

Effects of Tidal Dynamics on the Variation of Physicochemical Parameters in Bitung Port Waters

(Pengaruh Pasang Surut terhadap Parameter Fisika-Kimia Air Laut pada Perairan di Pelabuhan Bitung)

Putu Ayu Suputri¹, Natalie Detty C. Rumampuk², Deiske A. Sumilat¹, Wilmy Etwil Pelle², Grevo Soleman Gerung², Putu Deny Darmawan³, Burhan Niode⁴

¹. Marine Science Study Program, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University

². Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Sam Ratulangi University

³. North Sulawesi Maritime Polytechnic

⁴. Faculty of Social and Political Sciences, Sam Ratulangi University.

*Corresponding author: ayusuputri.as@gmail.com

Manuscript received: 19 April. 2026. Revision accepted: 7 May 2026

Abstract. This study aimed to evaluate the influence of tidal dynamics on the spatial and temporal variability of physicochemical parameters in Bitung Port waters. Sampling was conducted at three representative sites under high and low tide conditions. Parameters including temperature, pH, salinity, turbidity, DO, TDS, and conductivity were measured in situ, while TSS and heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, and Ni) were analysed in the laboratory. Descriptive statistics, Kruskal-Wallis test, and Linear Mixed Model (LMM) were applied. Results showed that DO and pH were significantly higher during high tide, while turbidity, TDS, salinity, and conductivity were significantly higher during low tide. Spatial variability was low during high tide but increased significantly during low tide, indicating stronger local influence. The integration of interquartile range (IQR) analysis revealed higher variability of dissolved and suspended parameters during low tide, while DO exhibit higher variability during high tide due to intensified mixing processes. These findings highlight that tidal dynamics act as a key regulator of water quality distribution in semi-enclosed port systems. Incorporating tidal phase into monitoring strategies is essential for effective environmental management and supports the implementation of sustainable green port practices.

Keywords: tidal dynamics, seawater quality, Bitung Port, physicochemical parameters, LMM

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana dinamika pasang surut memengaruhi variasi parameter fisika-kimia air laut, baik secara ruang maupun waktu, di perairan Pelabuhan Bitung. Pengambilan sampel dilakukan di tiga lokasi yang dianggap mewakili kondisi perairan, dengan mempertimbangkan fase pasang dan surut. Parameter yang diukur langsung di lapangan meliputi suhu, pH, salinitas, kekeruhan, DO, TDS, serta konduktivitas. Sementara itu, parameter seperti TSS dan kandungan logam berat (Cu, Pb, Zn, Cd, dan Ni) dianalisis di laboratorium. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji Kruskal-Wallis, dan *Linear Mixed Model* (LMM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai DO dan pH secara signifikan lebih tinggi pada saat pasang. Sebaliknya, kekeruhan, TDS, salinitas, dan konduktivitas cenderung meningkat pada saat surut. Dari sisi spasial, variasi parameter relatif kecil ketika pasang, namun meningkat saat surut, yang mengindikasikan kuatnya pengaruh faktor lokal. Analisis *Interquartile Range* (IQR) juga memperlihatkan bahwa parameter terlarut dan tersuspensi lebih bervariasi saat surut, sedangkan DO menunjukkan variasi lebih besar saat pasang akibat proses pencampuran yang lebih intens. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa dinamika pasang surut berperan penting dalam mengatur distribusi kualitas air di perairan pelabuhan semi-tertutup. Oleh karena itu, fase pasang surut perlu dipertimbangkan dalam kegiatan pemantauan lingkungan guna mendukung pengelolaan pelabuhan yang berkelanjutan.

Kata kunci: pasang surut, kualitas air laut, pelabuhan Bitung, parameter fisika-kimia, LMM

PENDAHULUAN

Wilayah pelabuhan merupakan kawasan pesisir dengan aktivitas manusia yang sangat intens, seperti lalu lintas kapal, kegiatan bongkar muat, hingga pembuangan limbah operasional. Berbagai aktivitas tersebut berpotensi menghasilkan beban pencemar, termasuk padatan tersuspensi, bahan organik, minyak, serta logam berat, yang pada akhirnya dapat menurunkan kualitas perairan.

Kondisi kualitas air di kawasan pelabuhan tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas manusia, tetapi juga oleh proses alami, terutama dinamika pasang surut. Proses ini berperan dalam pencampuran massa air, pengangkatan kembali sedimen (resuspensi), serta distribusi zat terlarut dan partikel di dalam kolom air. Perubahan antara kondisi pasang dan surut dapat menyebabkan variasi parameter fisika-kimia, baik secara spasial maupun temporal.

Pelabuhan Bitung merupakan salah satu pelabuhan utama di kawasan Indonesia Timur yang memiliki peran strategis dalam mendukung kegiatan perdagangan dan perikanan.

Tingginya intensitas aktivitas di wilayah ini berpotensi memberikan tekanan terhadap kualitas perairan, yang ditandai dengan meningkatnya kekeruhan, penumpukan limbah, serta risiko pencemaran logam berat. Selain itu, karakter perairan yang semi-tertutup menyebabkan proses pertukaran air berlangsung terbatas, sehingga memungkinkan terjadinya akumulasi polutan.

