

DETEKSI *TURBIDITY FRONT* MENGGUNAKAN CITRA SATELIT SENTINEL-2 HUBUNGANNYA DENGAN OSEANOGRAFI DI ESTUARI BENGAWAN SOLO

TURBIDITY FRONT DETECTION USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGE RELATIONSHIP WITH OCEANOGRAPHY IN BENGAWAN SOLO ESTUARY

Muhammad Abdul Ghofur Al Hakim^{1*}, Setyo Budi Susilo², & Jonson Lumban Gaol²

¹Program Studi Teknologi Kelautan, Sekolah Pascasarjana, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University,
Bogor, 16680, Indonesia

*Email: abdulghofurmuhammad@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

The estuary is a mixing area between the mass of fresh water and seawater, which causes substances in the bottom waters to rise to the surface so that nutrient concentrations become high. Research on estuary water mass confluence still needs to be carried out, especially regarding the turbidity front estuary. So far, this research is limited to in situ data. Therefore remote sensing technology is trying to be applied to detect turbidity front estuary. This study aims to develop local TSS algorithms and detect turbidity fronts based on Sentinel-2 satellite imagery. This research method uses Sentinel-2 imagery to determine the turbidity front boundary based on TSS compared to in situ salinity data and TSS as data validation. The results of this study show that the empirical algorithm obtained from the band ratio (red/(blue+green+red)) on Sentinel-2 has the best results with a correlation coefficient (r) = 0.86. The results of satellite imagery show that the turbidity front estuary occurs at a distance of 1.6 – 2.8 km, while the in situ data occurs at a distance of 2 – 4 km at the Bengawan Solo estuary. There is a difference in the TSS value of 1.9182 mg/L between the in situ data and satellite imagery in the turbidity front estuary area. Seasonal conditions, rainfall and tides affect the concentration and distance of the turbidity front from the river mouth.

Keywords: coastal turbidity, estuary, GIS, suspended sediment, remote sensing

ABSTRAK

Estuari merupakan daerah percampuran antara massa air tawar dan air laut yang menyebabkan zat-zat di dasar perairan naik ke permukaan sehingga konsentrasi unsur hara menjadi tinggi. Penelitian mengenai pertemuan massa air estuari masih perlu dilakukan terutama terkait *turbidity front estuary* karena untuk mengetahui kemampuan citra Sentinel-2 dalam mendeteksi *turbidity front*. Selama ini penelitian ini terbatas dari data *in situ*, oleh karena itu teknologi penginderaan jauh coba diterapkan untuk mendeteksi *turbidity front estuary*. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan algoritma TSS lokal dan mendeteksi *turbidity front* berdasarkan citra satelit Sentinel-2. Metode penelitian ini menggunakan citra Sentinel-2 untuk mengetahui batas *turbidity front* berdasarkan TSS yang dibandingkan dengan data *in situ* salinitas dan TSS sebagai validasi data. Hasil penelitian ini diketahui algoritma empiris yang diperoleh dari band ratio (merah/(biru+hijau+merah)) pada Sentinel-2 memiliki hasil yang terbaik dengan koefisien korelasi (r) = 0,86. Hasil citra satelit menunjukkan bahwa *turbidity front estuary* terjadi pada jarak 1,6 – 2,8 km, sedangkan pada data *in situ* terjadi pada jarak 2 – 4 km di muara Bengawan Solo. Terdapat perbedaan nilai TSS sebesar 1,9182 mg/L antara data *in situ* dengan citra satelit di daerah *turbidity front estuary*. Kondisi musim, curah hujan dan pasang surut memengaruhi konsentrasi dan jarak *turbidity front* dari muara sungai.

Kata kunci: kekeruhan pesisir, material padatan teruspensi, muara, penginderaan jauh, SIG

I. PENDAHULUAN

Estuari merupakan daerah transisi antara daerah ekosistem air tawar dan air laut. Daerah estuari memiliki karakteristik yang unik karena memiliki sistem dinamika yang sangat kompleks akibat pencampuran dari massa air yang berasal dari darat dan laut. Salah satu fenomena yang terjadi di estuari yaitu terjadinya *turbidity front*. *Turbidity front* merupakan fenomena terbentuknya batas air tawar dan air laut akibat adanya pertemuan dua *massa* air yang berbeda antara *massa* jenis air estuari dan *massa* jenis air laut akibat pengaruh *run off* dari sungai sehingga memengaruhi salinitas perairan (Belkin & Cornillon, 2007; Luo *et al.*, 2012). Pada area pertemuan kedua *massa* air ini terjadi pengadukan (*mixing*) yang menyebabkan substansi-substansi yang ada di dasar perairan menjadi naik ke permukaan sehingga konsentrasi nutrisi tinggi (Klemas, 2012). Nutrien yang tinggi pada daerah *turbidity front* berpengaruh terhadap kelimpahan fitoplankton sehingga dapat menjadi daerah yang potensial tempat berkumpulnya ikan, larva ikan, dan lokasi ikan bertelur (Kingsford & Suthers 1996; Katlane *et al.*, 2020). Oleh karena pengamatan dan penelitian *turbidity front* serta dinamikanya perlu dilakukan. Namun demikian, pengamatan dinamika *turbidity front* secara *in situ* sulit dilakukan karena wahana kapal mempunyai keterbatasan dalam pengambilan data secara spasial.

Salah satu alternatif teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk pengamatan *turbidity front* dan dinamikanya adalah teknologi penginderaan jauh melalui pemetaan distribusi *Total Suspended Solid* (TSS) di suatu perairan. Penginderaan jauh memiliki kemampuan yang baik, meliputi area yang luas dan sulit dijangkau sehingga pengambilan data lebih efektif dan efisien (Munthe *et al.*, 2007; Katlane *et al.*, 2020). Beberapa algoritma yang dikembangkan untuk mengestimasi TSS dari citra satelit umumnya bersifat lokal sehingga perlu

dikembangkan untuk memperoleh algoritma yang sesuai pada area penelitian ini (Budiman, 2005; Parwati & Purwanto, 2014; Heltria *et al.*, 2021; Pertiwi *et al.*, 2021; Selamat & Ukkas, 2020).

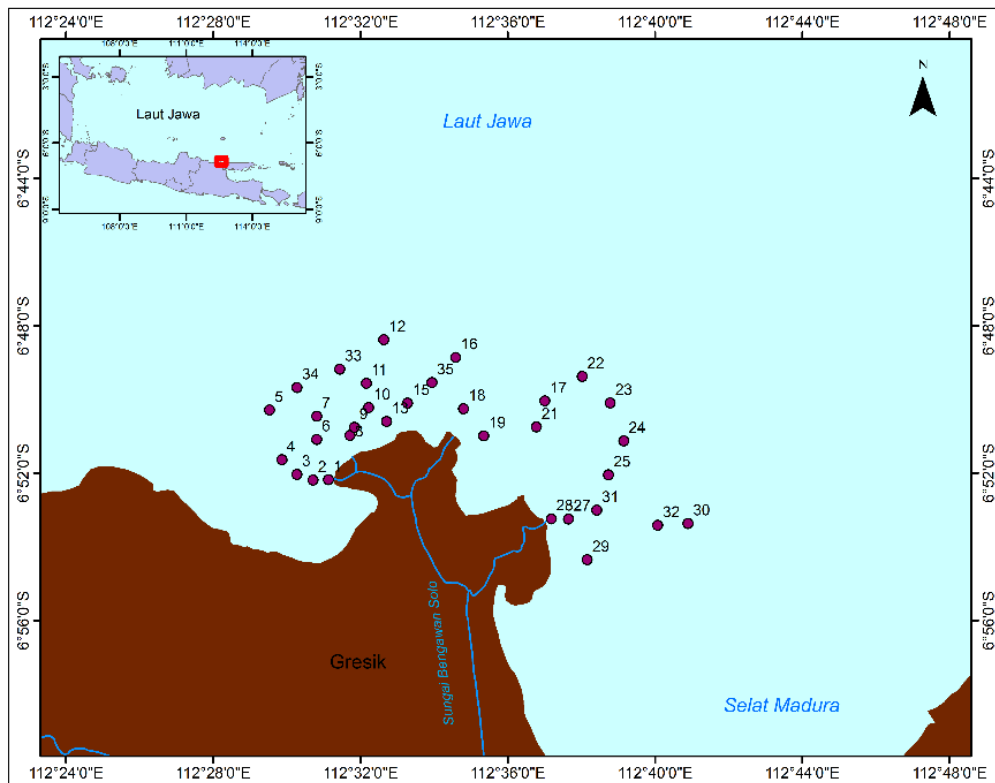
Deteksi *turbidity front* menggunakan citra satelit di perairan pesisir umumnya menggunakan *band visible* dan *near-infrared* (NIR) (400–900 nm) karena lebih sensitif terhadap material tersuspensi di perairan (Heltria *et al.*, 2021; Pertiwi *et al.*, 2021). Deteksi *turbidity front* dan dinamikanya dari citra satelit masih jarang dilakukan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peta distribusi TSS dari citra dapat menggambarkan pola *turbidity front* dan polanya sama dengan data pengukuran lapangan (Heltria *et al.*, 2021).

