

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Diatom

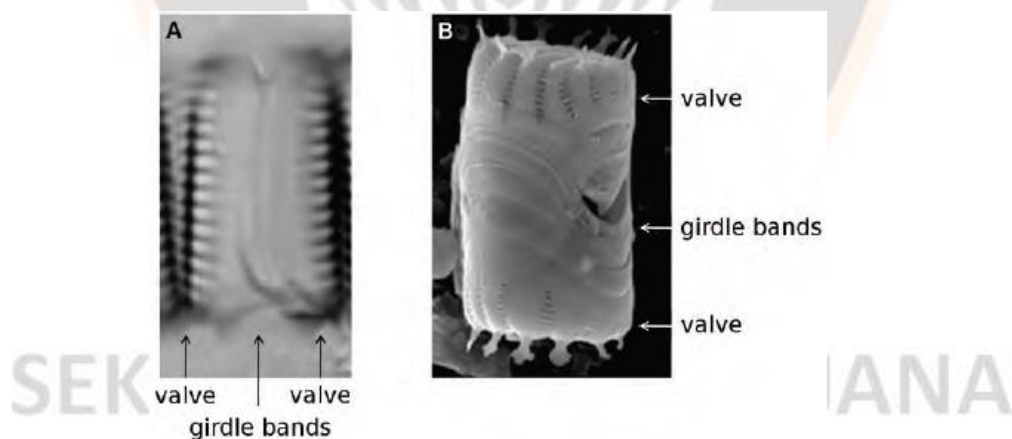
Diatom atau Bacillariophyta adalah organisme uniseluler, kebanyakan autotrof. Ditemukan di hampir semua jenis badan air, galur ini adalah salah satu yang paling produktif dan memiliki banyak spesies dari kelompok alga, dapat mencapai 100.000-200.000 taksa (Mann & Vanormelingen, 2013). Diatom merupakan salah satu organisme yang biasa digunakan sebagai bioindikator lingkungan. Hal ini dikarenakan diatom sangat mempengaruhi kehidupan di perairan karena memegang peranan penting sebagai sumber makanan dalam rantai makanan bagi berbagai organisme laut dan berperan dalam perpindahan karbon, nitrogen dan pospat (Siregar *et al.*, 2008). Melalui rantai makanan ini seluruh fungsi ekosistem dapat berlangsung. Seluruh hewan laut seperti udang, ikan, cumi-cumi sampai paus yang berukuran raksasa bergantung pada fitoplankton, baik secara langsung maupun tidak langsung (Abdillah, 2020).

Menurut Soeprbowati *et al.*, (2015), diatom sebagai bioindikator sangat efektif dan ekonomis karena diatom mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan organisme lain, diantaranya diatom mempunyai distribusi yang luas dengan populasi yang bervariasi, mempunyai peran penting di dalam rantai makanan, siklus hidup pendek, cepat bereproduksi, dijumpai di hampir semua substrat sehingga mampu merekam sejarah habitatnya, serta banyak dari spesiesnya yang sensitif terhadap perubahan lingkungan sehingga cepat merespon, mampu

merefleksikan perubahan-perubahan kualitas air dalam jangka pendek maupun jangka panjang, mudah dalam pengambilan sampel, analisis dan identifikasinya.

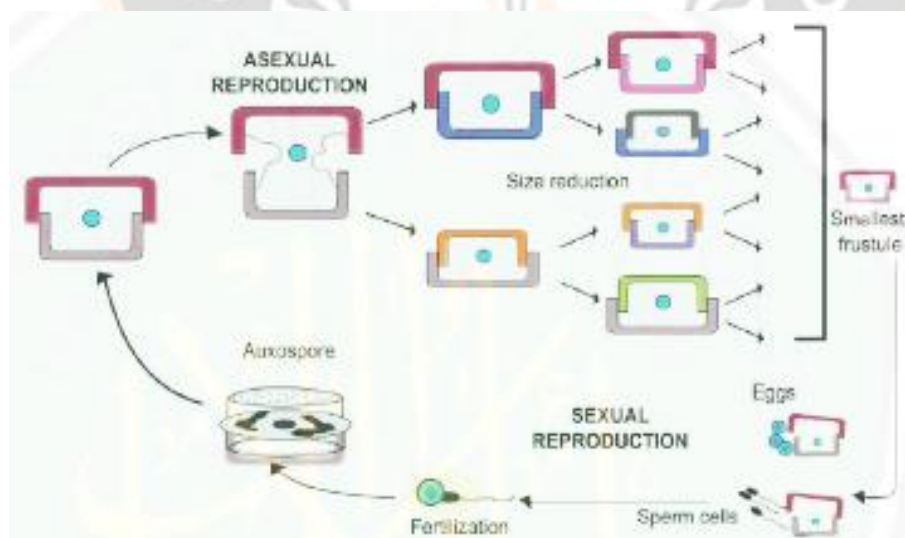
Menurut tempat hidupnya, diatom dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu, diatom planktonik dan diatom bentik, diatom planktonik hidup bebas dan berenang baik di air tawar maupun air laut, sedangkan diatom bentik hidup menempel pada substrat (Mery *et al*, 2018). Diatom bentik memiliki struktur dinding sel yang lebih tebal (lebih berat) daripada diatom planktonik. *Centrales* adalah ordo di dalam diatom, yang keberadaannya mendominasi kelompok planktonik diatom. Kelompok diatom bentik didominasi oleh ordo *Pennales*.