Sejauh ini, banyak penelitian terkait pengaruh pasang surut terhadap kualitas air lebih difokuskan pada ekosistem estuari yang memiliki dinamika arus kuat dan fluktuasi salinitas tinggi. Sementara itu, kajian pada perairan pelabuhan semi-tertutup dengan tekanan aktivitas manusia yang tinggi masih relatif terbatas. Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk memperdalam pemahaman mengenai peran pasang surut dalam mengontrol kualitas air di kawasan pelabuhan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis variasi parameter fisika-kimia air laut pada kondisi pasang dan surut, serta mengevaluasi sejauh mana dinamika pasang surut memengaruhi kualitas perairan di Pelabuhan Bitung.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di perairan Pelabuhan Bitung, Sulawesi Utara, yang secara oseanografis termasuk dalam wilayah Selat Lembeh. Tiga titik pengamatan dipilih secara purposif, yaitu Pelabuhan Peti Kemas, Pelabuhan Penyeberangan Bitung-Lembeh, dan Pelabuhan Perikanan Samudera Bitung. Pemilihan lokasi didasarkan pada tingginya aktivitas kapal serta kemampuannya merepresentasikan fungsi utama pelabuhan.

Pengambilan sampel dilakukan pada saat kondisi pasang maksimum dan surut maksimum, mengacu pada data prakiraan dari BMKG. Sampel saat pasang diambil pada pagi hari, sedangkan saat surut pada siang hari, tepatnya pada tanggal 7 dan 21 Februari 2026. Pendekatan ini dilakukan untuk memastikan perbedaan kondisi hidrodinamika dapat diamati secara optimal sekaligus meningkatkan keandalan data.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan survei awal untuk menentukan titik koordinat pengambilan sampel serta waktu yang sesuai dengan kondisi pasang dan surut maksimum. Sampel air laut kemudian diambil langsung di lapangan pada kedalaman sekitar 30 cm dari permukaan di setiap lokasi penelitian. Pengukuran parameter fisika-kimia seperti suhu, pH, salinitas, *Dissolved Oxygen* (DO), kekeruhan, *Total Dissolved Solid* (TDS), dan konduktivitas dilakukan secara

langsung (*in situ*) menggunakan alat multi-parameter *water quality meter* (HORIBA). Parameter-parameter ini dipilih karena sensitif terhadap perubahan yang dipicu oleh dinamika pasang surut, seperti proses pencampuran air, resuspensi sedimen, serta distribusi zat terlarut dan partikel tersuspensi (Cereja et al., 2022; Shil et al., 2014).

Selain itu, sampel air laut juga diuji laboratorium mencakup *Total Suspended Solids* (TSS) dan kandungan logam berat (Cu, Pb, Zn, Cd, serta Ni). Analisis TSS menggunakan metode gravimetri, sementara logam berat ditentukan dengan *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS). Parameter logam berat (Cu, Pb, Zn, Cd, serta Ni) erat kaitannya dengan aktivitas operasional kapal, seperti cat *antifouling*, korosi material kapal, bahan bakar, pelumas, dan limbah operasional yang dapat menyebabkan akumulasi logam di perairan pelabuhan (Ytreberg et al., 2022; Teuchies et al., 2020). Kegiatan kapal dan industri pelabuhan terbukti menyumbang peningkatan konsentrasi logam berat, khususnya di wilayah dengan lalu lintas kapal yang padat (Lim et al., 2022; Manullang et al., 2017).

Data dari pengukuran lapangan dan analisis laboratorium ditabulasikan serta divalidasi, kemudian dianalisis melalui statistik deskriptif dan inferensial menggunakan uji Kruskal-Wallis serta *Linear Mixed Model* berbantuan SPSS. Hasil pengukuran dibandingkan dengan standar baku mutu air laut sesuai Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 sebagai rujukan evaluasi kualitas perairan.

Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengidentifikasi perbedaan serta pengaruh pasang surut terhadap parameter fisika-kimia air laut. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan distribusi data pada masing-masing lokasi dan kondisi pasang-surut.

Karena data tidak berdistribusi normal dan jumlah sampel relatif terbatas, digunakan uji non-parametrik Kruskal-Wallis untuk menguji perbedaan antar lokasi pada masing-masing kondisi pasang dan surut.

Selanjutnya, pengaruh dinamika pasang surut dianalisis menggunakan *Linear Mixed Model* (LMM). Dalam model ini, kondisi pasang dan surut diperlakukan sebagai efek tetap (*fixed effect*), sedangkan lokasi dan waktu pengambilan sampel sebagai efek acak (*random effect*) guna menangkap variasi spasial dan temporal. Seluruh pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi 95% ($p < 0,05$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Umum Perairan

Secara keseluruhan, kondisi perairan di Pelabuhan Bitung mencerminkan karakteristik perairan pelabuhan semi-tertutup yang dipengaruhi oleh aktivitas kapal serta dinamika pasang surut. Kegiatan bongkar muat, pergerakan kapal, dan pembuangan limbah turut membentuk kondisi fisika-kimia perairan. Disamping pengaruh aktivitas antropogenik, dinamika pasang surut merupakan faktor utama yang mengendalikan proses pencampuran massa air, sehingga berperan penting dalam menentukan distribusi parameter kualitas air secara temporal dan spasial (Cereja et al., 2022; Mahyari et al., 2024).

