

Effects of Barge and Tugboat Activities on Seawater Quality in the Geothermal Coastal Waters of Moinit Beach, South Minahasa

(Pengaruh Aktivitas Kapal Tongkang dan Tunda terhadap Kualitas Air Pesisir Berkarakter Geotermal di Pantai Moinit, Minahasa Selatan)

Andarum Septianto^{1,2*}, Wilmy E. Pelle³, James J.H. Paulus³, Heffry V. Dien³, Deiske A. Sumilat³, Isnawati L. Wantasen⁴

¹Master of Marine Science Program, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University, Manado

²North Sulawesi Maritime Polytechnic

³Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Sam Ratulangi University, Manado

⁴Faculty of Cultural Sciences, Sam Ratulangi University, Manado

*Corresponding author: andarum@poltekpelsulut.ac.id

Manuscript received: 19 April. 2026. Revision accepted: 27 June 2026

Abstract. This study aimed to analyze changes in seawater quality before and after vessel activity, evaluate their compliance with Indonesian marine water quality standards, and formulate implications for coastal environmental management. A descriptive-comparative quantitative approach with a before-after sampling design was applied at three stations: ST 1 as the vessel maneuvering zone, ST 2 as the geothermal and tourism-sensitive zone, and ST 3 as the control zone. In situ measurements included temperature and pH, with three replicates at each station. Ex situ analyses of turbidity, Total Suspended Solids (TSS), oil and grease, pH, Dissolved Oxygen (DO), and salinity were conducted at SGS-WLN Manado Laboratory, accredited by the National Accreditation Committee (KAN LP-433-IDN), under Analytical Report No. 1089379-1. Data were analyzed descriptively and using the Wilcoxon Signed-Rank Test for paired parameters that were eligible for statistical testing. The results showed that the seawater quality of Moinit Beach was generally in good condition, as indicated by low turbidity, TSS <10 mg/L, DO ranging from 7.71 to 7.92 mg/L, and pH ranging from 7.97 to 8.22. Temperature increased significantly after vessel activity ($p = 0.011$). The most critical finding was the oil and grease concentration at ST 1 after vessel activity, which reached 5 mg/L, or five times higher than the threshold of 1 mg/L, while ST 2 recorded 1 mg/L and ST 3 remained <1 mg/L. This pattern indicates that the impact of vessel activity was local and selective, particularly in the maneuvering zone. This study is important for environmental stakeholders because it provides initial laboratory-based evidence from an accredited laboratory to support oil pollution control, vessel operation zoning, and event-based monitoring in the geothermal coastal waters of Moinit Beach.

Keywords: barge; tugboat; oil and grease; seawater quality; geothermal coast; Moinit Beach

Absrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan kualitas air laut sebelum dan sesudah aktivitas kapal, mengevaluasi kesesuaiannya terhadap baku mutu air laut Indonesia, serta merumuskan implikasi pengelolaan lingkungan pesisir. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan desain before-after sampling pada tiga stasiun: ST 1 sebagai zona manuver kapal, ST 2 sebagai zona sensitif geotermal dan wisata, serta ST 3 sebagai zona kontrol. Pengukuran in situ mencakup suhu dan pH dengan tiga ulangan per stasiun. Analisis ex situ terhadap kekeruhan, Total Suspended Solids (TSS), minyak dan lemak, pH, Dissolved Oxygen (DO), dan salinitas dilakukan di Laboratorium SGS-WLN Manado yang terakreditasi KAN LP-433-IDN berdasarkan Analytical Report No. 1089379-1. Data dianalisis secara deskriptif dan dengan Wilcoxon Signed-Rank Test untuk parameter berpasangan yang layak diuji. Hasil menunjukkan bahwa kualitas air Pantai Moinit secara umum masih berada dalam kondisi baik, ditunjukkan oleh kekeruhan rendah, TSS <10 mg/L, DO 7,71-7,92 mg/L, dan pH 7,97-8,22. Suhu meningkat signifikan sesudah aktivitas kapal ($p = 0,011$). Temuan paling kritis adalah minyak dan lemak di ST 1 sesudah aktivitas kapal sebesar 5 mg/L, atau lima kali lebih tinggi dari ambang 1 mg/L, sementara ST 2 tercatat 1 mg/L dan ST 3 tetap <1 mg/L. Pola ini menunjukkan bahwa dampak kapal bersifat lokal dan selektif, terutama pada zona manuver. Studi ini penting bagi pemerhati lingkungan karena menyediakan bukti awal berbasis laboratorium terakreditasi untuk pengendalian pencemaran minyak, pengaturan zona operasi kapal, dan pemantauan berbasis kejadian di pesisir geotermal Pantai Moinit.

Kata kunci: kapal tongkang; kapal tunda; minyak dan lemak; kualitas air laut; pesisir geotermal; Pantai Moinit

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan ruang ekologis dan ekonomi yang produktif, tetapi rentan terhadap tekanan antropogenik karena menjadi lokasi pertemuan antara aktivitas daratan, laut, wisata, perikanan, dan transportasi. Pada kawasan pesisir dangkal, aktivitas pelayaran tidak

hanya menghasilkan tekanan visual atau kebisingan, tetapi dapat mengubah kondisi fisika-kimia perairan melalui turbulensi, resuspensi sedimen, pelepasan limbah operasional, dan masukan hidrokarbon. Dampak tersebut penting dikaji karena kualitas air merupakan indikator awal perubahan daya dukung ekosistem pesisir.