Dinding sel diatom disebut dengan *frustule*, yang mampu berdiferensiasi dan mengandung silika. *Frustule* ini terdiri dari dua katup (*valve*) yang dihubungkan oleh pita korset (*girdle band*) yang mana kedua ini saling menyatu dengan sangat rapat untuk mencegah adanya materi asing masuk ke dalam dinding sel (gambar 2.1) (Taylor *et al.*, 2016).



Gambar 2.1 A) Frustule diatom di bawah mikroskop cahaya dan B) Frustule diatom di bawah mikroskop elektron (Taylor *et al.*, 2016)

Siklus hidup diatom dinamakan siklus hidup diplontik, yang mana bentuk diploid ($n=2$) lebih dominan dibandingkan haploidnya ($n=1$). Reproduksi pada diatom sebagian besar terjadi secara aseksual, sehingga sel anak terbentuk di dalam sel induk oleh mitosis. Reproduksi diatom dengan membelah diri pada pemisahan epiteka dan hipoteka. Selanjutnya, pada epiteka membentuk hipoteka sehingga nantinya membentuk sel diatom, begitu sebaliknya pada hipoteka yang membentuk epiteka. Pembelahan akan menyebabkan ukuran sel bertambah kecil sehingga diatom membentuk *Auxospora* untuk mengembalikan ke ukuran semula. Reproduksi selanjutnya akan dilakukan melalui generatif dengan oogami (gambar 2.2) (Kale & Karthick, 2015).



Gambar 2.2 Siklus reproduksi diatom (Kale & Karthick, 2015)

Diatom banyak digunakan sebagai indikator lingkungan karena memiliki preferensi ekologi yang relatif spesifik terhadap salinitas, nutrien, dan tipe habitat, sehingga perubahan komposisi komunitasnya mampu merekam perubahan kondisi perairan dari waktu ke waktu, termasuk pada sistem pesisir dan rawa yang

dipengaruhi pasang surut (Smol & Stoermer, 2010). Pada ekosistem peralihan seperti estuari–mangrove, diatom telah lama dimanfaatkan untuk memberikan informasi terkait intrusi laut, perubahan hidrologi, serta perubahan muka laut relatif, tetapi interpretasinya perlu mempertimbangkan proses transport, pencampuran sedimen, dan tafonomi (pelarutan/fragmentasi frustul) yang dapat mengubah komposisi fosil yang terekam (Starratt, 2007).

Untuk memperkuat interpretasi di lingkungan yang dinamis, pendekatan yang umum dipakai adalah mengelompokkan taksa diatom ke dalam kelompok ekologis (misalnya air tawar, payau, laut; bentik vs planktonik) karena pengelompokan ini memperkuat rekonstruksi dan mengurangi bias dari ketergantungan pada spesies tunggal (Vos & de Wolf, 1993).

Pada lingkungan air tawar, komunitas diatom umumnya didominasi taksa oligohalin yang beradaptasi pada salinitas rendah dan sering menunjukkan respons cepat terhadap perubahan nutrien, sehingga banyak digunakan sebagai bioindikator status trofik dan kualitas air (Smol & Stoermer, 2010). Dalam konteks sedimen pesisir, dominasi komponen diatom rawa air tawar pada lapisan lebih tua kerap ditafsirkan sebagai fase awal pengendapan yang masih dikontrol masukan fluvial dan perairan darat, sebelum sistem menjadi lebih estuarin akibat peningkatan intrusi salin (Starratt, 2007).

Rekaman sedimen juga sering memberikan catatan perubahan salinitas yang lebih lengkap dibanding data lapangan jangka pendek; misalnya, perubahan salinitas jangka panjang pada rawa pesisir Louisiana berhasil direkonstruksi

menggunakan indeks salinitas berbasis diatom dari inti sedimen yang berumur ratusan tahun (Parsons *et al.*, 1999).

Pada lingkungan payau (*brackish*), komposisi diatom cenderung sangat dinamis karena salinitas berfluktuasi dipengaruhi pasang surut, debit sungai, turbiditas, dan perubahan geomorfologi di muara (Starratt, 2007). Banyak taksa diatom payau bersifat eurihalin sehingga komposisi biota payau sering menjadi penanda fase transisi (air tawar → laut) pada rekaman sedimen estuari (Starratt, 2007). Dalam kerangka metodologis rekonstruksi lingkungan pesisir, Vos & de Wolf (1993) menunjukkan bahwa pengkodean informasi ekologi taksa dan pengelompokan diatom ke dalam “*ecological groups*” yang terkait lingkungan tertentu efektif untuk menginterpretasi perubahan lingkungan sedimen pada rawa pesisir klastik.

