

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim global telah menyebabkan peningkatan suhu rata-rata bumi yang signifikan, disertai dengan kenaikan muka air laut dan meningkatnya frekuensi kejadian ekstrem di wilayah pesisir. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menegaskan bahwa pemanasan global yang telah melampaui 1,5 °C berpotensi memicu dampak serius terhadap sistem pesisir dan ekosistem pantai, termasuk ekosistem mangrove (IPCC, 2022). Dalam konteks ini, mangrove menjadi salah satu ekosistem kunci yang berperan dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim melalui perlindungan pantai, penyimpanan karbon, dan penopang mata pencaharian masyarakat pesisir.

Perubahan iklim menjadi tantangan besar bagi keberlanjutan ekosistem mangrove, khususnya di negara berkembang yang masyarakat pesisirnya sangat bergantung pada sumber daya pesisir (Friess *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengelolaan mangrove berkelanjutan yang mampu menyeimbangkan aspek ekologi, ekonomi, dan sosial menjadi kebutuhan mendesak (Ferreira *et al.*, 2022). Prinsip-prinsip pengelolaan tersebut mencakup pemeliharaan struktur dan fungsi ekosistem, pemerataan manfaat bagi masyarakat lokal, penerapan pengelolaan adaptif berbasis sains, integrasi dalam perencanaan wilayah pesisir dan adaptasi iklim, serta kepatuhan terhadap kebijakan dengan tetap menghargai pengetahuan lokal (Bhatnagar & Kumar, 2025). Penerapan prinsip ini diharapkan dapat

memperkuat peran mangrove dalam meningkatkan ketahanan pesisir terhadap perubahan iklim (Arifanti *et al.*, 2022).

Secara global, luas mangrove mengalami penurunan yang signifikan akibat konversi lahan dan degradasi lingkungan. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* melaporkan bahwa luas mangrove dunia pada tahun 2020 mencapai sekitar 14,8 juta hektare, dengan kehilangan sekitar 677.000 hektare antara tahun 2000–2020, meskipun sebagian kehilangan tersebut diimbangi oleh pertumbuhan mangrove baru di beberapa wilayah (FAO, 2023). Penurunan mangrove ini meningkatkan kerentanan pesisir terhadap abrasi, banjir rob, dan intrusi air laut.

Indonesia sebagai negara dengan luas mangrove terbesar di dunia, sekitar 3,3 juta hektar, memiliki peran strategis dalam konservasi mangrove global (Rahadian *et al.*, 2019). Namun, laju deforestasi mangrove yang masih terjadi sejak tahun 2000 berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon akibat perubahan penggunaan lahan (Murdiyarso *et al.*, 2015; Hamilton & Friess, 2018). Dampak perubahan iklim di Indonesia telah nyata dirasakan, khususnya di pesisir utara Pulau Jawa yang mengalami abrasi dan banjir rob akibat kenaikan muka air laut dan karakter sedimen aluvial yang tidak stabil (Moechtar *et al.*, 2013; Solihuddin *et al.*, 2021).

Terdapat juga beberapa usaha rehabilitasi ekosistem mangrove yang telah dilakukan oleh pemerintah daerah maupun masyarakat yang hasilnya perlahan memberikan dampak kepada masyarakat. Rohmawati *et al.* (2022) dalam mengkaji konservasi mangrove di Pantai Glagah Wangi Demak memperlihatkan bahwa potensi ekowisata dapat meningkatkan nilai social masyarakat yang hidup di daerah

tersebut. Khairani dan Yulistiyono (2023) mengungkapkan bahwa terdapat peran penting Badan Usaha Milik Desa (BUMDes) dalam menjaga ekosistem mangrove di Kedatim.

Berbagai penelitian sebelumnya di pesisir utara Jawa umumnya berfokus pada pendekatan neoekologi, pemodelan numerik, dan analisis spasial berbasis citra satelit untuk memprediksi banjir dan abrasi (Pratama, 2019; Handayani *et al.*, 2020). Meskipun pendekatan tersebut penting, kajian tersebut masih bersifat jangka pendek dan belum mampu menjelaskan dinamika perubahan ekosistem mangrove dalam skala waktu yang panjang. Dengan demikian, terdapat *research gap* terkait pemahaman rekaman lingkungan jangka panjang yang diperlukan untuk merumuskan strategi pengelolaan mangrove yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Pendekatan paleoekologi menjadi penting karena mampu merekonstruksi perubahan lingkungan mangrove di masa lalu berdasarkan rekaman sedimen. Rekaman tersebut mencerminkan respons alami ekosistem mangrove terhadap fluktuasi muka air laut, perubahan salinitas, serta dinamika sedimentasi yang berlangsung dalam skala dekadal hingga milenial (Holmes *et al.*, 2025; Yu *et al.*, 2025). Informasi ini tidak dapat diperoleh dari pengamatan modern yang bersifat temporal pendek, namun sangat relevan untuk memahami ambang batas ekologis dan kapasitas adaptasi mangrove terhadap perubahan iklim.

