Volume 18, No. 3, 2025

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

PEMANFAATAN CITRA SENTINEL-2 UNTUK PEMETAAN SEBARAN *TOTAL SUSPENDED SOLIDS* (TSS) DI MUARA SUNGAI PORONG SIDOARJO

APPLICATION OF SENTINEL-2 IMAGERY DATA TO MAP THE DISTRIBUTION OF TOTAL SUSPENDED SOLIDS (TSS) IN PORONG ESTUARY SIDOARJO

Muzdalifah[1], Zainul Hidayah[1]*, Dwi Budi Wiyanto[2]

[1]Program Studi Ilmu Kelautan Jurusan Kelautan dan Perikanan, Fakultas Pertanian Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Raya Telang No 02 Kamal Bangkalan Madura Jawa Timur 69162 Indonesia
[2]Program Studi Kelautan Jurusan Kelautan Fakultas Kelautan dan Perikanan Universitas Udayana Kampus Bukit Jimbaran Denpasar Bali 80361 Indonesia

*Corresponding author email: zainulhidayah@trunojoyo.ac.id

Submitted: 6 October 2025 / Revised: 22 December 2025 / Accepted: 30 December 2025

http://doi.org/10.21107/jk.v18i3.32000

ABSTRAK

Muatan padatan yang terlarut dalam air (Total Suspended Solids) merupakan salah satu fenomena yang dapat mempengaruhi sifat optik perairan laut dan dapat diobservasi melalui teknik penginderaan jauh. Tingginya konsentrasi TSS dalam suatu badan perairan dapat menghambat laju fotosintesis, sehingga mengurangi kandungan oksigen terlarut dan berdampak negatif terhadap metabolisme biota akuatik. Penelitian dilakukan di perairan muara Sungai Porong Kabupaten Sidoarjo. Tujuan penelitian ini adalah (1) untuk mengetahui perubahan multi-temporal konsentrasi TSS yang diduga disebabkan oleh tingginya sedimentasi di muara sungai dan (2) menguji hasil pengukuran TSS berdasarkan hasil penginderaan jauh dan data lapang. Citra satelit yang digunakan pada penelitian ini adalah Citra Sentinel-2 akuisisi tahun 2020 sampai dengan 2023. Algoritma yang digunakan untuk estimasi nilai TSS adalah algoritma Liu, Parwati, Laili dan Syarif. Sebanyak 25 titik sampling digunakan untuk perbandingan dan validasi data TSS hasil pengolahan citra dengan pengukuran lapang.Uji akurasi dilakukan mengugunakan 3 parameter yaitu RMSE, MAE dan MAPE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengukuran nilai TSS in-situ berada pada kisaran 48-366 mg/L. Sementara itu, kisaran rata-rata nilai TSS yang diperoleh dari 4 algoritma antara 50 – 250 mg/L. Uji akurasi hasil pengukuran TSS in-situ dibandingkan dengan hasil pengolahan citra satelit mendapatkan nilai MAPE yang bervariasi antara 14.8% - 50.3%. Algoritma Liu menunjukkan hasil nilai TSS yang cukup mewakili pengukuran lapang (R^2=0.75). Penelitian ini menunjukkan bahwa citra satelit dapat digunakan untuk mengestimasi konsentrasi TSS di perairan dengan akurasi yang sedang. Modifikasi algoritma atau pre-processing pada tahap awal pengolahan citra dapat dilakukan untuk meningkatkan akurasi pengukuran.

Kata kunci: *muatan padat terlarut, algoritma, citra Sentinel-2, multi temporal;*

ABSTRACT

Total Suspended Solids (TSS) is a phenomenon that can affect the optical properties of marine waters and can be observed through remote sensing techniques. High concentrations of TSS in a body of water can inhibit photosynthesis, which reduces the dissolved oxygen content and negatively impacts the metabolism of aquatic biota. This study was conducted in the estuarine waters of the Porong River in Sidoarjo Regency. The objectives were (1) to determine multi-temporal changes in TSS concentrations believed to be caused by high sedimentation in the estuary and (2) to evaluate TSS measurements derived from remote sensing against field data. The satellite imagery utilized in this study consisted of Sentinel-2 images acquired from 2020 to 2023. The algorithm employed to estimate TSS values was the Liu, Parwati, Laili, and Syarif algorithm. A total of 25 sampling points were established for comparison and validation of TSS data from image processing and field measurements. Accuracy tests were conducted using three parameters: RMSE, MAE, and MAPE. The study's results indicated that in situ TSS values ranged from 48 to 366 mg/L. In contrast, the average TSS values derived from the four algorithms ranged from 50 to 250 mg/L. The accuracy test comparing in situ TSS

measurements with satellite image processing results yielded MAPE values between 14.8% and 50.3%. The Liu algorithm produced TSS values that were fairly representative of field measurements (R^2 = 0.75). This study demonstrates that satellite imagery can be used to estimate TSS concentrations in water bodies with moderate accuracy. Improvements to the algorithm or preprocessing during the initial stages of image processing may enhance measurement accuracy.

Keywords: *total suspended solids, algorithm, Sentinel-2 images, multi-temporal*

PENDAHULUAN

Muara Sungai Porong terletak di Kabupaten Sidoarjo tepatnya pada koordinat 07°32'40'' LS dan 112°53'09'' BT. Sejak terjadinya bencana lumpur Lapindo, kawasan muara Sungai Porong dijadikan sebagai tempat pembuangan aliran lumpur. Hal tersebut membuat terjadinya sedimentasi yang tinggi sehingga endapan lumpur yang dibuang membentuk beberapa pulau/delta dengan luas mencapai 275.606 m^2 dan saat ini ditumbuhi vegetasi mangrove (Bagaskara *et al*., 2017). Tingginya kandungan partikel padat dalam badan perairan dapat diukur melalui berbagai cara, antara lain dengan metode gravimetri yang didasarkan pada prinsip pengukuran berat residu padatan setelah proses penyaringan dan pengeringan (Istriyani *et al.,* 2024).

Total Suspended Solids (TSS) mengacu pada jumlah material yang berasal dari bahan organik atau anorganik yang terlarut dalam badan air. Proses alami seperti erosi tanah yang berasal dari daratan kemudian terbawa oleh aliran sungai menuju laut menyebabkan masuknya material tersuspensi ke perairan muara sungai (Rosyadewi & Hidayah, 2020). Sementara itu aktivitas antropogenik dalam bentuk deforestasi, pertanian, dan urbanisasi juga berdampak signifikan terhadap transportasi sedimen kedalam perairan (Irawan *et al.,* 2013). Tingkat kekeruhan yang tinggi akan mempengaruhi tingginya kadar TSS pada kolom air, menghalangi sinar matahari masuk ke dalam kolom air dan menurunkan laju fotosintesis (Rizka *et al.,* 2020; Ajiperwata *et al.,* 2023). Lebih lanjut, TSS mempengaruhi oksigen terlarut, siklus biogeokimia laut, tingkat kecerahan, proses produksi primer di lautan, dan parameter lainnya (Marlina *et al*., 2017; Ofiyen & Puryanti, 2022). Selain itu, analisis TSS juga digunakan untuk menilai kualitas air. Semakin tinggi nilai TSS pada suatu perairan maka semakin tinggi pula tingkat pencemaran akibat adanya bahan-bahan tidak larut yang tidak dapat mengendap secara langsung (Wibowo *et al*., 2021; Wifarullah & Marlina, 2021).