Kajian *turbidity front* secara *in-situ* maupun dari citra satelit di perairan estuari Bengawan Solo penting untuk dapat digunakan sebagai informasi, khususnya untuk para nelayan penangkap ikan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengembangan algoritma yang tepat secara empiris untuk deteksi TSS sebagai dasar pengamatan *turbidity front* dan faktor-faktor yang mempengaruhi dinamikanya di estuari Bengawan Solo.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari - Desember 2021. Pengambilan data *in situ* dilakukan pada 13 April 2021 di muara sungai Bengawan Solo, Kecamatan Ujungpangkah, Kabupaten Gresik, Jawa Timur. Secara geografis, wilayah Kabupaten Gresik terletak antara 112° BT - 113° BT dan 7°LS - 8° LS (Gambar 1). Pengumpulan data lapangan dilakukan secara *in situ* dari 32 titik untuk mengetahui parameter lingkungan di sekitar estuari Bengawan Solo. Sampel dianalisis di Laboratorium Sistem Informasi Geospasial, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di estuari Bengawan Solo Gresik, Jawa Timur Indonesia

2.2. Alat dan Bahan

Pengambilan data primer menggunakan alat yaitu *Water Quality Checker*, *Global Positioning System (GPS)*, kapal dan kamera. Data satelit yang digunakan adalah Sentinel-2 yang diunduh dari laman <https://earthexplorer.usgs.gov/>, data batimetri dari laman <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas>, data pasang surut dari laman <https://tides.big.go.id> dan data curah hujan (https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/indonesia_monthly/bils/).

2.3. Pengambilan Data *In situ*

Data *in situ* digunakan untuk mendapatkan data salinitas, *turbidity*, suhu, dan konsentrasi klorofil-a. Peta desain survei dari data citra satelit bulan sebelumnya sebagai pedoman untuk menentukan lokasi sampling konsentrasi TSS. Metode yang digunakan dalam pengambilan data lapang adalah *purposive random sampling* dengan

tujuan supaya pengambilan titik sampling dengan memperhatikan jarak titik lokasi dengan *turbidity front*.

2.4. Pengolahan Data *In situ*

Data *in situ* yang diambil pada penelitian ini diolah dengan teknik interpolasi untuk mendapatkan nilai-nilai antara yang tidak ada pada data. Metode interpolasi yang digunakan yaitu kriging, metode ini digolongkan ke dalam estimasi stochastic dengan perhitungan secara statistik dilakukan untuk menghasilkan interpolasi. Interpolasi kriging lebih akurat jika digunakan untuk peta skala besar, dan keakuratannya akan menurun dengan semakin kecilnya skala (Krisdianto *et al.*, 2018).

2.5. Pengolahan Data Citra Sentinel-2

Tahapan awal dalam pengolahan data citra satelit dilakukan koreksi atmosferik untuk menghilangkan pengaruh atmosfer

yang direkam oleh sensor pada citra. Metode yang digunakan untuk koreksi atmosferik adalah *Dark of Subtraction (DOS)*. Selanjutnya dilakukan proses *masking* yang bertujuan untuk memisahkan reflektansi gelombang yang ada di laut dengan yang ada di darat. Proses *masking* dilakukan untuk membuat daratan dan awan memiliki nilai nol sehingga saat penerapan algoritma, objek daratan dan awan tidak terhitung (Sartika *et al.*, 2019; Wicaksono *et al.*, 2019).

2.6. Pengembangan Algoritma Empiris TSS

Pengembangan model untuk menduga konsentrasi TSS perairan dilakukan dengan kombinasi dari nilai-nilai reflektansi pada *band 2* (biru), *band 3* (hijau), dan *band 4* (merah). Reflektansi spektral atau perbandingan reflektansi yang digunakan untuk menduga parameter TSS perairan adalah reflektansi pada *band* tunggal dan rasio antar *band* dari citra Sentinel-2.

Model yang digunakan adalah persamaan regresi sesuai yang tertera pada Tabel 1, *y* merupakan pendugaan nilai parameter *in situ* dan *x* merupakan nilai reflektansi pada *band* yang digunakan. Bentuk persamaan regresi yang digunakan yaitu model hubungan regresi linier, eksponensial, logaritmik dan *power*. Tabel 1 merupakan rumus persamaan dari persamaan model regresi yang digunakan.

Beberapa model pendugaan yang dihasilkan kemudian dipilih model hubungan terbaik yang memiliki koefisien determinasi dan koefisien korelasi (*r*) tertinggi serta simpangan akar nilai tengah (*RMS error*) terkecil (Syaban & Ratnaningrum, 2021).

Nilai koefisien korelasi (*r*) dihitung dengan persamaan (1) berikut:

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots\dots\dots(1)$$

n merupakan jumlah data, *X* merupakan variable independen dan *Y* merupakan variable dependen

Nilai *RMS error* dihitung dengan persamaan (2) berikut:

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{(y - y')^2}{n}} \dots\dots\dots(2)$$

n merupakan jumlah data, *y* merupakan nilai pendugaan nilai TSS *in situ*, *y'* merupakan pendugaan nilai berdasarkan citra satelit.

2.7. Pengolahan data Pasang Surut

Pengolahan data pasang surut menggunakan metode admiralty, metode ini dalam perhitungannya melibatkan kedudukan muka air laut rata-rata dan fungsi sinusoidal untuk mendapatkan komponen harmonik. Nilai komponen harmonik pasang surut kemudian digunakan untuk mendapatkan bilangan *formzahl* guna menentukan tipe pasang surut (Tabel 2) dengan rumus (3) sebagai berikut (Khairunnisa *et al.*, 2021):

$$F = \frac{O_1 + K_1}{M_2 + S_2} \dots\dots\dots(3)$$

F merupakan Bilangan *Formzahl*, *K1* adalah konstanta harmonik pasang surut diurnal akibat gaya tarik matahari dan bulan, *O1* adalah konstanta harmonik pasang surut diurnal akibat gaya tarik bulan, *M2*

Tabel 1. Model regresi persamaan untuk *ratio band*

Model Regresi	Rumus Persamaan Regresi
Regresi linear	$y = a + bx$
Eksponensial	$y = a * \exp(bx)$
Logaritmik	$y = a * \ln(x) + b$
<i>Power</i>	$y = a * x^b$

Wouthuyzen *et al.* (2008)

Tabel 2. Tipe Pasang Surut berdasarkan Bilangan Formzahl

No	Bilangan Formzahl	Jenis Pasang Surut
1.	$0.00 < F < 0.25$	Pasang Surut Harian Ganda
2.	$0.25 < F < 1.5$	Pasang Surut Campuran Condong Harian Ganda
3.	$1.5 < F < 3$	Pasang Surut Campuran Condong Harian Tunggal
4.	$F > 3$	Pasang Surut Harian Tunggal

(Supriyadi *et al.*, 2019)

merupakan konstanta harmonik pasang surut semi diurnal akibat gaya tarik bulan dan S2 adalah konstanta harmonik pasang surut semi diurnal akibat gaya tarik matahari.