Ekosistem mangrove di Indonesia berkembang di bawah pengaruh kondisi oseanografi dan geologi yang sangat beragam, sehingga membentuk karakteristik ekologi, sedimentasi, serta rekaman lingkungan masa lalu yang berbeda antarwilayah. Variasi pengaruh laut terbuka, laut semi tertutup, dan selat sempit

berdampak langsung pada dinamika pasang surut, salinitas, suplai sedimen, serta komposisi biota mikroskopis seperti diatom, baik pada kondisi ekosistem saat ini (neoekologi) maupun dalam rekaman sedimen masa lalu (paleoekologi) (Yu *et al.*, 2025; Holmes *et al.*, 2025).

Wilayah Pariaman yang terletak di pesisir barat Sumatra berada langsung di bawah pengaruh Samudera Hindia, yang dicirikan oleh energi gelombang tinggi, arus laut kuat, serta dinamika tektonik aktif akibat zona subduksi. Kondisi oseanografi tersebut berpengaruh terhadap proses abrasi pantai, suplai sedimen berenergi tinggi, serta fluktuasi salinitas yang relatif ekstrem. Dalam konteks paleoekologi, pengaruh Samudera Hindia berpotensi terekam melalui asosiasi diatom laut dan karakter mineral sedimen yang mencerminkan interaksi antara proses laut dalam, aktivitas tektonik, dan input material daratan (Yu *et al.*, 2025).

Sebaliknya, wilayah Indramayu, Brebes, Pemalang, hingga Demak (Tuntang) di pesisir utara Pulau Jawa dipengaruhi oleh Laut Jawa, yang merupakan perairan dangkal dan semi tertutup. Lingkungan ini dicirikan oleh energi gelombang relatif rendah, suplai sedimen fluvial yang besar, serta interaksi intens antara air tawar dan air laut. Kondisi tersebut mendorong akumulasi sedimen halus dan perkembangan ekosistem mangrove yang luas, namun juga meningkatkan kerentanan terhadap perubahan kualitas perairan dan tekanan antropogenik. Rekaman paleoekologi di wilayah ini umumnya ditandai oleh dominasi diatom air payau hingga air tawar serta mineral sedimen halus yang mencerminkan dinamika delta, perubahan garis pantai, dan aktivitas manusia dalam skala waktu panjang (Hasrini *et al.*, 2023; Dianti *et al.*, 2024).

Wilayah Surabaya dan Madura berada di bawah pengaruh Selat Madura, sebuah perairan sempit dengan dinamika hidrodinamika yang kompleks akibat arus pasang surut yang kuat dan percampuran massa air laut dan air darat. Kondisi ini menciptakan lingkungan transisi yang unik bagi ekosistem mangrove, yang tercermin dalam variasi komposisi diatom laut, payau, dan air tawar secara bersamaan. Endapan sedimen di wilayah ini berpotensi merekam perubahan lingkungan yang relatif cepat, baik akibat variasi oseanografi maupun intensifikasi aktivitas manusia di kawasan pesisir (Chen *et al.*, 2024; Al Falah *et al.*, 2023, 2025a).

Kajian yang dilakukan dengan melakukan pendekatan neo dan paleoekologi dengan menggunakan diatom untuk mengetahui perubahan lingkungan di masing-masing ekosistem mangrove tersebut. Diatom merupakan salah satu bioindikator yang mampu menggambarkan kondisi lingkungan saat ini dan rekaman lingkungan pada masa lampau dikarenakan dinding sel yang terbuat dari silica (Round *et al.* 1990). Diatom memiliki keragaman spesies yang besar (Mann & Vanormelingen, 2013), waktu generasi yang singkat (Round *et al.* 1990) dan kemampuan untuk merespon secara langsung dan sensitif terhadap perubahan lingkungan (Lobo *et al.*, 2016). Karakteristik ini memungkinkan peneliti untuk menggunakan diatom sebagai indikator dalam penilaian status ekologi ekosistem perairan (Ector *et al.* 2004), yang telah diterapkan sejak akhir 1940-an (Rimet, 2012).

