงธันวาคม พบว่าจำนวนภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยเฉพาะเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมที่มีภาพเฉลี่ยจำนวน 2-3 ภาพต่อเดือน เมื่อพิจารณาในภาพรวมรายปีพบว่าจำนวนภาพที่ผ่านเงื่อนไขตามเกณฑ์ที่กำหนดมีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยแต่ละปีจะมีช่วงเวลาที่สามารถสืบค้นภาพได้ในฤดูแล้งและลดลงเป็นลำดับในฤดูฝน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของการสังเกตการณ์ด้วยข้อมูลดาวเทียมแบบออปติคัลในพื้นที่เขตร้อนที่มีสภาพอากาศแปรปรวนและมีเมฆปกคลุมเป็นเวลานาน รายละเอียดการกระจายของภาพถ่ายในแต่ละเดือนและวันที่บันทึกภาพดังแสดงใน Table 1

Table 1 Temporal Distribution of Sentinel-2 Satellite Images

Year	Month	Number of Scenes	Image Dates
2023	January	4	4, 9, 14, 24
	February	3	3, 8, 13
	March	1	15
	April	2	19, 29
	May	2	4, 19
	June	–	–
	July	–	–
	August	–	–
	September	–	–
	October	1	26
	November	3	5, 25, 30
	December	3	15, 20, 30
2024	January	3	4, 9, 19
	February	6	3, 8, 13, 18, 23, 28
	March	5	4, 9, 14, 24, 29
	April	3	13, 23, 28
	May	1	3
	June	–	–
	July	–	–
	August	–	–
	September	–	–
	October	3	15, 25, 30

Year	Month	Number of Scenes	Image Dates
2025	November	3	4, 19, 24
	December	3	4, 24, 29
	January	5	3, 13, 18, 23, 28
	February	5	2, 7, 12, 17, 22, 27
	March	4	4, 14, 24, 29

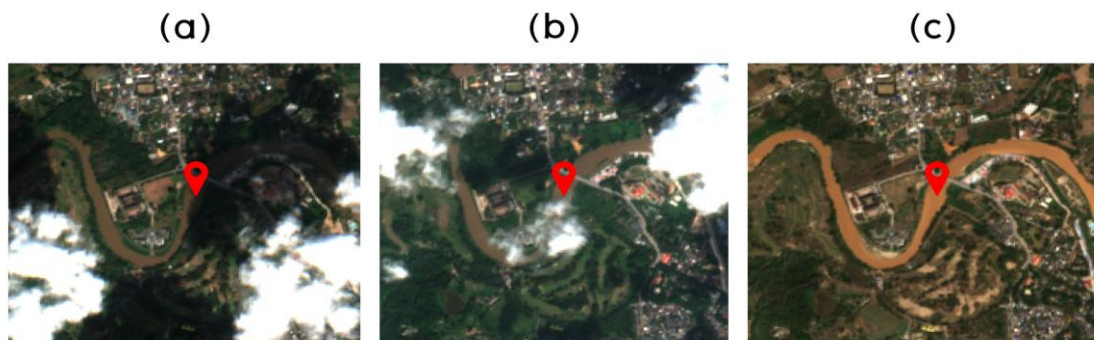


Figure 3 Results of Sentinel-2 Images Acquisition

ผลลัพธ์การคำนวณดัชนี NDSSI และการสกัดค่าการสะท้อนแสง

ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าดัชนี NDSSI จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนล-2 ในสองช่วงเวลา ได้แก่ วันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ดังแสดงใน Figure 4 (a) และวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ดังแสดงใน Figure 4 (b) โดยแสดงภาพแบบสีผสมจริง (True Color Composite) ควบคู่กับภาพผลลัพธ์ของดัชนี NDSSI

เมื่อเปรียบเทียบภาพวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2566 พบว่าสีของน้ำในภาพแบบสีผสมจริงมีลักษณะเป็นสีเขียวหม่น และค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดแนวลำน้ำในบริเวณพื้นที่ศึกษาซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ดัชนี NDSSI ณ ตำแหน่งที่สนใจให้ค่าเป็นบวกโดยมีค่าเท่ากับ 0.396 แสดงถึงสถานะน้ำใสเนื่องจากมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในระดับต่ำ มีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดเท่ากับ 0.037 และ 0.016 ตามลำดับ

ในทางตรงกันข้ามภาพวันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2568 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำในภาพแบบสีผสมจริงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มต่อเนื่องและมีความเข้มของสีที่แตกต่างกัน ซึ่งบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอย ผลการคำนวณดัชนี NDSSI ณ ตำแหน่งที่สนใจให้ค่าเป็นลบโดยมีค่าเท่ากับ -0.522 สอดคล้องกับการสะท้อนแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดมีค่าเท่ากับ 0.075 และ 0.239 ตามลำดับ

จากนั้นดัชนี NDSSI ทุกภาพถูกสกัดโดยใช้ฟังก์ชัน reduceRegions ณ ตำแหน่งที่สนใจเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าระหว่างช่วงเวลาได้อย่างสอดคล้องกัน

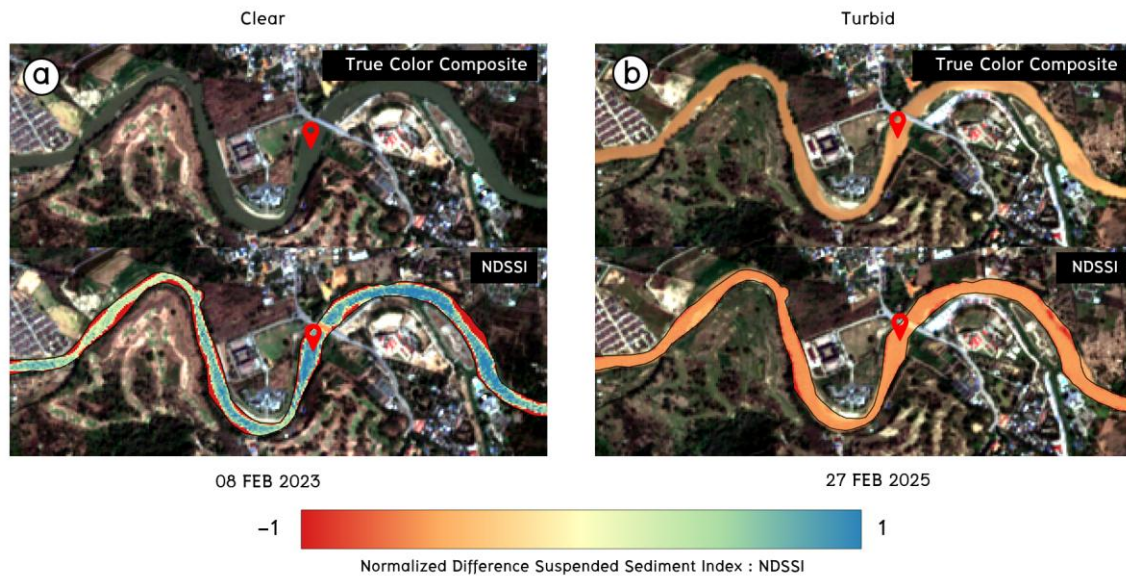


Figure 4 NDSSI Analysis Results for the Kok River

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นภาคสนาม และค่าดัชนี NDSSI ที่คำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนล-2 จำนวน 61 ชุดข้อมูล เพื่อประเมินระดับความสัมพันธ์และรูปแบบความเชื่อมโยงระหว่างค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม (NDSSI) กับค่าความขุ่นของน้ำจากการสำรวจภาคสนาม (NTU) ได้แสดงไว้ใน Table 2

ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าค่าความขุ่นภาคสนามมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 148.71 NTU มัธยฐาน 67.90 NTU ฐานนิยม 30.90 NTU ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 452.33 NTU โดยมีค่าต่ำสุด 20.50 NTU และค่าสูงสุด 3,560.00 NTU ซึ่งสะท้อนถึงการกระจายตัวของข้อมูลในระดับกว้างและความแปรปรวนสูง ในขณะที่ค่าดัชนี NDSSI มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.10 มัธยฐาน 0.09 ฐานนิยม -0.21 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.23 โดยมีค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดเท่ากับ -0.52 และ 1.00 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงค่าการสะท้อนแสงจากผิวน้ำที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นภาคสนามและดัชนี NDSSI พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางลบโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเท่ากับ -0.46 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับปานกลาง

สำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ได้จากข้อมูลคือ $NDSSI = -0.0002 \times NTU + 0.1381$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.21 ดังแสดงใน Figure 5 (a) แสดงให้เห็นว่าค่าความขุ่นภาคสนามสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า NDSSI ได้ค่อนข้างต่ำประมาณร้อยละ 21 ส่วนที่เหลือร้อยละ 79 อาจเกิดจากปัจจัยอื่น เช่น ความสว่างของจุดภาพ การบดบังที่เกิดจากเงาของเมฆ หรืออื่น ๆ นอกจากนี้พื้นที่เงาสีเข้มซึ่งแสดงช่วงความเชื่อมั่นของเส้นถดถอยมีการขยายตัวกว้างขึ้นในช่วงค่าความขุ่นสูงสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของการประมาณค่าในช่วงดังกล่าว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงอันดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน เท่ากับ -0.84 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงอันดับที่มีทิศทางตรงกันข้ามในระดับสูงมากอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนว่าลำดับของค่าความขุ่น และค่าดัชนี NDSSI มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้ามกัน แม้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นอาจไม่สมบูรณ์ที่เกิดจาก

การกระจายของข้อมูลบางช่วง เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์มีค่าเท่ากับ -0.66 แสดงความสอดคล้องของลำดับข้อมูลระหว่างสองตัวแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า แม้ NDSSI จะอธิบายค่าความขุ่นได้จำกัดในเชิงเส้นตรงแต่ยังคงสามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงเชิงลำดับได้

อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบรายละเอียดของข้อมูลพบว่า มีค่าหนึ่งที่แตกต่างจากกลุ่มข้อมูลอื่นอย่างมีนัยสำคัญคือค่าความขุ่นภาคสนามที่สูงถึง 3,560 NTU เป็นค่าความขุ่นของวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ซึ่งสูงกว่าค่ามัธยฐานของชุดข้อมูลหลายเท่า ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนามไม่ใช่ค่าผิดพลาดทางเทคนิคแต่มีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากเหตุการณ์เฉพาะช่วง เช่น การไหลบ่าของตะกอนจากพื้นที่ต้นน้ำในช่วงฝนตกหนักหรือการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยาเฉียบพลัน จากการตรวจสอบข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ (Office of the National Water Resources, n.d.) พบว่าเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 มีฝนตกในพื้นที่ต้นน้ำหลายสถานี เช่น สถานีแม่อาว (CHM003) ปริมาณน้ำฝน 23.40 มม. สถานีบ้านแม่ฮ้าง (STN0141) ปริมาณน้ำฝน 10.50 มม. และสถานี อบต.เวียง (FANG) ปริมาณน้ำฝน 15.60 มม. ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดการพัดพาตะกอนจำนวนมากลงสู่ลำน้ำและทำให้ระดับความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าปกติหลายเท่าตัว เหตุการณ์ในลักษณะนี้สะท้อนให้เห็นถึงพลวัตของระบบแม่น้ำที่มีความแปรปรวนสูงในระยะสั้น อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเนื่องจากทำให้แนวโน้มข้อมูลเบี่ยงเบนออกจากสมการถดถอยอีกทั้งส่งผลให้ค่าสหสัมพันธ์เพียร์สันและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่รวมข้อมูลดังกล่าวไว้ในการคำนวณ

เพื่อพิจารณาผลกระทบของค่าผิดปกติ (Outlier) ต่อรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ผู้วิจัยจึงได้ตัดค่าความขุ่นที่มีค่าสูงผิดปกติจำนวน 1 ค่า คือ 3,560 NTU ออกจากชุดข้อมูลก่อนดำเนินการวิเคราะห์ ผลลัพธ์พบว่าข้อมูลที่เหลือ 60 ค่า มีค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นภาคสนาม เท่ากับ 91.85 NTU มัธยฐาน 66.95 NTU ฐานนิยม 30.90 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 86.90 NTU โดยมีค่าต่ำสุด 20.50 NTU และค่าสูงสุดเท่ากับ 564.00 NTU ซึ่งทำให้การกระจายของข้อมูลมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและเหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงสถิติ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงการกระจายตัวของข้อมูลที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญและทำให้ค่าความสัมพันธ์เชิงสถิติเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเพิ่มขึ้นเป็น -0.65 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับปานกลางค่อนข้างสูงในทิศทางตรงกันข้าม สำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ได้จากข้อมูลคือ $NDSSI = -0.0016 \times NTU + 0.2632$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.42 ดังแสดงใน Figure 5 (b) หมายความว่าดัชนี NDSSI สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความขุ่นภาคสนามได้ประมาณร้อยละ 42 การกระจายตัวของข้อมูลมีความสอดคล้องกับแนวโน้มของเส้นถดถอยมากขึ้นซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มีเสถียรภาพมากขึ้นหลังจากการปรับข้อมูล นอกจากนี้พื้นที่เงาสัมมีความแคบลงเมื่อเทียบกับรูปที่ Figure 5 (a) ในขณะที่เดียวกันค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมนและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์ มีค่าเท่ากับ -0.83 และ -0.64 ซึ่งยังคงอยู่ในระดับสูงและมีทิศทางเดียวกันกับกรณีก่อนตัดค่าผิดปกติออกจากชุดข้อมูล แสดงถึงความสม่ำเสมอของลำดับข้อมูลและความสัมพันธ์เชิงอันดับที่มั่นคงระหว่างทั้งสองตัวแปร

ผลการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นอย่างว่าการปรากฏของค่าความขุ่นที่มีการเบี่ยงเบนออกจากกลุ่มข้อมูลส่วนใหญ่ในชุดข้อมูล จะส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นลดลงจากค่าที่ควรสะท้อนถึงความสัมพันธ์ที่แท้จริง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบอันดับยังคงสามารถบ่งชี้ถึงความแข็งแกร่งของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างสม่ำเสมอในทั้งสองกรณี อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังคงมีความสำคัญเชิงสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสะท้อนถึงเหตุการณ์ความขุ่นสูงเฉียบพลันซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ธรรมชาติหรือกิจกรรมของมนุษย์ จึงควรนำไป

