Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787 DOI : 10.14710/jmr.v15i4.60358
EISSN: 2407-7690
https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr

Estimasi Sebaran Total Suspended Solid di Teluk Balikpapan Tahun 2019 dan 2026

Muhammad Iqra Prasetya*, Destyariani Liana Putri, Nurmawati, Giossua Putra Aditia, Frans S. Manik, Haikal Khairul Anam
Teknik Kelautan, Fakultas Pembangunan Berkelanjutan, Institut Teknologi Kalimantan
Kampus ITK Karang Joang, Balikpapan, Kalimantan Timur 76127 Indonesia
Corresponding author, e-mail: iqra.prasetya@lecturer.itk.ac.id

ABSTRAK: Teluk Balikpapan merupakan perairan semi tertutup di Kalimantan Timur yang menerima tekanan pembangunan kawasan industri, pelabuhan, dan permukiman sehingga rentan terhadap peningkatan konsentrasi *Total Suspended Solid* (TSS). Penelitian ini bertujuan mengestimasi TSS di Teluk Balikpapan menggunakan citra Sentinel-2A Level-2 (band 4) tahun 2019 dan 2026 serta menguji akurasi hasil estimasi terhadap data TSS in-situ. Data lapangan dikumpulkan pada 49 titik sampel pada 25–30 Juli 2026 dengan metode gravimetri. Reflektansi band 4 yang dikoreksi atmosfer dengan ACOLITE diekstraksi pada setiap titik, kemudian model regresi linear dibangun menggunakan citra 4 Agustus 2026. Setelah dua titik dengan reflektansi tidak wajar dikeluarkan (n = 47), model menunjukkan hubungan sedang dan signifikan (r = 0,70; R^2 = 0,49; RMSE = 26,05 mg/L; MAE = 19,89 mg/L; RMSE validasi silang = 27,75 mg/L). Karena survei lapangan hanya dilakukan pada 2026, model yang sama diterapkan pada citra 10 Oktober 2019 tanpa validasi independen. Pada 47 titik sampel, TSS terestimasi tahun 2026 (median 63,8 mg/L) lebih tinggi daripada 2019 (median 54,0 mg/L), tetapi selisih ini bersifat indikatif. Peta sebaran menunjukkan TSS tertinggi pada jalur pesisir dan sekitar mulut teluk, sedangkan luas kelas terendah (0–20 mg/L) meningkat dari 2,3% menjadi 44,6% area terpetakan terutama di perairan terbuka, sehingga perubahan antartahun belum dapat ditafsirkan sebagai perubahan kualitas perairan. TSS in-situ berkisar 36–195 mg/L dengan konsentrasi ≥80 mg/L terutama di bagian selatan teluk, dan seluruh titik melampaui baku mutu 20 mg/L untuk wisata bahari serta terumbu karang dan lamun. Band 4 saja hanya menjelaskan sebagian variasi TSS sehingga model ini lebih tepat digunakan sebagai indikator awal, dan kalibrasi lanjutan dengan data lapangan yang lebih banyak dan sezaman dengan akuisisi citra diperlukan.

Kata kunci: TSS; Teluk Balikpapan; penginderaan jauh; regresi; RMSE

Estimation of Total Suspended Solid Distribution in Balikpapan Bay, 2019 and 2026

ABSTRACT: *Balikpapan Bay is a semi-enclosed water body in East Kalimantan under increasing pressure from industrial, port, and residential development, making it vulnerable to rising Total Suspended Solid (TSS) concentrations. This study aims to estimate TSS in Balikpapan Bay using Sentinel-2A Level-2 (band 4) imagery from 2019 and 2026 and to evaluate the estimates against in-situ TSS data. Field data were collected at 49 sampling stations on 25–30 July 2026 using the gravimetric method. Band 4 reflectance, atmospherically corrected with ACOLITE, was extracted at each station, and a linear regression model was built with the 4 August 2026 image. After excluding two stations with implausible reflectance (n = 47), the model showed a moderate and significant relationship (r = 0.70; R^2 = 0.49; RMSE = 26.05 mg/L; MAE = 19.89 mg/L; leave-one-out cross-validated RMSE = 27.75 mg/L). Because the field survey was conducted only in 2026, the same model was applied to the 10 October 2019 image without independent validation. At the 47 stations, estimated TSS in 2026 (median 63.8 mg/L) was higher than in 2019 (median 54.0 mg/L), but this difference is indicative only. The maps show the highest TSS along the coastal strip and near the bay mouth, while the lowest class (0–20 mg/L) increased from 2.3% to 44.6% of the mapped area, mainly in open water, so the change between years cannot yet be interpreted as a change in water quality. In-situ TSS ranged from 36 to 195 mg/L, with concentrations ≥80 mg/L found mainly in the southern part of the bay, and all stations exceeded the 20 mg/L quality standard for marine tourism, coral reefs, and seagrass. Band 4 alone explains only part of the TSS variability, so the model is*

Diterima : 03-09-2025 ; Diterbitkan : 20-11-2026

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

best used as an initial indicator, and further calibration with more field data coincident with image acquisition is needed.

Keywords: *TSS; Balikpapan Bay; remote sensing; regression; RMSE*

PENDAHULUAN

Teluk Balikpapan merupakan perairan semi tertutup di pesisir timur Pulau Kalimantan yang secara administratif berbatasan dengan Kota Balikpapan, Kabupaten Penajam Paser Utara, dan Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Karakteristik perairan yang relatif tertutup dengan pola arus yang didominasi pasang surut menyebabkan material tersuspensi yang masuk dari daratan cenderung terakumulasi di dalam teluk. Dalam dua dekade terakhir, kawasan sekitar Teluk Balikpapan mengalami perkembangan pesat berupa kawasan industri, pelabuhan, terminal batu bara, serta konversi lahan bervegetasi menjadi kawasan terbangun. Perubahan tutupan lahan tersebut meningkatkan laju erosi di daerah aliran sungai yang bermuara ke teluk sehingga berpotensi meningkatkan konsentrasi Total Suspended Solid (TSS) dan menurunkan kualitas perairan.

Total Suspended Solid adalah padatan tersuspensi berupa komponen biotik maupun abiotik yang melayang di dalam kolom air dan memengaruhi kekeruhan serta penetrasi cahaya di perairan. Konsentrasi TSS yang tinggi dapat menghambat proses fotosintesis biota laut, menurunkan kadar oksigen terlarut, serta mempercepat pendangkalan alur pelayaran (Effendi, 2003). Pemantauan TSS secara konvensional melalui pengambilan sampel dan analisis laboratorium bersifat akurat pada titik pengukuran, tetapi terbatas secara spasial dan temporal serta memerlukan biaya dan waktu yang besar.

Teknologi penginderaan jauh menawarkan alternatif pemantauan TSS secara spasial dan berkelanjutan melalui pemanfaatan hubungan antara nilai reflektansi/digital number citra satelit dengan konsentrasi TSS hasil pengukuran in-situ. Pendekatan ini telah banyak diterapkan di perairan Indonesia, di antaranya untuk pemetaan sebaran padatan tersuspensi di Teluk Semangka (Arief, 2012), Perairan Berau (Parwati dan Purwanto, 2014), muara Sungai Porong (Indeswari *et al*., 2018), perairan Lombok (Emiyati *et al*., 2017), serta perairan Delta Mahakam yang berdekatan dengan lokasi kajian ini (Budhiman, 2004). Pendekatan serupa juga digunakan secara luas untuk perairan tropis yang keruh, misalnya dengan citra MODIS di teluk tropis (Rodríguez-Guzmán dan Gilbes-Santaella, 2009) dan citra Sentinel-2 di perairan danau tropis (Liu *et al*., 2017).