2.8. Analisis Deteksi Turbidity Front

Penentuan *turbidity front estuary* adalah berdasarkan data citra satelit yang sudah diolah dengan algoritma TSS dibandingkan dengan data *in situ*. Batasan *front estuary* dari citra satelit ditentukan berdasarkan distribusi konsentrasi TSS. Daerah *turbidity front* secara *in situ* ditentukan berdasarkan profil vertikal data parameter oseanografi *in situ* (Vinh *et al.*, 2018).

2.9. Hubungan Intensitas Curah Hujan dan Turbidity Front

Hubungan antara intensitas curah hujan dengan *turbidity front* dianalisis dengan melihat perubahan jarak terjadinya *turbidity front* dari daratan. Menurut Pamungkas (2019) perhitungan jarak antara 2 titik dalam data spasial menggunakan rumus Euclidean (4) yaitu :

$$Jarak = \frac{\sqrt{(Latitude1 - Latitude2)^2 + (Longitude1 - Longitude2)^2}}{\dots\dots\dots(4)}$$

2.10. Hubungan Pasang Surut dengan Turbidity Front

Hubungan pasang surut dengan *turbidity front* dianalisis untuk mengetahui pengaruh pasang surut terhadap lokasi *turbidity front estuary*. Analisis hubungan pasang surut dengan *turbidity front* menggunakan analisis deskriptif dengan

melihat jarak terjadinya *turbidity front* dengan jenis pasang surut yang terjadi (Heltria *et al.*, 2021).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kondisi Lingkungan Estuari Bengawan Solo

Sungai Bengawan Solo merupakan sungai terbesar di Pulau Jawa yang salah satu muara dari aliran ini berada di Kecamatan Ujungpangkah, Kabupaten Gresik Jawa Timur. Aliran sungai yang bermuara di Kecamatan Ujungpangkah memiliki 4 anak sungai yaitu Sungai Ngapiri dan Lawean mengalir ke arah barat dan Sungai Lebakan dan Sumbalan mengalir ke arah timur atau Selat Madura. Kondisi di sekitar lingkungan sungai yang dipenuhi oleh tambak membuat muara dari aliran sungai ini menjadi tinggi zat hara akibat limbah pakan dari tambak. Selain itu hal ini juga akan memengaruhi topografi muara sungai karena banyaknya suspensi yang di bawa sampai ke muara.

Gambar 2 menunjukkan kondisi batimetri dan distribusi parameter oseanografi di estuari Bengawan Solo. Batimetri di estuari Bengawan Solo tergolong perairan dangkal karena kedalaman perairan sekitar 0 – 20 m. Survei terkait kedalaman perairan dangkal utara Pulau Jawa-Madura sudah beberapa kali dilakukan yang menyatakan kedalaman pantai utara Jawa berkisar 40 - 55 meter (Najid *et al.*, 2012; Atmadipoera *et al.*, 2015).

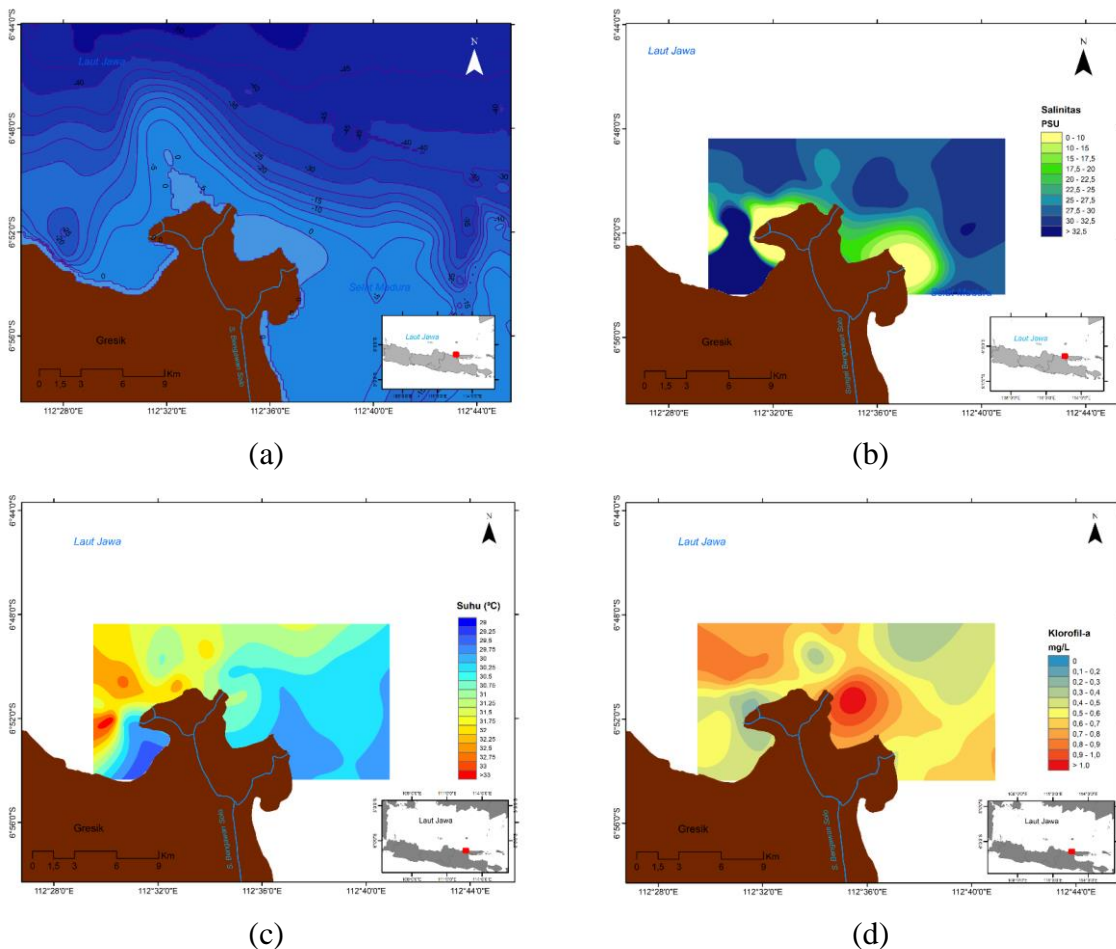
Salinitas di sekitar muara sungai adalah <25,0 PSU, sedangkan salinitas di sekitar *turbidity front estuary* berkisar antara 25,0 – 27,5 PSU dan semakin meningkat

menuju ke arah laut lepas. Batas daerah estuari jika salinitas sudah mencapai 30 PSU (Elliott & McLusky, 2002). Perbatasan antara daerah estuari dan laut lepas terjadi perbedaan massa air yang menyebabkan terjadinya *turbidity front estuary* (Luo *et al.*, 2012).

Konsentrasi *turbidity* tinggi berada pada area di sekitar muara sungai dengan nilai > 400 mg/L dan nilai semakin menurun menuju ke laut lepas. Nilai batas akhir salinitas estuari sebesar 30 PSU membuat konsentrasi *turbidity* sudah mulai lemah pada nilai 40 – 60 mg/L. Oleh karena itu, nilai tengah dari batas akhir *turbidity front* dijabarkan pada kondisi *turbidity* sebesar 50 mg/L. Seperti halnya hasil penelitian yang dilakukan oleh Heltria (2021) bahwa *turbidity front estuary* yang berada di Muara

Sungai Banyuasin sebesar 50 mg/L. Lokasi terjadinya *turbidity front* membuat terjadinya turbulensi sehingga unsur material yang berasal dari estuari akan mengalami *mixing* pada daerah ini (Mendes *et al.*, 2014).