พิจารณาเพิ่มเติมในเชิงพื้นที่และช่วงเวลาเพื่อสนับสนุนการติดตามแนวโน้มความขุ่นของแม่น้ำในระยะยาวด้วยข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนล-2 แบบอนุกรมเวลาต่อไป

Table 2 Results of the Statistical Correlation Analysis

Descriptives	Including Outlier (N = 61)	Excluding Outlier (N = 60)
Nephelometric Turbidity Units : NTU		
Average	148.71	91.85
Median	67.90	66.95
Mode	30.90	30.90
Standard deviation	452.33	86.90
Min – Max	20.50 – 3,560.00	20.50 – 564.00
Normalized Difference Suspended Sediment Index : NDSSI		
Average	0.10	
Median	0.09	
Mode	(-0.21)	
Standard deviation	0.23	
Min – Max	(-0.52) – 1	
Correlation between NTU and NDSSI		
Pearson's Correlation	(-0.46)*	(-0.65)*
Spearman's Correlation	(-0.84)*	(-0.83)*
Kendall's	(-0.66)*	(-0.64)*
Coefficient of Determination (R^2)	0.21*	0.42*

Note : * $p < 0.001$

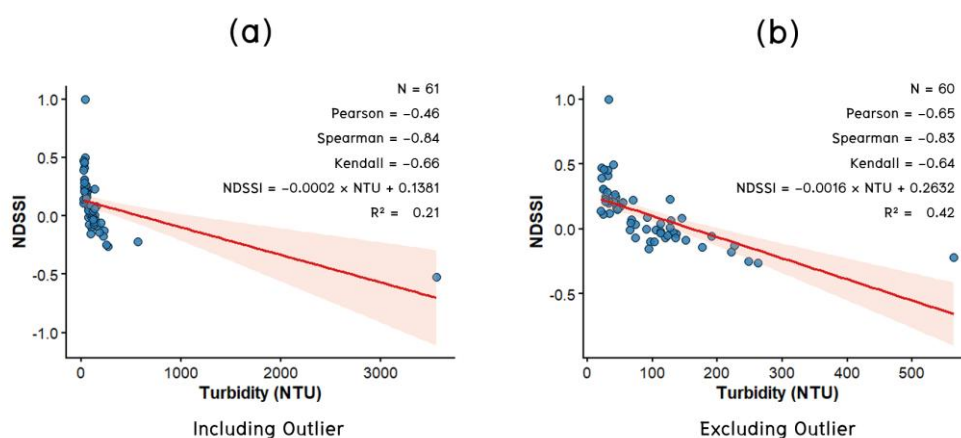


Figure 5 Results of the Linear Relationship Analysis between NDSSI and Turbidity

การวิเคราะห์ความแปรผันเชิงช่วงเวลา

การกระจายเชิงเวลา (Time-Series Distribution)

ข้อมูลค่าความขุ่นของน้ำที่บันทึกได้จากการสำรวจภาคสนามระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2566 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความขุ่นตามช่วงเวลาอย่างเห็นได้ชัด โดยในช่วงต้นปี (มกราคม ถึงมีนาคม) ของทุกปี ค่าความขุ่นอยู่ในระดับต่ำมีค่าประมาณ 100 NTU ซึ่งแสดงลักษณะของสภาพน้ำใสในฤดูแล้ง หลังจากนั้นค่าความขุ่นจะเพิ่มขึ้นในช่วงปลายเดือนเมษายนถึงเดือนสิงหาคม สำหรับปี พ.ศ. 2566 ค่าความขุ่นเพิ่มสูงสุดถึง 1,068 NTU ในวันที่ 15 พฤษภาคม และค่าความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอีกหลายช่วงในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม โดยเฉพาะวันที่ 22 มิถุนายนและ 15 สิงหาคมที่มีค่ามากกว่า 1,200 NTU การเพิ่มขึ้นของค่าความขุ่นในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดขึ้นต่อเนื่องจากต้นฤดูฝนซึ่งอาจมีปริมาณน้ำไหลบ่าจากพื้นที่ต้นน้ำลำธารสู่แม่น้ำกกในปีถัดมา พ.ศ. 2567 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะคล้ายกับปี 2566 โดยช่วงต้นปีค่าความขุ่นต่ำกว่า 100 NTU และเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเดือนพฤษภาคมก่อนถึงค่าสูงสุด 6,150 NTU ในวันที่ 24 สิงหาคม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดตลอดช่วงเวลาที่ยกมาไว้ หลังจากนั้นค่าความขุ่นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงปลายปีสอดคล้องกับการสิ้นสุดของฤดูฝนและการลดลงของปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำ

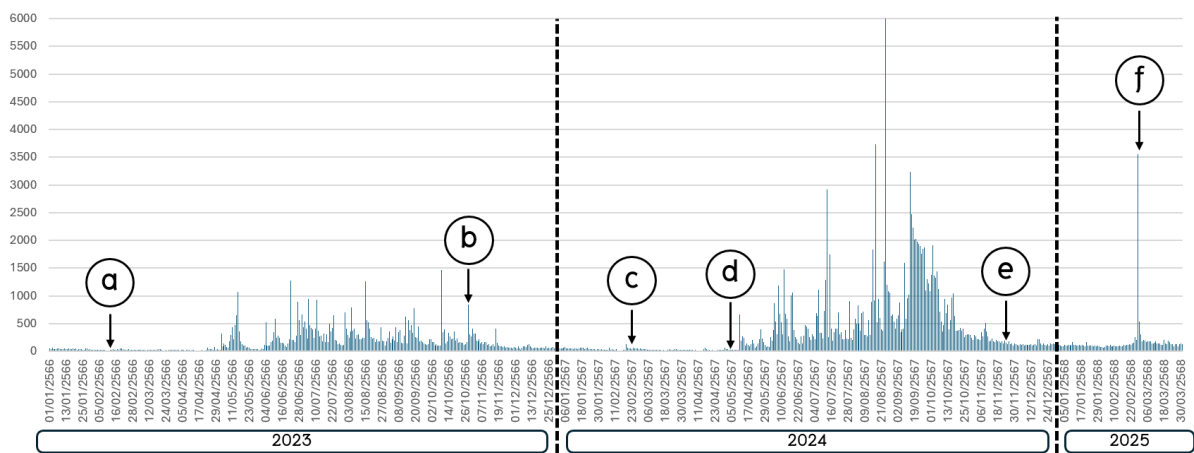


Figure 6 Temporal Distribution of Turbidity (NTU) Data

สำหรับค่าดัชนี NDSSI ที่คำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนล-2 ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2566 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 แสดงให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในน้ำซึ่งสะท้อนลักษณะของสภาพน้ำในแต่ละช่วงเวลา สำหรับช่วงเดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2566 ค่าดัชนี NDSSI เป็นบวกมีค่าอยู่ระหว่าง 0.11 – 0.41 โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.41 บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของตะกอนในระดับต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของฤดูแล้งที่ปริมาณน้ำฝนน้อยและการไหลบ่าของตะกอนจากพื้นที่ต้นน้ำไม่มาก อย่างไรก็ตามในช่วงเดือนพฤษภาคมค่าดัชนีลดต่ำลงเป็นค่าติดลบมีค่าประมาณ -0.10 ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำส่งผลให้การสะท้อนแสงลดลงในบริเวณที่ตรวจวัด ส่วนค่าดัชนีในช่วงเดือนมิถุนายน – กันยายน ไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่มีภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ผ่านเงื่อนไขการคัดกรองการปกคลุมของเมฆ จากนั้นค่าดัชนี NDSSI ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2566 (ตุลาคม – ธันวาคม) ส่วนใหญ่มีค่าติดลบต่อเนื่อง (-0.13 ถึง -0.01) สะท้อนถึงสภาพน้ำขุ่นในช่วงปลายฤดูฝนก่อนที่จะกลับมาเป็นค่าบวกอีกครั้งในเดือนธันวาคม (0.22–0.19) ซึ่งสอดคล้องกับการเริ่มฟื้นตัวของสภาพน้ำในช่วงต้นฤดูแล้ง

ในปีถัดมา พ.ศ. 2567 ค่าดัชนี NDSSI มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยช่วงต้นปี (มกราคม–มีนาคม) มีค่าดัชนี NDSSI เป็นค่าบวก (0.17–0.50) โดยเฉพาะวันที่ 29 มีนาคมที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.00 ซึ่งแสดงถึงการสะท้อนแสงจากผิวน้ำที่อยู่ในสภาวะน้ำใสและมีปริมาณตะกอนต่ำ ต่อมาในช่วงเดือนเมษายน – พฤษภาคม พบว่าค่า NDSSI ยังคงมีค่าบวกในระดับปานกลาง (0.28–0.47) และช่วงเดือนมิถุนายน – กันยายนไม่ปรากฏภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ผ่านเงื่อนไขเช่นเดียวกับปี พ.ศ. 2566 จากนั้นค่าดัชนี NDSSI มีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องจนเป็นค่าติดลบในช่วงเดือนตุลาคม–ธันวาคม (−0.26 ถึง −0.01) ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำกก

ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2568 ค่าดัชนี NDSSI เริ่มกลับมามีค่าบวกเล็กน้อย (0.00–0.09) บ่งชี้ถึงการลดลงของปริมาณตะกอนในน้ำและการกลับเข้าสู่ฤดูแล้ง อย่างไรก็ตามพบเหตุการณ์ค่าผิดปกติในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ที่มีค่า NDSSI ต่ำมากถึง −0.52 ซึ่งอาจเป็นผลจากสภาวะน้ำขุ่นเหนียวปล้นส่งผลให้ค่าดัชนีสะท้อนแสงลดลงอย่างมากในระยะสั้นก่อนที่ค่าจะกลับสู่ระดับบวกอีกครั้งในเดือนมีนาคม (0.06 – 0.23)

ค่าดัชนี NDSSI ในช่วงระยะเวลา พ.ศ. 2566 – 2568 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงฤดูกาลโดยมีค่าบวกในช่วงต้นปีซึ่งเป็นฤดูแล้งและน้ำใส ขณะที่ช่วงกลางถึงปลายปีโดยเฉพาะเดือนตุลาคมค่ามีแนวโน้มลดลงเป็นค่าติดลบ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยในช่วงฤดูฝน ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี NDSSI กับการเปลี่ยนแปลงของความขุ่นและตะกอนแขวนลอยในระบบน้ำผิวดินในช่วงเวลาที่มีข้อมูลการตรวจวัด

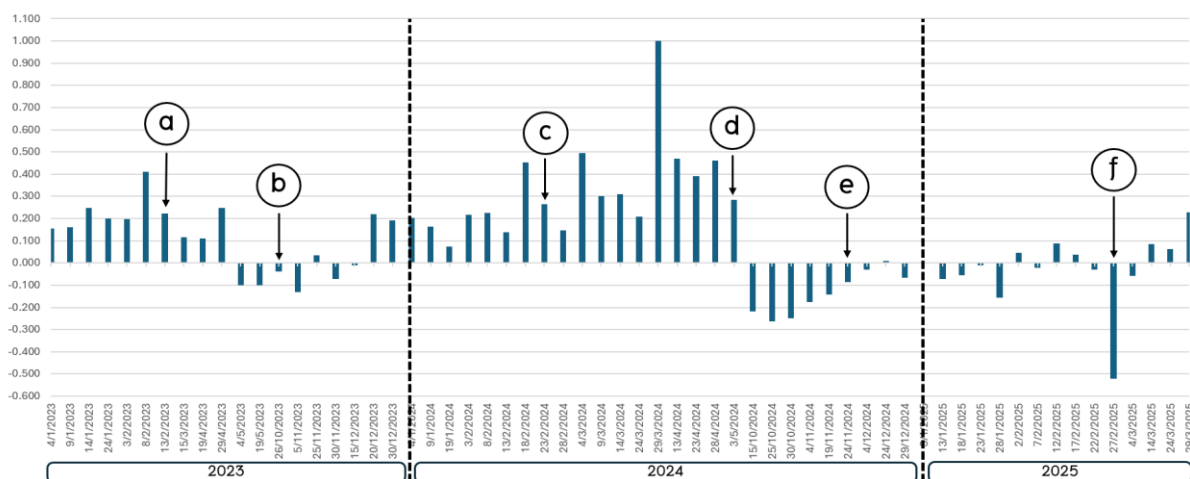


Figure 7 Temporal Distribution of NDSSI Value

จากการพิจารณาการกระจายเชิงเวลาของค่าความขุ่นในหน่วย NTU และค่าดัชนี NDSSI ควบคู่กับภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนล-2 พบว่าตำแหน่งที่ระบุด้วยตัวอักษร a – f สะท้อนลักษณะสภาพน้ำในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยตำแหน่ง a (13 กุมภาพันธ์ 2566) มีค่า NTU และค่าดัชนี NDSSI เท่ากับ 31.60 และ 0.22 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับความขุ่นต่ำถึงปานกลางและมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายดาวเทียมที่แสดงลักษณะน้ำมีสีเขียวหม่น ซึ่งบ่งชี้ว่าตะกอนแขวนลอยในน้ำมีจำนวนน้อย ขณะที่ตำแหน่ง b (26 ตุลาคม 2566) พบว่าค่า NTU เพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 847 และค่าดัชนี NDSSI มีค่าเท่ากับ −0.04 สะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำโดยสามารถสังเกตได้จากลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียม สำหรับตำแหน่ง c (23 กุมภาพันธ์ 2567) ค่า NTU และค่าดัชนี NDSSI มีค่าเท่ากับ 42.60 และ 0.27 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายที่แสดงลำน้ำมีสีเขียวเข้มขึ้นในลักษณะน้ำสีเขียวหม่น

บ่งชี้ถึงการลดลงของตะกอนแขวนลอยในน้ำ เช่นเดียวกับตำแหน่ง d (3 พฤษภาคม 2567) ซึ่งแสดงค่าทั้งสองอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่า NTU และค่าดัชนี NDSSI เท่ากับ 30.10 และ 0.29 ขณะที่ตำแหน่ง e (24 พฤศจิกายน 2567) พบว่าค่า NTU และ NDSSI เท่ากับ 151 และ -0.085 สะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำในระดับเล็กน้อยสอดคล้องกับภาพถ่ายดาวเทียมที่แสดงสภาพน้ำแสดงลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม และในตำแหน่ง f (27 กุมภาพันธ์ 2568) ปรากฏค่า NTU สูงถึง 3,560 รวมกับค่า NDSSI เท่ากับ -0.522 โดยภาพถ่ายดาวเทียมแสดงลักษณะน้ำอยู่ในสภาวะขุ่นจัด



Figure 8 Representative Sentinel-2 images corresponding to selected temporal points (a–g) in the NDSSI and turbidity (NTU) time-series.