Tabel 1 menggambarkan bahwa secara umum, parameter fisika-kimia air laut di perairan Pelabuhan Bitung mengalami variasi antara kondisi pasang dan surut. Pada kondisi pasang, parameter seperti *Dissolved Oxygen* (DO) cenderung lebih tinggi dibandingkan kondisi surut, yang menunjukkan peningkatan proses pencampuran massa air dan aerasi. Sebaliknya, pada kondisi surut, parameter seperti kekeruhan, konduktivitas, TDS, serta salinitas menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi, yang mencerminkan dominasi faktor lokal dan input daratan. Pola ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa dinamika pasang surut

mengontrol distribusi parameter kualitas air, di mana kondisi pasang meningkatkan proses pencampuran, sedangkan kondisi surut meningkatkan pengaruh lokal dan konsentrasi zat terlarut (Lim et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Tabel 1. Statistik Deskriptif Parameter Fisika-Kimia Air Laut pada Kondisi Pasang dan Surut

Parameter	Pasang (Mean \pm SD)	Surut (Mean \pm SD)	IQR Pasang	IQR Surut
DO	6.68 \pm 0.18	6.26 \pm 0.19	0.81	0.40
Konduktivitas	50.03 \pm 0.07	49.61 \pm 0.08	0.11	0.38
Salinitas	32.27 \pm 0.05	31.98 \pm 0.05	0.06	0.29
TDS (g/L)	32.03 \pm 0.02	31.80 \pm 0.03	0.03	0.26
Temperatur	28.51 \pm 0.03	28.45 \pm 0.04	0.17	0.20
Turbidity	5.08 \pm 0.03	4.82 \pm 0.04	0.13	0.26
pH	7.90 \pm 0.09	7.78 \pm 0.10	0.33	0.17

Selain parameter fisika-kimia yang dianalisis, hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai *Total Suspended Solids* (TSS) dan sebagian besar logam berat berada di bawah batas deteksi alat (*Reporting Limit*), sehingga tidak memungkinkan dilakukan analisis variasi secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi parameter tersebut relatif rendah dan belum menunjukkan indikasi pencemaran yang signifikan pada saat pengamatan. Meskipun demikian, unsur Zn masih terdeteksi dalam jumlah terukur, yang mengindikasikan adanya kontribusi aktivitas antropogenik di kawasan pelabuhan, seperti korosi material kapal atau penggunaan cat antifouling. Namun demikian, konsentrasi yang terukur relatif rendah dan tidak menunjukkan pola variasi yang jelas antar kondisi pasang dan surut.

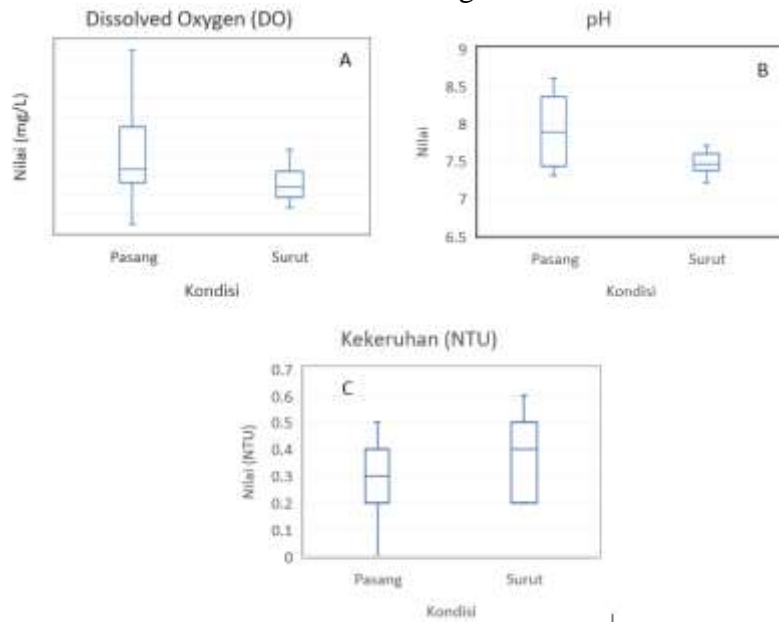
Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa kondisi pasang mendukung distribusi parameter yang lebih seragam akibat masuknya massa air dari perairan terbuka, sedangkan kondisi surut menghasilkan variasi antar lokasi yang lebih besar. Fenomena ini menyoroti bahwa pada fase surut, pengaruh sumber pencemar lokal seperti aktivitas kapal dan limpasan daratan menjadi lebih menonjol dalam membentuk kualitas perairan. Hal ini didukung oleh penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa dinamika pasang surut merupakan faktor utama yang mengontrol variabilitas parameter lingkungan di wilayah pesisir (Belanha et al., 2026).

Analisis nilai *Interquartile Range* (IQR) semakin memperkuat pola tersebut, di mana beberapa parameter seperti TDS, kekeruhan, konduktivitas, dan salinitas menunjukkan nilai IQR yang lebih tinggi pada kondisi surut dibandingkan pasang. Hal ini mengindikasikan bahwa sebaran data pada kondisi surut lebih lebar, yang mencerminkan tingginya heterogenitas kondisi perairan akibat dominasi faktor lokal. Sebaliknya, parameter DO dan pH menunjukkan nilai IQR yang relatif lebih tinggi pada kondisi pasang, yang mengindikasikan adanya variasi yang dipengaruhi oleh proses pencampuran massa air laut dengan air dari perairan terbuka (Chen et al., 2026).