Suhu di muara sungai sebelah barat estuari adalah 31,5 °C – 33 °C dan sebelah timur estuari adalah 29 °C – 30,5 °C. Suhu estuari sebelah Timur lebih rendah daripada sebelah Barat estuari karena adanya pengaruh massa air yang berasal dari Selat Madura yang suhunya lebih rendah yaitu berkisar 28,2 °C – 28,5 °C (Trinugroho *et al.*, 2019). Suhu mencapai hingga 33 °C karena evaporasi dapat meningkatkan suhu kira-kira sebesar 0,1 °C pada lapisan permukaan hingga kedalaman 10 meter (Jumiarti *et al.*, 2014).



Gambar 2. Peta batimetri (a), salinitas (b), suhu (c) dan klorofil-a in situ (d) di estuari Bengawan Solo

Klorofil-a berkisaran antara 0,3 – 3 mg/L. Konsentrasi klorofil-a pada area estuari tinggi dan semakin menurun menuju ke laut lepas. Klorofil-a yang tinggi pada estuari akibat tingginya nutrien yang bersumber dari masukan daratan sehingga kelimpahan fitoplankton meningkat (Nufus & Karina, 2017).

3.2. Pendugaan Konsentrasi TSS Satelit

Model terbaik yang dihasilkan untuk estimasi TSS dari citra satelit berdasarkan hubungan nilai pantulan citra satelit dan data TSS *in situ* seperti tertera pada persamaan (4). Model ini dikembangkan berdasarkan hubungan antara nilai reflektansi *band ratio* antara *red/(blue + green + red)* dengan TSS *in situ*. Hubungan antara nilai pantulan pada citra satelit dengan nilai TSS *in situ* sangat tinggi yang ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,86. Koefisien determinasi (R²) adalah sebesar 0,74 menunjukkan bahwa model pendugaan konsentrasi TSS berdasarkan citra satelit dapat dijelaskan oleh nilai rasio spektral citra satelit sebesar 74%. *Band* merah merupakan *band* yang sensitif terhadap kandungan suspensi sedimen di perairan (Adawiah *et al.*, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan

nilai koefisien korelasi (r) estimasi TSS dari citra satelit Sentinel-2 dan *in situ* berkisar antara 0,66 – 0,93 (Sartika *et al.*, 2019; Octaviana *et al.*, 2020).

$$TSS = 0,002e^{26,684x} \dots\dots\dots(5)$$

TSS adalah total suspended solid, x adalah nilai *reflectance band ratio* B4/(B2+B3+b4) dari satelit Sentinel-2.

3.3. Deteksi Turbidity Front berdasarkan Citra Sentinel-2

Hasil deteksi *turbidity front* berdasarkan data Citra Sentinel-2 (Gambar 4) menunjukkan bahwa garis berwarna putih merupakan batas akhir salinitas yang memiliki salinitas sebesar 30 PSU dan menjadi area *turbidity front estuary* berdasarkan data *in situ*. Distribusi TSS dari citra Sentinel-2 menunjukkan kesamaan pola arah distribusi suspensi sedimen dengan citra komposit RGB warna natural di estuari Bengawan Solo (Gambar 4a). Hasil distribusi TSS dari citra satelit menunjukkan bahwa terjadi perbedaan konsentrasi TSS yang tinggi pada jarak 1,6 – 2,8 km dari daratan yang merupakan wilayah terbentuknya *front estuary* (panah kuning). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa



Gambar 3. Grafik hubungan antara data TSS *in situ* dan *reflectance band ratio* citra satelit Sentinel-2 di perairan estuari Bengawan Solo

turbidity front ditemukan pada jarak sekitar 4,7 km di Perairan Pantai Barat Daya Korea dan 10,3 km di Perairan Pantai Utara Jiangsu (Hu *et al.*, 2016). Konsentrasi TSS di wilayah *turbidity front* berdasarkan citra satelit adalah 51,9182 mg/L (panah kuning) sedangkan berdasarkan data *in situ* memiliki nilai adalah 50 mg/L, hasil ini menunjukkan terdapat perbedaan sekitar 1,9182 mg/L antara data *in situ* dengan citra. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya di Sungai Musi bahwa nilai *turbidity front* berkisar antara 40 – 60 mg/L (Heltria *et al.*, 2021).

3.4. Profil *Turbidity Front* berdasarkan Data *In situ* dan Citra Satelit

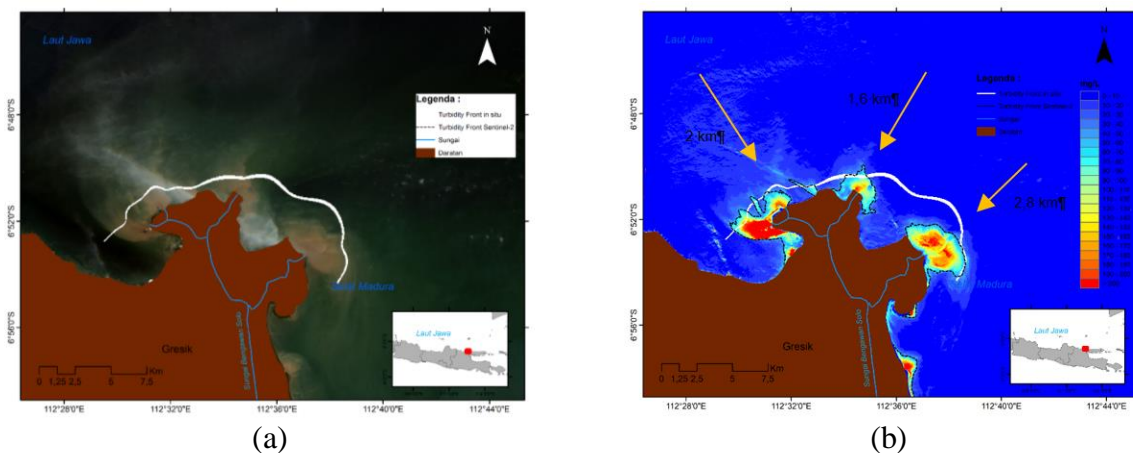
Profil vertikal parameter oseanografi menunjukkan terjadinya perbedaan massa air pada jarak 2 – 4 km dari darat dibuktikan dengan terbentuknya *turbidity front* (Gambar 5). *Front* ditandai dengan pertemuan dua salinitas massa air yang berbeda secara drastis pada area ini dengan rentang nilai 15 – 28 PSU. *Front* massa air ini terjadi akibat dari adanya pertemuan dua massa air yang berbeda, yaitu massa air sungai dan massa air laut (Wijaya, 2019).

Turbidity front juga terlihat pada area ini ditandai dengan menurunnya konsentrasi kekeruhan secara drastis di estuari Bengawan Solo pada jarak 2 – 4 km dengan rentang 25 – 200 mg/L. *Turbidity front* terjadi akibat