Dasar fisis estimasi TSS dari citra satelit adalah hubungan antara konsentrasi partikel tersuspensi dan reflektansi permukaan perairan. Partikel mineral memiliki sifat hamburan balik yang kuat sehingga peningkatan konsentrasinya menaikkan reflektansi pada panjang gelombang tampak hingga inframerah dekat (Bowers dan Binding, 2006). Pada perairan yang sangat keruh, sensitivitas reflektansi terhadap konsentrasi partikel bergeser ke panjang gelombang merah dan inframerah dekat, sehingga pita-pita tersebut banyak dipilih untuk menurunkan TSS (Doxaran *et al*., 2002; Nechad *et al*., 2010). Berbagai algoritma empiris maupun semi-analitis telah dikembangkan untuk mengubah reflektansi menjadi konsentrasi TSS (Novoa *et al*., 2017). Meskipun demikian, kajian terbaru menekankan bahwa akurasi algoritma bergantung pada sensor, koreksi atmosfer, dan karakteristik optik perairan setempat, sehingga kalibrasi regional dengan data in-situ tetap diperlukan (Sagan *et al*., 2020; Mabit *et al*., 2022).

Ketersediaan citra Landsat-8 (Roy *et al*., 2014) dan Sentinel-2 (Drusch *et al*., 2012) yang dapat diakses secara terbuka dengan resolusi spasial 10–30 m dan interval kunjungan ulang yang singkat membuka peluang pemantauan perairan pesisir secara berulang. Pemanfaatan citra tersebut memerlukan praproses radiometrik dan geometrik (Gonzalez dan Woods, 2018) serta koreksi atmosfer yang sesuai untuk perairan keruh (Vanhellemont, 2019; Bui *et al*., 2022). Di Indonesia, pendekatan serupa telah diuji pada berbagai tipe perairan, antara lain muara Ujung Pangkah (Istriyani *et al*., 2024), perairan Teluk Awur, Jepara (Sabila *et al*., 2024), muara Suwung, Bali (Yuliara *et al*., 2025), dan Teluk Tamiang (Galuh *et al*., 2019), dengan tingkat akurasi yang bervariasi

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

antarlokasi. Pendekatan multitemporal juga telah dimanfaatkan untuk menilai dinamika sedimentasi dan kualitas perairan, misalnya di Teluk Lamong (Khomsin, 2009), Teluk Benoa (Al Tanto *et al*., 2017), serta muara Sungai Porong yang terpengaruh lumpur Sidoarjo (Andriyono, 2010; Budianto, dan Hariyanto, 2017).

Di Teluk Balikpapan, sebaran sedimen tersuspensi telah dikaji melalui pemodelan arus pasang surut (Sinaga *et al*., 2013; Suciaty *et al*., 2019), analisis citra Landsat-8 (Ratnasari *et al*., 2015), dan pemodelan hidrodinamika tiga dimensi yang menunjukkan konsentrasi TSS sangat tinggi di sekitar muara sungai pada kondisi pasang purnama (Hermansyah *et al*., 2026). Pada saat yang sama, tekanan terhadap daerah tangkapan dan zona pesisir teluk meningkat; luas mangrove di Teluk Balikpapan dilaporkan berkurang sekitar 21% (2.906,17 ha) pada periode 2020–2025 (Al Hakim *et al*., 2025). Secara global, perubahan tutupan lahan dan aktivitas manusia terbukti mengubah fluks sedimen sungai ke laut (Syvitski *et al*., 2005), sedangkan peningkatan padatan tersuspensi menurunkan kualitas air dan mengganggu biota akuatik (Bilotta dan Brazier, 2008). Konsentrasi TSS di perairan laut juga dibatasi oleh baku mutu, yaitu 80 mg/L untuk pelabuhan dan 20 mg/L untuk wisata bahari serta biota laut tertentu seperti terumbu karang dan lamun (Pemerintah Republik Indonesia, 2021).

Kajian mengenai sebaran TSS khusus di Teluk Balikpapan masih terbatas dan umumnya bersifat sesaat (satu periode akuisisi citra), sementara tekanan pembangunan di sekitar teluk terus berlangsung. Perbandingan sebaran TSS antarwaktu diperlukan untuk melihat kecenderungan perubahan kualitas perairan akibat aktivitas di daratan. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengestimasi sebaran spasial konsentrasi TSS di Teluk Balikpapan menggunakan data citra satelit multitemporal Sentinel-2A Level-2 (band 4) tahun 2019 dan 2026, dan (2) menguji akurasi hasil estimasi tersebut terhadap data TSS in-situ menggunakan analisis regresi, RMSE, dan MAE.

MATERI DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di perairan Teluk Balikpapan, Kalimantan Timur, dengan 49 titik sampel yang tersebar dari bagian hulu teluk di utara hingga wilayah pesisir selatan yang berhadapan dengan Selat Makassar (Gambar 1). Sebaran titik sampel dirancang untuk mewakili variasi kondisi hidro-oseanografi di dalam teluk, termasuk area di sekitar muara sungai, badan teluk bagian tengah, dan mulut teluk. Koordinat batas wilayah kajian adalah 116°47'33.88" BT dan 1°14'55.66" LS.

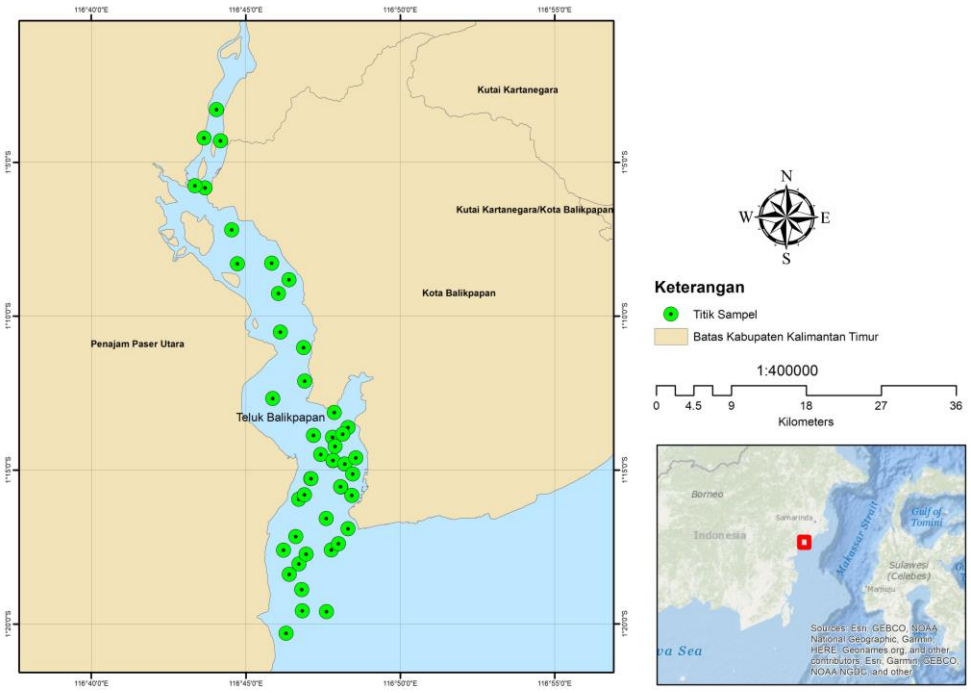
Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer berupa hasil pengukuran konsentrasi TSS in-situ (mg/L) di setiap titik sampel. Sampel air diambil pada 25–30 Juli 2026 pukul 10.00–12.00 WITA pada kedalaman 50 cm dan dianalisis di laboratorium dengan metode gravimetri menggunakan glass fiber filter berukuran pori 0,45 µm. Survei lapangan hanya dilakukan satu kali, yaitu pada 25–30 Juli 2026, sehingga data in-situ hanya tersedia untuk periode 2026. Data sekunder berupa citra satelit multitemporal tahun 2019 dan 2026 yang mencakup lokasi kajian. Sensor, level produk, tanggal dan jam akuisisi, tutupan awan, sumber data, serta selisih waktu antara akuisisi citra dan pengambilan sampel disajikan pada Tabel 1. Nilai reflektansi permukaan band 4 (merah) hasil koreksi atmosfer ACOLITE (Vanhellemont, 2019) diekstraksi pada koordinat setiap titik sampel dari kedua citra.