Perbedaan pola yang terlihat antara kondisi pasang dan surut menunjukkan bahwa dinamika pasang surut tidak hanya memengaruhi rata-rata konsentrasi, tetapi juga mengendalikan tingkat variasi parameter kualitas air. Nilai IQR yang lebih tinggi pada saat surut mengindikasikan meningkatnya heterogenitas lingkungan, yang kemungkinan dipicu oleh pengaruh lokal seperti aktivitas pelabuhan dan aliran dari daratan. Sebaliknya, variabilitas yang relatif lebih rendah pada saat pasang mencerminkan adanya proses pencampuran dan pengenceran yang lebih intens. Hal ini menegaskan bahwa fase pasang surut memiliki peran ganda, yaitu sebagai mekanisme pencampuran sekaligus pengatur distribusi polutan di perairan.

Standar deviasi yang relatif rendah pada sebagian besar parameter menunjukkan stabilitas kondisi perairan, meskipun parameter seperti DO menampilkan variasi yang lebih tinggi, menggarisbawahi sensitivitasnya terhadap dinamika lingkungan. Pola ini diperkuat oleh

nilai IQR yang menunjukkan bahwa variabilitas parameter tidak hanya terjadi pada skala pengulangan pengukuran, tetapi juga pada skala spasial dan temporal. Dengan demikian, dinamika pasang surut memiliki peran krusial dalam mengendalikan distribusi dan variabilitas parameter fisika-kimia di kawasan Pelabuhan Bitung.



Gambar 2. Perbandingan Nilai Parameter Fisika-Kimia pada Kondisi Pasang dan Surut di Perairan Pelabuhan Bitung A) *Dissolved Oxygen* (DO), B) pH dan C) Kekeruhan

Visualisasi boxplot digunakan untuk menampilkan distribusi parameter yang paling responsif terhadap dinamika pasang surut, yaitu DO, pH, dan kekeruhan karena menunjukkan variasi yang paling jelas antara kondisi pasang dan surut serta mewakili aspek utama kualitas perairan.

a. *Dissolved Oxygen* (DO)

Berdasarkan boxplot pada Gambar A, konsentrasi DO menunjukkan perbedaan yang cukup jelas antara kondisi pasang dan surut. Nilai median DO pada kondisi pasang cenderung lebih tinggi dibandingkan kondisi surut, dengan rentang interkuartil yang lebih lebar yang mengindikasikan variabilitas yang lebih tinggi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa fase pasang berperan dalam meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut melalui proses pencampuran massa air (*water mixing*) yang lebih intens antara perairan pelabuhan dan laut terbuka. Masuknya massa air baru yang relatif lebih kaya oksigen menyebabkan peningkatan DO serta distribusi yang lebih bervariasi. Fenomena ini sejalan dengan penelitian Shil et al., (2014) yang menyatakan bahwa dinamika pasang surut dapat meningkatkan pertukaran massa air dan memengaruhi parameter kualitas air, termasuk oksigen terlarut. Sebaliknya, nilai DO variabilitasnya cenderung lebih rendah pada kondisi surut. Hal ini mengindikasikan terbatasnya proses pencampuran serta dominasi faktor lokal seperti aktivitas biologis dan dekomposisi bahan organik yang dapat mengonsumsi oksigen terlarut.

b. pH

Boxplot B menunjukkan bahwa nilai pH pada kondisi pasang memiliki median yang lebih tinggi dibandingkan kondisi surut, serta variasi yang lebih besar. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh signifikan dinamika pasang surut terhadap distribusi pH perairan. Peningkatan pH pada kondisi pasang dapat dikaitkan dengan masuknya massa air laut dari perairan terbuka

yang umumnya memiliki kondisi kimia yang lebih stabil dan cenderung basa. Proses pencampuran ini menyebabkan peningkatan nilai pH serta memperluas variasinya. Temuan ini sejalan dengan penelitian Nurhidayu & Harun yang menunjukkan bahwa pasang surut berperan dalam mengontrol variasi parameter kimia seperti pH melalui proses intrusi air laut. Sebaliknya, pada kondisi surut, nilai pH cenderung lebih rendah dan relatif lebih homogen. Hal ini menunjukkan dominasi pengaruh lokal seperti aktivitas antropogenik, termasuk limbah domestik, limpasan daratan, serta proses dekomposisi bahan organik yang dapat menurunkan nilai pH perairan (Sidauruk et al., 2024).

c. Keekeruhan (*Turbidity*)

Boxplot pada Gambar C menunjukkan pola berbeda dibandingkan parameter lainnya, dimana keekeruhan memiliki nilai median yang lebih tinggi pada kondisi surut dibandingkan kondisi pasang. Selain itu, rentang nilai pada kondisi surut juga lebih lebar, yang menunjukkan peningkatan variabilitas. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada fase surut terjadi peningkatan konsentrasi partikel tersuspensi dalam kolom air. Hal ini dapat disebabkan oleh berkurangnya kedalaman air serta melemahnya proses pencampuran, sehingga partikel tersuspensi lebih terkonsentrasi di perairan pelabuhan. Selain itu, proses resuspensi sedimen akibat aktivitas kapal dan arus lokal juga berkontribusi terhadap peningkatan keekeruhan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Hasmawati et al. yang menunjukkan bahwa dinamika pasang surut berpengaruh terhadap distribusi sedimen tersuspensi di perairan pesisir. Penelitian Bamaniya et al. juga menjelaskan bahwa fase pasang surut dapat memicu resuspensi sedimen yang meningkatkan keekeruhan perairan.