Dalam sistem logistik material curah, kapal tongkang dan tunda digunakan karena mampu memindahkan muatan besar dengan efisiensi operasional tinggi. Kajian terbaru tentang articulated tug-barge menunjukkan bahwa sistem tunda-tongkang terus berkembang sebagai moda transportasi maritim yang fleksibel dan efisien, termasuk untuk muatan curah, bahan kimia, minyak, dan container (Yanakiev et al., 2025). Namun, efisiensi tersebut perlu diimbangi dengan pengendalian lingkungan, terutama ketika operasi berlangsung dekat pantai, kawasan wisata, atau perairan sensitif.

Dampak utama kapal tongkang dan tunda terhadap kualitas air dapat terjadi melalui dua mekanisme. Pertama, gangguan fisik-hidrodinamika berupa propeller wash kapal tunda, drawdown, aliran balik di bawah lambung, dan turbulensi manuver yang dapat meningkatkan tegangan geser dasar serta mengangkat sedimen ke kolom air (Mao & Chen, 2020). Kedua, dampak kimia-operasional berupa masuknya minyak, lemak, residu bahan bakar, pelumas, air bilga, dan kebocoran sistem mesin. Kajian global menunjukkan bahwa chronic oiling di laut sangat berkaitan dengan sumber antropogenik dan jalur pelayaran, sehingga pencemaran minyak skala kecil tetapi berulang tidak dapat dianggap sebagai isu minor (Dong et al., 2022).

Pantai Moinit di Kecamatan Tenga, Kabupaten Minahasa Selatan, memiliki karakter yang lebih kompleks dibandingkan perairan pesisir biasa. Kawasan ini memiliki sumber air panas geotermal yang muncul di tepi pantai dan bercampur dengan air laut, sehingga membentuk variasi suhu dan salinitas alami. Pada saat yang sama, Pantai Moinit juga dimanfaatkan sebagai destinasi wisata dan kawasan perikanan lokal. Ketika aktivitas kapal tongkang dan tunda beroperasi pada ruang pesisir yang sama, muncul kebutuhan untuk membedakan perubahan kualitas air yang bersumber dari karakter geotermal alami dan perubahan yang berkaitan dengan aktivitas kapal.

Kesenjangan penelitian yang menjadi dasar studi ini adalah belum tersedianya data kuantitatif lokal yang mengevaluasi kualitas air Pantai Moinit sebelum dan sesudah aktivitas kapal tongkang dan tunda dengan dukungan analisis laboratorium terakreditasi. Ketiadaan data tersebut menyulitkan pemerintah daerah, pengelola kawasan, pelaku usaha, dan pemerhati lingkungan dalam menentukan apakah aktivitas kapal masih berada dalam batas daya dukung pesisir atau telah memerlukan intervensi pengendalian. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki nilai kebaruan sebagai baseline impact assessment pada perairan pesisir geotermal yang beririsan langsung dengan aktivitas kapal.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mendeskripsikan kondisi parameter kualitas air laut sebelum dan sesudah aktivitas kapal tongkang dan tunda di Pantai Moinit; (2) menganalisis perbedaan parameter kunci kualitas air dan mengevaluasi kesesuaiannya terhadap baku mutu air laut; serta (3) merumuskan implikasi pengelolaan lingkungan yang berbasis bukti untuk mengurangi risiko pencemaran pada zona manuver kapal dan kawasan pesisir sensitif.

METODE

Penelitian dilaksanakan di perairan Pantai Moinit, Kecamatan Tenga, Kabupaten Minahasa Selatan, Provinsi Sulawesi Utara. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif komparatif dengan desain *before after sampling* untuk membandingkan kondisi kualitas air laut sebelum dan sesudah aktivitas kapal tongkang dan kapal tunda tanpa melakukan intervensi terhadap kondisi operasional di lapangan.

Lokasi penelitian terdiri atas tiga stasiun yang ditetapkan secara *purposive* berdasarkan karakteristik ekologis dan tingkat paparan aktivitas kapal. ST 1 merupakan zona manuver kapal tongkang dan kapal tunda yang merepresentasikan daerah dengan potensi dampak operasional tertinggi. ST 2 merupakan kawasan sensitif yang dipengaruhi sumber air panas geotermal dan aktivitas wisata. ST 3 ditetapkan sebagai zona kontrol karena berada di luar pengaruh langsung aktivitas kapal. Penetapan ketiga stasiun tersebut bertujuan memperoleh gambaran spasial mengenai perbedaan kualitas air antara zona terdampak, kawasan sensitif, dan kawasan pembandingan.

[Sisipkan Gambar 1 di sini: Peta stasiun pengambilan sampel di Pantai Moinit, Minahasa Selatan.]