Adanya bahan terlarut menyebabkan perubahan warna secara visual dan mempengaruhi sifat optik air laut. Hal ini merupakan fenomena terukur yang dapat diamati dengan menggunakan teknik penginderaan jauh (Umar *et al.,* 2018). Citra satelit terutama yang memiliki sensor untuk saluran cahaya tampak (*visible light bands*) dapat digunakan dalam pendugaan konsentrasi TSS, khususnya di kawasan muara sungai (Kusumaningrum, 2023). Pada prosesnya, beberapa algoritma perlu digunakan untuk mengubah nilai reflektan pada citra menjadi nilai konsentrasi TSS. Tersedianya akses citra satelit multi-temporal membuat pemantauan TSS secara periodik dapat lebih mudah dilakukan. Salah satu citra satelit yang banyak digunakan untuk pemantauan TSS di berbagai lokasi perairan di Indonesia adalah citra Landsat. Citra Landsat ETM 7 dan Landsat 8 OLI antara lain digunakan untuk pemantauan TSS di Teluk Benoa (Kamajaya et al., 2021), muara Sungai Citarum (Hidayat & Khakhim, 2017), Teluk Lamong (Hariyanto & Krisananda, 2019) dan Teluk Jakarta (Zulfikar & Kusratmoko, 2017). Kisaran akurasi pada penelitian-penelitian tersebut cukup bervariasi dari akurasi rendah (MAPE < 20%) hingga sedang (20%<MAPE<50%).

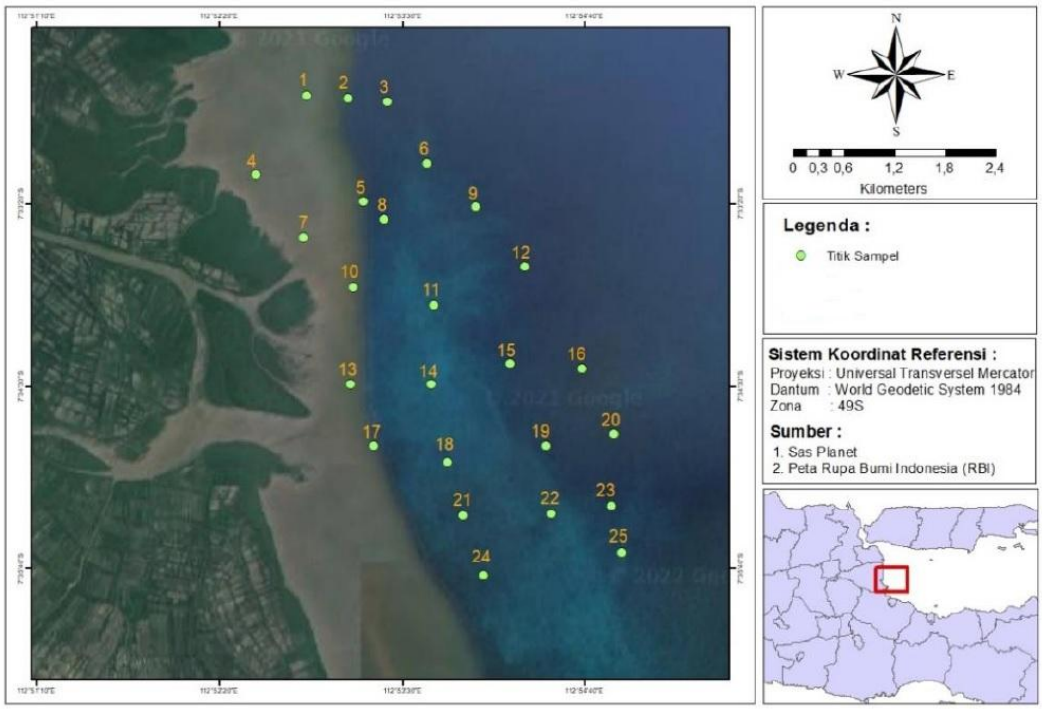
Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah memungkinkan para peneliti untuk melakukan pemantauan kualitas air secara periodik pada area yang luas. Sebagai parameter yang mempengaruhi sifat optik air, distribusi TSS adalah khususnya di perairan estuari merupakan obyek yang telah banyak diteliti. Ketersediaan data lapang sangat penting sebagai dasar validasi hasil pengolahan citra. Secara umum, peneliti mengkalibrasi informasi penginderaan jauh menggunakan informasi lapangan untuk mengukur akurasi suatu algoritma. Namun, algoritma yang dikembangkan sangat bergantung pada wilayah. Keterbatasan adalah algoritma TSS yang dikembangkan yaitu bahwa algoritma tersebut hanya dapat diterapkan pada wilayah penelitian dan kurang sesuai digunakan pada wilayah lain. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan unsur air, seperti warna sedimen, bentuk ukuran dan bahkan konsentrasi yang dapat mempengaruhi penyerapan cahaya, hamburan dan pemantulan (Sa'ad *et al.,* 2021).

Penelitian ini mengaplikasikan beberapa algoritma TSS pada citra Sentinel-2 untuk memetakan perubahan spasio-temporal TSS di Muara Sungai Porong. Citra satelit Sentinel-2 dipilih pada penelitian ini karena memiliki karakteristik spektral yang relatif sama dengan citra Landsat 8 OLI khususnya pada saluran spektral cahaya tampak. Namun, perbedaan yang signifikan antara kedua citra tersebut adalah pada resolusi spasial dimana citra Sentinel-2 memiliki resolusi 10 meter dibandingkan dengan resolusi 30 meter pada citra Landsat. Perbedaan resolusi spasial ini diduga akan berpengaruh pada akurasi pengukuran nilai TSS di perairan muara sungai (Istriyani *et al.,* 2024). Penelitian ini bertujuan untuk (1) memetakan sebaran konsentrasi TSS menggunakan data citra satelit Sentinel-2 multi temporal, dan (2) membandingkan beberapa algoritma konsentrasi TSS berdasarkan analisis citra dengan pengukuran *in-situ*. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait dinamika sebaran TSS di perairan muara Sungai Porong serta meningkatkan pemahaman analisis parameter kualitas air menggunakan citra satelit.

MATERI DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di perairan estuari muara Sungai Porong pada bulan Juli 2022 sampai dengan April 2023. Data yang digunakan untuk penelitian ini terdiri dari data citra satelit Sentinel-2 dan data lapang yang diperoleh dari pengukuran TSS di 25 titik sampling. Pada setiap titik sampling dilakukan 5 kali pengambilan sample air (**Gambar 1**). Analisis sample air untuk mengetahui konsentrasi TSS dilakukan dengan metode gravimetri berdasarkan pada SNI 06-6989.3-2004 di Laboratorium Oseanografi Prodi Ilmu Kelautan Universitas Trunojoyo Madura. Selain itu untuk data pendukung, dilakukan pula pengukuran beberapa parameter kualitas air yaitu *Dissolved Oxygen* (DO), kecerahan, pH dan salinitas. Parameter-parameter kualitas air tersebut dipilih karena secara langsung maupun tidak langsung dipengaruhi oleh konsentrasi TSS. Kadar TSS yang tinggi dapat mengurangi penetrasi cahaya matahari yang menyebabkan kecerahan air menjadi rendah, sehingga menghambat proses fotosintesis. Kondisi ini dapat mengurangi konsentrasi oksigen terlarut dalam air (Istriyani *et al.,* 2024). Selanjutnya partikel TSS yang terurai (dekomposisi) dapat menjadi bagian dari TDS (total padatan terlarut) yang secara tidak langsung memengaruhi komposisi zat terlarut total dalam air, termasuk garam (salinitas) (Hidayah *et al.,* 2023). TSS sendiri bukan penentu utama pH, tetapi padatan ini sering kali menjadi sumber kontaminan atau material yang memengaruhi pH saat terurai atau ketika proses pengolahan air diterapkan, seperti yang terjadi pada penggunaan tawas atau karbon aktif untuk mengontrol TSS (Wadi'ah *et al.,* 2025).



