

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teluk Jakarta dan Kepulauan Seribu merupakan wilayah pesisir strategis dengan nilai ekonomi dan ekologis yang tinggi. Kawasan ini berfungsi sebagai pusat industri, pelabuhan, pariwisata, dan perikanan, serta memiliki ekosistem penting seperti terumbu karang dan mangrove. Kepulauan Seribu telah ditetapkan sebagai Pusat Konservasi Ekologi melalui Keputusan Gubernur DKI Jakarta Nomor 1042 Tahun 2018. Meskipun demikian, wilayah ini rentan terhadap pencemaran yang bersumber dari daratan Teluk Jakarta.

Dalam dua dekade terakhir, tekanan pencemaran di Teluk Jakarta menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan pesatnya urbanisasi, industrialisasi, serta pelaksanaan Proyek Reklamasi Pantai Utara Jakarta yang dilegalkan melalui Keputusan Presiden Nomor 52 Tahun 1995. Perairan Teluk Jakarta menerima masukan dari sedikitnya 13 sungai utama yang bermuara langsung ke laut diantaranya 3 sungai besar yaitu Sungai Cisadane, Sungai Ciliwung dan Sungai Citarum, serta 10 sungai kecil yaitu: Sungai Kamal, Sungai Cengkareng, Sungai Angke, Sungai Karang, Sungai Ancol, Sungai Sunter, Sungai Cakung, Sungai Blencong, Sungai Grogol dan Sungai Pasanggrahan. Sungai yang bermuara di Teluk Jakarta tersebut melintasi daerah pemukiman padat penduduk dan kawasan industri, sehingga membawa limbah domestik, industri, dan aktivitas pertanian dari wilayah hulu. Masukan ini tidak hanya meningkatkan beban nutrisi dan bahan organik, tetapi juga berpotensi membawa logam terlarut yang bersifat toksik ke perairan laut. Kondisi tersebut menyebabkan perairan Teluk Jakarta berada di bawah tekanan pencemaran yang tinggi dan berpotensi mengalami penurunan kualitas lingkungan laut secara berkelanjutan (Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, 2024).

Secara ekologis, wilayah pesisir merupakan ekosistem peralihan atau *ecotone* antara daratan dan lautan yang dicirikan oleh dinamika fisik, kimia, biologi, dan logam terlarut yang tinggi, sehingga sangat sensitif terhadap perubahan kualitas air (Palijama, 2021). Kualitas air laut secara konseptual didefinisikan sebagai kondisi fisik, kimia, biologis, dan toksikologis perairan yang menentukan kesesuaiannya bagi peruntukan

tertentu, termasuk sebagai habitat biota laut. Penilaian kualitas air laut umumnya dilakukan berdasarkan empat kelompok parameter utama, yaitu parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut (Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 51, 2004)

Parameter fisika, seperti suhu, kekeruhan, kecerahan, dan total padatan tersuspensi (TSS), berperan dalam mengatur distribusi energi, penetrasi cahaya, serta produktivitas primer di dalam kolom air (Habibah, 2020). Parameter kimia mencakup pH, salinitas, oksigen terlarut (DO), kebutuhan oksigen biokimia (BOD), nutrisi yaitu nitrat dan fosfat serta senyawa pencemar seperti minyak dan lemak, surfaktan, *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH), *Polychlorinated Biphenyls* (PCB), fenol total, sulfida, dan sianida, yang merepresentasikan proses biogeokimia serta tingkat pencemaran organik dan anorganik dalam perairan (Irawan & Sari, 2022; Patimah et al., 2022).

Parameter biologi seperti koliform total dan *Escherichia coli* digunakan sebagai indikator pencemaran fekal dan keberadaan patogen yang berkaitan dengan risiko kesehatan dan kualitas sanitasi lingkungan perairan (Anisafitri et al., 2020). Sementara itu, parameter logam terlarut, termasuk merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), seng (Zn), nikel (Ni), arsen (As), dan kromium heksavalen [Cr(VI)] memiliki sifat toksik, persisten, serta berpotensi mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi, sehingga dapat menimbulkan dampak jangka panjang terhadap biota laut dan kesehatan manusia (Palijama, 2021). Interaksi antarparameter tersebut bersifat kompleks dan non-linear, sehingga kualitas air laut merupakan fenomena multivariat yang tidak dapat direpresentasikan oleh satu parameter tunggal (Habibah, 2020; Wahyuni et al., 2024).