Tabel 1. Stasiun pengambilan sampel dan zonasi fungsional wilayah penelitian.

| Stasiun | Zona dan fungsi | Koordinat | Justifikasi ilmiah |
|---------|---|-------------------------------------|---|
| ST 1 | Zona dampak primer; area manuver kapal tunda dan tongkang | 1°11'7,84" LU; 124°29'20,60" BT | Berada pada area manuver dan anchorage langsung; dipilih untuk mendeteksi tekanan hidrodinamika dan potensi masukan hidrokarbon. |
| ST 2 | Zona sensitif geotermal dan wisata | 1°11'4,92" LU; 124°29'25,44" BT | Berada dekat sumber air panas dan kawasan wisata; dipilih untuk menilai respons perairan sensitif yang memiliki variasi termal alami. |
| ST 3 | Zona kontrol | 1°11'12,01" LU; 124°29'25,23" BT | Berada di luar pengaruh langsung aktivitas kapal; digunakan sebagai pembandingan spasial terhadap zona terdampak. |

Pengukuran lapangan (*in situ*) dilakukan terhadap parameter suhu dan pH. Setiap parameter diukur sebanyak tiga kali ulangan pada masing masing stasiun baik sebelum maupun sesudah aktivitas kapal. Pengulangan dilakukan untuk memperoleh gambaran variasi lokal setiap stasiun sekaligus mendukung analisis statistik terhadap data berpasangan.

Analisis laboratorium (*ex situ*) dilaksanakan di Laboratorium SGS WLN Manado yang telah terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional dengan nomor akreditasi LP 433 IDN berdasarkan *Analytical Report* No. 1089379-1. Analisis laboratorium dilakukan terhadap enam sampel air laut yang mewakili tiga stasiun sebelum aktivitas kapal pada tanggal 7 Maret 2026 dan sesudah aktivitas kapal pada tanggal 8 Maret 2026. Parameter yang dianalisis meliputi kekeruhan, *Total Suspended Solids* (TSS), minyak dan lemak, pH, *Dissolved Oxygen* (DO), serta salinitas. Pemilihan parameter tersebut dilakukan karena mewakili indikator perubahan fisik, kimia, serta potensi pencemaran akibat aktivitas kapal pada kawasan pesisir geotermal. Metode analisis mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* ((APHA) et al., 2023).

Hasil pengujian laboratorium yang ditampilkan dengan simbol "<" diperlakukan sebagai data tersensor di bawah *Reporting Limit* (RL), sehingga tidak diinterpretasikan sebagai nilai nol. Pendekatan tersebut digunakan agar interpretasi terhadap konsentrasi pencemar tetap sesuai dengan kemampuan pelaporan metode analisis laboratorium.

Analisis data dilakukan melalui analisis deskriptif dan analisis inferensial. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi setiap parameter kualitas air sebelum dan sesudah aktivitas kapal pada masing masing stasiun. Uji normalitas *Shapiro Wilk* digunakan sebagai dasar pemilihan metode statistik. Karena data merupakan pasangan pengamatan dan sebagian parameter tidak memenuhi asumsi parametrik, maka digunakan *Wilcoxon Signed Rank Test* untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah aktivitas kapal. Parameter kekeruhan,

TSS, serta minyak dan lemak tidak dianalisis menggunakan uji inferensial karena sebagian besar hasil pengujian berada di bawah *Reporting Limit*. Evaluasi kualitas air dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap baku mutu berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 dan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 dengan mempertimbangkan karakteristik alami kawasan pesisir geotermal, khususnya pada parameter salinitas.

Tabel 2. Kode sampel SGS-WLN dan parameter analisis laboratorium ex situ.

| Kode sampel SGS-WLN | Stasiun | Periode | Tanggal sampling | Parameter analisis |
|---------------------|---------|-------------------------|------------------|---|
| S-IDMDC1045299 | ST 1 | Sebelum aktivitas kapal | 7 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |
| S-IDMDC1045300 | ST 2 | Sebelum aktivitas kapal | 7 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |
| S-IDMDC1045301 | ST 3 | Sebelum aktivitas kapal | 7 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |
| S-IDMDC1045302 | ST 1 | Sesudah aktivitas kapal | 8 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |
| S-IDMDC1045303 | ST 2 | Sesudah aktivitas kapal | 8 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |
| S-IDMDC1045304 | ST 3 | Sesudah aktivitas kapal | 8 Maret 2026 | Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak, pH, DO, salinitas |

Sumber: Lampiran laporan penelitian; (Manado, 2026).