Parameter dengan Variasi Rendah

a. Suhu (*Temperature*)

Parameter suhu menunjukkan variasi yang relatif kecil antara kondisi pasang dan surut, dengan nilai yang cenderung stabil di seluruh lokasi penelitian. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu perairan lebih dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti radiasi matahari dan kondisi atmosfer dibandingkan dinamika pasang surut. Stabilitas suhu ini juga menunjukkan bahwa proses pencampuran massa air tidak dipengaruhi secara langsung oleh dinamika pasang surut, melainkan lebih dikontrol oleh faktor eksternal seperti kondisi atmosfer serta dinamika pencampuran massa air di kolom perairan (Zhong & Chien, 2024; Ahmed et al., 2025).

b. Salinitas

Salinitas menunjukkan variasi yang relatif kecil antar kondisi pasang dan surut, yang mengindikasikan bahwa massa air di perairan pelabuhan cenderung stabil. Hal ini disebabkan oleh dominasi air laut dibandingkan pengaruh air tawar, serta adanya proses pencampuran yang cukup efektif selama siklus pasang surut. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Shil et al. (2014) yang menyatakan bahwa pada perairan pelabuhan, variasi salinitas cenderung terbatas akibat dominasi massa air laut.

c. Konduktivitas (*Electrical Conductivity*)

Nilai konduktivitas menunjukkan pola yang relatif stabil dan tidak berbeda signifikan antara kondisi pasang dan surut. Hal ini berkaitan erat dengan konsentrasi ion terlarut dalam perairan yang relatif konstan, serta hubungan linier antara konduktivitas dan salinitas. Stabilitas ini menunjukkan bahwa dinamika pasang surut tidak memberikan pengaruh besar terhadap distribusi ion terlarut di perairan pelabuhan (Cereja et al., 2022).

d. *Total Dissolved Solids* (TDS)

TDS menunjukkan variasi yang relatif kecil antar kondisi pasang dan surut, yang

mengindikasikan bahwa konsentrasi zat terlarut dalam perairan cenderung stabil. Hal ini disebabkan oleh dominasi massa air laut yang homogen serta terbatasnya pengaruh input air tawar. Selain itu, hubungan erat antara TDS, salinitas, dan konduktivitas menyebabkan ketiga parameter ini menunjukkan pola yang serupa dalam distribusinya.

Secara keseluruhan, ketiga parameter menunjukkan respons yang berbeda terhadap dinamika pasang surut. Parameter yang berkaitan dengan kualitas kimia perairan seperti DO dan pH cenderung meningkat pada kondisi pasang akibat masuknya massa air laut dari perairan terbuka yang memperkuat proses pencampuran dan meningkatkan homogenitas perairan. Sebaliknya, parameter kekeruhan menunjukkan pola yang berlawanan, dengan nilai yang lebih tinggi pada kondisi surut akibat akumulasi partikel tersuspensi serta dominasi faktor lokal.

Pola ini menegaskan bahwa dinamika pasang surut berperan sebagai mekanisme utama dalam mengontrol distribusi parameter fisika-kimia melalui proses pencampuran massa air, pengenceran, serta resuspensi sedimen. Pada sistem pelabuhan yang bersifat semi-tertutup seperti Pelabuhan Bitung, interaksi antara dinamika oseanografi dan aktivitas antropogenik menghasilkan variasi kualitas air yang kompleks secara spasial dan temporal.

Uji Kruskal-Wallis

Hasil uji Kruskal-Wallis pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada kondisi pasang, sebagian besar parameter fisika-kimia tidak berbeda signifikan antar lokasi ($p > 0,05$), kecuali kekeruhan ($p < 0,05$). Kondisi ini mengindikasikan dominasi proses pencampuran massa air (mixing) dan flushing yang menghasilkan perairan yang relatif homogen secara spasial.

Sebaliknya, pada kondisi surut, hampir seluruh parameter—meliputi pH, konduktivitas, kekeruhan, DO, TDS, dan salinitas—menunjukkan perbedaan signifikan antar lokasi ($p < 0,05$), sementara suhu tetap tidak berbeda signifikan ($p > 0,05$). Hal ini mencerminkan melemahnya proses pencampuran serta meningkatnya pengaruh faktor lokal terhadap kualitas perairan.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Uji Kruskal-Wallis

Parameter	Pasang	Surut	Interpretasi
Temperatur	0,620	0,120	tidak berbeda
pH	0,850	0,043	berbeda saat surut
Konduktivitas	0,520	0,003	berbeda saat surut
Kekeruhan	0,015	<0,001	berbeda
DO	0,692	0,004	berbeda saat surut
TDS	0,134	0,003	berbeda saat surut
Salinitas	0,453	0,003	berbeda saat surut

Penurunan intensitas pencampuran pada fase surut, yang ditandai oleh volume air yang lebih rendah dan berkurangnya pengaruh air laut terbuka, menyebabkan kemampuan flushing menurun. Akibatnya, parameter fisika-kimia seperti pH, DO, dan konduktivitas lebih merefleksikan kondisi spesifik masing-masing lokasi, termasuk pengaruh aktivitas antropogenik seperti pergerakan kapal, limpasan daratan, dan pembuangan limbah operasional.