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกราฟความหนาแน่นดังแสดงใน Figure 9 (a) แสดงให้เห็นการกระจายของค่าความขุ่นที่มีลักษณะเบ้ขวา โดยมีความหนาแน่นสูงในช่วงค่าต่ำ (ใกล้ศูนย์ถึงประมาณ 500 NTU) และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นจนเกือบเป็นเส้นราบ หลังช่วงค่ามากกว่า 2,000 NTU ซึ่งสะท้อนว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในระดับค่าต่ำถึงปานกลาง ขณะที่การเกิดเหตุการณ์ค่าขุ่นสูงเฉียบพลัน เช่น ช่วงค่ามากกว่า 4,000 – 6,000 NTU แม้เกิดไม่บ่อยแต่ส่งผลให้การกระจายโดยรวมมีลักษณะเบ้ไปทางขวาอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับ Figure 9 (b) แสดงกราฟไวโอลินที่มีผลลัพธ์คล้ายคลึงกับกราฟความหนาแน่น โดยแสดงการกระจุกตัวในช่วง 0 – 500 NTU และมีส่วนหางยาวต่อเนื่องที่ค่ามากกว่า 6,000 NTU บ่งชี้ถึงความแปรปรวนของข้อมูลสูง จุดที่มีการกระจายจำนวนมากบริเวณค่าต่ำหมายถึงความขุ่นในแม่น้ำกส่วนใหญ่มักอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ขณะที่จุดกระจายทางด้านบนสะท้อนเหตุการณ์ขุ่นสูงเฉียบพลันที่เกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ ซึ่งอาจเชื่อมโยงกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเฉพาะหน้า เช่น ปริมาณฝน การชะล้างตะกอน หรือกิจกรรมของมนุษย์ในพื้นที่ต้นน้ำ

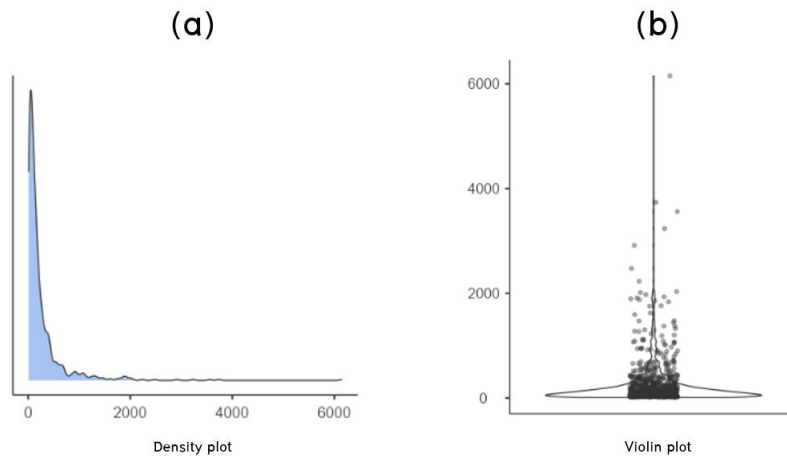


Figure 9 Density and Violin Plots of Turbidity (NTU) Data

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกราฟความหนาแน่นของข้อมูล NDSSI ดังแสดงใน Figure 10 (a) พบว่าการกระจายของค่าดัชนี NDSSI มีจุดที่มีค่าความหนาแน่นสูงอยู่ในช่วงประมาณ -0.02 และอีกจุดในช่วงประมาณ 0.15 ซึ่งสะท้อนถึงการมีอยู่ของกลุ่มข้อมูลย่อยสองช่วงที่มีลักษณะแตกต่างกัน และสำหรับความขุ่นของน้ำส่วนบริเวณค่าติดลบมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำกว่า ในขณะที่ช่วงค่าที่มากกว่า 0.5 พบว่าความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสะท้อนว่าสภาพน้ำใสเกิดขึ้นไม่บ่อยนักในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา โดยลักษณะของกราฟที่มีค่าความหนาแน่นกระจุกอยู่ทางซ้ายและค่อย ๆ ลดลงทางขวา แสดงถึงการกระจายที่มีแนวโน้มเบ้ขวาซึ่งเป็นลักษณะของค่าความขุ่นที่มีค่าปกติอยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลางและมีบางเหตุการณ์ที่เกิดค่าผิดปกติในบางช่วงเวลา สำหรับกราฟไวโอลินใน Figure 10 (b) แสดงการกระจายตัวของค่าดัชนี NDSSI โดยมีลักษณะรูปทรงที่แสดงให้เห็นการกระจุกตัวของค่าในช่วงใกล้ศูนย์ ประกอบกับจุดข้อมูลจำนวนมากถูกกระจายอยู่บริเวณค่าระหว่างประมาณ -0.40 ถึง 0.70 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดของข้อมูล สะท้อนให้เห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีค่า NDSSI อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ขณะที่ส่วนบนและส่วนล่างของกราฟแสดงการกระจายที่ยืดยาวทั้งด้านค่าบวกและค่าลบ แต่มีความหนาแน่นต่ำสะท้อนว่ามีข้อมูลที่มีค่าผิดปกติเล็กน้อย เช่น ค่าสูงเกิน 0.50 หรือค่าต่ำกว่า -0.30