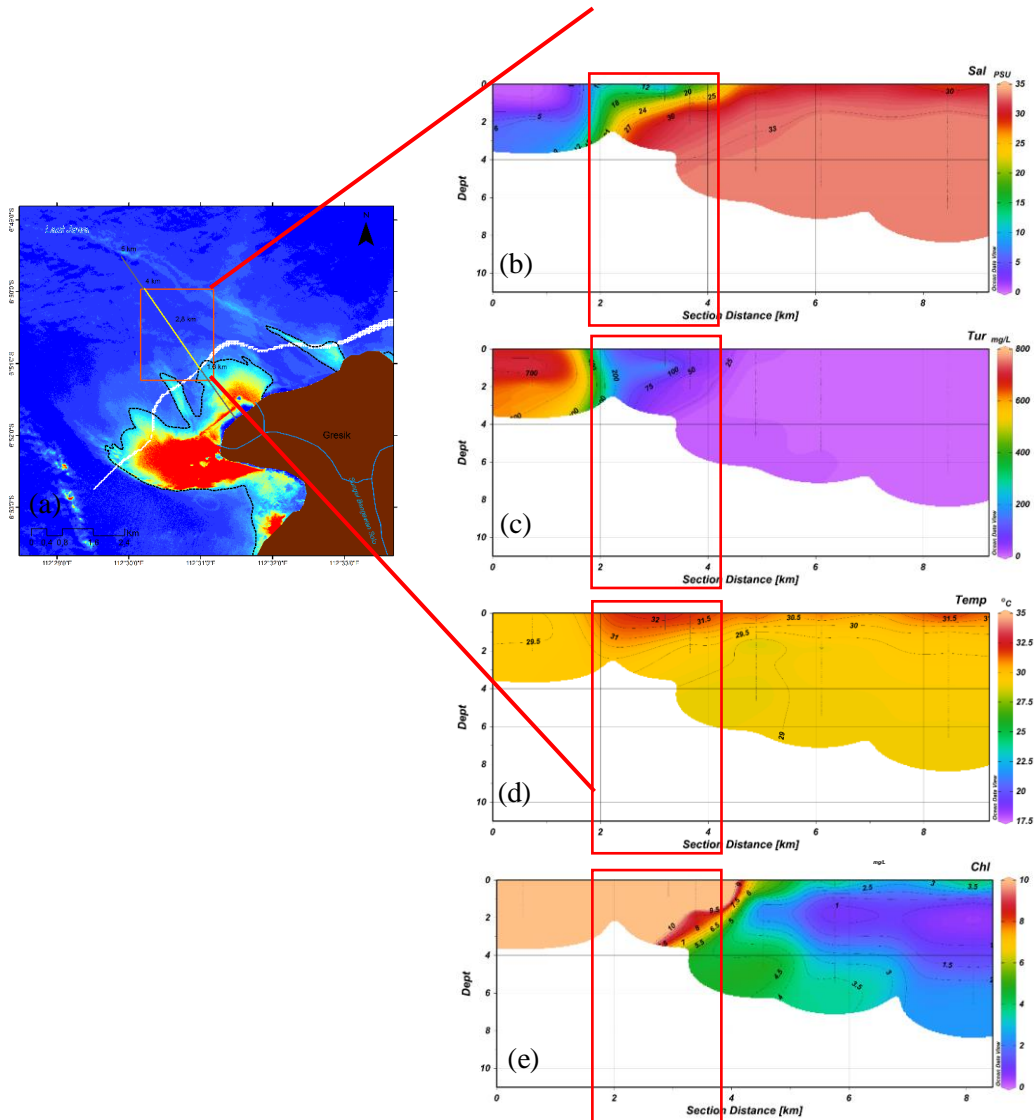
adanya dua massa air yang menahan laju perpindahan dari suspensi sedimen sehingga transport material dari *turbidity* terhenti. Hal ini terjadi karena adanya dorongan arus dari laut yang menuju ke darat serta dorongan arus dari sungai menuju ke laut lepas yang saling bertemu (Wibowo *et al.*, 2016).

Profil vertikal suhu pada area estuari lebih dingin dibandingkan dengan suhu pada laut lepas akibat pengaruh masukan air tawar dari sungai yang membuat suhu di estuari lebih rendah dibandingkan suhu di laut. Suhu permukaan laut (SPL) terlihat lebih tinggi pada jarak 2 – 4 km dari darat dengan kisaran nilai 31 °C – 32 °C. Peningkatan suhu ini berkaitan dengan tingginya intensitas matahari yang menyebabkan suhu permukaan laut pada perairan dangkal mengalami pemanasan air yang tidak homogen sehingga terjadi perbedaan suhu (Wijaya, 2019).

Secara vertikal konsentrasi klorofil-a relatif lebih rendah pada area permukaan dan semakin meningkat seiring meningkatnya kedalaman dengan kisaran nilai 8 - >10 mg/L. Penelitian yang dilakukan oleh Ge *et al.* (2020) menunjukkan bahwa biomassa fitoplankton yang ditemukan pada area *turbidity front* relatif tinggi akibat pengaruh arus bawah perairan dan turbulensi yang lemah. Konsentrasi klorofil-a tinggi pada area



Gambar 4. Deteksi *turbidity front estuary* dari citra : RGB Satelit Sentinel-2 (a) dan distribusi kandungan TSS (b)



Gambar 5. Profil vertikal berdasarkan jarak dari darat parameter: lokasi sampel penelitian (a), salinitas (b), *turbidity* (c), suhu (d) dan klorofil-a (e)

penelitian ini juga disebabkan karena lokasi penelitian ini dekat dengan area vegetasi mangrove, pertambakan dan adanya sumber masukan dari aliran sungai yang bermuara di estuari Bengawan Solo. Selain itu, kawasan hutan mangrove juga memberikan *supply* nutrisi dari adanya serasah daun mangrove yang jatuh ke perairan sehingga mengalami dekomposisi yang dapat menambah nutrisi di perairan tersebut. Selain itu tingginya nilai klorofil-a di perairan diduga berasal dari tingginya kandungan nutrisi yang berasal dari buangan limbah organik yang berasal

dari aktivitas manusia yang mengalir dari aliran sungai yang bermuara di estuari Bengawan Solo (Hidayah *et al.*, 2016).

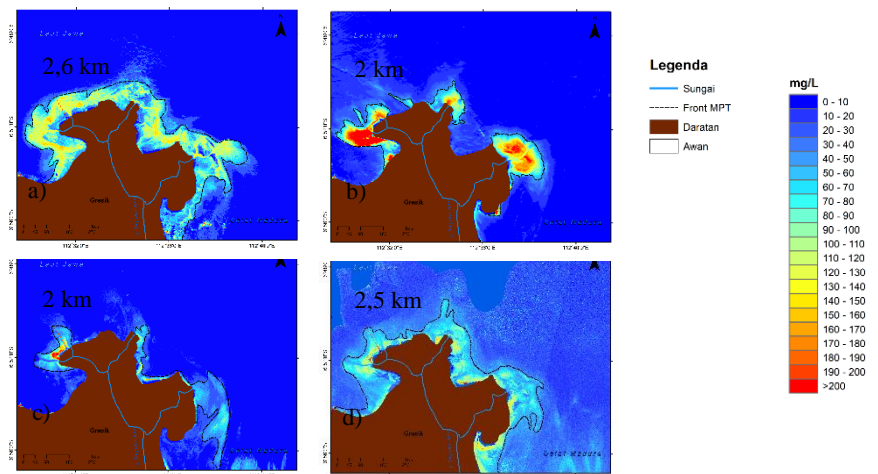
3.5. Pengaruh Curah Hujan terhadap *Turbidity Front*

Gambar 6 menunjukkan distribusi TSS pada musim yang berbeda. Pada saat terjadi Musim Barat area *turbidity front* lebih luas dibandingkan dengan musim lainnya. Jarak dari *turbidity front* ke ujung muara sungai pada Musim Barat sekitar 2,6 km, pada Musim Peralihan I sekitar 2 km, Musim

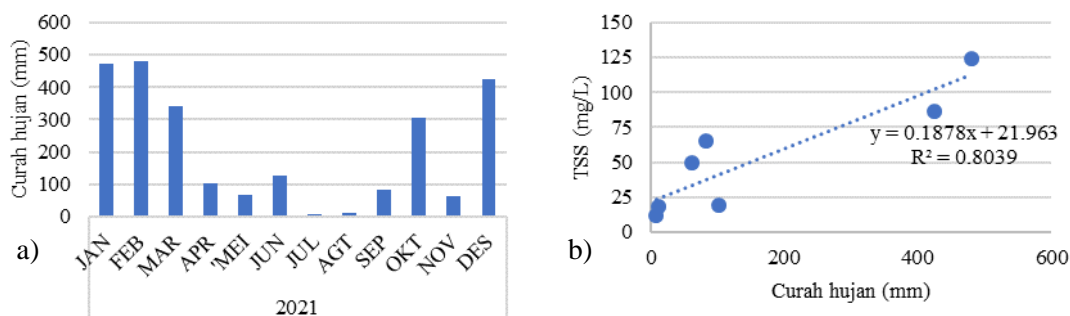
Timur sekitar 2 km dan Musim Peralihan II sekitar 2,5 km (garis putus-putus merah).