Selain itu, peningkatan kekeruhan pada kondisi surut mengindikasikan akumulasi partikel tersuspensi dan proses resuspensi sedimen, yang diperkuat oleh turbulensi akibat aktivitas kapal di kawasan pelabuhan. Pola ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kondisi surut meningkatkan heterogenitas kualitas perairan akibat berkurangnya proses pencampuran massa air (Shil et al., 2014).

Secara keseluruhan, dinamika pasang surut menunjukkan peran yang berbeda terhadap masing-masing parameter, dimana parameter kimia seperti DO dan pH cenderung meningkat pada kondisi pasang akibat proses pencampuran dan pengenceran, sedangkan kekeruhan

menunjukkan pola sebaliknya dengan nilai yang lebih tinggi pada kondisi surut. Pola ini menegaskan bahwa pasang surut berperan sebagai mekanisme utama dalam mengontrol distribusi parameter fisika-kimia melalui proses pencampuran massa air, pengenceran, dan resuspensi sedimen. Pada sistem pelabuhan semi-tertutup seperti Pelabuhan Bitung, interaksi antara dinamika oseanografi dan aktivitas antropogenik menghasilkan variasi kualitas air yang kompleks secara spasial dan temporal.

Interpretasi Kondisi Surut

Berbeda dengan kondisi pasang, hasil uji statistik menunjukkan bahwa pada kondisi surut sebagian besar parameter mengalami perbedaan signifikan antar lokasi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh faktor lokal menjadi lebih dominan ketika proses pencampuran massa air melemah.

Pada kondisi surut, volume air yang lebih rendah serta berkurangnya pengaruh air laut terbuka menyebabkan kemampuan *flushing* perairan menurun. Akibatnya, parameter fisika-kimia seperti pH, DO, dan konduktivitas lebih mencerminkan kondisi spesifik masing-masing lokasi, termasuk pengaruh aktivitas antropogenik seperti pergerakan kapal, limbah domestik, dan limpasan daratan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Shil et al. (2014) yang menyatakan bahwa variasi kualitas air cenderung lebih tinggi pada kondisi surut akibat berkurangnya proses pencampuran.

Selain itu, perbedaan signifikan pada kekeruhan mengindikasikan adanya peningkatan resuspensi sedimen serta akumulasi partikel tersuspensi di beberapa lokasi. Kondisi ini diperkuat oleh aktivitas kapal yang dapat meningkatkan turbulensi lokal, terutama di kawasan pelabuhan yang memiliki intensitas operasional tinggi.

Pengaruh Dinamika Pasang Surut

Pengaruh dinamika pasang surut terhadap variasi parameter fisika-kimia dianalisis menggunakan *Linear Mixed Model* (LMM), yang mampu mengakomodasi struktur data berulang dengan memisahkan efek tetap kondisi pasang surut dan variasi acak antar lokasi serta waktu pengamatan.

Tabel 3. Ringkasan Uji *Linear Mixed Model* (LMM)

Parameter	F	p-value	Estimate	Interpretasi
Temperatur	14,487	<0,001	-0,265	Signifikan; suhu lebih rendah saat pasang
pH	14,885	<0,001	+0,430	Signifikan; pH meningkat saat pasang
Konduktivitas	12,917	0,001	-0,217	Signifikan; konduktivitas menurun saat pasang
Kekeruhan	6,186	0,018	-0,083	Signifikan; kekeruhan menurun saat pasang
DO	7,392	0,010	+0,795	Signifikan; DO meningkat saat pasang
TDS	17,920	<0,001	-1.555,556	Signifikan; TDS menurun saat pasang
Salinitas	17,601	<0,001	-0,184	Signifikan; salinitas menurun saat pasang

Analisis *Linear Mixed Model* (LMM) mengonfirmasi bahwa dinamika pasang surut secara signifikan memengaruhi seluruh parameter fisika-kimia air laut ($p < 0,05$). Nilai estimasi menunjukkan bahwa parameter pH dan *Dissolved Oxygen* (DO) meningkat pada kondisi pasang (estimate positif), sedangkan suhu, konduktivitas, kekeruhan, TDS, dan salinitas cenderung menurun (estimate negatif).

Pola ini mengindikasikan bahwa kondisi pasang berperan dalam meningkatkan kualitas kimia perairan melalui masuknya massa air laut dari perairan terbuka yang lebih kaya oksigen dan memiliki karakteristik lebih stabil, sekaligus menurunkan konsentrasi partikel tersuspensi dan zat terlarut melalui mekanisme pengenceran (*dilution*) dan pencampuran massa air.

Pada perairan pelabuhan semi-tertutup seperti Pelabuhan Bitung, pengaruh pasang surut menjadi lebih kompleks akibat interaksinya dengan tekanan antropogenik. Aktivitas kapal dan sumber pencemar lokal dapat memodifikasi distribusi parameter melalui proses resuspensi dan akumulasi, sehingga dinamika pasang surut berperan tidak hanya sebagai agen pencampuran, tetapi juga sebagai pengendali distribusi pencemar. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menekankan peran penting pasang surut dalam mengatur distribusi parameter fisika-kimia dan pencemar di kawasan pelabuhan (Cereja et al., 2022; Wibisono et al., 2022).

Integrasi Dinamika Pasang Surut dan Kualitas Perairan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter fisika-kimia di perairan Pelabuhan Bitung merupakan hasil interaksi antara dinamika pasang surut dan aktivitas antropogenik di kawasan pelabuhan. Pada kondisi pasang, intensitas pencampuran massa air yang lebih tinggi menghasilkan distribusi parameter yang relatif homogen, sedangkan pada kondisi surut, melemahnya proses pencampuran meningkatkan dominasi sumber pencemar lokal dan memperbesar variasi antar lokasi.