Tabel 3. Konteks meteorologi dan oseanografi selama pengambilan sampel.

| Parameter | 7 Maret 2026 | 8 Maret 2026 | Implikasi interpretative |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| Curah hujan | 0,0 mm | 0,0 mm | Tidak ada interferensi limpasan langsung. |
| Rata-rata suhu udara harian | 27,8°C | 28,1°C | Kondisi antardua hari relatif sebanding. |
| Angin | 6,3 km/jam | 5,9 km/jam | Tidak menunjukkan perbedaan besar yang dapat mendominasi variasi kualitas air. |
| Pasang surut | Kisaran pasang-surut lokal | Kisaran pasang-surut lokal | Interpretasi tetap mempertimbangkan pencampuran massa air pesisir. |
| Kondisi umum | Tidak hujan saat sampling | Tidak hujan saat sampling | Perbandingan before-after tidak didominasi oleh kejadian hujan. |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola Umum Kualitas Air Moinit

Hasil pengukuran lapangan dan analisis laboratorium menunjukkan bahwa kualitas air di Pantai Moinit secara umum masih berada dalam kondisi fisika kimia yang baik selama periode penelitian. Perbedaan kondisi kualitas air pada masing masing stasiun terutama dipengaruhi oleh karakteristik lokasi pengamatan. ST 1 merupakan zona manuver kapal tongkang dan kapal tunda yang menerima tekanan operasional secara langsung, ST 2 merupakan kawasan yang dipengaruhi aktivitas geotermal dan wisata, sedangkan ST 3 berfungsi sebagai zona kontrol yang relatif tidak terpengaruh aktivitas kapal.

Hasil pengukuran suhu menunjukkan adanya peningkatan setelah aktivitas kapal pada seluruh stasiun pengamatan. ST 2 memiliki suhu yang relatif lebih tinggi dibandingkan stasiun lainnya karena berada di sekitar sumber air panas geotermal, sedangkan peningkatan suhu pada ST 1 lebih mencerminkan respons terhadap aktivitas manuver kapal. Nilai pH *in situ* pada

seluruh stasiun relatif stabil dengan perubahan yang sangat kecil antara kondisi sebelum dan sesudah aktivitas kapal.

Tabel 4. Pola suhu dan pH in situ sebelum dan sesudah aktivitas kapal.

| Stasiun | Kondisi | Suhu 1 | Suhu 2 | Suhu 3 | Rata-rata suhu | Rata-rata pH in situ |
|---------|---------|--------|--------|--------|----------------|----------------------|
| ST 1 | Sebelum | 29,3 | 29,4 | 29,3 | 29,33 | 7,59 |
| ST 1 | Sesudah | 30,5 | 30,6 | 30,5 | 30,53 | 7,61 |
| ST 2 | Sebelum | 30,6 | 30,5 | 30,2 | 30,43 | 7,50 |
| ST 2 | Sesudah | 30,5 | 30,7 | 30,6 | 30,60 | 7,61 |
| ST 3 | Sebelum | 29,6 | 29,6 | 29,5 | 29,57 | 7,64 |
| ST 3 | Sesudah | 30,2 | 30,2 | 30,1 | 30,17 | 7,64 |

Sumber: Data primer penelitian, diolah (2026).

Pola tersebut menunjukkan bahwa kondisi dasar perairan Pantai Moinit masih relatif stabil. Variasi suhu yang terjadi lebih dipengaruhi oleh karakteristik lokasi dan aktivitas kapal dibandingkan perubahan kualitas air secara menyeluruh. Sementara itu, kestabilan pH mengindikasikan bahwa aktivitas kapal belum menyebabkan perubahan kimia perairan yang signifikan selama periode pengamatan.

Hasil Analisis Laboratorium

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa seluruh parameter kualitas air memberikan respons yang berbeda terhadap aktivitas kapal. Parameter kekeruhan pada ST 1 meningkat dari kurang dari 0,5 NTU sebelum aktivitas kapal menjadi 0,8 NTU setelah aktivitas kapal. ST 2 mengalami perubahan dari kurang dari 0,5 NTU menjadi 0,5 NTU, sedangkan ST 3 tetap berada di bawah batas pelaporan laboratorium. Parameter *Total Suspended Solids* (TSS) menunjukkan nilai kurang dari 10 mg/L pada seluruh stasiun baik sebelum maupun sesudah aktivitas kapal.

Perubahan yang paling menonjol terjadi pada parameter minyak dan lemak. Sebelum aktivitas kapal seluruh stasiun memiliki konsentrasi di bawah 1 mg/L. Setelah aktivitas kapal, konsentrasi minyak dan lemak di ST 1 meningkat menjadi 5 mg/L, ST 2 mencapai 1 mg/L, sedangkan ST 3 tetap berada di bawah 1 mg/L. Pola tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan konsentrasi minyak dan lemak terkonsentrasi pada zona manuver kapal.

Parameter pH laboratorium berada pada kisaran 7,97 sampai 8,22, sedangkan *Dissolved Oxygen* (DO) berkisar antara 7,71 sampai 7,92 mg/L. Nilai salinitas berada pada kisaran 31 sampai 32‰ dan menunjukkan variasi yang relatif kecil antarstasiun.