Intensitas curah hujan memengaruhi area *turbidity front* yang terjadi di estuari. Curah hujan yang tinggi pada Musim Barat (Desember, Januari, Februari) mengakibatkan debit aliran sungai yang mengalir ke muara lebih besar (Gambar 6a). Hal ini menyebabkan konsentrasi material tersuspensi tinggi dan area *turbidity front* meluas. Debit air dan curah hujan mempengaruhi konsentrasi salinitas, *turbidity* dan luasan area *turbidity front* (Fathiyah *et al.*, 2017).

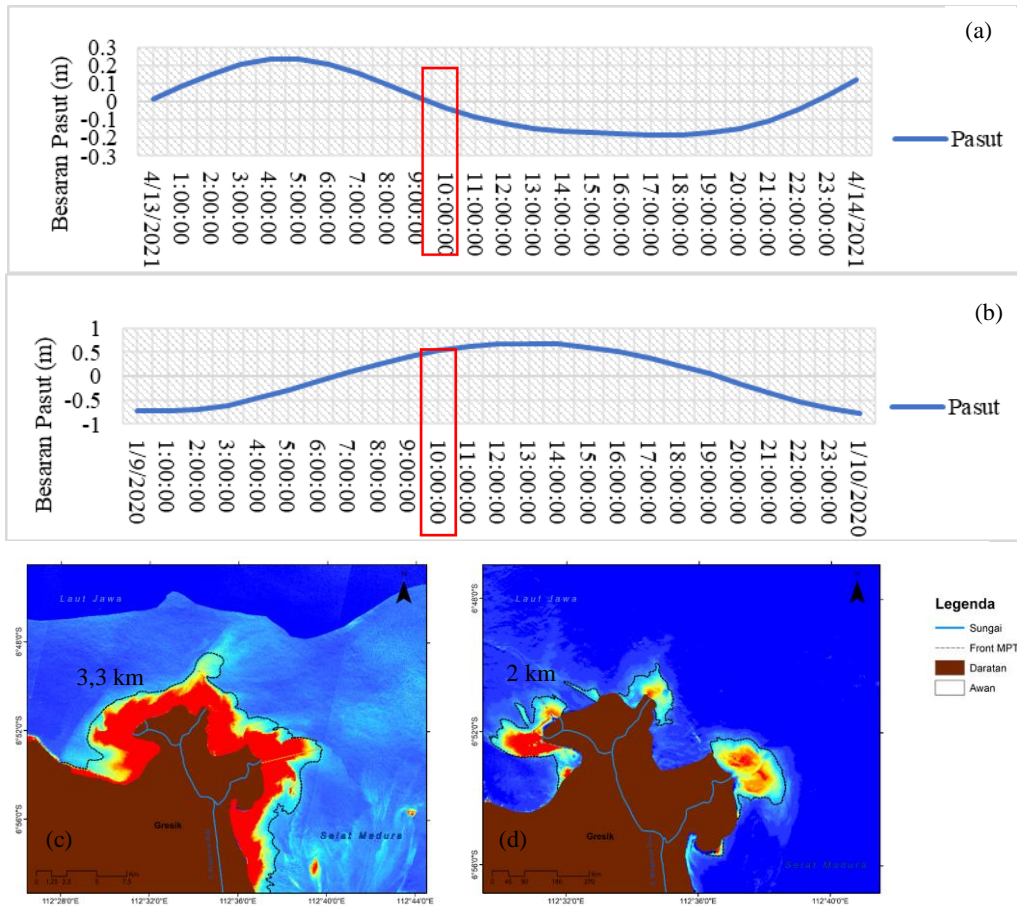
Hubungan antara *turbidity* dan curah hujan di area *turbidity front* sangat kuat yang ditunjukkan nilai korelasi $r = 0,89$ dan koefisien determinasi (R^2) = 0,80 (Gambar 7b). Penyebaran *plume* TSS ke lepas pantai dan meluas ke laut dipengaruhi oleh musim (Jabbar *et al.*, 2013). Selama periode musim kering, debit sungai sangat rendah karena intensitas curah hujan yang rendah dan sebaliknya terjadi. Pada saat musim kering, zat terlarut seperti sedimen tersuspensi dan konsentrasi fitoplankton dari muara menurun.



Gambar 6. Konsentrasi *turbidity front* berdasarkan a) Musim Barat, b) Musim Peralihan I, c) Musim Timur, d) Musim Peralihan II.



Gambar 7. Grafik a) curah hujan di Kecamatan Ujungpangkah Tahun 2021 b) hubungan regresi data curah hujan dan *turbidity front*



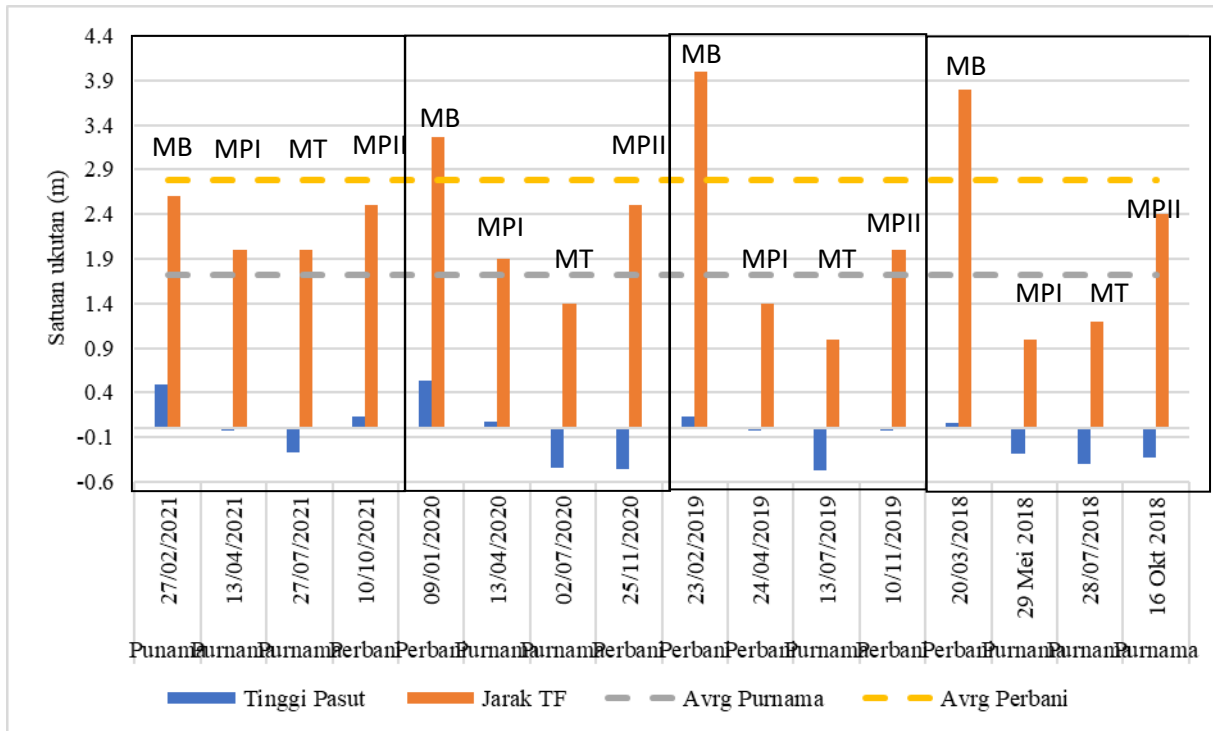
Gambar 8. Kondisi estuari Bengawan Solo pada saat pasang purnama (13 April 2021) (a), pasang perbani (9 Januari 2020) (b) jarak *turbidity front* pasang perbani (c) dan jarak *turbidity front* pasang purnama

3.6. Pengaruh pasang surut terhadap *turbidity front*

Hasil data pengamatan pasang surut pada saat *sampling* data *in situ* tanggal 13 April 2021 terjadi pasang purnama (*spring tide*) dengan kondisi perairan sedang mengalami surut dengan ketinggian 0,032 meter (Gambar 8a), sedangkan kondisi pasang perbani (*neap tide*) terjadi pada 9 Januari 2020 pasang dengan ketinggian 0,53 meter (Gambar 8b). Hasil perhitungan tipe pasang surut menggunakan metode admiralty menunjukkan nilai bilangan formzal adalah 8,1371. Hasil ini menjabarkan bahwa estuari Bengawan Solo memiliki tipe pasang surut harian tunggal (*diurnal*) yaitu satu kali pasang dan satu kali surut. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh

Taufik *et al.* (2015) terkait tipe pasang surut yang ada di sekitar Gresik yaitu tipe pasang surut harian tunggal dengan bilangan formzal adalah 10,02.