Pada lingkungan laut (*marine*), terutama pesisir neritik, peningkatan proporsi diatom laut (terutama komponen planktonik/neritik) pada sedimen estuari umumnya ditafsirkan sebagai bukti menguatnya pengaruh laut, pembukaan konektivitas muara/laguna, atau kenaikan muka laut relatif (Starratt, 2007). Aplikasi diatom untuk rekonstruksi muka laut relatif dan elevasi pasang surut juga telah dibuktikan melalui pengembangan *transfer function* di lingkungan *saltmarsh–tidal flat*, termasuk studi klasik Zong & Horton (1999) yang menggunakan relasi diatom modern dan elevasi pasang surut untuk merekonstruksi perubahan muka laut di Inggris.

Terkait mangrove di Indonesia, Horton *et al.* (2007) menekankan bahwa studi diatom untuk rekonstruksi muka laut relatif di lingkungan mangrove Indonesia

masih sangat jarang, sehingga pengembangan basis data ekologi diatom mangrove tropis menjadi penting untuk memperkuat interpretasi paleoekologi pesisir. Selain itu, studi kasus pesisir Louisiana menunjukkan bahwa diatom juga dapat dipakai sebagai alat untuk merekonstruksi eutrofikasi pada rawa asin melalui analisis inti sedimen yang ditanggal menggunakan radionuklida, sehingga menautkan perubahan komunitas diatom dengan perubahan nutrisi dan produktivitas jangka panjang (Parsons *et al.*, 2005). Secara ringkas, interpretasi freshwater–brackish–marine yang paling kuat umumnya diperoleh dari kombinasi proporsi kelompok ekologis diatom dan pemahaman tafonomi sedimen, serta didukung proksi lain bila diperlukan (Vos & de Wolf, 1993).

2.2 Analisis Stratigrafi

2.2.1 Biostratigrafi

Biostratigrafi adalah cabang stratigrafi yang berfokus pada identifikasi dan pengorganisasian strata berdasarkan kandungan fosilnya. Strata dengan kandungan fosil yang khas disebut unit atau zona biostratigrafi. Biostratigrafi berkembang secara independen di Inggris dan Perancis setelah tahun 1800 oleh William Smith bahwa “strata yang sama selalu ditemukan dalam urutan superposisi yang sama dan mengandung fosil yang sama”. Ahli biostratigrafi mengenali lima jenis utama zona biostratigrafi: zona jangkauan, zona interval, zona garis keturunan, zona kumpulan, dan zona kelimpahan (Lucas, 2021).

Biostratigrafi hanya mungkin dilakukan karena spesies berevolusi dan punah pada waktu tertentu, dan evolusi setiap spesies bersifat unik. Meskipun

frustula diatom telah larut di sebagian besar lingkungan lautan, sejarah evolusi diatom diselingi oleh beberapa fase evolusi yang dipertahankan, sehingga memungkinkan adanya korelasi biostratigrafi di tingkat cekungan. Biostratigrafi diatom berdasarkan taksa asal usul dan kepunahannya yang unik sangat berguna di suksesi laut di sekitar Antartika, khatulistiwa, dan garis lintang tinggi di Pasifik Utara. Namun demikian, hanya dengan munculnya pengeboran inti sedimen laut dalam, yang dilakukan oleh IODP – *International Ocean Discovery Program* yang dapat mengidentifikasi spesies diatom dari sampel yang diambil dari inti yang sangat panjang, maka Burckle (1972) mengkorelasikan diatom jaman Kenozoikum akhir dari inti sedimen laut dalam (Abrantes & Isabelle, 2023).

2.2.1 Litostratigrafi

Litostratigrafi merupakan cabang stratigrafi yang membagi batuan atau sedimen menjadi satuan litostratigrafi berdasarkan karakteristik litologis fisik seperti komposisi mineral, tekstur, warna, dan struktur sedimen, bukan usia geologis (kronostratigrafi) (*North American Commission on Stratigraphic Nomenclature*, 2005). Satuan litostratigrafi utama meliputi formasi (satuan paling mendasar), anggota, dan bed, yang dibatasi oleh perbedaan litologi yang jelas dan dapat dilacak secara lateral. Prinsip dasar litostratigrafi mengikuti hukum superimposisi (lapisan bawah lebih tua), kontinuitas lateral, dan kesamaan karakter, memungkinkan korelasi antar-lokasi tanpa tanggal radiometrik (Harland *et al.*, 1990).

Dalam konteks sedimen mangrove, litostratigrafi sangat efektif karena endapan pesisir tropis menunjukkan variasi litofasies yang tajam akibat dinamika hidrotropik (pasang surut, sedimentasi organik) dan perubahan lingkungan (SLR, *subsidence*). Analisis melibatkan deskripsi lapangan, analisis granulometri (saringan, laser difraksi), dan mineralogi (XRD, LOI), menghasilkan log sedimen yang merekam siklus akomodasi ruang (Woodroffe, 2007).

2.3 Neoeкологи dan Paleoekologi

Laju perubahan global semakin cepat sejak tahun 1950an, dan masyarakat saat ini menghadapi tantangan besar dalam skala global (Steffen *et al.*, 2005). Mengantisipasi perubahan-perubahan tersebut, terutama yang mempengaruhi keanekaragaman hayati, telah menjadi salah satu tujuan utama para ilmuwan dari berbagai disiplin ilmu seperti klimatologi, geologi, dan/atau ekologi (Chaudhary & Mooers, 2018).