Tabel 5. Hasil analisis laboratorium parameter kualitas air laut di Pantai Moinit.

| Parameter | Satuan | ST 1 sebelum | ST 2 sebelum | ST 3 sebelum | ST 1 sesudah | ST 2 sesudah | ST 3 sesudah |
|------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kekeruhan | NTU | <0,5 | <0,5 | <0,5 | 0,8 | 0,5 | <0,5 |
| TSS | mg/L | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 |
| Minyak dan lemak | mg/L | <1 | <1 | <1 | 5 | 1 | <1 |
| pH | - | 8,10 | 8,06 | 8,08 | 8,22 | 7,97 | 8,07 |
| DO | mg/L | 7,92 | 7,76 | 7,88 | 7,91 | 7,79 | 7,71 |
| Salinitas | ‰ | 32 | 32 | 32 | 31 | 32 | 32 |

Sumber: (Manado, 2026). Tanda "<" menunjukkan nilai di bawah Reporting Limit.

Perbedaan Statistik Sebelum Dan Sesudah Aktivitas Kapal

Analisis menggunakan *Wilcoxon Signed Rank Test* menunjukkan bahwa hanya parameter suhu yang mengalami perubahan signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah aktivitas kapal. Suhu meningkat dari rata-rata 29,76°C menjadi 30,43°C dengan nilai

signifikansi sebesar 0,011. Sebaliknya, parameter pH *in situ* tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan nilai signifikansi sebesar 0,107. Analisis gabungan terhadap parameter pH laboratorium, DO, dan salinitas juga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan.

Tabel 6. Hasil Wilcoxon Signed-Rank Test untuk perbandingan sebelum dan sesudah aktivitas kapal.

| Parameter/kelompok | Rata-rata sebelum | Rata-rata sesudah | Z | p-value | Interpretasi |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------|---------|--|
| Suhu | 29,76°C | 30,43°C | -2,558 | 0,011 | Meningkat signifikan sesudah aktivitas kapal |
| pH <i>in situ</i> | 7,58 | 7,62 | -1,612 | 0,107 | Tidak signifikan |
| pH, DO, salinitas laboratorium | - | - | -1,069 | 0,285 | Tidak signifikan |
| Kekeruhan, TSS, minyak dan lemak | Deskriptif | Deskriptif | - | - | Tidak diuji inferensial karena sebagian besar nilai berada di bawah RL |

Sumber: Output SPSS dan data laboratorium, diolah (2026).

Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivitas kapal tidak memberikan pengaruh yang sama terhadap seluruh parameter kualitas air. Respons yang muncul bersifat selektif, di mana perubahan suhu dapat dideteksi secara statistik, sedangkan perubahan kualitas air lainnya lebih terlihat melalui evaluasi deskriptif terhadap parameter tertentu seperti minyak dan lemak.

Kesesuaian Terhadap Baku Mutu Air Laut

Evaluasi terhadap baku mutu menunjukkan bahwa sebagian besar parameter kualitas air masih memenuhi ketentuan yang berlaku. Nilai kekeruhan, TSS, pH, dan DO masih berada dalam kisaran baku mutu pada seluruh stasiun pengamatan. Ketidaksihesuaian hanya ditemukan pada parameter minyak dan lemak di ST 1 setelah aktivitas kapal yang mencapai 5 mg/L atau lima kali lebih tinggi dibandingkan ambang baku mutu sebesar 1 mg/L.

Parameter salinitas berada pada kisaran 31 sampai 32‰. Nilai tersebut tidak diinterpretasikan sebagai bentuk pencemaran karena karakteristik Pantai Moinit dipengaruhi oleh sistem geotermal yang menyebabkan variasi alami salinitas.

Tabel 7. Status kesesuaian parameter kunci terhadap baku mutu air laut Indonesia.

| Parameter | Baku mutu untuk wisata bahari/biota | Nilai terukur | Nilai kritis | Status | Interpretasi |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|----------------|--|
| Kekeruhan | <5 NTU | 0,8 NTU di ST 1 sesudah aktivitas | | Memenuhi | Meningkat ringan sesudah aktivitas, tetapi tetap rendah. |
| TSS | 20 mg/L | <10 mg/L di seluruh stasiun | | Memenuhi | Tidak ada pelampauan terukur. |
| Minyak dan lemak | 1 mg/L | 5 mg/L di ST 1 sesudah aktivitas | | Tidak memenuhi | Parameter kritis; melampaui baku mutu lima kali. |
| pH | 7,0-8,5 | 7,97-8,22 berdasarkan laboratorium | | Memenuhi | Stabil dalam rentang baku mutu. |
| DO | >5 mg/L | 7,71-7,92 mg/L | | Memenuhi | Oksigenasi perairan masih baik. |
| Salinitas | Alami/sesuai kondisi lokal | 31-32‰ | | Kontekstual | Dipengaruhi masukan air tawar geotermal; tidak ditafsirkan sebagai pencemaran. |

Sumber: Data penelitian, (Manado, 2026), (K. L. H. R. Indonesia, 2004) (P. R. Indonesia, 2021).

Dampak Aktivitas Kapal Terhadap Kualitas Air

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas kapal tongkang dan kapal tunda di Pantai Moinit tidak menyebabkan penurunan kualitas air secara menyeluruh, tetapi menghasilkan perubahan yang bersifat lokal dan selektif pada beberapa parameter tertentu. Pola tersebut

menunjukkan bahwa dampak aktivitas kapal lebih dipengaruhi oleh lokasi operasi serta karakteristik masing-masing parameter dibandingkan menghasilkan perubahan seragam pada seluruh kualitas perairan.