Pada sistem perairan pelabuhan semi-tertutup seperti Pelabuhan Bitung, dinamika pasang surut berperan sebagai pengendali utama proses sirkulasi dan *flushing*, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh tingkat aktivitas manusia. Aktivitas kapal, termasuk pergerakan, bongkar muat, serta pembuangan limbah operasional, berkontribusi terhadap peningkatan beban pencemar seperti padatan tersuspensi dan logam berat, yang selanjutnya mengalami redistribusi melalui proses resuspensi dan pencampuran (Cereja et al., 2022; Wibisono et al., 2022).

Interaksi antara proses alamiah dan tekanan antropogenik tersebut menghasilkan dinamika yang kompleks, di mana pasang surut tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme pencampuran, tetapi juga sebagai modulator yang dapat memperbesar atau meredam konsentrasi pencemar sesuai kondisi hidrodinamika. Oleh karena itu, pengelolaan kualitas perairan di kawasan pelabuhan perlu mengintegrasikan dinamika pasang surut dengan aktivitas operasional pelabuhan guna merumuskan strategi pengendalian pencemaran yang lebih efektif dan adaptif.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika pasang surut memengaruhi variasi parameter fisika-kimia air laut, dimana kondisi pasang menghasilkan distribusi yang lebih seragam, sedangkan kondisi surut meningkatkan variasi antar lokasi. Pola ini mengindikasikan bahwa intensitas pencampuran massa air lebih tinggi pada fase pasang dibandingkan surut.

Temuan ini konsisten dengan studi Shil et al. (2014) serta Nurhidayu & Harun (2024), yang menyatakan bahwa pasang surut mengendalikan pencampuran massa air dan distribusi parameter kualitas air melalui mekanisme intrusi air laut dan pengenceran. Namun demikian, beberapa penelitian menunjukkan pola yang berbeda, di mana parameter seperti TSS dan kekeruhan dapat meningkat pada kondisi pasang akibat resuspensi sedimen (Hasmawati et al., 2023). Selain itu, dinamika pasang surut juga berperan dalam memodulasi distribusi logam berat melalui proses *flushing* dan resuspensi (Wibisono et al., 2022; Rashid et al., 2025). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons parameter fisika-kimia terhadap dinamika pasang surut bersifat kontekstual dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidrodinamika serta tingkat aktivitas antropogenik di masing-masing lokasi penelitian.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, diantaranya pengambilan sampel yang terbatas pada dua periode sehingga belum merepresentasikan variasi temporal jangka panjang. Selain itu, parameter oseanografi seperti arus, gelombang, dan curah hujan tidak diukur secara langsung, padahal berperan penting dalam proses pencampuran dan

resuspensi sedimen. Penelitian ini juga belum mencakup analisis sedimen, lapisan minyak permukaan, maupun senyawa organotin seperti tributyltin (TBT) yang berpotensi berasal dari aktivitas kapal. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan cakupan parameter dan durasi pengamatan yang lebih luas diperlukan untuk memperoleh pemahaman kualitas perairan yang lebih komprehensif.

Implikasi terhadap Kualitas Perairan dan Pengelolaan Pelabuhan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika pasang surut memiliki peran penting dalam membentuk kualitas perairan di kawasan pelabuhan. Pada kondisi pasang, proses pencampuran yang lebih intensif berkontribusi terhadap pengenceran bahan pencemar. Sebaliknya, pada kondisi surut, risiko akumulasi pencemar cenderung meningkat akibat berkurangnya proses pencampuran. Implikasi ini relevan dalam pengelolaan pelabuhan berbasis konsep *green port*. Dengan memasukkan dinamika pasang surut, program pemantauan kualitas air dapat menghasilkan identifikasi yang lebih akurat terhadap area yang berpotensi mengalami pencemaran tinggi. Pendekatan ini juga dapat memperkuat strategi pengendalian pencemaran serta mendukung penerapan pengelolaan lingkungan pelabuhan yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Dinamika pasang surut terbukti berperan signifikan dalam mengontrol distribusi dan variabilitas parameter fisika-kimia air laut di perairan Pelabuhan Bitung. Saat kondisi pasang, distribusi parameter memiliki variasi rendah akibat intensifikasi proses pencampuran massa air dari perairan terbuka, yang berkontribusi pada peningkatan parameter kimia seperti DO dan pH serta penurunan konsentrasi zat terlarut melalui mekanisme pengenceran. Sebaliknya, kondisi surut menunjukkan peningkatan heterogenitas spasial yang lebih tinggi, yang tercermin dari perbedaan signifikan antar lokasi serta nilai IQR yang lebih besar pada beberapa parameter, mengindikasikan dominasi faktor lokal seperti aktivitas kapal dan limpasan daratan.