Sebagai wilayah dengan tingkat aktivitas antropogenik yang tinggi dan nilai ekologis yang signifikan, kualitas air laut di Teluk Jakarta dan Kepulauan Seribu dipantau secara rutin oleh instansi pemerintah melalui kegiatan pemantauan kualitas air laut. Kegiatan ini menghasilkan data multi-parameter yang mencakup parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut, yang dikumpulkan pada berbagai lokasi dan periode waktu pemantauan. Besarnya volume data dan kompleksitas karakteristik parameter menuntut metode analisis yang tidak hanya akurat secara numerik, tetapi juga konsisten, efisien, dan mampu mendukung pengambilan keputusan pengelolaan lingkungan secara cepat, objektif, dan berkelanjutan (Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, 2024).

Kerangka regulasi nasional menetapkan bahwa penilaian status mutu air laut di Indonesia dilakukan menggunakan metode Indeks Pencemaran atau *Pollutan Index* (PI), sebagaimana diatur dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air. Penilaian tersebut mengacu pada Baku Mutu Air Laut untuk berbagai peruntukan, termasuk perlindungan biota laut, yang ditetapkan melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004.

Metode Indeks Pencemaran mengintegrasikan rasio antara konsentrasi parameter kualitas air dan baku mutunya dengan mempertimbangkan nilai maksimum serta nilai rata-rata. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, status mutu air diklasifikasikan ke dalam empat kategori, yaitu kategori baik dengan nilai IP kurang dari atau sama dengan 1,0, kategori tercemar ringan dengan nilai IP lebih dari 1,0 sampai dengan 5,0, kategori tercemar sedang dengan nilai IP lebih dari 5,0 sampai dengan 10, serta kategori tercemar berat dengan nilai IP lebih dari 10 (Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 115, 2003).

Meskipun metode indeks pencemaran telah sah secara regulatif dan banyak digunakan dalam penilaian mutu air, penerapannya masih menghadapi sejumlah keterbatasan substantif dan metodologis. Perhitungan Indeks Pencemaran umumnya dilakukan secara manual dan berulang untuk setiap lokasi serta periode pemantauan. Seiring dengan meningkatnya jumlah data secara spasial dan temporal, termasuk data logam terlarut dengan jumlah parameter yang relatif banyak, proses perhitungan tersebut menjadi kurang efisien, memerlukan waktu yang relatif lama, serta berpotensi menimbulkan kesalahan manusia atau *human error* (Suharto et al., 2019).

Selain itu, hasil penilaian mutu air menggunakan Indeks Pencemaran pada umumnya hanya disajikan dalam bentuk nilai indeks dan kategori status mutu air sebagaimana ditetapkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003. Metode ini dirancang untuk menilai tingkat pencemaran secara agregat sehingga tidak secara langsung menjelaskan kontribusi relatif masing-masing parameter terhadap status mutu air. Akibatnya, parameter tertentu, seperti logam terlarut yang memiliki dampak ekologis signifikan meskipun sering dijumpai dalam konsentrasi rendah, dapat tertutupi oleh parameter lain yang memiliki nilai rasio lebih tinggi. Pendekatan nilai maksimum dan nilai rata-rata dalam perhitungan Indeks Pencemaran juga belum mampu

menggambarkan pengaruh kombinasi maupun interaksi kompleks antara parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut dalam ekosistem laut secara menyeluruh (Grbčić et al., 2022; Suharto et al., 2019).