ST 1 merupakan lokasi yang menunjukkan respons paling nyata karena berada pada zona manuver kapal. Peningkatan suhu yang signifikan serta kenaikan konsentrasi minyak dan lemak setelah aktivitas kapal memperlihatkan adanya pengaruh langsung aktivitas operasional kapal terhadap kondisi perairan. Sebaliknya, parameter kekeruhan, *Total Suspended Solids* (TSS), pH, dan *Dissolved Oxygen* (DO) masih menunjukkan kondisi yang relatif stabil. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kapasitas alami perairan dalam melakukan pencampuran dan proses pemulihan masih berfungsi dengan baik selama periode pengamatan.

Temuan ini memperlihatkan bahwa aktivitas kapal memberikan tekanan lingkungan yang terukur, namun tekanan tersebut masih bersifat terbatas pada parameter tertentu. Oleh karena itu, evaluasi kualitas air tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan satu parameter, tetapi perlu mempertimbangkan keseluruhan indikator fisika dan kimia perairan.

Dampak Fisik Hidrodinamika Terhadap Kekeruhan dan Total Suspended Solids (TSS)

Aktivitas kapal tongkang dan kapal tunda berpotensi menimbulkan perubahan hidrodinamika melalui *propeller wash*, *drawdown*, *return flow*, serta turbulensi yang terjadi selama proses manuver kapal. Mekanisme tersebut dapat meningkatkan tegangan geser dasar perairan sehingga sedimen yang berada di dasar dapat terangkat kembali ke kolom air. Fenomena tersebut telah dilaporkan oleh Mao dan Chen (2020) serta Guarnieri *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa lalu lintas kapal mampu meningkatkan konsentrasi sedimen tersuspensi terutama pada kawasan pelayaran yang padat (Mao & Chen, 2020), (Guarnieri *et al.*, 2021).

Pada penelitian ini, peningkatan kekeruhan hanya terjadi dalam skala kecil. Nilai kekeruhan di ST 1 meningkat dari kurang dari 0,5 NTU menjadi 0,8 NTU setelah aktivitas kapal, sedangkan nilai TSS tetap berada di bawah 10 mg/L pada seluruh stasiun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun aktivitas kapal berpotensi memicu resuspensi sedimen, besarnya perubahan yang terjadi selama waktu pengamatan belum mencapai tingkat yang melampaui baku mutu lingkungan.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Craig *et al.* (2023) dan Srše *et al.* (2023) yang menjelaskan bahwa besarnya resuspensi sedimen dipengaruhi oleh kedalaman perairan, tenaga mesin, posisi baling-baling terhadap dasar perairan, pola manuver kapal, serta waktu pengambilan sampel setelah kapal beroperasi. Dengan demikian, rendahnya nilai TSS pada penelitian ini tidak menunjukkan bahwa potensi resuspensi tidak ada, melainkan mengindikasikan bahwa perubahan tersebut masih berada pada tingkat yang relatif rendah selama periode pengamatan (Craig *et al.*, 2023), (Srše *et al.*, 2023).

Suhu sebagai Respons Fisik pada Kawasan Pesisir Geotermal

Suhu merupakan satu satunya parameter yang menunjukkan perubahan signifikan berdasarkan hasil uji statistik. Rata-rata suhu meningkat dari 29,76°C menjadi 30,43°C setelah aktivitas kapal dengan nilai signifikansi sebesar 0,011. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivitas kapal memberikan respons fisik yang dapat diukur secara statistik pada kawasan penelitian.

Meskipun demikian, interpretasi perubahan suhu di Pantai Moinit perlu mempertimbangkan karakteristik geotermal kawasan. ST 2 secara alami memiliki suhu lebih tinggi karena berada di sekitar sumber air panas geotermal sehingga variasi suhu pada lokasi tersebut tidak sepenuhnya disebabkan oleh aktivitas kapal. Oleh karena itu, perubahan suhu

pada ST 1 menjadi indikator yang lebih representatif dalam menggambarkan pengaruh aktivitas operasional kapal terhadap kondisi perairan.

Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu lebih tepat dipahami sebagai respons fisik lokal yang dipengaruhi oleh aktivitas kapal dan karakteristik lingkungan secara bersamaan. Selama penelitian berlangsung, peningkatan suhu tersebut belum diikuti oleh penurunan nilai DO maupun perubahan pH sehingga belum menunjukkan adanya gangguan ekologis yang bersifat sistemik.

Minyak dan lemak sebagai Indikator Utama Pencemaran

Parameter minyak dan lemak merupakan indikator yang menunjukkan perubahan paling nyata selama penelitian. Sebelum aktivitas kapal, seluruh stasiun memiliki konsentrasi di bawah 1 mg/L. Setelah aktivitas kapal berlangsung, konsentrasi minyak dan lemak pada ST 1 meningkat menjadi 5 mg/L, ST 2 mencapai 1 mg/L, sedangkan ST 3 tetap berada di bawah 1 mg/L.