Gambar 1. Lokasi Penelitian dan Titik Pengambilan Sample Air di Muara Sungai Porong Sidoarjo

Pengolahan Citra Satelit

Citra satelit Sentinel-2 Level 1C multitemporal yang digunakan pada penelitian ini diundah dari situs resmi https://scihub.copernicus.eu akuisisi dari tahun 2020 sampai dengan 2023. Waktu pengambilan citra dibuat sedekat mungkin dengan waktu pengambilan data lapang yaitu antara bulan Juli sampai dengan September. Citra Sentinel-2 adalah citra satelit resolusi medium selain Landsar dan ALOS yang saat ini banyak digunakan untuk mengamati obyek-obyek di permukaan bumi. Kelebihan citra Sentinel-2 dibandingkan dengan citra lainnya adalah resolusi spasial khususnya pada panjang gelombang tampak yang lebih tinggi yaitu 10 meter. **Tabel 1** dibawajh ini menjelaskan karakteristik citra Sentinel-2.

Tabel 1. Karakteristik Spektral dan Spasial Citra Sentinel-2

Sentinel-2 Bands	Central Wavelenght (µm)	Resolusi Spasial (m)
Band 1 – Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 – Biru (Blue)	0.490	10
Band 3 – Hijau (Green)	0.560	10
Band 4 – Merah (Red)	0.665	10
Band 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 – NIR	0.842	10
Band 8A – Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 – Water Vapour	0.945	60
Band 10 – SWIR Cirrius	1.342	60
Band 11 – SWIR	1.610	20
Band 12 – SWIR	2.190	20

Perangkat lunak *Sentinel Application Platform* (SNAP) digunakan untuk mengolah citra Sentinel-2A. Citra yang diunduh kemudian dikoreksi menggunakan metode *Bottom of Atmospheric* (BoA), yang dirancang untuk menghilangkan efek atmosfer dengan menggunakan *Toolbox Sen2Core*. Proses resampling selanjutnya dilakukan untuk proses koreksi geometrik yang mengatur resolusi pada setiap band menjadi resolusi 10 m dan mempertajam citra. Proses *subset* dan *masking* citra dilakukan untuk menentukan area kajian dan memisahkan daratan dan perairan. Algoritma NDWI (*Normalized Difference Water Index*) digunakan untuk masking area. Hasil algoritma NDWI membagi citra ke dalam kelas nilai piksel. Jika piksel NDWI > 0 maka wilayah tersebut dikategorikan sebagai daratan, sebaliknya jika piksel NDWI < 0 maka wilayah tersebut dikategorikan sebagai perairan. Untuk menghasilkan nilai konsentrasi TSS dari nilai reflectance pixel citra Sentinel-2, pada penelitian ini menggunakan 4 algoritma yang dijelaskan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Algoritma TSS yang Digunakan

Algoritma	Persamaan
Liu (2017)	TSS (mg/) = $2950\ x\ B7^{1,357}$
Parwati (2014)	TSS (mg/l) = $3{,}323\ x\ e^{(34{,}099\ x\ B4)}$
Laili (2015)	TSS (mg/l) = $31{,}42\ x\ (\frac{Log\ (B2)}{Log\ (B4)} - 12{,}719)$
Syarif (2004)	TSS (mg/l) = $8{,}1429\ x\ e^{(23{,}704\ x\ B4)}$

Analisis Sample Air untuk Kadar TSS

Analisis TSS laboratorium dilakukan sesuai SNI 06-6989.3-2004 menggunakan metode gravimetri. Metode gravimetri memastikan pengendapan zat padat yang tidak larut dalam air. Analisis ini dilakukan dengan menyaring sampel air laut yang sudah dihomogenisasi, kemudian dipindahkan sebanyak 10 mL ke kertas saring. Kertas saring yang mengandung residu atau padatan kemudian dipanaskan selama 1 jam pada suhu 103°C – 105°C. Setelah 1 jam di dalam oven, sampel didinginkan dalam desikator selama 15 menit sebelum ditimbang untuk mengetahui berat kertas saring dan residu. Ulangi langkah ini sampai diperoleh berat residu antara 2,5 mg dan 200 mg. Penelitian ini menggunakan volume sampel air sebanyak 250 ml dari setiap plot pengambilan sampel untuk mengetahui berat sisa yang konstan. Rumus perhitungan akhir TSS disajikan pada persamaan dibawah ini :

$$TSS\ (mg\ /\ l) = \frac{(A - B) \times 1000}{Volume\ (L)} \quad \text{..... (1)}$$

Dimana, A adalah Berat kertas saring dan residu (gr); B adalah Berat kertas saring (gr); V adalah Volume sample air (ml)

Uji Akurasi

Setelah menentukan konsentrasi TSS, dilakukan uji akurasi dengan membandingkan konsentrasi TSS dari data lapangan (Xi) dengan hasil pengolahan citra dari citra Sentinel-2A (X). Perbedaan antara pengukuran diwakili oleh nilai RMSE (*Root Mean Square Errors*), MAE (*Mean Average Error*) dan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dengan persamaan-persamaan sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Xi-X)^2}{N}} \quad \text{..... (2)}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}\frac{|Xi - X|}{Xi}\ x\ 100\% \quad \text{..... (3)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N}|Xi - X|}{N} \quad \text{..... (4)}$$

Kisaran nilai RMSE dan MAE bisa dari 0 hingga tak terhingga (∞), namun nilai yang lebih rendah selalu lebih baik karena menunjukkan prediksi yang lebih akurat. Sementara itu, kisaran nilai uji akurasi yang tinggi dengan menggunakan MAPE adalah <10%, sedangkan nilai MAPE antara 10%-20% dan 20%-50% dapat dikategorikan memiliki akurasi baik dan cukup. Sedangkan nilai MAPE >50% menunjukkan hasil uji yang dilakukan tidak akurat (Lewis, 1982).