Estimasi TSS dari citra dilakukan dengan regresi linear sederhana, dengan reflektansi permukaan band 4 (merah), R(B4), sebagai variabel bebas dan TSS in-situ sebagai variabel terikat (TSS = a × R(B4) + b). Model dibangun menggunakan citra 4 Agustus 2026 dan TSS lapangan pada 49 titik. Dua titik (nomor 25 dan 31) dikeluarkan karena reflektansi band 4-nya (0,59 dan 0,49) jauh di atas 47 titik lainnya (0,16–0,23) dan tidak wajar untuk perairan keruh, sehingga diduga terkontaminasi awan atau bayangan awan, sun glint, atau piksel campuran dengan daratan. Hasil dengan seluruh 49 titik tetap dilaporkan sebagai uji sensitivitas. Persamaan akhir (n = 47) adalah TSS = 1.706,70 × R(B4) − 222,61, dengan R(B4) berupa reflektansi tak berdimensi (nilai DN dibagi 10.000). Karena survei lapangan hanya dilakukan pada 2026, tidak tersedia data lapangan yang sezaman dengan citra 2019. Persamaan yang sama karena itu diterapkan pada reflektansi band 4 citra 2019 yang diekstraksi pada koordinat yang sama, dengan asumsi bahwa hubungan reflektansi–TSS dan praproses kedua citra setara; hasil 2019 tidak diuji akurasinya secara independen.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

Tabel 1. Spesifikasi Citra Satelit yang Digunakan dan Waktu Akuisisi terhadap Pengambilan Sampel

Tahun	Sensor dan level produk	Tanggal dan jam akuisisi	Tutupan awan (%)	Sumber data	Selisih waktu dengan pengambilan sampel
2019	Sentinel-2A Level-2	10 Oktober 2019, 10.00 WITA	30	Copernicus	6 tahun 9 bulan sebelum survei
2026	Sentinel-2A Level-2	4 Agustus 2026, 10.00 WITA	30	Copernicus	5–10 hari setelah survei



Gambar 1. Sebaran Titik Sampel Lokasi Penelitian di Teluk Balikpapan

Akurasi model estimasi TSS terhadap TSS observasi lapangan diuji menggunakan koefisien korelasi Pearson (r), koefisien determinasi (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), dan Mean Absolute Error (MAE), dengan persamaan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{[\Sigma(\text{TSS citra} - \text{TSS observasi})^2 / n]}$$
$$MAE = \Sigma|\text{TSS citra} - \text{TSS observasi}| / n$$

dengan n adalah jumlah titik sampel yang digunakan (n = 47). Karena titik-titik tersebut juga dipakai untuk membangun model, akurasi ini merupakan akurasi kalibrasi dan cenderung optimistis. Untuk memperoleh estimasi galat yang lebih independen, RMSE dan MAE juga dihitung dengan validasi silang leave-one-out, yaitu setiap titik diestimasi dari model yang dibangun tanpa titik tersebut. Semakin kecil nilai RMSE dan MAE serta semakin tinggi nilai r dan R^2, maka model dinilai semakin akurat. Pengujian tidak dapat dilakukan untuk citra 2019 karena tidak tersedia data lapangan yang sezaman.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

Persamaan regresi diterapkan pada seluruh piksel band 4 citra 2019 dan 2026 menggunakan Raster Calculator pada QGIS untuk menghasilkan peta sebaran TSS. Hasil estimasi diklasifikasikan ke dalam empat kelas dengan batas yang sama untuk kedua tahun (0–20, 20–80, 80–150, dan >150 mg/L) yang mengacu pada baku mutu TSS air laut 20 dan 80 mg/L (Pemerintah Republik Indonesia, 2021) dan rentang TSS in-situ, sehingga perubahan sebaran dan luasan kelas antarperiode dapat dibandingkan (Gambar 3). Luas tiap kelas dihitung dari peta hasil klasifikasi dan dinyatakan dalam hektare serta persentase dari total luas terpetakan. Model hanya dikalibrasi pada reflektansi 0,16–0,23; nilai estimasi di luar rentang tersebut merupakan ekstrapolasi, dan nilai negatif dimasukkan ke kelas terendah. Seluruh pengolahan data dan analisis statistik dilakukan menggunakan QGIS Desktop 3.44.10, ENVI 5.2, ArcGIS 10.8, dan Microsoft Excel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

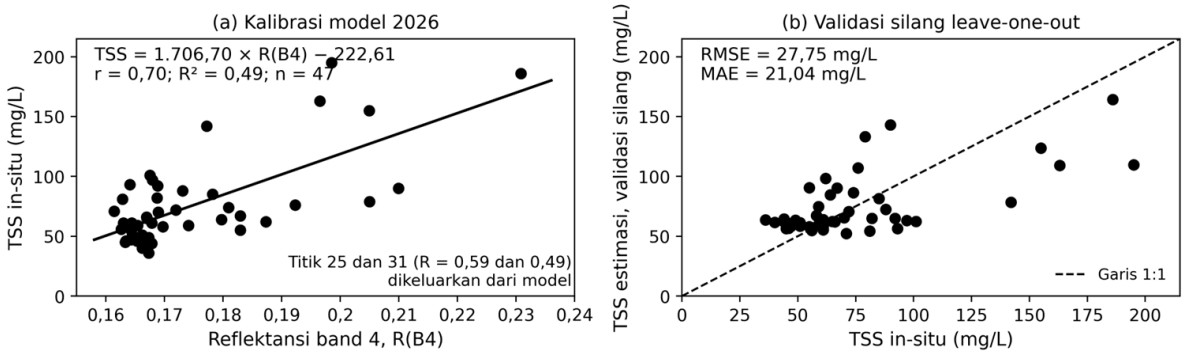
Sebanyak 49 titik sampel berhasil diukur konsentrasi TSS in-situ-nya, tersebar dari bagian hulu Teluk Balikpapan di utara hingga wilayah pesisir selatan (Gambar 1). Konsentrasi TSS berkisar 36–195 mg/L dengan rata-rata 74,8 mg/L, median 64,0 mg/L, dan simpangan baku 36,1 mg/L. Konsentrasi ≥80 mg/L dijumpai pada 14 titik, 11 di antaranya berada di sepertiga selatan teluk dan 3 di bagian utara, sedangkan bagian tengah teluk tidak memiliki titik dengan konsentrasi ≥80 mg/L. Rata-rata TSS pada sepertiga selatan, tengah, dan utara berturut-turut adalah 103,6; 50,4; dan 68,5 mg/L. TSS cenderung lebih tinggi ke arah barat (korelasi Spearman terhadap koordinat timur $\rho = -0{,}54$; $p < 0{,}001$) dan ke arah selatan (terhadap koordinat utara $\rho = -0{,}32$; $p = 0{,}03$).