Jarak *turbidity front* dari muara sungai pada saat pasang perbani lebih jauh yakni sekitar 3,3 km (Gambar 8c) dibandingkan pada pasang purnama yaitu sekitar 2,0 km (Gambar 8d). Hal ini terjadi karena konsentrasi TSS dasar laut pada saat *spring tide* lebih kecil dibandingkan dengan TSS dasar *neap tide* sehingga TSS pada saat *spring tide* melayang dan berhamburan mengikuti arah arus. Selain itu pada saat *spring tide*, gaya pasang surut yang kuat mengaduk sedimen dasar dan mendistribusikannya secara vertikal (MacDonald & Geyer, 2005). Pengaruh



Gambar 9. Grafik pasang surut dan jarak *turbidity front* di muara sungai Bengawan Solo.

pasang terhadap *turbidity front* dapat memperpanjang daerah yang keruh mencapai hingga 3 km ke arah lepas pantai dari muara sungai (Masyhur *et al.*, 2018).

Kondisi perairan saat surut jarak *turbidity front* menurun dari daratan atau garis pantai dan sebaliknya pada saat terjadi pasang diikuti dengan penambahan jarak *turbidity front estuary* dari daratan. Jarak rata-rata *turbidity front* dari daratan pada saat pasang purnama adalah 1,7 km dan saat pasang perbani adalah 2,8 km (Gambar 9), jarak terjauh dari *turbidity front* terjadi pada saat pasang perbani. Penelitian ini menunjukkan bahwa plume mencapai jarak terjauh dari pantai selama *neap tide* dibandingkan dengan *spring tide* (Mascarenhas *et al.*, 2016). Nilai salinitas pada bulan-bulan *neap tide* (Mei dan Juli) mencapai jarak maksimum 230 km dari pantai, sedangkan pada *spring tide* plume mencapai jarak hingga 130 km.

IV. KESIMPULAN

Algoritma untuk pemetaan distribusi TSS di estuari Bengawan Solo dari sensor satelit Sentinel-2 yang dikembangkan secara empiris adalah $Y = 0,002e^{26,684x}$, Y adalah TSS (mg/l) dan X adalah reflektansi *band* (B4/B2+B3+B4) citra Sentinel-2. Distribusi TSS dari citra satelit dapat menggambarkan kondisi *turbidity front estuary* pada citra satelit ditemukan berada pada jarak 1,6 – 2,8 km dari garis pantai, sedangkan berdasarkan data *in situ* berada pada jarak 2,0 – 4,0 km pada estuari Bengawan Solo. Jarak *turbidity front* dari darat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan. Intensitas curah hujan berpengaruh positif terhadap konsentrasi TSS pada area *turbidity front*. Selain itu, pasang surut berpengaruh terhadap jarak *turbidity front* pada saat terjadi pasang *neap tide* jarak *turbidity front* dari daratan semakin menjauh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada teman-teman yang telah membantu dalam pengambilan data lapangan. Terima kasih juga kepada NOAA, BIG, UCSB dan semua instansi yang sudah menyediakan data untuk penelitian serta Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University atas fasilitas yang telah diberikan selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiah, S.W., K.T. Setiawan, E. Parwati, & R. Faristyan. 2021. Development of empirical model of Total Suspended Solid (TSS) by using Landsat 8 on the Coast of Bekasi Regency. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.*, 750(1): 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/750/1/012039>
- Atmadipoera A.S., E. Kusmanto, A. Purwandana, & I.W. Nurjaya. 2015. Observation of coastal front and circulation in the Northeastern Java Sea, Indonesia. *J Ilmu dan Teknol Kelaut Trop.*, 7(1): 91–108. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v7i1.9786>
- Belkin, I.M. & P.C. Cornillon. 2007. Fronts in the world ocean's large marine ecosystems. *Ices C. March*:1–33.
- Dyer, K.R., M.C. Christie, & A.J. Manning. 2004. The effects of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. *Estuar Coast Shelf Sci.*, 59(2): 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2003.09.002>
- Elliott, M., & D.S. McLusky. 2002. The need for definitions in understanding estuaries. *Estuar Coast Shelf Sci.*, 55(6): 815–827. <https://doi.org/10.1006/ecss.2002.1031>
- Fathiyah, N., T.G. Pin, & R. Saraswati. 2017. Pola spasial dan temporal *Total Suspended Solid* (TSS) dengan Citra SPOT di Estuari Cimandiri, Jawa Barat. *Ind Res Work Natl Semin.*, (1): 518–526. <https://doi.org/10.35313/irwns.v8i3.600>
- Ge, J., R. Torres, C. Chen, J. Liu, Y. Xu, R. Bellerby, F. Shen, J. Bruggeman, & P. Ding. 2020. Influence of suspended sediment front on nutrients and phytoplankton dynamics off the Changjiang Estuary: A FVCOM-ERSEM coupled model experiment. *J Mar Syst.*, 24 November 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103292>
- Heltria, S., I.W. Nurjaya, & J.L. Gaol. 2021. Turbidity front dynamics of the musu banyuasin estuary using numerical model and landsat 8 satellite. *AACL Bioflux*, 14(1): 1–13. <http://www.bioflux.com.ro/docs/2021.1-13.pdf>
- Hidayah, G., S.Y. Wulandari, & M. Zainuri. 2016. Studi sebaran klorofil-a secara horizontal di Perairan Muara Sungai Silugonggo Kecamatan Batangan, Pati. *Bul Oseanografi Mar.*, 5(1): 52–59. <https://doi.org/10.14710/buloma.v5i1.11296>
- Jabbar, A., T. Lihan, M.A. Mustapha, Z.A. Rahman, & S.A. Rahim. 2013. Variability of river plume signature determined using satellite image. *J Appl Sci.* 13(1): 1–10.
- Jumiarti, A. Pratomo, & D. Apdillah. 2014. Pola sebaran salinitas dan suhu di perairan teluk Riau Kota Tanjungpinang Provinsi Kepulauan Riau. *J Umr.* 1(1): 1–12. [file:///C:/Users/ASUS/Downloads/E-journal-jumiarti%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/E-journal-jumiarti%20(1).pdf)
- Katlane, R., C. Dupouy, B. E. Kilani, & J.C. Berges. 2020. Estimation of chlorophyll and turbidity using Sentinel 2a and EO-1 data in kneiss