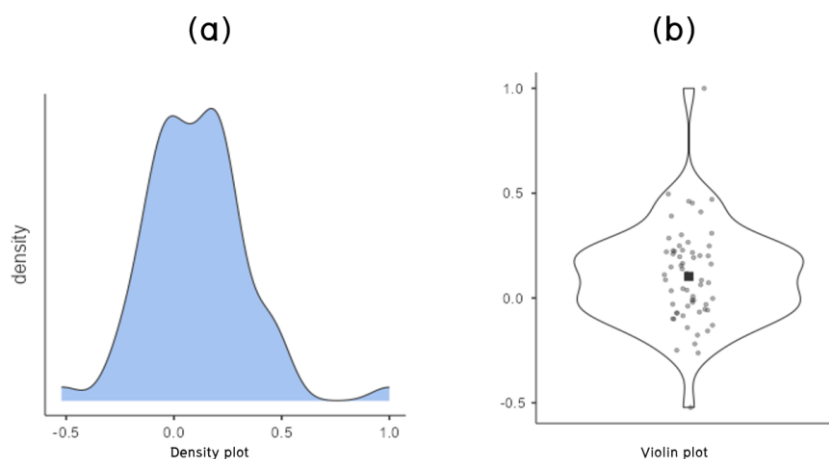


Figure 10 Density and Violin Plots of NDSSI Value

การระบุค่าผิดปกติของความขุ่น

จากกราฟแสดงค่าผิดปกติของความขุ่น (Anomaly Chart) พบว่าค่าความขุ่นเฉลี่ยของแม่น้ำกกในช่วงเวลา 1 มกราคม 2566 – 31 มีนาคม 2568 คำนวณจากข้อมูลการตรวจวัดความขุ่นทั้งหมดจำนวน 818 ค่ามีค่าเท่ากับ 263 NTU โดยที่เกณฑ์การระบุค่าผิดปกติในทิศทางบวก (Positive Anomalies) ซึ่งคำนวณจากผลรวมของค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 720 NTU เกณฑ์ดังกล่าวใช้เพื่อจำแนกช่วงเวลาที่ค่าความขุ่นสูงผิดปกติจากแนวโน้มเฉลี่ยระยะยาว ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าความขุ่นที่สูงกว่าเกณฑ์ปรากฏชัดในหลายช่วง โดยเฉพาะช่วงกลางปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2567 (ช่วงเดือนพฤษภาคม–กันยายน) ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนของประเทศไทยค่าความขุ่นในช่วงเวลาดังกล่าวมีแนวโน้มสูงเกินกว่า 700 NTU และบางเหตุการณ์มีค่าสูงเกิน 1,000 NTU สะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยอย่างเฉียบพลันในแม่น้ำกกซึ่งมักสัมพันธ์กับเหตุการณ์ฝนตกหนักหรือการไหลบ่าของตะกอนจากพื้นที่ลาดชัน

ในทางตรงกันข้าม ช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ของปีถัดไปพบค่าความขุ่นอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ค่าเฉลี่ยอย่างต่อเนื่องและไม่พบค่าเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งบ่งชี้ถึงช่วงเวลาที่มีสภาวะน้ำใสและมีการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยมากขึ้นซึ่งเป็นสภาวะปกติของฤดูแล้ง

การกระจายของค่าความขุ่นในช่วงเวลาที่ศึกษาแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงฤดูกาล (Seasonal Fluctuation) โดยช่วงฤดูฝนเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดค่าผิดปกติในทิศทางบวกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของแม่น้ำภูเขา (Mountainous River System) ที่ตอบสนองต่อปริมาณฝนและการไหลบ่าของตะกอนอย่างรวดเร็ว การระบุค่าผิดปกติในลักษณะนี้จึงมีความสำคัญต่อการติดตามคุณภาพน้ำเชิงเวลา และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์เหตุการณ์ตะกอนสูงเฉียบพลันในอนาคตดังแสดงใน Figure 11

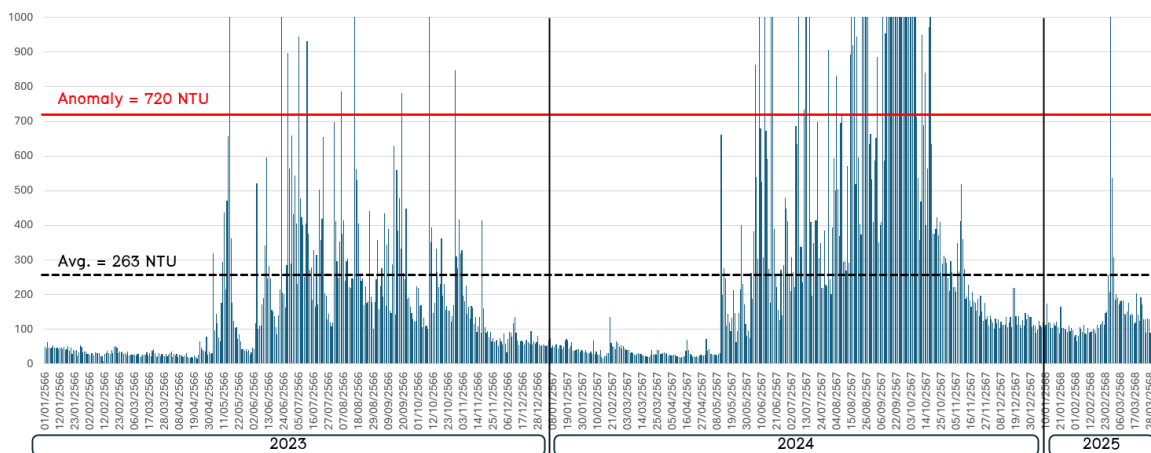


Figure 11 Anomaly Analysis of Turbidity (NTU) Data

เมื่อพิจารณากราฟแสดงค่าความผิดปกติของดัชนี NDSSI ซึ่งระบุค่าความผิดปกติทางลบ (Negative Anomalies) ซึ่งคำนวณจากค่าเฉลี่ยลบด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ -0.13 เพื่อใช้เป็นเส้นอ้างอิงในการตรวจจับช่วงเวลาที่ค่าดัชนีลดต่ำกว่าระดับปกติตามฤดูกาล จากข้อมูลพบว่าค่าดัชนี NDSSI ลดต่ำกว่าค่าเกณฑ์ติดต่อกันหลายช่วงเวลาสะท้อนแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความขุ่นในแม่น้ำกก ในทางตรงกันข้ามช่วงฤดูหนาวต่อเนื่องถึงต้นฤดูร้อนของปีถัดไป (ธันวาคม–เมษายน) ค่าดัชนี NDSSI ส่วนใหญ่ปรากฏอยู่เหนือเกณฑ์ บ่งชี้ถึงช่วงเวลาที่น้ำมีความใสและมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในระดับต่ำเมื่อเทียบกับฤดูฝน ทั้งนี้การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเฉพาะช่วงเวลาที่

ข้อมูลดาวเทียมเท่านั้นเนื่องจากในช่วงเดือนมิถุนายนถึงกันยายนของทุกปีไม่มีภาพจากดาวเทียมที่ผ่านเงื่อนไขการคัดเลือกจากปัญหาการปกคลุมของเมฆ จึงไม่ครอบคลุมช่วงมรสุมหลักของฤดูฝน