Rentang konsentrasi TSS in-situ yang lebar (36–195 mg/L, atau sekitar 5,4 kali lipat antara nilai terendah dan tertinggi) menunjukkan bahwa kondisi perairan di dalam teluk sangat heterogen. Pola spasialnya tidak menurun secara sederhana dari hulu ke mulut teluk: TSS tertinggi berada di bagian selatan, terendah di bagian tengah, dan menengah di bagian utara. Pola ini dapat mencerminkan pengaruh arus pasang surut, resuspensi sedimen dasar, aktivitas pelabuhan dan pelayaran, serta masukan sungai yang berbeda antarsegmen (Istriyani *et al*., 2024), tetapi faktor-faktor tersebut tidak diukur dalam penelitian ini. Heterogenitas tersebut menguntungkan bagi kalibrasi model karena rentang konsentrasi yang tercakup cukup luas, tetapi sekaligus menuntut agar kesalahan estimasi dibaca terhadap besarnya rentang tersebut.

Tabel 2. Hasil Uji Akurasi Model Estimasi TSS Citra Sentinel-2A Tahun 2026

Parameter	Model utama (n = 47)	Uji sensitivitas, seluruh titik (n = 49)
Koefisien Korelasi (r)	0,70	0,08
Koefisien Determinasi (R^2)	0,49	0,007
RMSE (mg/L)	26,05	35,60
MAE (mg/L)	19,89	24,95
Jumlah Sampel (n)	47	49
RMSE validasi silang leave-one-out (mg/L)	27,75	37,73
Rasio RMSE/MAE	1,31	1,43
RMSE terhadap rentang TSS in-situ (159 mg/L)	16,4%	22,4%

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787



Gambar 2. (a) Regresi Linear Reflektansi Band 4 terhadap TSS In-Situ Tahun 2026 (Dua Titik dengan Reflektansi Tidak Wajar Dikeluarkan) dan (b) TSS Estimasi Hasil Validasi Silang Leave-One-Out terhadap TSS Observasi

Setelah dua titik dikeluarkan (n = 47), regresi linear antara reflektansi band 4 citra 2026 dan TSS lapangan menunjukkan hubungan positif sedang yang signifikan (r = 0,70; R^2 = 0,49; p < 0,001; Gambar 2), dengan RMSE = 26,05 mg/L dan MAE = 19,89 mg/L (Tabel 2). Artinya sekitar 49% variasi TSS lapangan dijelaskan oleh reflektansi band 4. Validasi silang leave-one-out memberikan RMSE = 27,75 mg/L dan MAE = 21,04 mg/L, hanya sedikit lebih besar daripada galat kalibrasi, sehingga model cukup stabil terhadap pelepasan satu titik. Bila dua titik tidak wajar dipertahankan (n = 49), hubungan hilang (r = 0,08; R^2 = 0,007; RMSE = 35,60 mg/L), yang menunjukkan bahwa hasil sangat peka terhadap kontaminasi piksel dan bahwa penapisan kualitas piksel menentukan keberhasilan model.

Nilai R^2 sebesar 0,49 tergolong sedang dan berada dalam kisaran R^2 sekitar 0,3–0,6 yang dilaporkan pada sebagian besar kajian TSS berbasis Landsat di perairan Indonesia (Istriyani *et al*., 2024). Namun, R^2 hanya menggambarkan kekuatan hubungan linear dan tidak menunjukkan besarnya kesalahan, sehingga RMSE dan MAE perlu dilihat secara terpisah.

RMSE sebesar 26,05 mg/L setara dengan 16,4% dari rentang TSS in-situ (159 mg/L) dan sekitar 35% dari rata-rata TSS in-situ (74,8 mg/L), sehingga kesalahan estimasi tergolong moderat hingga cukup besar terhadap variasi konsentrasi yang diamati (Tabel 2). Rasio RMSE/MAE sebesar 1,31 mendekati nilai sekitar 1,25 untuk galat berdistribusi normal, sehingga kesalahan relatif merata antartitik dan tidak didominasi oleh segelintir pencilan (Chai dan Draxler, 2014). Pada Gambar 2b terlihat bahwa model cenderung menaksir terlalu rendah pada TSS tinggi (>140 mg/L), sedangkan sebagian titik dengan TSS rendah hingga menengah ditaksir terlalu tinggi, pola khas regresi yang menarik estimasi ke arah nilai tengah.

Persamaan pada Tabel 2 diterapkan pada reflektansi band 4 citra 2019 dan 2026. Pada 47 titik sampel, TSS terestimasi tahun 2019 berkisar 30,3–137,2 mg/L (median 54,0 mg/L) dan tahun 2026 berkisar 52,8–171,3 mg/L (median 63,8 mg/L), dengan selisih rata-rata 17,3 mg/L (uji Wilcoxon berpasangan, p < 0,001). Berdasarkan kelas 0–20, 20–80, 80–150, dan >150 mg/L, jumlah titik pada tahun 2019 adalah 0, 42, 5, dan 0, sedangkan pada tahun 2026 adalah 0, 34, 12, dan 1. Reflektansi band 4 citra 2026 lebih tinggi daripada citra 2019 pada 37 dari 47 titik. Namun, selisih tersebut belum dapat dipastikan sebagai peningkatan TSS yang sebenarnya: persamaan dikalibrasi hanya pada 2026 (estimasi 2026 merupakan nilai terkalibrasi, sedangkan estimasi 2019 merupakan hasil transfer tanpa validasi), kedua citra direkam pada bulan, kondisi atmosfer, dan fase pasang surut yang berbeda, dan reflektansi band 4 citra 2019 hanya berkorelasi sedang dengan TSS lapangan 2026 (r = 0,46; p < 0,001; n = 49). Dengan demikian, perbandingan multitemporal dalam penelitian ini bersifat indikatif.