Perbedaan karakteristik oseanografi dan sedimentasi di wilayah yang dipengaruhi oleh Samudera Hindia, Laut Jawa, dan Selat Madura menunjukkan bahwa diatom merupakan indikator paleoekologi yang sangat efektif untuk

merekonstruksi perubahan lingkungan ekosistem mangrove dari masa lalu hingga kondisi saat ini. Pendekatan neo dan paleoekologi berbasis diatom dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai respons ekosistem mangrove terhadap perubahan alami dan antropogenik, serta menjadi dasar ilmiah yang kuat dalam perumusan strategi pengelolaan ekosistem mangrove yang berkelanjutan dan berbasis karakteristik lokal (Campbell *et al.*, 2025).

Meskipun penelitian diatom di pesisir utara Jawa telah dilakukan (Soeprbowati *et al.*, 2010; Suwartimah *et al.*, 2011; Hasrini *et al.*, 2023; Dianti *et al.*, 2024), sebagian besar kajian tersebut masih berfokus pada kondisi ekosistem saat ini. Kajian yang mengintegrasikan pendekatan neo dan paleoekologi berbasis diatom dan sedimen untuk mengaitkan dinamika masa lalu dengan pengelolaan mangrove modern masih sangat terbatas, khususnya pada wilayah dengan karakter oseanografi yang kontras.

Sementara itu, perkembangan penelitian dengan menggunakan diatom saat ini sudah memasuki era modern dimana metode *environmental DNA* (eDNA) mulai diterapkan. eDNA diatom telah berkembang pesat selama dekade terakhir dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan, seperti, Kermarrec *et al.* (2013) yang menemukan 21 spesies diatom dengan menggunakan 3 DNA primer yang berbeda, Kermarrec *et al.* (2014) mengkaji biomonitoring sungai dengan menggunakan metode *Next Generation Sequencing* (NGS), dan Baillet *et al.* (2020) yang membandingkan bioinformatika diatom dari 6 negara eropa, dan berpotensi untuk diterapkan secara rutin untuk penilaian ekologi sungai pada skala nasional.

Pengembangan penelitian eDNA di kawasan mangrove masih sangat terbatas. Tercatat, hanya beberapa pengembangan eDNA yang dilakukan di Indonesia untuk mengidentifikasi Bacillariophyta. Cahyani *et al.* (2024a) di mangrove Demak, dengan menemukan primer Cytochrome Oxidase Subunit 1 (COI) berhasil mengidentifikasi 12 spesies *Bacillariophyta*, kemudian pada tahun 2025 di Danau Balekambang dengan primer 18S menemukan dominasi fungi dan protozoa (Cahyani *et al.* 2025). Sehingga dari evaluasi penelitian sebelumnya yang menemukan keterbatasan dalam identifikasi diatom dengan menggunakan eDNA, penelitian ini akan menerapkan teknis yang berbeda dengan melalui proses dekantasi atau pembersihan/penyaringan sedimen sebelum proses ekstraksi.

Rekonstruksi paleoekologi akan lebih kuat bila ditopang analisis sedimen, karena perubahan ekosistem mangrove tidak hanya terekam pada biota (diatom), tetapi juga pada litostratigrafi dan mineralogi yang merefleksikan mekanisme pengendapan (energi lingkungan, intrusi laut, pengaruh evaporasi, perubahan suplai sedimen). Karena itu, penelitian ini mengintegrasikan litostratigrafi dan mineralogi untuk menafsirkan kondisi lingkungan, terutama pada interval sedimen yang sedikit mikro-fosil. Pendekatan multiproksi serupa pada kajian lingkungan mangrove di China untuk rekonstruksi muka laut relatif (RSL) dengan menggunakan foraminifera, diatom, isotop, dan proses geokimia (Yu *et al.*, 2025).

Kajian tersebut akan menjadi dasar dalam perencanaan pengelolaan ekosistem mangrove berkelanjutan. Keputusan Gubernur Jawa Tengah Nomor 522.52/32 tahun 2019 tentang Pembentukan Forum Kolaborasi Pengelolaan Kawasan Ekosistem Mangrove di Provinsi Jawa Tengah dan Keputusan Gubernur

Jawa Tengah Nomor 552.52/31 tahun 2020 tentang Penetapan Kawasan Ekosistem Esensial dan Pengelolaan Kawasan Ekosistem Esensial Lahan Basah Mangrove di Jawa Tengah, menjadi landasan dalam pengelolaan mangrove di Jawa tengah.