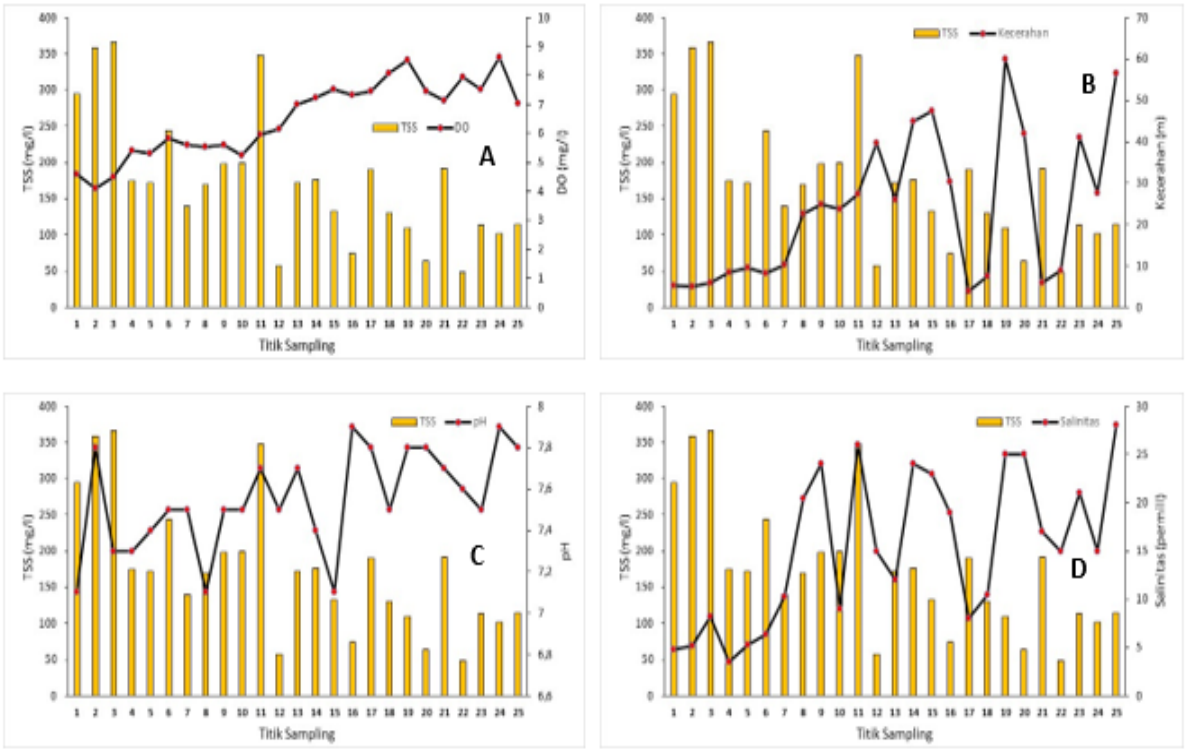
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Lapang TSS dan Beberapa Parameter Kualitas Air

Pengukuran TSS dan beberapa parameter kualitas air secara *in-situ* di muara Sungai Porong dilakukan di 25 titik sampling yang ditentukan secara random dengan 5 kali pengulangan yang dilakukan pada periode waktu Juli –September 2022 (**Gambar 1**). Rata-rata hasil pengukuran menunjukkan bahwa selama periode penelitian tercatat TSS tertinggi ditemukan di stasiun 3 yang mencapai 366 mg/l ± 15,3 mg/l. Sementara TSS terendah ditemukan di stasiun 22 dengan nilai TSS mencapai 48 mg/l ± 5,81 mg/l. Secara umum, dari ke-25 stasiun pengambilan sample tidak terlihat adanya pola pengelompokan stasiun yang jelas berdasarkan nilai TSS, meskipun nilai TSS rata-rata tertinggi dapat ditemukan di beberapa stasiun yang berdekatan yaitu stasiun 1,2 dan 3 dengan kisaran rata-rata TSS mencapai 295 mg/l – 366 mg/l. Secara lebih detail hasil pengukuran *in-situ* TSS disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Pengukuran TSS Muara Sungai Porong

No	Koordinat Geografis		Rata-rata TSS *In-Situ* (mg/L)	Simpangan Baku (mg/L)
	Latitude (LS)	Longitude (BT)		
1	07°32'39"	112°53'53"	295	12,8
2	07°32'40"	112°53'09"	358	21,4
3	07°32'41"	112°53'24"	366	15,3
4	07°33'09"	112°52'34"	175	10,8
5	07°33'19"	112°53'15"	172	11,05
6	07°33'05"	112°53'39"	244	20,05
7	07°33'33"	112°52'52"	140	13,8
8	07°33'26"	112°53'23"	169	8,21
9	07°33'21"	112°53'58"	198	5,85
10	07°33'52"	112°53'11"	200	10,23
11	07°33'59"	112°53'42"	348	23,52
12	07°33'44"	112°54'17"	57	9,26
13	07°34'29"	112°53'10”	172	11,7
14	07°34'29"	112°53'41"	176	10,27
15	07°34'21"	112°54'11"	133	12,4
16	07°34'23"	112°54'39"	74	5,21
17	07°34'53"	112°53'19"	190	11,27
18	07°34'59”	112°53'47"	130	9,54
19	07°34'53"	112°54'25"	110	7,75
20	07°34'48"	112°54'51"	64	5,32
21	07°35'20"	112°53'53"	191	15,21
22	07°35'19"	112°54'27"	48	5,81
23	07°35'16"	112°54'50"	114	10,4
24	07°35'43"	112°54'01"	102	11,07
25	07°35'34"	112°54'54"	115	9,54