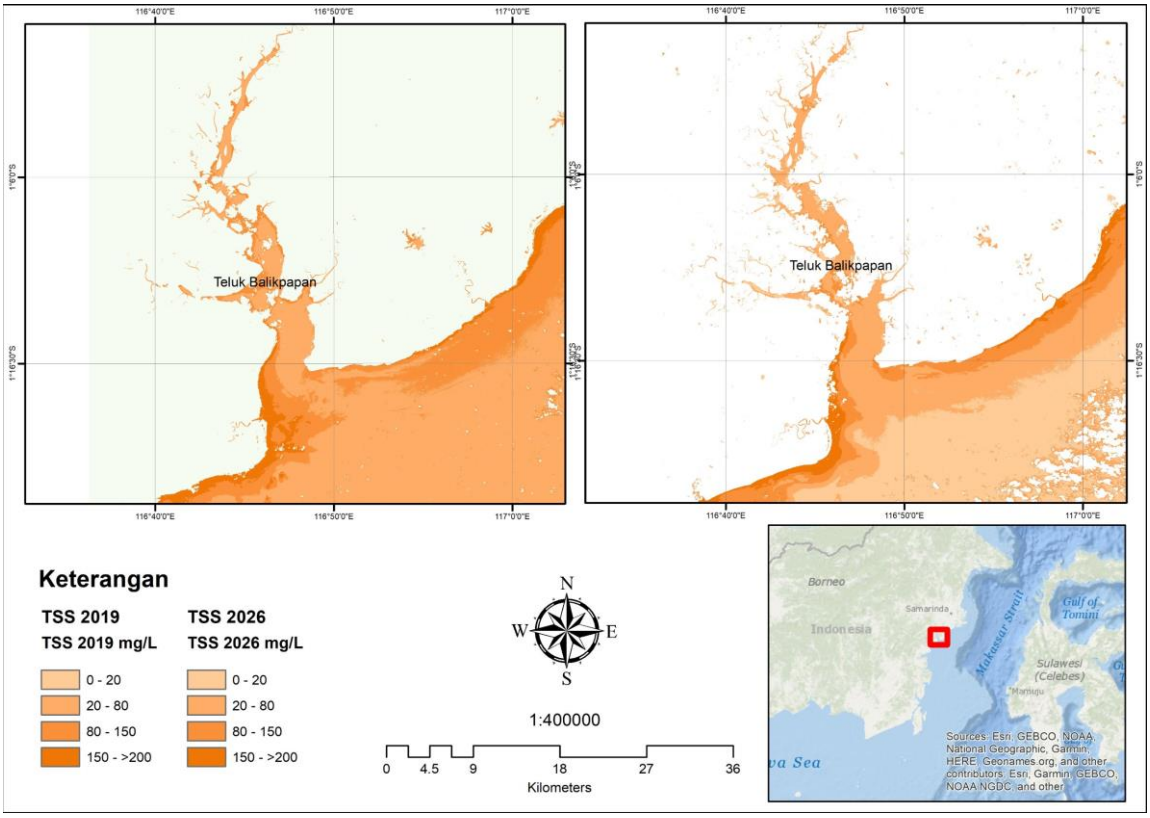
Peta TSS (Gambar 3) memperlihatkan konsentrasi tertinggi (kelas 80–150 dan >150 mg/L) pada jalur sempit di sepanjang garis pantai dan di sekitar mulut teluk, sedangkan badan teluk bagian dalam didominasi kelas 20–80 mg/L. Pada tahun 2019, hampir seluruh perairan terbuka di luar teluk berada pada kelas 20–80 mg/L (67,9% luas terpetakan), dan kelas terendah (0–20 mg/L) hanya

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

2,3%. Pada tahun 2026, kelas 0–20 mg/L meluas menjadi 44,6% luas terpetakan, terutama di perairan terbuka bagian selatan dan tenggara, sedangkan kelas 20–80, 80–150, dan >150 mg/L berturut-turut 37,9%; 13,0%; dan 4,4% (Tabel 3). Dengan demikian, secara spasial luas kelas TSS rendah justru bertambah pada 2026, berlawanan dengan arah selisih pada titik sampel (TSS terestimasi 2026 lebih tinggi daripada 2019). Perbedaan arah ini menunjukkan bahwa selisih antartahun sangat dipengaruhi oleh perairan terbuka dan kondisi perekaman, serta kemungkinan oleh perbedaan radiometrik antarcitra (kondisi atmosfer, sun glint, atau fase pasang surut), sehingga perbedaan 2019–2026 belum dapat ditafsirkan sebagai perubahan kualitas perairan. Luas terpetakan juga berbeda (sekitar 66.810 ha pada 2019 dan 62.480 ha pada 2026) akibat perbedaan area tanpa data atau tertutup awan, sehingga perbandingan dilakukan terhadap persentase luas terpetakan.

Tabel 3. Luas Kelas Konsentrasi TSS Terpetakan di Teluk Balikpapan dan Perairan Sekitarnya Tahun 2019 dan 2026

Kelas	TSS 2019 (mg/L)	Luas 2019 (ha)	2019 (%)	TSS 2026 (mg/L)	Luas 2026 (ha)	2026 (%)
1	0–20	1.510	2,3	0–20	27.900	44,6
2	20–80	45.360	67,9	20–80	23.690	37,9
3	80–150	16.340	24,5	80–150	8.130	13,0
4	>150	3.600	5,4	>150	2.760	4,4
Total		66.810	100,0		62.480	100,0



Gambar 3. Peta Sebaran Konsentrasi TSS di Teluk Balikpapan Tahun 2019 (kiri) dan Tahun 2026 (kanan)

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

Model dikalibrasi pada reflektansi 0,16–0,23 dengan TSS in-situ 36–195 mg/L. Piksel dengan reflektansi di luar rentang ini, misalnya perairan yang lebih jernih di sekitar mulut teluk, menghasilkan estimasi hasil ekstrapolasi persamaan regresi; nilai negatif tidak bermakna fisik dan dimasukkan ke kelas terendah, sedangkan nilai di atas 195 mg/L lebih tepat dibaca sebagai indikator relatif zona keruh daripada konsentrasi absolut (Mabit *et al*., 2022). Dengan demikian, perbandingan antartahun lebih kuat bila bertumpu pada pola spasial dan luasan kelas TSS di dalam rentang kalibrasi.

Hasil lapangan menunjukkan sebaran TSS yang tidak seragam: konsentrasi ≥80 mg/L terkonsentrasi di bagian selatan teluk (11 dari 14 titik) dan sebagian di bagian utara, sedangkan bagian tengah relatif rendah (rata-rata 50,4 mg/L). Teluk Balikpapan menerima masukan sungai-sungai besar dan kecil, antara lain Sungai Wain, Sepaku, Riko, Semoi, dan Kariangau, dan sebaran sedimen tersuspensi di dalamnya dikendalikan oleh arus pasang surut (Sinaga *et al*., 2013; Suciaty *et al*., 2019). Simulasi hidrodinamika tiga dimensi menunjukkan bahwa TSS sangat tinggi terbentuk pada saat pasang purnama, dengan konsentrasi sekitar 200–250 mg/L di Sungai Sepaku dan 50–100 mg/L di mulut teluk, serta adanya zona erosi di sekitar Jenebora, sebagian Kariangau, dan pesisir timur teluk (Hermansyah *et al*., 2026). Pola yang tidak monoton pada data lapangan menunjukkan bahwa TSS di dalam teluk tidak hanya menurun dari hulu ke mulut, tetapi juga dipengaruhi proses lokal seperti resuspensi akibat arus pasang surut dan aktivitas di pesisir selatan; hal ini belum diuji dalam penelitian ini.