Distribusi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi minyak dan lemak terjadi secara lokal pada zona manuver kapal. Sumber pencemar diduga berasal dari aktivitas operasional kapal seperti pelepasan air bilga, residu bahan bakar, pelumas, maupun kebocoran sistem hidrolis. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian Dong *et al.* (2022) yang menjelaskan bahwa pencemaran minyak di perairan laut modern sebagian besar berasal dari aktivitas antropogenik yang berkaitan dengan jalur pelayaran (Dong *et al.*, 2022).

Konsentrasi minyak dan lemak sebesar 5 mg/L memiliki arti penting baik dari aspek regulasi maupun aspek ekologis. Nilai tersebut lima kali lebih tinggi dibandingkan baku mutu yang berlaku sehingga menunjukkan perlunya perhatian khusus terhadap pengelolaan aktivitas kapal pada kawasan Pantai Moinit. Selain menurunkan kualitas lingkungan, minyak dan lemak juga berpotensi mengganggu proses pertukaran gas di permukaan air serta memberikan dampak terhadap organisme perairan apabila terjadi akumulasi dalam jangka panjang. Ketentuan mengenai pengendalian pencemaran minyak dari kapal sebagaimana diatur dalam *MARPOL Annex I* menjadi dasar penting dalam upaya pencegahan pencemaran di kawasan ini.

pH, DO, dan salinitas: bukti kapasitas penyangga yang masih bekerja

pH dan DO yang stabil menunjukkan bahwa tekanan kapal belum berkembang menjadi gangguan kimia umum pada saat penelitian. pH laboratorium berada pada 7,97-8,22, sedangkan DO berada pada 7,71-7,92 mg/L. Nilai DO yang tinggi memperlihatkan bahwa oksigenasi perairan masih baik, meskipun minyak dan lemak meningkat pada ST 1. Hal ini menunjukkan bahwa dampak kimia-operasional kapal masih berada pada tahap indikator pencemar spesifik, belum menjadi gangguan sistemik terhadap keseimbangan oksigen dan pH.

Salinitas sebesar 31-32‰ perlu dibaca secara kontekstual karena Pantai Moinit dipengaruhi masukan air tawar atau fluida geotermal. Tidak adanya perubahan salinitas yang signifikan setelah aktivitas kapal menunjukkan bahwa parameter ini lebih kuat mencerminkan karakter alami lokasi daripada dampak kapal. Interpretasi kontekstual tersebut penting untuk menghindari kesalahan penilaian, sebab perairan geotermal tidak selalu mengikuti pola salinitas laut terbuka secara kaku.

Implikasi bagi pengelolaan lingkungan Pantai Moinit

Hasil penelitian ini memiliki dampak praktis bagi pemerhati lingkungan, pemerintah daerah, pengelola wisata, dan pelaku usaha pelayaran. Bukti bahwa minyak dan lemak melampaui baku mutu di zona manuver kapal menunjukkan perlunya pengendalian sumber pencemar yang spesifik. Prioritas pengelolaan sebaiknya diarahkan pada pemeriksaan oily

water separator, pengawasan air bilga, pencegahan kebocoran pelumas, larangan pembuangan residu minyak di perairan, dan dokumentasi kepatuhan operasional kapal.

Selain itu, pengaturan ruang laut lokal perlu dipertimbangkan. Penetapan slow speed zone, zona anchorage yang menjauhi kawasan wisata dan sumber geotermal, serta pembatasan manuver intensif dekat garis pantai akan mengurangi potensi propeller wash dan risiko tumpahan minyak lokal. Strategi ini lebih realistis dibandingkan pelarangan total aktivitas kapal karena tetap mempertimbangkan kebutuhan ekonomi, tetapi menempatkan perlindungan lingkungan sebagai batas operasional yang harus dipatuhi.

Pemantauan lanjutan perlu menggunakan pendekatan event-based monitoring, yaitu pengambilan sampel sebelum, saat, dan sesudah aktivitas kapal, terutama pada parameter minyak dan lemak, kekeruhan, TSS, dan DO. Pemantauan periodik konvensional berisiko melewatkan dampak episodik karena pencemaran kapal sering terjadi dalam durasi pendek dan lokal. Dengan desain pemantauan yang lebih adaptif, Pantai Moinit dapat dikelola sebagai kawasan pesisir produktif tanpa mengabaikan sensitivitas geotermal, nilai wisata, dan fungsi ekologisnya.

Keterbatasan penelitian dan arah kajian lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dinyatakan secara terbuka. Pengamatan dilakukan pada jendela waktu yang singkat, sehingga belum mewakili variasi musim, perubahan arus, atau akumulasi dampak jangka panjang. Penelitian juga belum mencakup analisis PAHs, logam berat, sedimen, biota, atau pemodelan hidrodinamika. Keterbatasan ini tidak mengurangi nilai naskah sebagai baseline, tetapi membatasi cakupan kesimpulan pada kondisi pengamatan yang tersedia.