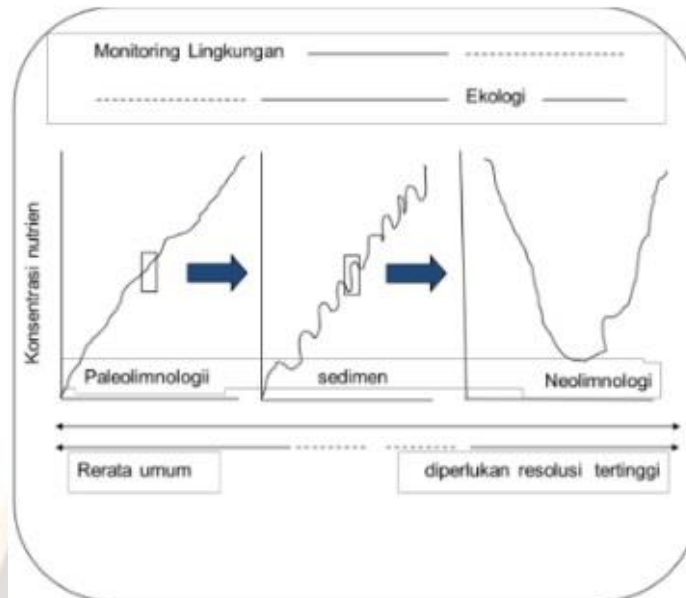
Para ahli neoeкологи secara tradisional berfokus pada mempelajari proses-proses sejarah terkini (dalam satu tahun hingga satu dekade atau seratus tahun) untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, sementara para ahli paleoekologi biasanya mempelajari proses-proses jangka panjang (dari sepuluh tahun hingga jutaan tahun) melalui catatan fosil. Meskipun perbedaan dan definisi paleo dan neoeкологи ini mungkin terlalu sederhana, pada kenyataannya, terdapat banyak pengecualian, kedua bidang tersebut secara tradisional dipisahkan karena berbagai sebab (Nieto-Lugilde *et al.*, 2021).

Namun demikian, elemen dan proses ekologi di masa lalu, masa kini, dan masa depan saling terkait dalam kontinum spatio-temporal (Reitalu *et al.*, 2014). Oleh karena itu, kedua disiplin ilmu tersebut memberikan informasi berharga pada skala waktu yang berbeda dan saling melengkapi yang, jika digabungkan, memiliki kemampuan untuk meningkatkan pemahaman kita tentang keanekaragaman hayati dan proses yang mendasarinya atau meningkatkan prediksi respons keanekaragaman hayati di masa depan (Maguire *et al.*, 2015). Oleh karena itu, pengintegrasian lebih lanjut kedua perspektif ini merupakan langkah penting menuju pemahaman dan antisipasi potensi perubahan ekologi.

2.4 Neolimnologi dan Paleolimnologi

Neolimnologi dan paleolimnologi merupakan bagian ilmu dari limnologi. Neolimnologi mempelajari karakteristik dan sifat perairan tawar dalam kurun waktu tahun sampai 10 tahun. Kegiatan yang dilakukan dalam kurun waktu tersebut merupakan pemantauan lingkungan, umumnya dengan fluktuasi tinggi. Sementara itu, paleolimnologi mempelajari karakteristik dan sifat perairan tawar dalam kurun waktu ratusan tahun, yang lebih menggambarkan rerata kualitas lingkungan (Gambar 2.3; Anderson, 1995) (Soeprbowati & Suedy, 2015).

SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar 2.3 Konsepsi limnologi dalam skala temporer (Soeprbowati & Suedy, 2015; modifikasi dari Anderson, 1995)

Kajian paleolimnologi di Indonesia masih terbatas (Soeprbowati *et al.*, 2018). Studi paleolimnologi menawarkan kesempatan untuk memahami kondisi lingkungan masa lalu (Bere, 2014). Studi ini dimulai untuk memberikan bukti bahwa pengelolaan danau yang baik dapat dikembangkan ketika kondisi masa lalu dipahami dengan baik. Studi paleolimnologi menawarkan kesempatan untuk memahami kondisi danau di masa lalu dan sekarang dan, dari lintasan yang disimpulkan, untuk memprediksi kondisi masa depan.

2.5 Paleo-oseanografi

Paleo-oseanografi merupakan kajian yang dilakukan di wilayah laut untuk mengetahui kondisi di masa lampau, bisa mendapatkan data ratusan hingga milyaran tahun yang lalu, dengan tujuan untuk merekonstruksi kondisi fisika, kimia, dan biologi (Thomas, 2009). Ilmu ini memberikan informasi mengenai tingkat proses perubahan lingkungan sehingga hubungan antara faktor biotik dan

abiotik saling terhubung untuk dilakukan rekonstruksi kondisi tersebut. Hal ini menjadikan peneliti mampu memperoleh tentang perubahan iklim/kondisi di masa depan.

Paleo-oseanografi merupakan kajian yang berkonsentrasi pada lautan di masa lampau dengan mempelajari sampel lautan, seperti foraminifera bentik, sedimen samudera, dan permukaan laut. Hal ini juga tergantung pada pengamatan metode geofisika seismik dan magnetik untuk menunjukkan perubahan lautan untuk menafsirkan perubahan paleo-oseanografi misalnya, perubahan iklim kuartar, pergerakan lautan saat ini, perubahan glasial, pengendapan batuan yang menguap seperti halit dan gipsum yang mungkin berasal dari masa lalu (Sahoo *et al.*, 2025).