Dari sisi sumber, TSS yang tinggi di teluk diduga berkaitan dengan masukan dari daratan. Perubahan tutupan lahan dan kegiatan manusia di daerah aliran sungai meningkatkan pasokan sedimen ke wilayah pesisir (Syvitski *et al*., 2005). Di Teluk Balikpapan, luas mangrove yang menjadi sabuk penyangga pesisir dilaporkan menyusut sekitar 21% selama 2020–2025 (Al Hakim *et al*., 2025), sehingga kemampuan zona pesisir menahan dan mengendapkan sedimen sebelum mencapai badan teluk kemungkinan menurun. Hubungan sebab-akibat langsung antara penyusutan mangrove dan peningkatan TSS belum diuji dalam penelitian ini. Aktivitas pelabuhan, pelayaran, dan pengerukan juga diduga berkontribusi terhadap peningkatan kekeruhan lokal melalui resuspensi sedimen dasar, sementara tingginya TSS itu sendiri berimplikasi pada kebutuhan pengerukan alur dan kestabilan garis pantai (Hermansyah *et al*., 2026).

Variasi kondisi pada saat perekaman dapat memengaruhi reflektansi dan estimasi TSS. Karena TSS di teluk sangat dipengaruhi fase pasang surut, kondisi sungai, dan hujan (Hermansyah *et al*., 2026; Istriyani *et al*., 2024), perbedaan waktu antara citra dan pengambilan sampel (5–10 hari untuk 2026 dan hampir tujuh tahun untuk 2019) serta fase pasang surut yang berbeda dapat menghasilkan pola sebaran yang berbeda walaupun sumber sedimen tidak berubah.

Tabel 4 merangkum hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa kajian TSS di Teluk Balikpapan dan perairan Indonesia lain. Nilai R^2 penelitian ini (0,49) sebanding dengan model Sentinel-2 di Teluk Awur (R^2 = 0,45; Sabila *et al*., 2024) tetapi lebih rendah daripada model di muara Suwung (R^2 = 0,845; Yuliara *et al*., 2025) maupun Ujung Pangkah (R^2 = 0,85; Istriyani *et al*., 2024). RMSE penelitian ini (26,05 mg/L) lebih besar daripada kedua studi terakhir, tetapi perbandingan RMSE absolut antarlokasi tidak setara karena RMSE bergantung pada rentang konsentrasi. Di Ujung Pangkah, konsentrasi in-situ berkisar 24–127 mg/L sehingga RMSE 10,75 mg/L setara dengan sekitar 10% dari rentang tersebut, sedangkan RMSE penelitian ini setara dengan 16,4% dari rentang 36–195 mg/L. Akurasi yang lebih rendah ini dapat berkaitan dengan penggunaan satu band, selisih waktu 5–10 hari antara citra dan sampel, serta kemungkinan kontaminasi piksel.

Dibandingkan studi sebelumnya di Teluk Balikpapan, kisaran 0–40 mg/L yang diperoleh dari citra Landsat-8 (Ratnasari *et al*., 2015) jauh lebih rendah daripada rentang in-situ penelitian ini. Perbedaan tersebut dapat berasal dari perbedaan waktu observasi, metode pengolahan dan kalibrasi (studi 2015 berbasis analisis respon spektral), serta perubahan kondisi teluk selama satu dekade terakhir, sehingga tidak dapat dipandang sebagai perbandingan langsung. Sebaliknya, konsentrasi sekitar 200–250 mg/L di Sungai Sepaku dan 50–100 mg/L di mulut teluk dari simulasi hidrodinamika (Hermansyah *et al*., 2026) berada dalam orde yang sama dengan rentang in-situ 36–195 mg/L, sehingga memperkuat kewajaran besaran konsentrasi yang terukur. Akurasi algoritma

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

juga bersifat spesifik lokasi (Istriyani *et al*., 2024; Mabit *et al*., 2022), sehingga model ini sebaiknya digunakan untuk Teluk Balikpapan saja dan hanya dalam rentang reflektansi kalibrasinya.

Rentang TSS in-situ (36–195 mg/L) perlu dibandingkan dengan baku mutu air laut. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 menetapkan baku mutu TSS sebesar 80 mg/L untuk pelabuhan, 20 mg/L untuk wisata bahari, serta 20 mg/L untuk terumbu karang dan lamun dan 80 mg/L untuk mangrove (Pemerintah Republik Indonesia, 2021; Tabel 5). Nilai terendah yang terukur (36 mg/L) sudah melampaui baku mutu 20 mg/L, sedangkan nilai tertinggi (195 mg/L) sekitar 2,4 kali baku mutu 80 mg/L (Gambar 4). Artinya, untuk peruntukan wisata bahari, terumbu karang, dan lamun, seluruh titik sampel melampaui baku mutu, sedangkan untuk pelabuhan dan mangrove, setidaknya titik-titik dengan konsentrasi tertinggi, yang terkonsentrasi di sekitar muara dan area intertidal berlumpur, melampaui 80 mg/L. Penilaian status mutu secara formal tetap memerlukan penetapan peruntukan tiap segmen perairan dan data pengukuran yang memenuhi ketentuan metode baku.

Implikasi bagi pengelolaan dapat dirangkum dalam tiga hal. Pertama, data lapangan menunjukkan bagian selatan teluk sebagai zona dengan TSS tertinggi (11 dari 14 titik dengan TSS ≥80 mg/L), bersama sebagian bagian utara, sehingga kedua zona ini layak menjadi prioritas pemantauan. Kedua, pemantauan berbasis citra dapat melengkapi pengambilan sampel lapangan sehingga frekuensi pengamatan meningkat dengan biaya yang lebih rendah, asalkan model dikalibrasi ulang secara berkala dan akurasinya ditingkatkan. Ketiga, informasi sebaran TSS dapat mendukung perencanaan pengerukan alur dan pengendalian erosi di daerah tangkapan, mengingat dinamika sedimen yang kuat di teluk berimplikasi pada kebutuhan pengerukan, kestabilan garis pantai, dan kondisi habitat (Hermansyah *et al*., 2026).

Beberapa keterbatasan perlu diperhatikan. Pertama, survei lapangan hanya dilakukan satu kali (25–30 Juli 2026), sehingga hanya model 2026 yang dapat dikalibrasi, sedangkan hasil 2019 diperoleh dengan menerapkan persamaan yang sama tanpa validasi independen; perbandingan 2019–2026 karena itu bersifat indikatif. Kedua, model dibangun dan diuji dengan 47 titik yang sama (setelah dua titik dikeluarkan); validasi silang leave-one-out memberikan RMSE 27,75 mg/L, tetapi pemisahan data kalibrasi dan validasi yang independen, seperti pada Sabila *et al*. (2024) yang

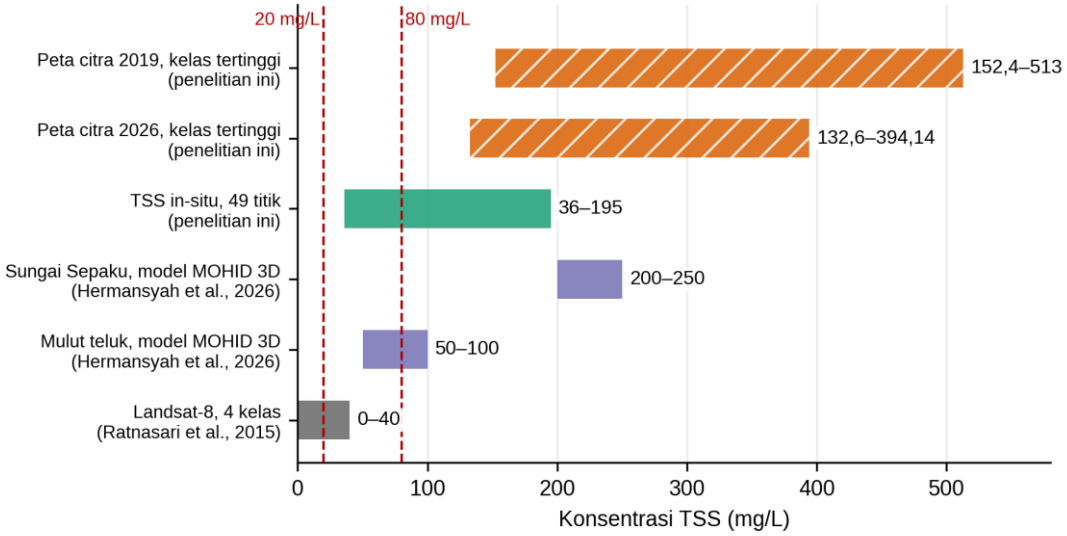
Tabel 4. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Studi Terdahulu