- archipelago Gulf of Gabes, Tunisia. *Int J Geosci.* 11(10): 708–728. <https://doi.org/10.4236/ijg.2020.1110035>
- Khairunnisa, K., D. Apdillah, & R.D. Putra. 2021. Karakteristik pasang surut di Perairan Pulau Bintan Bagian Timur menggunakan metode admiralty. *J Kelaut Indones J Mar Sci Technol.* 14(1): 58–69. <https://doi.org/10.21107/jk.v14i1.9928>
- Kingsford, M.J. & I.M. Suthers. 1996. Dynamic estuary plumes and fronts: Importance to small fish and plankton in Coastal Waters Of NSW, Australia. 14(6): 655–672. [file:///C:/BIBLIOGRAFIA/ARTIGOS/PDF/PDFs/Download/Bibliografia/REF MAN PDF/0045 Kingsford & Suthers 2004.pdf](file:///C:/BIBLIOGRAFIA/ARTIGOS/PDF/PDFs/Download/Bibliografia/REF%20MAN/PDF/0045%20Kingsford%20&%20Suthers%202004.pdf).
- Klemas, V. 2012. Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study. *J Coast Res.* 278: 1–7. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-11-00025.1>
- Krisdianto, A.Y., I. Musaad, & I.A.F. Djuuna. 2018. Metode kriging untuk interpolasi parameter kesuburan tanah di lahan pertanian Kelurahan Malawili Kabupaten Sorong. *Buletin Agro-Infotek.*, 4(1): 22–28.
- Luo, Z., W. Pan, L. Li, & G. Zhang. 2012. The study on three-dimensional numerical model and fronts of the Jiulong Estuary and the Xiamen Bay. *Acta Oceanol Sin.*, 31(4): 55–64. <https://doi.org/10.1007/s13131-012-0220-1>
- MacDonald, D.G. & W.R. Geyer. 2005. Hydraulic control of a highly stratified estuarine front. *J Phys Oceanogr.*, 35(3): 374–387. <https://doi.org/10.1175/JPO-2692.1>
- Mascarenhas, A.C.C., G.S. Gomes, A.P.Y. Lima, H.K.N. Da Silva, L.S. Santana, R.P. Rosário, & M. Rollnic. 2016. Seasonal variations of the amazon river plume with focus on the eastern sector. *J Coast Res.*, 1(75): 532–536. <https://doi.org/10.2112/SI75-107.1>
- Munthe, M. G., R. D. Putra, & Y.V. Jaya. 2007. Pemetaan zona potensial penangkapan ikan berdasarkan citra satelit aqua/terra modis di Perairan Selatan Laut Jawa. *J Food Syst Res.*, 14(2): 70–75. https://doi.org/10.5874/jfsr.14.2_70
- Najid, A., J.I. Pariwono, D.G. Bengen, S. Nurhakim, & A.S. Atmadipoera. 2012. Pola musiman dan antar tahunan salinitas permukaan laut di Perairan Utara Jawa-Madura. *Maspari J.*, 4(2): 168–177.
- Nufus, H. & S. Karina. 2017. Analisis sebaran klorofil-a dan kualitas air di Sungai Krueng Raba Lhoknga, Aceh Besar. *J Ilm Mhs Kelaut dan Perikan Unsyiah.* 2(1): 58–65. <https://media.neliti.com/media/publications/187965-ID-analisis-sebaran-klorofil-a-dan-kualitas.pdf>
- Octaviana, A., Y. Prasetyo, & F.J. Amarrohman. 2020. Analisis perubahan nilai total suspended solid citra Sentinel-2A. *J Geod Undip.* 9 April: 167–176. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/27178/23803>
- Pamungkas, C.A. 2019. Aplikasi penghitung jarak koordinat berdasarkan latitude dan longitude dengan metode euclidean distance dan metode haversine. *J Inf Politek Indonusa Surakarta*, 5(2): 8–13. <https://doi.org/10.46808/informa.v5i2.74>
- Pertiwi, A.P., C.B. Lee, & D. Traganos. 2021. Cloud-native coastal turbid zone detection using multi-temporal Sentinel-2 data on google earth engine. *Front Mar Sci.* 8 September 2021. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.699055>
- Sartika, M., L.M.G. Jaya, & Nurgiantoro.

2019. Pemetaan sebaran Total Suspended Solid (TSS) dan klorofil-a (chl-a) pada perairan Sungai Wanggu menggunakan citra Sentinel-2. *J Geogr Apl dan Teknol.*, 3(2): 49–56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3607250>
- Supriyadi, E., S. Siswanto, & W.S. Pranowo. 2019. Karakteristik pasang surut di perairan Pameungpeuk, Belitung, dan Sarmi berdasarkan metode admiralty. *J Meteorol dan Geofis.*, 19(1): 29–38. <https://doi.org/10.31172/jmg.v19i1.518>
- Syaban, M. & E. Ratnaningrum. 2021. *Statistika Penelitian*. Bandung: Informatika Bandung. 60-67.
- Taufik, H.A., S. Saputro, & D.H. Ismunarti. 2015. Studi pasang surut untuk perubahan luas genangan akibat kenaikan muka air laut di perairan Banyuurip, Kabupaten Gresik. *J Oceanogr.*, 4(1): 171–178. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/7680/7440>
- Trinugroho, T., A. Satriadi, & M. Muslim. 2019. Sebaran thermal front musiman di wilayah perairan Selat Madura menggunakan single image edge detection. *J Mar Res.*, 8(4): 416–423. <https://doi.org/10.14710/jmr.v8i4.24815>
- Vinh, V.D., S. Ouillon, & U.D. Van. 2018. Estuarine turbidity maxima and variations of aggregate parameters in the Cam-Nam Trieu Estuary, North Vietnam, in Early Wet Season. *Water*, 10(1): 1–33. <https://doi.org/10.3390/w10010068>
- Wibowo, Y.S.A., H. Hariadi, & J. Marwoto. 2016. Pengaruh arus laut dan pasang surut terhadap distribusi sedimen tersuspensi di perairan Muara Sungai Sembilangan Kaliprau Pemasang. *J Oseanografi*, 5: 490–497. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/16111>
- Wijaya, A. 2019. Karakteristik perairan di Estuari Perancak Jembrana Bali. *Pros Semin Nas Pengelolaan Pesisir Drh Aliran Sungai ke-1*. September: 75–82. <https://www.researchgate.net/publication/335161040>
- Wouthuyzen, S, S. Tarigan, & H. Indarto. 2008. Pengukuran salinitas permukaan teluk jakarta melalui penginderaan warna laut menggunakan data multi-temporal citra satelit Landsat-7 ETM +. *Pit Mapin Xvii.*, siap terbit. <https://www.scribd.com/doc/138037663/Sam-Wouthuyzen#>
- Zhou, W., S. Wang, Y. Zhou, & A. Troy. 2006. Mapping the concentrations of total suspended matter in Lake Taihu, China, using Landsat-5 TM data. *Int J Remote Sens.*, 27(6): 1177–1191. <https://doi.org/10.1080/01431160500353825>
- Submitted : 01 March 2022*
Reviewed : 12 July 2022
Accepted : 17 December 2022

FIGURE AND TABLE TITLES

- Figure 1. Map of the research location in the Bengawan Solo Gresik estuary, East Java Indonesia.*
- Figure 2. Bathymetry map (a), temperature (b), salinity (c) and chlorophyll-a in situ (d).*
- Figure 3. Graph of the relationship between in situ data and reflectance band ratio Sentinel-2 in the Bengawan Solo estuary.*
- Figure 4. Detection of turbidity front estuary using images: RGB Satellite Sentinel-2 (a) and Distribution of TSS Concentration (b).*

- Figure 5. Vertical profile based on distance from land parameters: research sample location (a), salinity (b), turbidity (c), temperature (d) and chlorophyll-a (e).*
- Figure 6. Concentration of turbidity front based on a) West Season, b) Transitional Season I, c) East Season, d) Transitional Season II.*
- Figure 7. Graph a) rainfall in Ujungpangkah Subdistrict in 2021 b) correlation between rainfall data regression and turbidity front.*
- Figure 8. The condition of the Bengawan Solo estuary during spring tide (13 April 2021) (a), neap tide (9 January 2020) (b) the turbidity front distance of neap tide (c) and the turbidity front distance of spring tide.*
- Figure 9. Tidal graph and turbidity front distance at the mouth of the Bengawan Solo river.*
- Table 1. Equation regression model for ratio band.*
- Table 2. Tidal Type based on Formzahl Numbers.*