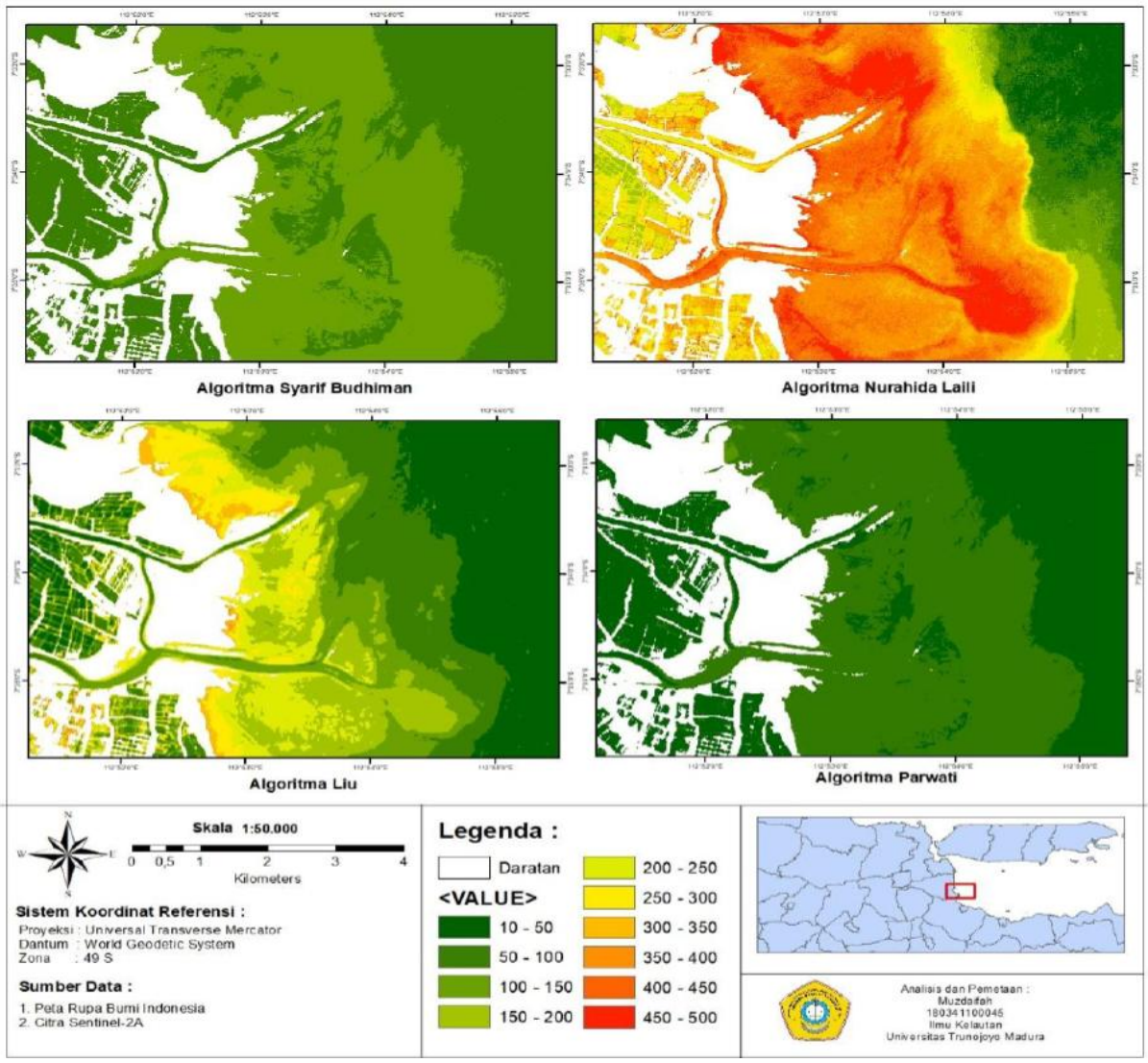


Gambar 2. Rata-Rata Hasil Pengukuran Parameter Kualitas Air DO (A), Kecerahan (B), pH (C) dan Salinitas (D) dibandingkan dengan Rata-rata TSS Hasil Pengukuran di Muara Sungai Porong

Gambar 2 diatas menunjukkan rata-rata sebaran nilai konsentrasi TSS di seluruh titik sampling dan dibandingkan dengan hasil pengukuran berbagai parameter kualitas air lainnya. Seperti yang disajikan pada **Gambar 2a,** pada titik-titik pengamatan dengan konsentrasi TSS yang tinggi terlihat memiliki kandungan DO yang rendah. Hal ini dapat dijumpai pada titik 1-3 dengan TSS >290 mg/L ternyata memiliki kandungan DO yang rendah yaitu berkisar antara 4,11 – 4,59 mg/L. Sedangkan pada titik 18-25 dengan TSS yang mencapai <200 mg/L memiliki DO dengan kisaran >7 mg/L. Pola yang relatif sama dapat ditemukan pada **Gambar 2b** yang menunjukkan kecenderungan antara TSS dan kecerahan, dimana titik sampling dengan TSS yang tinggi akan memiliki kecerahan yang rendah. Tingginya jumlah partikel yang tersuspensi membuat air laut menjadi keruh, sehingga dapat menghambat penetrasi cahaya matahari. Kondisi ini membuat proses fotosintesis oleh fitoplankton menjadi tidak optimal (Suhendar *et al.,* 2020; Hidayah *et al.,* 2023). Hal ini juga dapat menjelaskan rendahnya nilai DO pada titik sampling dengan TSS yang tinggi. Selanjutnya dari **Gambar 2c** dapat dilihat bahwa titik-titik sampling dengan TSS yang rendah cenderung memiliki pH yang lebih tinggi namun tidak sampai melebihi batas normal pH air laut yang mencapai 7-8. Pada **Gambar 2d** dan juga dapat dikonfirmasi melalui lokasi titik sampling (**Gambar 1**), terlihat bahwa lokasi TSS yang tinggi terdapat di sekitar muara sungai yang dicirikan dengan salinitas yang rendah (<10 $^{oo}/_{o}$).

Pengolahan Citra Sentinel-2 untuk Estimasi TSS

Pengolahan citra Sentinel-2 untuk mendapatkan sebaran spasio-temporal TSS di muara Sungai Porong dilakukan untuk citra tahun 2020 – 2023 menggunakan 4 algoritma (**Tabel 2**). Hasil pengolahan selama periode tersebut kemudian dirata-rata. Peta hasil rata-rata TSS yang diperoleh dan dikelompokkan menjadi beberapa kelas disajikan pada **Gambar 3**. Hasil estimasi TSS menggunakan algoritma Laili tampak menunjukkan perbedaan besar khususnya tepat di bagian muara sungai dibandingkan ketiga algoritma TSS lainnya. Kisaran rata-rata TSS yang diperoleh pada algoritma ini mencapai 250 – 500 mg/L. Sedangkan ketiga algoritma lain menunjukkan kisaran TSS antara 50 – 250 mg/L. Untuk area yang lebih jauh dari muara sungai, keempat algoritma menunjukkan rata-rata-rata kisaran TSS yang relatif seragam yaitu berada pada rentang 10-100 mg/L.



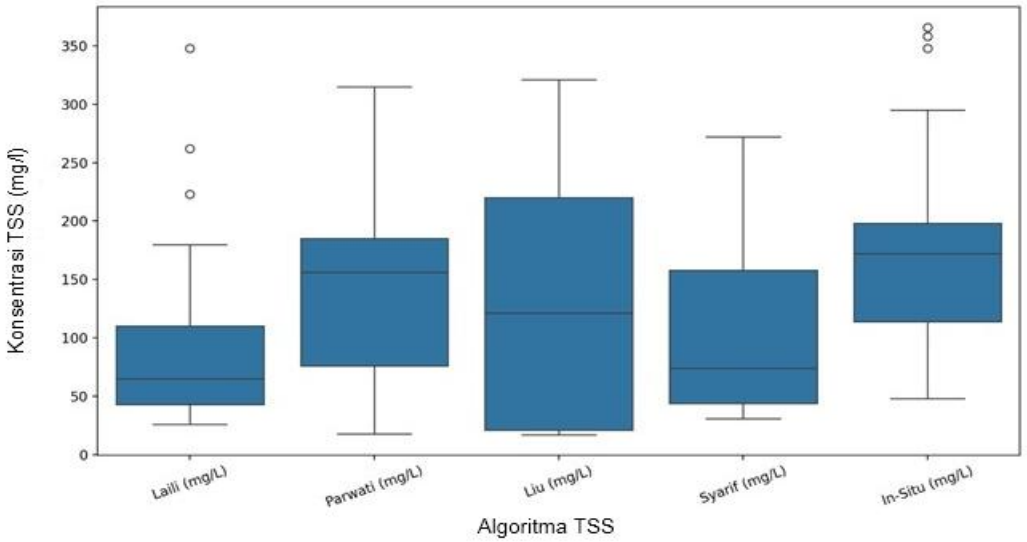
Gambar 3. Distribusi Spasial Rata-Rata TSS Hasil Pengolahan Citra Sentinel-2 Muara Sungai Porong 2020-2023

Penerapan algoritma TSS pada citra Sentinel-2 yang ditunjukkan pada **Gambar 3** memperlihatkan dengan jelas perbedaan kenampakan badan air dengan kandungan TSS yang bervariasi. Namun perlu diperhatikan bahwa terdapat area darat yang tidak dapat sepenuhnya dapat dipisahkan dari badan air. Hal tersebut disebabkan penggunaan lahan di kawasan muara Sungai Porong dominan digunakan untuk tambak, sehingga sebagian besar tergenang oleh air. Kondisi ini menimbulkan kesulitan dalam pemisahan piksel daratan dan badan air jika hanya menggunakan indeks NDWI saja, oleh karena itu direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan masking menggunakan poligon daratan. Nilai-nilai statistik hasil pengolahan TSS menggunakan ke-empat algoritma dan data *in-situ* ditampilkan dalam grafik Box-Plot berikut ini (**Gambar 4**).

Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa rata-rata TSS yang dihasilkan dari 4 algoritma pengolahan citra Sentinel-2 dan pengukuran lapang berbeda nyata ($p<0.05$; $df = 4$; $F=3.20$).

Selain itu, berdasarkan perbandingan visual spasial pada Gambar 3 dan distribusi statistik pada Gambar 4, terlihat bahwa setiap algoritma TSS menghasilkan pola sebaran dan rentang nilai yang berbeda, baik secara spasial maupun numerik. Algoritma Nurahida Laili cenderung menghasilkan nilai TSS yang lebih tinggi terutama di wilayah perairan terbuka dekat muara, yang ditunjukkan oleh dominasi kelas warna oranye–merah serta nilai maksimum yang tinggi pada box-plot. Sebaliknya, algoritma Syarif Budhiman dan Parwati menunjukkan distribusi nilai yang relatif lebih rendah dan lebih homogen, yang mengindikasikan sensitivitas algoritma tersebut

terhadap konsentrasi TSS sedang hingga rendah. Algoritma Liu memperlihatkan variasi nilai yang paling lebar, tercermin dari rentang interkuartil yang besar pada box-plot, sehingga menunjukkan respons yang lebih fluktuatif terhadap variasi kekeruhan perairan.



Gambar 4. Boxplot untuk Parameter Statistik TSS Hasil Analisis Citra dan Data In-Situ

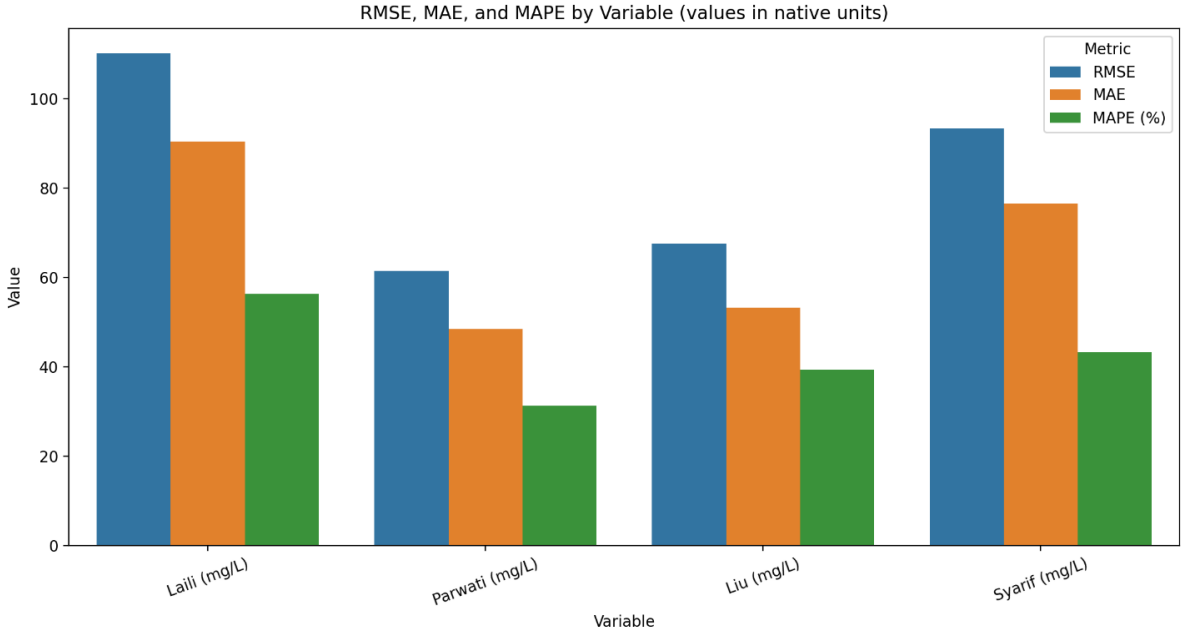
Uji Akurasi Data TSS *In-situ* dan Pengolahan Citra Sentinel-2

Pengujian hasil pengolahan citra Sentinel-2 multi temporal untuk estimasi nilai TSS di muara Sungai Porong dari 4 algoritma dilakukan dengan perbandingan antara nilai piksel pada citra dengan hasil pengukuran TSS *in-situ*. Nilai piksel diambil sesuai dengan koordinat 25 titik pengambilan sample. Perbandingan hasil TSS in-situ dan pengolahan citra disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Perbandingan Nilai TSS Hasil Pengolahan Citra Sentinel-2 dan Data In-Situ

Titik Sampling	Laili (mg/L)	Parwati (mg/L)	Liu (mg/L)	Syarif (mg/L)	*In-Situ* (mg/L)
	Rataan	Rataan	Rataan	Rataan	Rataan
1	180	207	321	184	295
2	262	238	321	185	358
3	348	315	320	272	366
4	117	199	222	73	175
5	78	186	122	167	172
6	67	172	220	156	244
7	110	183	122	166	140
8	170	166	121	56	169
9	48	130	219	74	198
10	108	175	181	60	200
11	43	281	320	158	348
12	28	60	77	33	57
13	89	59	121	152	172
14	58	170	21	57	176
15	35	44	119	42	133
16	223	109	17	84	74
17	67	185	222	165	190
18	63	156	22	151	130
19	41	107	120	145	110
20	29	46	18	31	64
21	65	76	21	46	191
22	48	87	20	44	48
23	34	98	19	38	114
24	44	18	19	40	102
25	26	30	17	32	115

Perhitungan uji akurasi TSS pada penelitian ini menunjukkan hasil yang bervariasi antar algoritma yang digunakan (**Gambar 5**). Dari keempat algoritma yang digunakan, algoritma Laili memiliki nilai MAPE terbesar yaitu 50,3% dan dapat dikategorikan memiliki akurasi yang rendah. Sementara itu algoritma Liu dan Syarif memiliki nilai MAPE yang juga relatif tinggi yaitu 31,05% dan 36,8%. Nilai MAPE terendah dan dapat dikategorikan memiliki akurasi yang cukup tinggi adalah algoritma Parwati dengan nilai MAPE 14.8%. Secara umum akurasi TSS hasil pengolahan citra Sentinel-2 pada penelitian ini menghasilkan nilai >10%. Meskipun masih dapat diterima, namun beberapa faktor yang menyebabkan rendahnya akurasi perlu untuk dibahas.