Studi	Lokasi	Data dan metode	Hasil utama
Ratnasari *et al*. (2015)	Teluk Balikpapan	Landsat-8; analisis respon spektral	TSS 0–40 mg/L dalam 4 kelas
Hermansyah *et al*. (2026)	Teluk Balikpapan	Model hidrodinamika 3D MOHID; data 3–20 September 2024	TSS sekitar 200–250 mg/L di Sungai Sepaku dan 50–100 mg/L di mulut teluk (pasang purnama)
Istriyani *et al*. (2024)	Muara Ujung Pangkah	Sentinel-2; 25 titik sampel	R^2 = 0,85; RMSE = 10,75 mg/L (algoritma Prasetyo)
Sabila *et al*. (2024)	Teluk Awur, Jepara	Sentinel-2; 110 stasiun (setengah kalibrasi, setengah validasi)	R^2 = 0,45; RMSE = 3,40 mg/L; MAPE = 10,76%
Yuliara *et al*. (2025)	Muara Suwung, Bali	Sentinel-2; 20 sampel	R^2 = 0,845; RMSE = 0,332 mg/L
Penelitian ini	Teluk Balikpapan	Sentinel-2A Level-2 band 4; regresi linear; 47 titik sampel (kalibrasi 2026)	R^2 = 0,49; RMSE = 26,05 mg/L; MAE = 19,89 mg/L (RMSE validasi silang = 27,75 mg/L)

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 775-787

Tabel 5. Baku Mutu TSS Air Laut dan Posisi Rentang TSS In-Situ Penelitian

Peruntukan	Baku mutu TSS (mg/L)	Posisi rentang TSS in-situ (36–195 mg/L)
Pelabuhan	80	Nilai maksimum (195 mg/L) melampaui baku mutu
Wisata bahari	20	Seluruh rentang (36–195 mg/L) di atas baku mutu
Biota laut: terumbu karang	20	Seluruh rentang (36–195 mg/L) di atas baku mutu
Biota laut: mangrove	80	Nilai maksimum (195 mg/L) melampaui baku mutu
Biota laut: lamun	20	Seluruh rentang (36–195 mg/L) di atas baku mutu



Gambar 4. Rentang Konsentrasi TSS Penelitian Ini Dibandingkan dengan Studi Terdahulu di Teluk Balikpapan dan Baku Mutu Air Laut (Garis Putus-Putus: 20 dan 80 mg/L). Rentang Diperoleh dengan Metode Berbeda sehingga Bersifat Indikatif

membagi dua data stasiun, akan memberikan estimasi kesalahan yang lebih andal. Ketiga, akurasi bergantung pada kesesuaian waktu antara akuisisi citra dan pengambilan sampel karena TSS di perairan estuari berubah dalam hitungan jam mengikuti pasang surut (Istriyani *et al*., 2024); selisih 5–10 hari pada 2026 dan hampir tujuh tahun pada 2019 perlu diminimalkan atau dikoreksi dengan data pasang surut. Keempat, model empiris satu band belum mengoreksi pengaruh klorofil, bahan organik terlarut berwarna, dan kedalaman perairan yang dangkal (Sagan *et al*., 2020; Mabit *et al*., 2022), dan persamaan linear dengan intersep negatif tidak bermakna fisik di luar rentang reflektansi kalibrasi (0,16–0,23). Kelima, hasil sangat peka terhadap kualitas piksel: dua piksel dengan reflektansi tidak wajar cukup untuk meniadakan hubungan regresi (R^2 turun dari 0,49 menjadi 0,007), sehingga penapisan awan, bayangan awan, sun glint, dan piksel campuran dengan daratan perlu dilakukan secara sistematis.

Penelitian lanjutan disarankan untuk (1) melakukan survei lapangan pada setiap periode akuisisi citra, dengan citra yang direkam hampir bersamaan dengan pengambilan sampel dan pada fase pasang surut yang sebanding antartahun, (2) menguji koreksi atmosfer yang sesuai untuk perairan keruh (Vanhellemont, 2019; Bui *et al*., 2022), (3) membandingkan regresi linear satu band dengan algoritma lain, misalnya rasio band atau algoritma semi-analitis berkalibrasi regional (Nechad *et al*., 2010), (4) menambah deret waktu tahunan serta data debit sungai, curah hujan, dan perubahan tutupan lahan untuk menguji hubungan sebab-akibat TSS (Al Hakim *et al*., 2025), dan

(5) menelusuri residual per titik serta melaporkan metrik akurasi per kelas konsentrasi agar kinerja model pada konsentrasi tinggi dapat dievaluasi secara terpisah.

KESIMPULAN

Model regresi linear antara reflektansi band 4 citra Sentinel-2A dan konsentrasi TSS in-situ pada 47 titik menunjukkan hubungan sedang dan signifikan untuk tahun 2026 ($r = 0,70$; $R^2 = 0,49$; RMSE = 26,05 mg/L; MAE = 19,89 mg/L; RMSE validasi silang = 27,75 mg/L), dengan persamaan TSS = 1.706,70 × R(B4) − 222,61. Hasil ini sangat bergantung pada penyaringan dua piksel yang tidak wajar; tanpa penyaringan, hubungan tidak tampak ($R^2 = 0,007$). TSS in-situ berkisar 36–195 mg/L dengan konsentrasi tertinggi terutama di bagian selatan teluk, dan seluruh titik melampaui baku mutu 20 mg/L. Penerapan model pada citra 2019 tanpa validasi independen menghasilkan TSS terestimasi yang lebih rendah daripada 2026 pada titik-titik sampel (median 54,0 dan 63,8 mg/L), tetapi perbedaan ini bersifat indikatif, dan secara spasial luas kelas TSS terendah justru meningkat dari 2,3% menjadi 44,6% area terpetakan pada 2026 terutama di perairan terbuka, sehingga perbedaan antartahun belum dapat ditafsirkan sebagai perubahan kualitas perairan dan perlu dikonfirmasi dengan survei lapangan pada setiap periode, deret waktu yang lebih panjang, serta kondisi perekaman (pasang surut, debit sungai, dan cuaca) yang sebanding. Model ini dapat digunakan sebagai indikator awal sebaran TSS di Teluk Balikpapan, tetapi kalibrasi lebih lanjut diperlukan sebelum dipakai untuk pemantauan kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

Al Hakim, M.A.G., Sinurat, M.E.B., Zulkifle, N.A.N., Nurmawati, & Mas'ud M, A.A. 2025. Machine learning-based mapping of mangrove forest changes from Sentinel-2 in Balikpapan Bay, East Kalimantan. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 17(3): 549–557. DOI: 10.29244/jitkt.v17i3.67707

Al Tanto, T., Putra, A., Kusumah, G., Farhan, A.R., Pranowo, W.S., Husrin, S., & Ilham. 2017. Pendugaan laju sedimentasi di perairan Teluk Benoa, Bali, berdasarkan citra satelit. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(3): 101–107. DOI: 10.15578/jkn.v12i3.4212

Andriyono, S. 2010. Kondisi Muara Porong berdasarkan indeks klorofil-a dan total suspended solid (TSS). *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 2(2): 171–178. DOI: 10.20473/jipk.v2i2.11647

Arief, M. 2012. Pemetaan muatan padatan tersuspensi menggunakan data satelit Landsat (Studi kasus: Teluk Semangka). *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital*, 9(1): 67–75.