Kajian lanjutan disarankan memperluas frekuensi sampling, memasukkan parameter hidrokarbon spesifik, mengevaluasi sedimen sebagai matriks akumulasi, serta menggunakan pemetaan spasial dan pemodelan arus untuk menghubungkan pola pencemar dengan intensitas aktivitas kapal. Dengan pengembangan tersebut, temuan awal dari Pantai Moinit dapat menjadi dasar sistem pemantauan lingkungan pesisir yang lebih kuat dan berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kualitas air Pantai Moinit secara umum masih berada dalam kondisi fisika-kimia yang baik selama periode pengamatan. Kekeruhan rendah, TSS berada di bawah Reporting Limit, DO tinggi, dan pH stabil. Salinitas yang relatif lebih rendah dipahami sebagai bagian dari karakter alami kawasan pesisir geotermal, bukan sebagai indikator pencemaran utama.

Aktivitas kapal tongkang dan tunda menghasilkan respons kualitas air yang lokal dan selektif. Peningkatan suhu sesudah aktivitas kapal signifikan secara statistik, tetapi belum disertai penurunan DO atau perubahan pH yang menunjukkan gangguan sistemik. Temuan paling kritis adalah minyak dan lemak sebesar 5 mg/L di ST 1 sesudah aktivitas kapal, yang melampaui baku mutu dan menjadi indikator paling kuat adanya dampak operasional kapal pada zona manuver.

Artikel ini layak diposisikan sebagai kontribusi ilmiah bagi pengelolaan lingkungan pesisir karena menyediakan data awal berbasis laboratorium terakreditasi pada kawasan pesisir geotermal yang menerima tekanan aktivitas pelayaran. Rekomendasi utama adalah penguatan pengendalian minyak dan lemak, pengawasan air bilga dan oily water separator, pengaturan zona manuver dan anchorage, penerapan slow speed zone, serta pemantauan berbasis kejadian untuk menjaga fungsi ekologis dan wisata Pantai Moinit.

Saran

Pengelolaan lingkungan di Pantai Moinit perlu difokuskan pada pengawasan aktivitas kapal, khususnya di zona manuver yang menunjukkan peningkatan konsentrasi minyak dan lemak, melalui pengendalian air bilga, pencegahan kebocoran bahan bakar dan pelumas, serta pemantauan kualitas air berbasis *event based monitoring*. Penelitian selanjutnya disarankan memperluas periode pengamatan pada berbagai musim dan menambahkan parameter seperti hidrokarbon, logam berat, sedimen, serta biota perairan agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dampak aktivitas kapal terhadap kualitas lingkungan pesisir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada tim lapangan dan pihak yang mendukung pengambilan data kualitas air di Pantai Moinit. Data analitik ex situ dalam naskah ini bersumber dari Laboratorium SGS-WLN Manado berdasarkan Analytical Report No. 1089379-1. Pernyataan ucapan terima kasih dapat disesuaikan kembali dengan kontribusi institusi, pendanaan, atau izin penelitian sesuai ketentuan jurnal tujuan.

DAFTAR PUSTAKA

- (APHA), A. P. H. A., (AWWA), A. W. W. A., & (WEF), W. E. F. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24th ed.). APHA Press.
- Craig, P. M., Jung, J. Y., Mausolff, Z., Bastidas, L. A., Mathis, T., & Wang, P.-F. (2023). Modeling sediment resuspension and transport processes induced by propeller wash from ship traffic. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(5), 4023009. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13229>
- Dong, Y., Liu, Y., Hu, C., MacDonald, I. R., & Lu, Y. (2022). Chronic oiling in global oceans. *Science*, 376(6599), 1300–1304. <https://doi.org/10.1126/science.abm5940>
- Guarnieri, A., Saremi, S., Pedroncini, A., Jensen, J. H., Torretta, S., Vaccari, M., & Vincenzi, C. (2021). Effects of marine traffic on sediment erosion and accumulation in ports: A new model-based methodology. *Ocean Science*, 17, 411–430. <https://doi.org/10.5194/os-17-411-2021>
- Indonesia, K. L. H. R. (2004). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut*.
- Indonesia, P. R. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- International Maritime Organization (IMO). (n.d.). MARPOL Annex I: Regulations for the prevention of pollution by oil. International Maritime Organization.
- Manado, S.-W. (2026). *Analytical Report No. 1089379-1: Hasil analisis laboratorium kualitas air laut Pantai Moinit*. SGS-WLN Manado.
- Mao, L., & Chen, Y. (2020). Investigation of ship-induced hydrodynamics and sediment suspension in a heavy shipping traffic waterway. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 424. <https://doi.org/10.3390/jmse8060424>
- Soczka Mandac, R., Covelli, S., & Faganeli, J. (2023). Sediment resuspension during vessel manoeuvres in port areas: Evidence from field observations. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 4110-4118. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03508-9>
- Srše, J., Perković, M., & Grm, A. (2023). Sediment resuspension distribution modelling using a ship handling simulation along with the MIKE 3 application. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(8), 1619. <https://doi.org/10.3390/jmse11081619>

Yanakiev, P., Garbatov, Y., & Georgiev, P. (2025). Advances of articulated tug-barge transport in enhancing shipping efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(8), 1451. <https://doi.org/10.3390/jmse13081451>