Analisis statistik melalui uji Kruskal-Wallis dan LMM mengonfirmasi bahwa dinamika pasang surut tidak hanya memengaruhi konsentrasi sebaran parameter, tetapi juga struktur variabilitasnya secara spasial dan temporal. Hal ini menegaskan bahwa pasang surut berfungsi sebagai mekanisme utama dalam mengendalikan kualitas perairan dengan sistem semi-tertutup.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa fase surut merupakan kondisi yang lebih rentan terhadap peningkatan variabilitas dan potensi akumulasi pencemar, sehingga perlu menjadi prioritas dalam pemantauan kualitas air. Dengan demikian, integrasi dinamika pasang surut dalam strategi pengelolaan lingkungan pelabuhan menjadi krusial untuk mendukung implementasi konsep *green port* yang adaptif dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Rahman, M. M., Islam, M. S., & Hossain, M. B. (2025). Assessment of coastal water quality under anthropogenic and environmental influences. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1538897. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1538897>
- Bamaniya, P. K., Vaghela, D., Bambhaniya, I. J., & Bhadarka, M. (2024). Assessment of marine water quality parameters in Veraval fishing harbour, Gujarat. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(11S), 555–563. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i11sh.2969>
- Belanha, L., Paz, O. L. S., Padial, A. A., et al. (2026). Water pollution drives environmental degradation in a seasonally influenced Neotropical coastal river. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, 322. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14956-w>

- Cereja, R., Brotas, V., Nunes, S., Rodrigues, M., Cruz, J. P. C., & Brito, C. (2022). Tidal influence on water quality indicators in a temperate mesotidal estuary (Tagus Estuary, Portugal). *Ecological Indicators*, 136, 108715. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108715>
- Chen, X.-L., Zhang, P., He, Y.-X., Zhou, L., & Zhang, J.-B. (2026). Tidal dynamics shaped the dissolved organic carbon fate and exchange flux across estuary–coastal water continuum in Zhanjiang Bay, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14, 123. <https://doi.org/10.3390/jmse14020123>
- Hasmawati, I., Irawati, & Haraty, S. R. (2023). Analysis of the distribution of suspended sediments at high and low tides in Nambo coastal waters, Kendari City. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 28(3), 420–427
- Hassan Yusuf, Z., Haris, H., & Obinna, A. G. (2025). Effect of tidal events on water quality of Sungai Perai, Penang, Malaysia. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 21, 1784–1795. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v21n2.3706>
- Lim, Y.-C., Chen, C.-F., Tsai, M.-L., Wu, C.-H., Lin, Y.-L., Wang, M.-H., Albarico, F. P. J. B., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2022). Impacts of fishing vessels on the heavy metal contamination in sediments: A case study of Qianzhen Fishing Port in southern Taiwan. *Water*, 14(7), 1174. <https://doi.org/10.3390/w14071174>
- Mahyari, A. A., & Mahmoudi, H. (2024). Analysis of international measures to reduce the environmental pollution caused by oil tankers. *Juridical Tribune*, 21(1), 193–213. <https://doi.org/10.17151/jurid.2024.21.1.10>
- Manullang, C. Y., Lestari, Tapilatu, Y., & Arifin, Z. (2017). Assessment of Fe, Cu, Zn, Pb, Cd & Hg in Ambon Bay surface sediments. *Marine Research in Indonesia*, 42(2), 77–86. <https://doi.org/10.14203/mri.v42i2.170>
- Nurhidayu, S., & Harun, N. Z. (2024). Tidal and seasonal effects on water quality in the Matang Mangrove Forest Reserve, Malaysia. *Modern Applied Science*, 18(1), 39–xx. <https://doi.org/10.5539/mas.v18n1p39>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
- Rashid, C. P., Jyothibabu, R., Arunpandi, N., Alok, K. T., Vidhya, V., Snigtha, T. R., Gireeshkumar, T. R., Sudheesh, V., Marigoudar, S. R., & Sharma, K. V. (2025). Tidal control of heavy metal loading in the nearshore of the northwestern Indian coast. *Science of the Total Environment*, 975, 179264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179264>
- Shil, S. C., Islam, M. S., Hoq, M. E., Meghla, N. T., & Sarkar, L. (2014). Tidal influence on physicochemical parameters of water from the Mongla Port near Sundarban mangroves in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Environmental Science*, 27, 142–149
- Sidauruk, V., Astawa Karang, I. W. G., & Nurweda Putra, I. D. N. (2024). Analisis status mutu air laut berdasarkan metode STORET di Pelabuhan Gilimanuk Bali. *Journal of Marine Research and Technology*, 7(1), 55. <https://doi.org/10.24843/jmrt.2024.v07.i01.p09>
- Teuchies, J., Cox, T. J. S., Van Iterbeek, K., Meysman, F. J. R., & Blust, R. (2020). The impact of scrubber discharge on water quality in estuaries and ports. *Environmental Sciences Europe*. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00380-z>
- Wibisono, Y., Tjahjono, A., Sugiharto, R., & Wahyuni, O. (2022). Factors affecting water quality and surface sediment at the Port of Tanjung Emas Semarang during the East Asian monsoon. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 49(10). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.10.23>

- Ytreberg, E., Hansson, K., Lunde, A., Parsmo, R., & Lagerström, M. (2022). Metal and PAH loads from ships and boats relative to other sources in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113904. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113904>
- Zhang, Y., Liu, H., Chen, X., & Wang, L. (2025). Tidal influence on dissolved organic matter dynamics in estuarine systems. *Water*, 17(2), 226. <https://doi.org/10.3390/w17020226>
- Zhong, Y., & Chien, H. (2024). Stratification effects on estuarine mixing: Comparative analysis of the Danshui Estuary and a thermal discharge outlet. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 345. <https://doi.org/10.3390/jmse12020345>.