Kajian paleo-oseanografi dapat dibedakan dalam tiga hal, yakni yang pertama adalah *proxy development*, permodelan baru, serta kajian statistika untuk menginterpretasi informasi dari paleoekologi dan ketidakpastian dalam data dan eksperimen model, misalnya, sensitivitas jangka panjang terhadap perubahan iklim, dan perubahan permukaan laut, termasuk lautan semi tertutup yang memberi kita lebih banyak informasi tentang pergerakan lempeng tektonik, dan menginteroperasikan peristiwa geologi lama seperti keretakan dan penyebaran dasar laut yang baru jadi (Meijer, 2021).

Kedua, mengenai iklim karbon, yang memusatkan pemahaman tentang perubahan iklim mendadak yang terjadi, dalam beberapa kasus, hal ini mungkin disertai dengan variasi signifikan dalam CO₂ di atmosfer terkait dengan gangguan siklus karbon (Shevenell *et al.*, 2020). Ketiga adalah interaksi es-laut, yang mewakili studi tentang pencairan glasial, jenis lingkungan laut glasial yang dapat

menyebabkan pemanasan setelah kenaikan suhu tinggi, dan respon lapisan es benua, termasuk interaksi kompleks antara penopang lapisan es, arus laut, dan pemanasan air laut di wilayah kutub serta dampaknya seperti kenaikan permukaan laut yang mungkin menenggelamkan kota-kota di zona pesisir dunia dalam beberapa dekade dan abad mendatang (Sahoo *et al.*, 2025).

2.6 Kualitas Perairan

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 yang telah mengatur mengenai Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air parameter yang akan digunakan meliputi:

2.6.1 Parameter Fisika

Suhu merupakan regulator utama proses-proses alamiah di dalam lingkungan akuatik dan dapat mengendalikan fungsi fisiologis organisme serta berperan secara langsung atau tidak langsung bersama dengan komponen kualitas air lainnya mempengaruhi kualitas akuatik. Salah satu faktor yang sangat penting dalam proses metabolisme organisme di perairan. Perubahan suhu yang bersifat ekstrim akan mengganggu kehidupan organisme bahkan dapat menyebabkan kematian (Ruthena, 2021).

Kedalaman merupakan salah satu penentu kesuburan perairan (status tropik) dan menggambarkan tingkat kestabilan massa air di danau. Perairan dengan kedalaman rata-rata yang rendah akan memiliki rasio antara lapisan fotik dan afotik yang lebih besar, karena dengan kedalaman rata-rata yang rendah, cahaya matahari dapat menembus samapai ke dasar sehingga fotosintesis masih dapat aktif dan sediaan oksigen cukup besar.

Kekeruhan air adalah sifat optik air yang ditentukan berdasarkan banyaknya cahaya yang diserap dan dipancarkan oleh bahan-bahan yang terdapat dalam air. Kekeruhan disebabkan oleh bahan organik dan anorganik baik tersuspensi maupun terlarut seperti lumpur, pasir, bahan organik seperti plankton dan mikroorganisme lainnya (Salim *et al.*, 2017).

Konduktivitas adalah kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik berdasarkan konsentrasi ion dalam larutan. Pengukuran konduktivitas tidak lepas dengan hasil pengukuran *Total Dissolved Solid* (TDS) yang dapat diukur dengan alat *Conductivity meter*. Semakin banyak ion yang bergerak maka arus listrik yang dihasilkan semakin besar sehingga nilai konduktivitasnya pun juga semakin besar. Padatan terlarut di dalam air juga mempengaruhi banyaknya ion dalam larutan (Irwan & Afdal, 2016).

2.6.2 Parameter Kimia

pH digunakan untuk menentukan derajat keasaman atau kebasaan dari suatu larutan. Pengukuran dan pengendalian pH adalah sangat penting untuk berbagai studi kimia dan biologi di laboratorium dan berbagai bidang industri (Desmira *et al.*, 2018). Tingginya nilai pH sangat menentukan dominansi fitoplankton yang mempengaruhi tingkat produktivitas primer suatu perairan.

Dissolved Oxygen (DO) merupakan total jumlah oksigen yang terlarut di suatu perairan. Oksigen diperlukan oleh semua jasad hidup untuk pernapasan, proses metabolisme atau pertukaran zat yang kemudian menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan pembiakan. Semakin tinggi oksigen di suatu perairan,

maka dapat dikatakan bahwa tingkat polusi di badan air tersebut rendah (Hamuna *et al.*, 2018).

BOD atau yang biasa dikenal dengan *biological oxygen demand* adalah jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam kondisi aerob (Santoso, 2018). Nilai BOD tidak menunjukkan jumlah bahan organik yang sebenarnya, tetapi hanya mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan bahan organik tersebut (Wulandari, 2018). Sedangkan COD atau yang biasa dikenal dengan *chemical oxygen demand* adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air secara kimiawi (Lumaela *et al.*, 2013).