Gambar 5. Perbandingan Nilai RMSE, MAE dan MAPE TSS Hasil Analisis Citra Sentinel 2

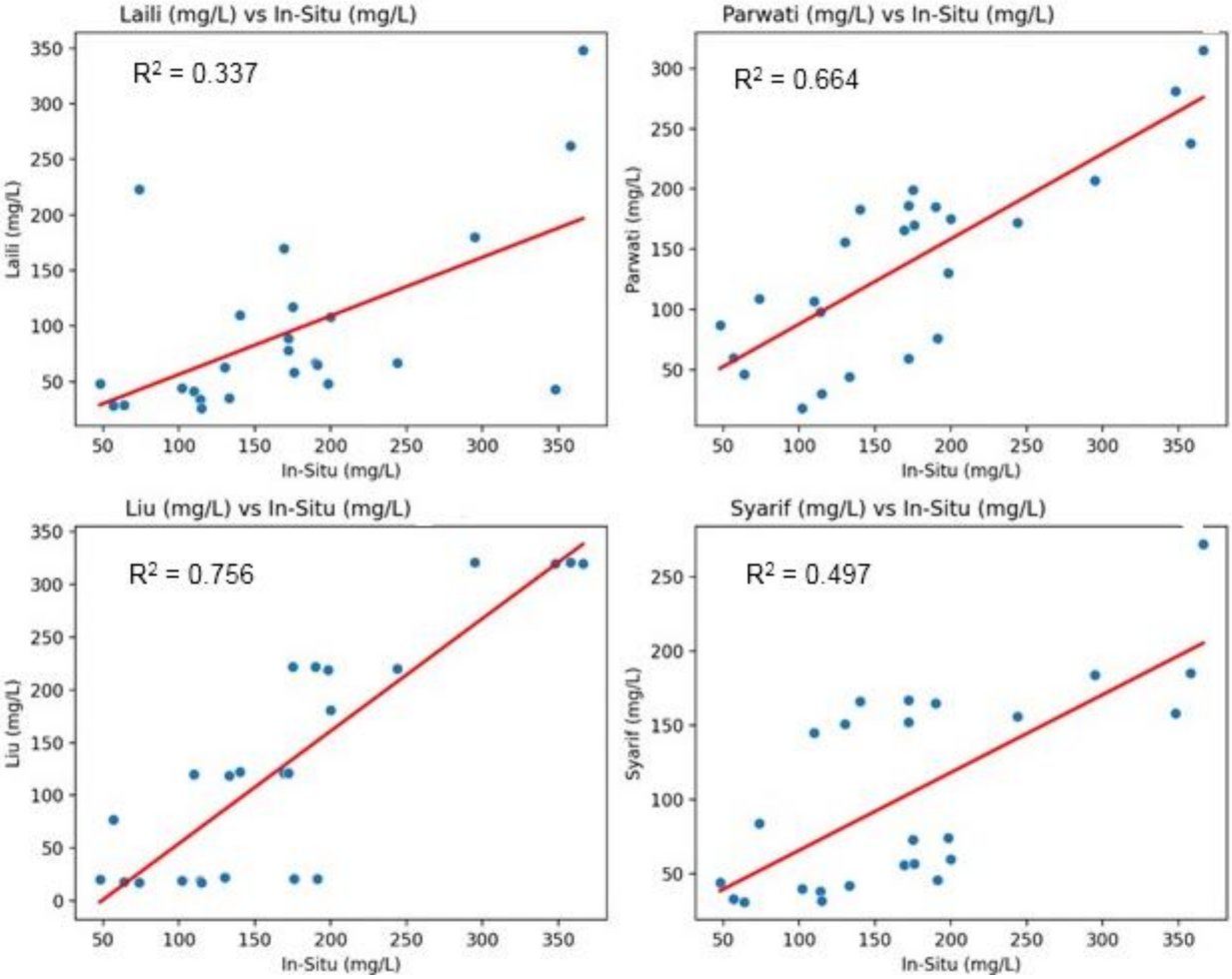
Nilai kesalahan yang tinggi pada pengujian hasil pengukuran TSS salah satunya dipengaruhi oleh ukuran piksel atau resolusi spasial citra. Setiap piksel akan mewakili satu informasi suatu citra, maka semakin kecil ukuran piksel yang terekam oleh sensor maka sensor tersebut semakin baik karena dapat menyajikan data dan informasi yang semakin rinci (Oktaviani & Yarjohan, 2016; Rejeki *et al.,* 2023). Pada citra Sentinel-2 dengan resolusi 10 meter, dapat dimungkinkan bahwa nilai reflektan yang terekam bukan nilai reflektan yang murni kandungan TSS, tapi masih mendapatkan pengaruh dari obyek-obyek lain di sekitarnya (Prasetiyo *et al,* 2019). Faktor lain yang menyebabkan kurang akuratnya pengukuran TSS dengan citra satelit adalah pengaruh awan yang terekan pada citra sehingga menghalangi reflektansi perairan terhadap cahaya matahari (Utami *et al,* 2016; Laili *et al.,* 2020).

Selanjutnya untuk menginvestigasi lebih jauh seberapa besar hubungan antara nilai TSS hasil pengolahan citra Sentinel-2 dengan data in-situ, maka dilakukan analisis regresi dan korelasi. Model regresi digunakan untuk mengidentifikasi pola atau hubungan antara pengukuran TSS in-situ dan hasil pengolahan citra. Dalam model regresi ini nilai TSS hasil pengukuran in-situ digunakan sebagai variabel bebas (X) dan nilai TSS hasil pengolahan citra untuk masing-masing algoritma dijadikan sebagai variabel terikat (Y). Model dan grafik regresi yang diperoleh disajikan pada **Gambar 6**.

Berdasarkan hasil model regresi, secara umum terlihat adanya hubungan linear antara nilai TSS hasil pengambilan data lapang dengan nilai TSS yang diperoleh dari pengolahan citra. Namun, dari keempat algoritma yang digunakan terlihat bahwa algoritma Laili dan algoritma Syarif memiliki koefisien determinasi (R^2 Laili = 0.33 dan R^2 Syarif = 0.49) paling rendah dibandingkan algoritma lainnya. Sementara itu model regresi yang dibentuk oleh algoritma Liu (R^2 = 0.75) menunjukkan kesesuaian yang cukup tinggi dengan hasil pengukuran TSS in-situ, diikuti oleh algoritma Parwati (R^2 = 0.66). Sedangkan nilai koefisien determinasi yang rendah pada model regresi algoritma Laili dan Syarif menunjukkan relatif tingginya perbedaan nilai TSS yang terukur dari pengolahan citra terhadap data lapang. Hasil ini konsisten dengan pengujian akurasi dimana

algoritma Laili memiliki tingkat akurasi terendah dengan MAPE = 50.3%.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah memungkinkan para peneliti untuk melakukan pemantauan kualitas air secara periodik pada area yang luas. Sebagai parameter yang mempengaruhi sifat optik air, distribusi TSS adalah khususnya di perairan estuari merupakan obyek yang telah banyak diteliti. Ketersediaan data lapang sangat penting sebagai dasar validasi hasil pengolahan citra. Secara umum, peneliti mengkalibrasi informasi penginderaan jauh menggunakan informasi lapangan untuk mengukur akurasi suatu algoritma. Namun, algoritma yang dikembangkan sangat bergantung pada wilayah. Keterbatasan adalah algoritma TSS yang dikembangkan yaitu bahwa algoritma tersebut hanya dapat diterapkan pada wilayah penelitian dan kurang sesuai digunakan pada wilayah lain. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan unsur air, seperti warna sedimen, bentuk ukuran dan bahkan konsentrasi yang dapat mempengaruhi penyerapan cahaya, hamburan dan pemantulan (Sa'ad *et al.,* 2021).



Gambar 6. Model Regresi Linear Hubungan antara Hasil Pengukuran TSS In-Situ dan Hasil Pengolahan Citra Sentinel-2

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah menunjukkan kemampuan citra satelit Sentinel-2 untuk memetakan distribusi TSS menggunakan 4 algoritma berbeda di perairan muara Sungai Porong. Hasil pengukuran TSS in-situ yang dilakukan di 25 titik sampling menunjukkan bahwa rata-rata TSS berada pada kisaran 48-366 mg/L. Sementara itu, rentang nilai TSS yang diperoleh antar algoritma pada pengolahan citra menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Kisaran rata-rata TSS yang diperoleh pada algoritma Laili mencapai 250 – 500 mg/L. Sedangkan ketiga algoritma lain menunjukkan kisaran yang lebih rendah yaitu antara 50-250 mg/L di area muara sungai dan 10-100 mg/L di area perairan terbuka. Pengujian akurasi menggunakan MAPE dan model regresi linear menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara hasil pengolahan TSS menggunakan algoritma Laili

dengan hasil pengambilan data TSS in-situ (MAPE = 50.3% dan R^2 = 0.33).