Secara global, Indonesia berkomitmen melakukan konservasi dan restorasi mangrove sebagai program prioritas dalam pembangunan jangka menengah nasional (RPJMN) tahun 2020-2024 (BAPPENAS, 2019) dengan menargetkan luas rehabilitasi mangrove sebesar 600.000 ha. Penelitian ini juga mendukung *Sustainable Development Goals* (SDGs) nomor 13 mengenai penanganan perubahan iklim, nomor 14 mengenai ekosistem lautan, dan nomor 15 mengenai ekosistem daratan.

Novelty penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan neo dan paleoekologi secara terpadu dengan menggunakan diatom dan mineral sedimen pada ekosistem mangrove. Penelitian ini tidak hanya merekonstruksi perubahan lingkungan masa lalu, tetapi juga mengaitkan indikator paleoekologi dengan upaya mitigasi abrasi dan perumusan strategi pengelolaan mangrove berkelanjutan berbasis karakteristik lokal.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kondisi di ekosistem mangrove Pariaman, Pesisir Utara Pulau Jawa, dan Pulau Madura berdasarkan pendekatan neoekologi?
2. Bagaimana perbandingan identifikasi diatom klasik (metode digesti asam) dengan *environmental* DNA?

3. Bagaimana perubahan lingkungan yang terjadi di ekosistem mangrove Pariaman, Pesisir Utara Pulau Jawa, dan Pulau Madura berdasarkan pendekatan paleoekologi?
4. Bagaimana strategi pengelolaan untuk ekosistem mangrove Pariaman, Pesisir Utara Pulau Jawa, dan Pulau Madura ?

1.3 Orisinalitas

Hutan mangrove dianggap sebagai salah satu ekosistem yang paling terancam di dunia (Worthington *et al.*, 2020). Menurut perkiraan terbaru, luas mangrove global berkurang sebesar 3,4% dalam waktu kurang dari tiga dekade (1996–2020) akibat deforestasi alami dan antropogenik (Bunting *et al.*, 2022). Kajian paleoekologi memiliki fungsi untuk mengetahui rekaman kejadian di ekosistem mangrove, sehingga dari hasil tersebut dapat dilakukan beberapa langkah mitigasi untuk menjaga ekosistem mangrove.

Semua referensi hasil-hasil penelitian yang disajikan dalam tabel 1.1 tidak ada yang sama dengan penelitian yang akan dilakukan, dimana stratigrafi diatom, litostratigrafi, dan mineralogi digunakan sebagai interpretasi dari paleoekologi serta komparasi identifikasi diatom secara eDNA dengan morfologi mikroskopis. *Novelty* dalam penelitian ini yakni penelitian ini merupakan penelitian pertama di Indonesia yang mengintegrasikan beberapa lokasi ekosistem mangrove dengan dilakukan pendekatan neo dan paleoekologi. Penelitian ini juga melakukan perbandingan antara analisis diatom dengan metode klasik dan eDNA, serta analisis multiproksi dengan menggunakan kualitas air, diatom, litostratigrafi, dan mineralogi.

Tabel 1.1 Penelitian yang berkaitan dengan mitigasi mangrove, eDNA diatom, dan mineral mangrove

No	Peneliti/Tahun	Judul	Isi	Ket.
I. Penelitian terkait mitigasi abrasi				
1	(Pratama, 2019)	Tidal Flood in Pekalongan: Utilizing and Operating Open Resources for Modelling	Pemodelan laju penurunan muka tanah, terlihat bahwa setelah satu tahun, tinggi genangan banjir rob semakin meningkat pada kisaran 8 – 14 cm.	Proceeding
2	(Handayani <i>et al.</i> , 2020)	Urbanization and Increasing Flood Risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An Assessment towards Better Land Use Policy and Flood Management	Pengurangan risiko bencana melalui perencanaan dan pengendalian penggunaan lahan yang tepat merupakan instrumen penting untuk menjaga wilayah perkotaan (seperti wilayah studi kasus, dan seluruh pulau Jawa di Indonesia).	Jurnal
No	Peneliti/Tahun	Judul	Isi	Ket.
3	(Prasetyo <i>et al.</i> , 2021)	A Preliminary Study of Land Use Change and Hydro-meteorological Disaster in The North Coast of Central Java	Kajian pendahuluan ini menunjukkan adanya perluasan atau pembangunan kawasan yang signifikan di pesisir utara Jawa Tengah seiring dengan banyaknya kejadian bencana. Selain itu, banjir merupakan bencana hidrometeorologi utama yang terjadi di Jawa Tengah dengan 81% bencana terjadi di daerah hilir.	<i>Proceeding</i>