Unsur hara merupakan parameter penting dalam menentukan kesuburan suatu perairan yang dapat diklasifikasikan dengan menentukan produktivitas primer. Unsur-unsur utama nutrisi yang terkait dengan produktivitas primer seperti fitoplankton antara lain karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), sulfur (S) dan silikon (Si). Silikon/ silikat merupakan unsur yang dibutuhkan dalam pembentukan frustula. Sedangkan unsur mikro sebagai nutrisi diatom diantaranya kalium (K), kalsium (Ca), Mangan (Mn) seng (Zn) dan Magnesium (Mg). Logam berat adalah bahan beracun yang dapat menyebabkan kerusakan pada organisme akuatik. Sumber pencemaran logam sebagian besar berasal dari pertambangan, peleburan logam, industri lainnya, dan juga dapat berasal dari limbah domestik yang menggunakan logam, serta lahan pertanian yang menggunakan pupuk yang mengandung logam (Lestari & Trihadiningrum, 2019).

2.7 DNA *Metabarcoding*

Pemantauan kumpulan diatom dilakukan untuk menilai kualitas lingkungan pada ekosistem air tawar, seperti sungai dan danau. Diatom memiliki keanekaragaman taksonomi yang sangat besar (Mann & Vanormelingen, 2013) dan setiap spesies memiliki preferensi ekologi yang unik sehingga menjadikannya indikator ekologi yang sangat baik (Rimet, 2012). Hingga saat ini, metode standar yang digunakan untuk menghitung dan mengidentifikasi diatom hingga tingkat spesies didasarkan pada kriteria morfologi yang terlihat dengan mikroskop cahaya (CEN 2014a;b). Hal ini memakan waktu, memerlukan ahli taksonomi yang sangat terlatih, dan dapat menimbulkan variasi identifikasi yang cukup besar apabila proses dilakukan oleh beberapa orang yang berbeda (Kahlert, 2012).

DNA *metabarcoding* adalah pendekatan yang bertujuan untuk mengidentifikasi beberapa spesies dari sampel campuran (bulk DNA atau eDNA) berdasarkan high-throughput sequencing (HTS) dari penanda DNA spesifik. Ini berbeda dari barcode DNA konvensional (biasanya berdasarkan sekuensing DNA Sanger dari spesimen individu) karena jumlah data sekuens DNA yang diturunkan oleh HTS memungkinkan taksonomi untuk secara cepat ditetapkan ke banyak spesies yang ada dalam sampel. DNA *metabarcoding* mulai muncul karena dari segi biaya dinilai lebih hemat untuk studi skala besar mengenai lingkungan (Liu *et al.*, 2020).

Proses metabarcoding diatom melibatkan lima langkah: 1) pengambilan sampel dan penyimpanan, 2) ekstraksi DNA, 3) amplifikasi PCR, 4) persiapan dan pengurutan ampikon, dan 5) bioinformatika. Semua langkah ini dapat

menunjukkan variasi antar penelitian dengan berbagai macam protokol yang digunakan.

2.8 Next Generation Sequencing (NGS)

Next Generation Sequencing (NGS) merupakan alat yang dapat melihat ekspresi suatu gen dari seluruh sekuens genom (Sudigyo *et al.*, 2020), dimana metode yang pertama kali digunakan adalah metode Sanger (*Sanger Dideoxy Sequencing*) sejak tahun 1970-an. Prinsip teknik generasi pertama adalah pemanfaatan metode terminasi rantai dan panjang baca mencapai 500–1000 pasangan basa (bp). Generasi kedua teknologi sekuensing setelah generasi pertama Sanger dikenal dengan *Next Generation Sequencing* (NGS). Teknik generasi kedua, juga termasuk 18 *pyrosequencing*, *sequencing* dengan sintesis atau *sequencing* dengan metode ligasi, dan panjang baca berkisar antara 50–500 bp (Akaçin *et al.*, 2022).

Sejak tahun 2005, beberapa metode *next-generation sequencing* (NGS) telah dikembangkan dan diusulkan untuk menyelidiki genomik atau pertanyaan terkait DNA dalam praktik klinis (Weiss *et al.*, 2013). NGS melakukan pendekatan baru untuk *sequencing*, yang terdiri dari pendekatan yang berbeda tergantung pada penambahan preparasi template, *sequencing primer*, *sequence alignment* dan *genome assembly* (Metzker, 2009). Keuntungan utama NGS dibandingkan metode deteksi mutasi tradisional adalah kemampuan untuk mengurutkan banyak gen dan menyoroti jutaan varian secara bersamaan. Keunggulan lainnya termasuk input DNA minimal, waktu pemrosesan lebih cepat; NGS telah merevolusi kecepatan penemuan genetik dan genom dan meningkatkan pemahaman peneliti tentang

mekanisme molekuler penyakit dan pilihan pengobatan potensial. Kemajuan teknis dalam metode sekuensing ini (menggantikan radiolabeling dengan pewarna fluoresen dan mengganti elektroforesis gel dengan elektroforesis kapiler) membawa otomatisasi ke metode sekuensing dan meningkatkan volume sekuensing menjadi beberapa ribu bp dalam sekali proses (Lohmann & Klein, 2014). Instrumen NGS dapat menghasilkan beberapa miliar nukleotida dalam waktu yang sangat singkat dan dengan biaya yang murah (Rabbani *et al.*, 2016). Fitur ini memungkinkan penggunaan metode NGS di berbagai bidang seperti Whole Genome Sequencing (WGS), Whole Exome Sequencing (WES/ES), Varian Calling (VC), Targeted Sequencing (TS) dan Transcriptome Sequencing (TCS).