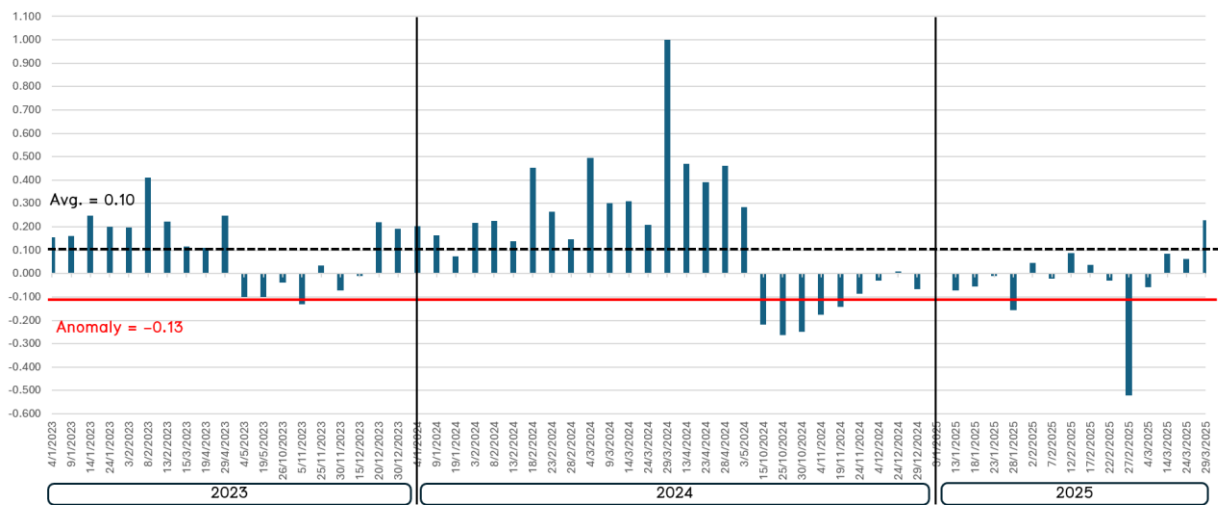


Figure 12 Anomaly Analysis of NDSSI Value

Conclusion and Discussion

ผลการศึกษาพบว่าค่าดัชนี NDSSI ที่คำนวณจากข้อมูลดาวเทียมเซนติเนล-2 ผ่านแพลตฟอร์ม GEE มีความสัมพันธ์กับค่าความชุ่มชื้นภาคสนามในระดับหนึ่ง โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าดัชนี NDSSI และค่าความชุ่มชื้นภาคสนามหลังการปรับแก้ค่าผิดพลาดอยู่ในระดับปานกลาง ($R^2 = 0.42$) ขณะที่ความสัมพันธ์เชิงอันดับมีค่าสูงกว่า (สหสัมพันธ์แบบอันดับสเปียร์แมน = -0.83 และสหสัมพันธ์แบบอันดับเคนดอลล์ = -0.64) ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า NDSSI อาจสามารถใช้บ่งชี้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงลำดับของความชุ่มชื้นได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ยังไม่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าอาจยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่าความชุ่มชื้นภาคสนาม ดังนั้นการใช้ NDSSI เพื่อประมาณค่าความชุ่มชื้นควรพิจารณาร่วมกับข้อมูลภาคสนามและการวิเคราะห์เพิ่มเติมในบริบทของพื้นที่ศึกษา

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงฤดูกาลของค่าดัชนี NDSSI แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลดลงในฤดูฝนกับการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอย ซึ่งอาจเกิดจากการไหลบ่าของตะกอนและการชะล้างดินในพื้นที่ต้นน้ำในทางตรงข้ามค่าดัชนี NDSSI ที่สูงมีแนวโน้มเพิ่มพบบ่อยในฤดูแล้งสัมพันธ์กับสภาวะน้ำใสและปริมาณตะกอนที่ลดลง

นอกจากนี้จากการตรวจสอบเหตุการณ์ความชุ่มชื้นสูงเฉียบพลันในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนย้อนหลังของสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ (Office of the National Water Resources, n.d.) พบว่ามีฝนตกหลายแห่งในพื้นที่ต้นน้ำกักเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2568 ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการพัดพาตะกอนลงสู่ลำน้ำในปริมาณมาก เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นตัวอย่างของการตอบสนองของระบบตะกอนในแม่น้ำต่อปริมาณน้ำฝนในระยะเวลสั้น

สำหรับการกระจายของค่าดัชนี NDSSI สะท้อนถึงความแปรผันของระดับความชุ่มชื้นตามฤดูกาล โดยพบว่ามีค่าเป็นบวกในช่วงต้นปี พ.ศ. 2566 และกลางปี พ.ศ. 2567 ซึ่งบ่งชี้สภาวะน้ำใส ขณะที่ค่าติดลบต่อเนื่องช่วงปลายปี พ.ศ. 2567 ถึงต้นปี พ.ศ. 2568 ซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะน้ำขุ่นที่เพิ่มขึ้น จากลักษณะการกระจายของข้อมูลดังกล่าว การใช้เกณฑ์คำนวณจากค่าเฉลี่ยลบด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับระบุค่าผิดปกติในเชิงลบ จึงเหมาะสมในการตรวจจับ

การลดลงของค่าดัชนี NDSSI ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความชุ่มชื้น แม้ว่าเหตุการณ์ค่าผิดปกติในเชิงลบจะเกิดไม่บ่อยครั้ง แต่ยังคงมีความสำคัญและสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการเกิดตะกอนสูงเฉียบพลันภายในระบบแม่น้ำกักได้ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Nontapon et al. (2025) ที่รายงานถึงศักยภาพของดัชนี NDSSI ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำโขง พบว่า NDSSI มีประสิทธิภาพสูงในการประมาณค่าความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยและแสดงความสัมพันธ์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีอื่น เช่น NSMI และ NDTI สำหรับการติดตามพลวัตของตะกอนในระบบแม่น้ำที่มีการพัดพาตะกอนสูงและมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล นอกจากนี้ลักษณะการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของระดับความชุ่มชื้นในช่วงฤดูฝนยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Bid & Siddique (2019) ที่รายงานว่าค่าความชุ่มชื้นสามารถเพิ่มขึ้นจากประมาณ 60 NTU ในช่วงฤดูแล้งปกติเป็นมากกว่า 700 NTU ในฤดูมรสุม ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับค่าความชุ่มชื้นที่ตรวจพบในแม่น้ำกักซึ่งสูงกว่า 720 NTU ในช่วงฤดูฝน การเปรียบเทียบดังกล่าวจึงสนับสนุนว่าดัชนี NDSSI สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในระบบแม่น้ำที่มีพลวัตสูงได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามการขาดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมต่อเนื่องในช่วงฤดูฝนจากปัญหาการปกคลุมของเมฆทำให้จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีสัดส่วนของข้อมูลในฤดูแล้งมากกว่าฤดูฝน ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าทางสถิติของดัชนี NDSSI มีแนวโน้มเอนเอียงไปทางสภาพน้ำในช่วงฤดูแล้งได้