Di samping itu, metode indeks pencemaran bersifat retrospektif dan tidak memiliki kemampuan prediktif. Penilaian mutu air yang dihasilkan hanya merepresentasikan kondisi perairan pada saat pengukuran dilakukan, tanpa memanfaatkan pola historis data kualitas air untuk mengklasifikasikan atau memprediksi status mutu air pada data yang baru, termasuk pola akumulasi logam terlarut yang bersifat kronis (Uddin, Nash, Rahman, et al., 2022).

Ketersediaan data kualitas air laut dalam jumlah besar membuka peluang penerapan pendekatan analitik berbasis data yang lebih adaptif. Pendekatan klasifikasi berbasis *machine learning* memungkinkan pemodelan hubungan nonlinier antar parameter kualitas air, termasuk interaksi antara parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut, serta memungkinkan pengklasifikasian status mutu air secara otomatis. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa algoritma *ensemble learning*, khususnya *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), mampu menghasilkan tingkat akurasi yang tinggi dalam klasifikasi kualitas air dan efektif dalam menangani data multiparameter yang kompleks (Limbago, 2023; Uddin, Nash, Mahammad Diganta, et al., 2022).

Namun penerapan metode klasifikasi berbasis *machine learning* dalam penilaian mutu air laut di Indonesia masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya belum secara langsung mengintegrasikan Indeks Pencemaran sebagaimana diatur dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 dan Baku Mutu Air Laut yang ditetapkan melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 sebagai dasar pelabelan data. Keterbatasan tersebut terutama terlihat pada belum dilibatkannya parameter logam terlarut secara eksplisit bersama parameter fisika, kimia, dan biologi. Akibatnya, penilaian mutu air laut berbasis data belum sepenuhnya bersifat komprehensif dan kontekstual terhadap kebijakan nasional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan prediksi status mutu air laut Teluk Jakarta berbasis data dengan mengintegrasikan parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut sesuai baku mutu air laut, serta menggunakan Indeks Pencemaran sebagai dasar penentuan kelas mutu air. Pendekatan

ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional dengan menghasilkan sistem prediksi yang lebih cepat, efisien, dan konsisten, serta mampu menangkap pola hubungan antarparameter kualitas air yang sesuai dengan regulasi nasional.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Parameter kualitas air laut apa saja yang relevan dan sesuai dengan baku mutu peruntukan biota laut berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 untuk digunakan dalam penilaian mutu air laut Teluk Jakarta?
2. Bagaimana status mutu air laut Teluk Jakarta dapat ditentukan melalui pelabelan data menggunakan metode Indeks Pencemaran (PI) sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 berdasarkan data kualitas air laut multi-parameter?
3. Bagaimana kinerja algoritma XGBoost dalam memprediksi status mutu air laut Teluk Jakarta berdasarkan parameter kualitas air laut?
4. Parameter kualitas air laut apa yang dominan berkontribusi terhadap tingkat pencemaran, ditinjau dari hasil nilai *feature importance* pada model klasifikasi XGBoost?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan parameter kualitas air laut yang digunakan dalam penelitian berdasarkan baku mutu peruntukan biota laut sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004, yang mencakup parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut.
2. Menghasilkan pelabelan data kualitas air laut ke dalam kategori status mutu air, yaitu baik, tercemar ringan, tercemar sedang, dan tercemar berat, berdasarkan perhitungan Indeks Pencemaran (PI) sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003.