DAFTAR PUSTAKA

Ajiperwata, D., Indrayanti, E., & Rochaddi, B. 2023. Sebaran Material Padatan Tersuspensi Berdasarkan Data Citra Sentinel-2 di Perairan Tanjung Jati, Jepara. *Jurnal Kelautan Tropis*, *26*(2), 349-356.

Bagaskara, D. P., Widada, S., & Rochaddi, B. 2017. Laju sedimentasi dan pergeseran delta di muara anak sungai Porong Sidoarjo. *Journal of Oceanography*, *6*(4), 607-615.

Hariyanto, T., & Krisananda, H. R. 2019. Pemantauan perairan teluk lamong dengan pengembangan algoritma total suspended solid (TSS) dari data citra satelit multitemporal dan data insitu. *Geoid*, *14*(2), 69-77.

Hidayah, Z., Maula, M., & Wardhani, M. K. 2023. Pemodelan Arus dan Muatan Padatan Tersuspensi di Perairan Estuari Muara Bengawan Solo Ujung Pangkah Gresik. *Buletin Oseanografi Marina*, *12*(1), 87-97.

Hidayat, Y. N., & Khakhim, N. 2017. Pemantauan Distribusi Muatan Padatan Tersuspensi Menggunakan Citra Landsat 8 Oli di Muara Citarum, Jawa Barat. *Jurnal Bumi Indonesia*, *6*(1).

Indrawan, D., Cahyono, M., & Moerwanto, A. S. 2013. Analisis Gerak Mula Partikel Sedimen Kohesif (Studi Kasus Lumpur Lapindo Di Sungai Porong). *Jurnal Teknik Hidraulik*, *4*(1), 39-50.

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: Estimasi Total Padatan Tersuspensi di Muara Ujung Pangkah Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2 Multitemporal. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *16*(3), 293-306.

Kamajaya, G. Y., Putra, I. D. N & Putra, N. G. P. 2021. Analisis sebaran Total Suspended Solid (TSS) berdasarkan citra landsat 8 menggunakan tiga algoritma berbeda di perairan Teluk Benoa. *Bali. Journal of Marine and Aquatic Sciences*, *7*(1), 18-24.

Kusumaningrum, W. 2023. Analisis Spasial TSS dan Klorofil-a Menggunakan Citra Landsat 8 di Perairan Muara Berau, Kecamatan Muara Badak, Kabupaten Kutai Kartanegara. *Maspari Journal: Marine Science Research*, *15*(2), 104-114.

Laili, S., Cahyono, B. E., & Nugroho, A. T. 2020. Analisis kualitas air di danau Batur menggunakan citra Landsat-8 OLI/TIRS multitemporal. *Jurnal Geodesi Dan Geodinamika*, *3*(1), 71-79.

Lewis, C.D. 1982. Industrial and Business Forecasting Methods. London: Butterworths

Marlina, N., Hudori, H., & Hafidh, R. 2017. Pengaruh Kekasaran Saluran dan Suhu Air Sungai pada Parameter Kualitas Air COD, TSS di Sungai Winongo Menggunakan Software QUAL2Kw. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, *9*(2), 122-133.

Ofiyen, C., & Puryanti, D. 2022. Penentuan Kualitas Air Muara Sungai Batang Arau Melalui Pengujian Total Dissolved Solid (TDS), Total Suspended Solid (TSS), dan Kandungan Logam Berat. *Jurnal Fisika Unand*, *11*(3), 278-284.

Oktaviani, A. & Yarjohan. 2016. Perbandingan Resolusi Spasial, Temporal dan Radiometrik Serta Kendalanya. *Jurnal Enggano*, 1(2):74-79.

Prasetiyo, B. A., Rochaddi, B., & Satriadi, A. 2019. Aplikasi citra sentinel-2 untuk pemetaan sebaran material padatan tersuspensi di Muara Sungai Wulan Demak. *Journal of Marine Research*, *8*(4), 379-386.

Rejeki, K. L. S., Putra, I. D. N. N., & Nuarsa, I. W. 2023. Estimasi sebaran konsentrasi total suspended solid (TSS) di Tahura Ngurah Rai Denpasar tahun 2016 dan 2020. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, *9*(1), 51-60.

Rizka, R. F., Purnomo, P. W., & Sabdaningsih, A. 2020. Pengaruh Total Suspended Solid (TSS) Terhadap Densitas Zooxhanthellae Pada Karang Acropora sp. Dalam Skala Laboratorium. *Jurnal Pasir Laut*, *4*(2), 95-101.

Rosyadewi, R., & Hidayah, Z. 2020. Perbandingan laju sedimentasi dan karakteristik sedimen di muara socah bangkalan dan porong sidoarjo. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, *1*(1), 75-86.

Sa'ad, F. N. A., Tahir, M. S., Jemily, N. H. B., Ahmad, A., & Amin, A. R. M. 2021. Monitoring total suspended sediment concentration in spatiotemporal domain over Teluk Lipat utilizing Landsat 8 (OLI). *Applied Sciences*, *11*(15), 7082.

Suhendar, D. T., Sachoemar, S. I., & Zaidy, A. B. 2020. Hubungan Kekeruhan Terhadap Suspended Particulated

Matter (SPM) dan Klorofil Dalam Tambak Udang. *JFMR (Journal of Fisheries and Marine Research)*, *4*(3), 332-338.

Umar, M., Rhoads, B. L., & Greenberg, J. A. 2018. Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences. *Journal of Hydrology*, *556*, 325-338.

Utami, F.P., Prasetyo, Y. & Sukmono, A., 2016. Analisis Spasial Perubahan Luasan Mangrove Akibat Pengaruh Limpasan Sedimentasi Tersuspensi Dengan Metode Penginderaan Jauh (Studi Kasus: Segara Anakan Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*, *5*(1):305-315.

Wadi'ah, N., Pandiangan, M., Irlamaida, S., Nuryadin, A., & Subagiyo, L. 2025. Efektivitas Karbon Aktif Terhadap TSS, TDS dan pH Air Sungai Mahakam. *Jurnal Redoks*, *10*(2), 153-161.

Wibowo, D., Hema, H., Assiddieq, M., Ndibale, W., & Ilham, I. 2021. Analisis Kualitas Air Dengan Parameter TSS, BOD, Detergen dan Fosfat (PO4) pada Sungai Wanggu Kota Kendari. *ENVIROTEK: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, *13*(2), 34-40.

Wifarulah, Y. O., & Marlina, N. (2021). Analisis daya tampung beban pencemar BOD, COD, dan TSS di Sungai Widuri dengan menggunakan software QUAL2Kw. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, *13*(1), 1-16.

Zulfikar, A. A., & Kusratmoko, E. 2017. Pola Sebaran Total Suspended Solid (TSS) di Teluk Jakarta Sebelum dan Sesudah Reklamasi. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 8, pp. 496-502).