จากผลการศึกษาพบว่าค่าดัชนี NDSSI สามารถสะท้อนสถานะ “น้ำใส-น้ำขุ่น” ของแม่น้ำกักได้ในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา และแสดงศักยภาพในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของตะกอนแขวนลอยในระบบแม่น้ำ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ยังมีข้อจำกัดจากความถี่ของภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนล-2 ที่ลดลงในช่วงฤดูฝนเนื่องจากการปกคลุมของเมฆ ส่งผลให้ไม่มีภาพที่ผ่านเงื่อนไขการคัดเลือกในบางช่วงเวลาและทำให้เกิดช่องว่างของข้อมูลเชิงเวลา รวมถึงปัญหาจุดภาพที่ได้รับผลกระทบจากเงาเมฆ แม้ว่าข้อมูลจากดาวเทียมแบบแพสซีฟจะมีข้อจำกัดดังกล่าว แต่การตอบสนองของค่าดัชนี NDSSI ต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความชุ่มชื้น โดยเฉพาะในช่วงเหตุการณ์ตะกอนสูงเฉียบพลัน แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ดัชนีร่วมกับวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลาสามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของระบบแม่น้ำได้อย่างมีนัยสำคัญสำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อไปควรพิจารณาเพิ่มเครื่องมือในการคาดการณ์ค่าความชุ่มชื้นในแม่น้ำหรืออาจผสมผสานข้อมูลจากหลายแพลตฟอร์ม (เช่น Landsat 8 – 9, Sentinel-1) อาจช่วยลดปัญหาช่องว่างข้อมูลและสร้างระบบติดตามแบบต่อเนื่องได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อาจพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติระหว่างค่าดัชนี NDSSI และค่าความชุ่มชื้นภาคสนามเพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวของความชุ่มชื้นจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการติดตามคุณภาพน้ำทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา นอกจากนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลเป็นเครื่องมือสำหรับติดตามเฝ้าระวังคุณภาพน้ำเชิงพื้นที่ ซึ่งเหมาะสมกับระบบแม่น้ำที่มีความแปรผันสูงและมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลภาคสนาม หากมีการติดตามอย่างต่อเนื่องจะทำให้มีแนวโน้มช่วยเพิ่มความเข้าใจต่อพฤติกรรมของตะกอนแขวนลอยได้ละเอียด ครอบคลุม และรอบด้านมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งสนับสนุนการจัดการทรัพยากรน้ำและระบบนิเวศของลุ่มน้ำบนฐานข้อมูลเชิงประจักษ์

Acknowledgements

ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานงานภาค สาขาเชียงราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลรายงานผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำแหล่งน้ำดิบ ณ สถานีตรวจวัดโรงกรองน้ำวังคำ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารวิชาการเพื่อการพัฒนาวัฒนธรรมเชิงพื้นที่สำหรับข้อเสนอแนะอันมีคุณค่า ซึ่งช่วยให้การปรับปรุงและเผยแพร่ผลงานนี้มีความสมบูรณ์และเป็นประโยชน์ยิ่งขึ้นต่อวงวิชาการและการพัฒนาเชิงพื้นที่

References

- Bid, S., & Siddique, G. (2019). Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1179. Form <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00609-8>
- Bilotta, G. S. & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*. 42(12), 2849–2861. Form <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
- Caballero, I., Steinmetz, F. & Navarro, G. (2018). Evaluation of the First Year of Operational Sentinel-2A Data for Retrieval of Suspended Solids in Medium- to High-Turbidity Waters. *Remote Sensing*. 10(7), 982. Form <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/982>
- Chiang Mai University. (2023). Project review of flood prevention and mitigation plan in the Upper Mekong Basin: Draft final report. (in Thai)
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis* (3rd ed.). Wiley.
- Garg, V., Aggarwal, S. P., & Chauhan, P. (2020). Changes in turbidity along Ganga River using Sentinel-2 satellite data during lockdown associated with COVID-19. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 11(1), 1175–1195. Form doi.org/10.1080/19475705.2020.1782482
- Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization). (2025). Monitoring Environmental Impacts along the Kok River in Chiang Rai Province Resulting from Transboundary Pollution Using Satellite Technology. Presentation to the House of Representatives Standing Committee on Land, Natural Resources and Environment, May 14 2025, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 202, 18–27. Form doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
- Hossain, A. K. M. A., Jia, Y., & Chao, X. (2010). Development of remote sensing based index for estimating/mapping suspended sediment concentration in river and lake environments. In *Proceedings of 8th international symposium on Ecohydraulics*. (pp. 578–585).
- Jaywant, S. A., & Arif, K. M. (2024). Remote Sensing Techniques for Water Quality Monitoring: A Review. *Sensors*. (24), 8041. Form doi.org/10.3390/s24248041
- Kavan, J., Wieczorek, I., Tallentire, G. D., Demidionov, M., Uher, J., & Strzelecki, M. C. (2022). Estimating Suspended Sediment Fluxes from the Largest Glacial Lake in Svalbard to Fjord System Using Sentinel-2 Data: Trebvatnet Case Study. *Water*, 14(12), 1840. Form <https://doi.org/10.3390/w14121840>
- Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1–2), 81–93. Form doi.org/10.2307/2332226
- Ngamile, S., Madonsela, S. & Kganyago, M. (2025). Trends in remotesensing of water quality parameters in inland water bodies: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*. 13, Form doi.org/10.3389/fenvs.2025.1549301

- Nontapon, J., Srihanu, N., Auttarapong, D., Hasita, S., Ratanachotinun, J., Bhurtyal, U., & Kaewplang, S. (2025). Assessment of suspended sediment concentration in the Mekong River using Landsat–8 data. *Engineering Access*, 11(2).
- Office of the National Water Resources. (n.d.). *National Thai Water: Rainfall dashboard*. Retrieved March 1, 2026, Form <https://nationalthaiwater.onwr.go.th/rainfall>
- Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242.
- Pisanti, A., Magri, S., Ferrando, I. & Federici, B. (2022). Sea water turbidity analysis from sentinel–2 images: atmospheric correction and bands correlation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII–4/W1–2022, 371–378. Form doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W1-2022-371-2022
- Rocket Media Lab. (2025, August 4). *Kok River contamination may cause agricultural damage worth over 3 billion baht*. Form <https://rocketmedialab.co/kok-river> (in Thai)
- Sahoo, D. & Anandhi A. (2023). Conceptualizing turbidity for aquatic ecosystems in the context of sustainable development goals. *Environmental Science: Advances*. (9), 1220–1234. Form doi.org/10.1039/D2VA00327A
- Sankaran, R., Al-Khayat, J. A., J, A., Chatting, M. E., Sadooni, F. N., Al-Kuwari, H. Al-Saad. (2023). Retrieval of suspended sediment concentration (SSC) in the Arabian Gulf water of arid region by Sentinel–2 data. *Science of The Total Environment*. 904. Form doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166875
- Shan Human Rights Foundation. (2024, November 27). Thai government study identifies eastern Shan State mining as cause of unprecedented mud damage in Mae Sai during recent flooding. Form <https://shanhumanrights.org/thai-government-study-identifies-eastern-shan-state-mining-as-cause-of-unprecedented-mud-damage-in-mae-sai-during-recent-flooding>
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. Form doi.org/10.2307/1412159
- The Nation. (2025, September 23). Toxic pollution in Kok River causes 1.3 billion baht annual economic losses. The Nation Thailand. Form <https://www.nationthailand.com/news/general/40055779>
- Transborder News. (2026, February 25). Arsenic found in residents along Kok River; academics warn of rising health risks. Form <https://transbordernews.in.th/home/?p=45225>
- United States Geological Survey. (2018, June 6). Turbidity and Water. Water Science School. Form https://www.usgs.gov/water-science-school/science/turbidity-and-water?utm_source
- Zhou, Z., Qiu, C. & Zhang, Y. (2023). A comparative analysis of linear regression, neural networks and random forest egression for predicting air ozone employing soft sensor models. *Scientific Reports*. 13, 22420. Form doi.org/10.1038/s41598-023-49899-0