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. DOI: 10.1016/j.watres.2008.03.018

Bowers, D.G., & Binding, C.E. 2006. The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2): 219–230. DOI: 10.1016/j.ecss.2005.11.010

Budhiman, S. 2004. Mapping TSM concentrations from multisensor satellite images in turbid tropical coastal waters of Mahakam Delta, Indonesia. MSc Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede.

Budianto, S., & Hariyanto, T. 2017. Analisis perubahan konsentrasi total suspended solids (TSS) dampak bencana Lumpur Sidoarjo menggunakan citra Landsat multi temporal (Studi kasus: Sungai Porong, Sidoarjo). *Jurnal Teknik ITS*, 6(1): C130–C135. DOI: 10.12962/j23373539.v6i1.21097

Bui, Q.T., Jamet, C., Vantrepotte, V., Mériaux, X., Cauvin, A., & Mograne, M.A. 2022. Evaluation of Sentinel-2/MSI atmospheric correction algorithms over two contrasted French coastal waters. *Remote Sensing*, 14(5): 1099. DOI: 10.3390/rs14051099

Chai, T., & Draxler, R.R. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3): 1247–1250. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014

Doxaran, D., Froidefond, J.M., Lavender, S., & Castaing, P. 2002. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 81(1): 149–161. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00341-8

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120: 25–36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026

Effendi, H. 2003. Telaah kualitas air bagi pengelolaan sumber daya dan lingkungan perairan. Kanisius, Yogyakarta.

Emiyati, Manoppo, A.K.S., & Budhiman, S. 2017. Estimation on the concentration of total suspended matter in Lombok coastal using Landsat 8 OLI, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1): 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/54/1/012073

Galuh, G.N.A., Baharuddin, B., & Dewi, I.P. 2019. Analisis sebaran total suspended solid (TSS) menggunakan citra Sentinel 2 di perairan Teluk Tamiang Kabupaten Kotabaru. *MCSIJ (Marine, Coastal and Small Islands Journal)*, 3(1): 1–6. DOI: 10.20527/m.v3i1.11760

Gonzalez, R.C., & Woods, R.E. 2018. Digital image processing. 4th ed. Pearson, New York.

Hermansyah, H., Azmanajaya, E., Sabhan, S., Ismail, S., Giarto, R.B., Pongtuluran, E.H., & Raming, I. 2026. Hydrodynamic control of suspended sediment transport and coastal morphodynamics in tropical estuarine systems under environmental pressure: A case study of Balikpapan Bay. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 31(3): 291–308. DOI: 10.14710/ik.ijms.31.3.291-308

Indeswari, L., Hariyanto, T., & Pribadi, C.B. 2018. Pemetaan sebaran total suspended solid (TSS) menggunakan citra Landsat multitemporal dan data in situ (Studi kasus: Perairan Muara Sungai Porong, Sidoarjo). *Jurnal Teknik ITS*, 7(1): C71–C76. DOI: 10.12962/j23373539.v7i1.28698

Istriyani, I.K., Hidayah, Z., & Wiyanto, D.B. 2024. Estimation of total suspended solids in the Ujung Pangkah Estuary using multi temporal Sentinel-2 satellite imagery. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 16(3): 293–306. DOI: 10.29244/jitkt.v16i3.53244

Khomsin. 2009. Prediksi laju sedimentasi di Teluk Lamong dengan data citra satelit multi temporal. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Liu, H., Li, Q., Shi, T., Hu, S., Wu, G., & Zhou, Q. 2017. Application of Sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7): 761. DOI: 10.3390/rs9070761

Mabit, R., Araújo, C.A.S., Singh, R.K., & Bélanger, S. 2022. Empirical remote sensing algorithms to retrieve SPM and CDOM in Québec coastal waters. *Frontiers in Remote Sensing*, 3: 834908. DOI: 10.3389/frsen.2022.834908

Nechad, B., Ruddick, K.G., & Park, Y. 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 854–866. DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.022

Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., & Gernez, P. 2017. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sensing*, 9(1): 61. DOI: 10.3390/rs9010061

Parwati, E., & Purwanto, D. 2014. Analisis algoritma ekstraksi informasi TSS menggunakan data Landsat 8 di perairan Berau. In: Prosiding Seminar Nasional Penginderaan Jauh 2014, pp. 518–528.

Pemerintah Republik Indonesia. 2021. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lampiran VIII: Baku Mutu Air Laut. Pemerintah Republik Indonesia, Jakarta.

Ratnasari, R.N., Helmi, M., & Rochaddi, B. 2015. Studi sebaran konsentrasi material padatan tersuspensi menggunakan citra satelit Landsat-8 di perairan Teluk Balikpapan Kalimantan Timur. *Jurnal Oseanografi*, 4(4): 741–749.

Rodríguez-Guzmán, V., & Gilbes-Santaella, F. 2009. Using MODIS 250 m imagery to estimate total suspended sediment in a tropical open bay. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 3(1): 36–44.

Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z.P., Lymburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H., & Zhu, Z. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145: 154–172. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001

Sabila, A.Y., Maslukah, L., Wirasatriya, A., Indrayanti, E., Prasetyawan, I.B., & Widada, S. 2024. A robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) using Sentinel-2: Case study in coastal waters of Teluk Awur, Jepara, Indonesia. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 29(4): 495–502. DOI: 10.14710/ik.ijms.29.4.495-502

Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., & Adams, C. 2020. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205: 103187. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103187

Sinaga, A.T., Satriadi, A., Hariyadi, & Novico, F. 2013. Pola sebaran sedimen tersuspensi berdasarkan model pola arus pasang surut di perairan Teluk Balikpapan, Kalimantan Timur. *Jurnal Oseanografi*, 2(3): 329–336.

Suciaty, F., Kemili, P., & Harkey, T. 2019. Studi distribusi partikel sedimen tersuspensi di Teluk Balikpapan dengan menggunakan pemodelan dispersal. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 3(3): 193–204. DOI: 10.26760/jrh.v3i3.3430

Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., & Green, P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308(5720): 376–380. DOI: 10.1126/science.1109454

Vanhellemont, Q. 2019. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225: 175–192. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.010

Yuliara, I.M., Ratini, N.N., Baskoro, W.T., & Wibisana, H. 2025. Development of total suspended solids (TSS) algorithm based on visible spectrum reflectance of Sentinel-2 imagery (Case: Suwung Estuary, Bali). *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(5): 1–9. DOI: 10.29303/jppipa.v11i5.11039