2.9 Ekosistem Mangrove

Ekosistem peralihan seperti hutan bakau terdapat di pertemuan antara sistem air tawar dan laut dan terdapat di wilayah pesisir di negara-negara tropis dan beriklim sedang. Sistem ini dianggap sebagai ekosistem paling produktif ketiga di dunia, dan spesies mangrove adalah yang paling mungkin bertahan dari dampak perubahan iklim karena pertumbuhan dan siklus reproduksinya yang cepat (Mukhopadhyay *et al.*, 2018). Sistem lahan basah ini menyediakan berbagai ruang, yang sangat penting bagi komunitas manusia, seperti perlindungan pesisir terhadap bahaya alam dan kawasan pembibitan bagi beberapa spesies (Basset *et al.*, 2013).

Namun, sebagian besar pemanfaatan dan manfaat hutan bakau tidak dapat diukur dengan uang, sehingga nilainya tidak dapat diperoleh melalui sistem ekonomi. Namun, manfaat ini memainkan peran penting dalam mendukung masyarakat yang berada di sekitar kawasan tersebut (Glaser, 2003), meskipun

aktivitas manusia yang berlebihan dapat merusak ekosistem mangrove, seperti yang terjadi di Desa Tambakbulusan dan Morodemak, dimana kerusakan yang terjadi akibat perubahan lahan menjadi tambak dan penebangan (Rahim, 2023).

2.10 Mineralogi

Mineralogi sedimen merupakan komponen kunci dalam rekonstruksi lingkungan pengendapan karena komposisi mineral merekam sumber material (*provenans*), intensitas pelapukan, mekanisme transport, serta kondisi kimia-fisika saat deposisi, sehingga sangat berguna untuk menafsirkan perubahan karakter sedimen pada sistem estuari–mangrove yang dinamis (Boggs, 1995). Pada sedimen pesisir, mineral kuarsa dan feldspar umumnya berasosiasi dengan input detrital daratan, sedangkan variasi mineral lempung (misalnya kaolinit, smektit, ilit, klorit) sering dipakai untuk menilai proses pelapukan dan perubahan sumber sedimen (Chamley, 1989).

Kaolinit umum meningkat pada wilayah tropis lembap dengan pelapukan kimia kuat, sedangkan smektit sering berhubungan dengan material vulkanik teralterasi, lingkungan dengan pelapukan sedang, atau akumulasi dalam cekungan tenang tempat lempung “swelling” dapat bertahan (Moore & Reynolds, 1997). Karena itu, perubahan vertikal rasio kaolinit–smektit–ilit/klorit di inti sedimen pesisir sering diinterpretasikan sebagai pergeseran dominasi input daratan, perubahan hidrologi, atau perubahan energi lingkungan yang memengaruhi butir yang halus (Moore & Reynolds, 1997).

Di ekosistem mangrove, mineralogi juga membantu membedakan pengaruh laut dan proses evaporatif pada fase tertentu, misalnya melalui kehadiran mineral

evaporit seperti halit atau gipsium yang dapat mengindikasikan intrusi laut kuat, evaporasi tinggi, atau kondisi laguna semi-tertutup yang mendukung presipitasi garam (Tucker, 2013). Interpretasi seperti ini menjadi penting ketika data mikrofosil (misalnya diatom) rendah akibat tafonomi atau energi tinggi, karena sinyal mineral dapat menjadi proksi pendukung untuk menilai dominasi proses marin vs fluvial pada interval tersebut (Boggs, 1995).

Dalam konteks metodologi analisis, *X-ray diffraction* (XRD) merupakan teknik standar untuk mengidentifikasi fase kristalin pada sedimen dan mineral lempung, tetapi kuantifikasi mineral lempung menuntut kehati-hatian karena orientasi preferensial, ukuran kristalit, dan *mixed-layer clays* dapat memengaruhi intensitas puncak (Moore & Reynolds, 1997). Oleh sebab itu, prosedur preparasi (penggerusan halus, *back-loading*, serta pemisahan butir tertentu bila diperlukan) menjadi langkah yang sangat menentukan kualitas interpretasi mineralogi (Cullity & Stock, 2001).

Dalam studi sedimen modern, evaluasi XRD sering dimulai dari identifikasi fase (misalnya menggunakan pencocokan puncak dengan basis data seperti ICDD), kemudian dilanjutkan dengan analisis kuantitatif. Untuk kuantifikasi komposisi mineral secara lebih presisi, pendekatan *Rietveld refinement* pada data XRD telah menjadi metode yang luas dipakai untuk *quantitative phase analysis* karena memodelkan seluruh pola difraksi, bukan hanya intensitas puncak terpilih (Young, 1993). Penerapan *Rietveld* menggunakan perangkat lunak seperti TOPAS banyak digunakan untuk estimasi kategori ukuran butir pada fase kristalin dalam campuran,

terutama bila input struktur kristal memadai dan proses refinement dilakukan secara bertahap (Coelho, 2018).