No	Peneliti/Tahun	Judul	Isi	Ket.
II. Penelitian terkait eDNA diatom				
1	(Li <i>et al.</i> , 2019)	Barcoding for diatoms in the Yangtze River from the morphological observation and 18S rDNA polymorphic analysis	Urutan 18S rDNA dari 236 spesies diatom dari 9 genus diatom dengan kelimpahan tertinggi di bagian Nanjing Sungai Yangtze dan disaring 8 Kode batang DNA.	Jurnal
2	(Duleba <i>et al.</i> , 2021)	Applicability of diatom metabarcoding in the ecological status assessment of Hungarian lotic and soda pan habitats	Penelitian ini menemukan korelasi yang signifikan antara kedua metode mengenai komposisi komunitas, indeks diatom dan hubungannya dengan variabel lingkungan.	Jurnal
3	(Pambudi <i>et al.</i> , 2021)	Identifikasi Komunitas Diatom Yang Berasosiasi Pada Makroalga <i>Padina</i> sp. di Perairan Pulau Pramuka dan Semak Daun Melalui Pendekatan Metagenomik	Komunitas diatom pada level order mendapatkan 13 order dan 1 grup <i>unclassified</i> untuk yang tidak diklasifikasikan ke level order. Hasil yang diperoleh adalah kelimpahan tertinggi pada ordo Bacillariales.	Jurnal
III. Penelitian terkait multiproksi analisis di ekosistem mangrove				
1	(Yu <i>et al.</i> , 2025)	The utility of mangrove foraminifera, diatoms, and stable carbon isotope and C/N geochemistry in relative sea-level reconstruction in the Pearl River Delta, China	Rekonstruksi perubahan lingkungan dari Holosen terkait dengan muka laut relatif (RSL) dengan menggabungkan informasi mikrofosil, isotop, dan geokimia.	Jurnal

1.4 Tujuan

1. Mengkaji neoekologi berdasarkan kualitas perairan, komposisi protista, dan komposisi diatom.
2. Mengkaji perbedaan identifikasi diatom klasik melalui metode digesti asam dan *environmental* DNA.
3. Mengkaji paleoekologi berdasarkan distribusi diatom dan diatom indeks.
4. Mengkaji paleoekologi berdasarkan komposisi dan distribusi mineral sedimen.
5. Mengembangkan strategi pengelolaan di ekosistem mangrove Pariaman, Pesisir Utara Pulau Jawa, dan Pulau Madura.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian paling tidak dapat dikelompokkan ke dalam 2 bidang yaitu manfaat secara teoritis dan manfaat secara praktis.

1.5.1 Manfaat Teoritis

Manfaat yang bersifat teoritis adalah menambah referensi ilmiah bagi kajian-kajian terkait lingkungan hidup khususnya yang berhubungan dengan mitigasi di ekosistem mangrove. Secara lebih spesifik adalah menambah informasi tentang penelitian dan database eDNA diatom di wilayah tropis serta memberikan informasi terkait perubahan lingkungan yang lebih kompleks dengan adanya analisis litostratografi dan mineralogi.

1.5.2 Manfaat Praktis

- a. Manfaat bagi pemerintah daerah maupun nasional adalah dapat menjadi pendorong bagi mereka untuk mengembangkan suatu kebijakan lebih lanjut guna menjaga kondisi lingkungan karena memiliki fungsi yang penting bagi masyarakat. Selain itu menjadi bahan pertimbangan dalam perbaikan sistem tata kelola sumberdaya sungai secara terpadu dan berkelanjutan.
- b. Bagi akademik dan peneliti, penelitian ini dapat memberikan pondasi untuk memulai penelitian terkait dengan multiproksi untuk mengkaji perubahan lingkungan ataupun aspek ekologi lain yang memberikan manfaat keberlanjutan bagi ekosistem mangrove.
- c. Bagi masyarakat setempat, dapat menambah pemahaman dan kesadaran bahwa kegiatan yang memanfaatkan kawasan ekosistem mangrove disamping berdampak positif juga menghasilkan dampak negatif.

SEKOLAH PASCASARJANA