3. Melakukan evaluasi kinerja algoritma XGBoost dalam memprediksi status mutu air laut berdasarkan parameter kualitas air laut.
4. Mendapatkan parameter kualitas air laut yang dominan berkontribusi terhadap pencemaran air laut berdasarkan nilai *feature importance* pada model XGBoost.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Penelitian ini memberikan manfaat akademis berupa penguatan kajian penilaian mutu air laut yang mengintegrasikan baku mutu peruntukan biota laut dan metode Indeks Pencemaran dengan pendekatan *ensemble learning*. Penelitian ini memperkaya referensi ilmiah mengenai penggunaan parameter kualitas air laut yang mencakup parameter fisika, kimia, biologi, dan logam terlarut, serta penerapan algoritma XGBoost dalam prediksi status mutu air laut berbasis regulasi nasional.
2. Penelitian ini memberikan manfaat metodologis dengan menghasilkan kerangka kerja pelabelan dan prediksi status mutu air laut yang sistematis dan terukur. Kerangka ini mengombinasikan perhitungan Indeks Pencemaran sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 dengan model prediksi berbasis XGBoost, sehingga dapat dijadikan acuan atau rujukan metodologi bagi penelitian sejenis pada wilayah pesisir lainnya.
3. Penelitian ini memberikan manfaat praktis berupa model prediksi status mutu air laut yang mampu memprediksikan kondisi perairan ke dalam kategori resmi pemerintah secara lebih cepat dan konsisten dibandingkan perhitungan Indeks Pencemaran secara manual. Model yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu dalam pengolahan dan analisis data kualitas air laut yang bersifat multi-parameter dan berjumlah besar.
4. Penelitian ini memberikan manfaat bagi pengelolaan lingkungan dengan mendapatkan informasi parameter kualitas air laut yang dominan berkontribusi terhadap pencemaran, baik berdasarkan rasio maksimum Indeks Pencemaran maupun nilai *feature importance* pada model XGBoost. Informasi ini dapat membantu instansi terkait dalam menentukan prioritas pengendalian pencemaran,

penyusunan strategi pengelolaan mutu air laut, serta upaya perlindungan ekosistem biota laut secara lebih terarah dan berbasis data.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan agar hasil analisis lebih terarah, penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Wilayah penelitian difokuskan pada Teluk Jakarta dan Kepulauan Seribu sebagai kawasan pesisir strategis dengan tekanan antropogenik tinggi.
2. Data yang digunakan merupakan hasil pemantauan kualitas air laut tahun 2024.
3. Analisis kualitas air dibatasi pada kelompok parameter berikut
 - a. Biologi : Coliform total
 - b. Fisika : Suhu, Kecerahan, Kekeruhan, TSS
 - c. Kimia : pH, Salinitas, Oksigen terlarut (DO), BOD₅, Amonia total (NH₃-N), Orto-fosfat (PO₄-P), Nitrat (NO₃-N), Sulfida (H₂S), Senyawa Fenol total, *Poliaromatik Hidrokarbon* (PAH), *Poliklor Bifenil* (PCB), *Surfaktan* (deterjen), Minyak dan Lemak
 - d. Logam terlarut : Arsen (As), Kadmium (Cd), Kromium heksavalen (Cr(VI)), Nikel (Ni), Raksa (Hg), Seng (Zn), Tembaga (Cu), Timbal (Pb), serta senyawa organologam Tributyl Timah (TBT)
4. Label status mutu air laut dilakukan menggunakan metode *Pollution Index* (PI) berdasarkan formulasi Sumitomo dan Nemerow (1970) sebagaimana tercantum dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003, sehingga kategori mutu air yang dihasilkan mengikuti standar nasional.
5. Penetapan baku mutu air laut mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 untuk peruntukan biota laut, mengingat standar ini memiliki batas ambang yang lebih ketat dibandingkan peruntukan lainnya.

1.6 Kebaharuan

Kebaharuan penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan penilaian mutu air laut yang mengintegrasikan seluruh kelompok parameter kualitas air, meliputi

parameter fisika, kimia, biologi, dan logam berat, dalam satu kerangka prediksi berbasis pembelajaran mesin. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada satu kelompok parameter tertentu atau menganalisis parameter kualitas air secara terpisah, penelitian ini menyusun penilaian mutu air laut secara komprehensif berdasarkan baku mutu biota laut. Selain itu, penelitian ini menerapkan algoritma *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) untuk memprediksi status mutu air laut dengan memanfaatkan hasil perhitungan *Pollution Index* sebagai *ground truth*, sehingga menghasilkan sistem prediksi yang tidak hanya konsisten dengan regulasi nasional, tetapi juga lebih adaptif, efisien, dan berbasis data.