Selain XRD, SEM–EDS berperan sebagai teknik pelengkap untuk mengamati mikrostruktur butir, morfologi mineral/fragmen biogenik, serta memeriksa komposisi unsur secara cepat pada titik/area tertentu, sehingga membantu memvalidasi interpretasi XRD (misalnya membedakan butir kuarsa, fragmen karbonat, atau kristal garam) dan memahami tekstur pengendapan (Goldstein *et al.*, 2018). Integrasi XRD dan SEM–EDS sering direkomendasikan dalam kajian sedimen karena XRD unggul dalam identifikasi fase kristalin bulk, sedangkan SEM–EDS unggul dalam pemeriksaan heterogenitas dan bukti mikroskopik proses (misalnya pelapukan, presipitasi garam, atau pengendapan ulang) (Boggs, 1995; Goldstein *et al.*, 2018). Dengan demikian, mineralogi dapat memberikan landasan multiproksi yang lebih kuat untuk menyimpulkan perubahan paleo-lingkungan pada sedimen mangrove dan pesisir.

2.11 Penentuan Umur Sedimen

Isotop radionuklida antropogenik ^{137}Cs telah lama digunakan sebagai penanda kronostratigrafi dalam sedimen lingkungan untuk merekonstruksi proses deposisi sedimen selama periode modern (± 100 tahun terakhir). ^{137}Cs dilepaskan ke atmosfer terutama selama uji coba senjata nuklir pada akhir 1950-an hingga awal 1960-an, dengan puncak global deposisi atmosfer terjadi sekitar tahun 1963, serta kontribusi tambahan yang bersifat regional dari kecelakaan nuklir Chernobyl pada tahun 1986. Dalam lingkungan sedimen yang relatif stabil, puncak aktivitas ^{137}Cs ini dapat terawetkan sebagai horizon stratigrafi yang jelas dan digunakan untuk

mengkalibrasi model umur sedimen, sering kali dikombinasikan dengan metode ^{210}Pb . Keberhasilan metode ini bergantung pada aktivitas ^{137}Cs yang cukup tinggi, umumnya pada kisaran beberapa hingga puluhan Bq/kg, sehingga variasi vertikalnya dapat terdeteksi dengan tingkat ketelitian analitik yang memadai (Appleby, 2008; Baskaran, 2016).

Namun demikian, berbagai studi menunjukkan bahwa penerapan ^{137}Cs sebagai penanda kronologi memiliki keterbatasan yang signifikan di lingkungan pesisir tropis, khususnya pada ekosistem mangrove dan lahan basah pasang surut. Di wilayah Asia Tenggara, aktivitas ^{137}Cs yang terukur dalam sedimen sering kali sangat rendah ($<1\text{--}2\text{ Bq/kg}$), mendekati batas deteksi praktis spektrometri gamma, sehingga menyulitkan identifikasi horizon fallout 1963. Rendahnya aktivitas ini dikaitkan dengan kombinasi faktor lingkungan, antara lain laju sedimentasi yang tinggi, masukan sedimen mineral dalam jumlah besar, serta proses pencampuran sedimen akibat pasang surut dan bioturbasi. Kondisi tersebut menyebabkan sinyal ^{137}Cs tereduksi atau terdistribusi secara merata di sepanjang kolom sedimen, sehingga kehilangan nilai stratigrafisnya (Sanchez-Cabeza & Ruiz-Fernández, 2012; Peñuela *et al.*, 2023).

Selain itu, efektivitas ^{137}Cs juga dipengaruhi oleh karakteristik regional deposisi fallout. Di kawasan tropis Asia Tenggara, satu-satunya penanda waktu ^{137}Cs yang relevan secara luas adalah puncak global tahun 1963, karena kontribusi dari kecelakaan Chernobyl pada 1986 hampir tidak terdeteksi. Hal ini berbeda dengan wilayah lintang menengah hingga tinggi, di mana deposisi ^{137}Cs umumnya lebih besar dan menghasilkan profil vertikal yang lebih jelas. Oleh karena itu,

banyak peneliti menekankan bahwa penggunaan ^{137}Cs di lingkungan mangrove tropis sebaiknya diperlakukan secara hati-hati dan dikombinasikan dengan pendekatan multiproksi, termasuk analisis ^{210}Pb , sedimenologi, dan indikator biologis, untuk memperoleh interpretasi kronologi dan paleoekologi yang lebih andal (Baskaran, 2016; Coca *et al.*, 2025).

Analisis radionuklida ^{137}Cs dan ^{210}Pb dilakukan untuk mengevaluasi potensi penentuan umur sedimen mangrove pada skala waktu dekadal hingga sub-sentennial. Sampel sedimen diambil secara berlapis dari inti sedimen mangrove menggunakan corer, kemudian disub-sampling secara interval vertikal tetap untuk menjaga stratigrafi. Seluruh sampel dikeringkan, dihomogenkan, dan disaring sebelum dilakukan analisis radionuklida. Aktivitas ^{137}Cs ditentukan menggunakan spektrometri gamma resolusi tinggi dengan detektor HPGe, melalui puncak energi karakteristik 661,6 keV.

SEKOLAH PASCASARJANA