

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Ekosistem Danau, Tipe dan Komponennya

Ekologi merupakan istilah yang bersumber dari bahasa Yunani, tersusun atas dua kata, yakni *oikos* dan *logos*. *Oikos* memiliki makna sebagai rumah atau tempat tinggal sementara *Logos* mengandung makna sebagai ilmu atau pengetahuan. Awalnya Ekologi didefinisikan sebagai ilmu yang mengkaji organisme di tempatnya tinggal. Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, hingga saat ini ekologi didefinisikan sebagai suatu keilmuan yang mengkaji hubungan timbal balik antar kelompok organisme terhadap lingkungannya. Ekologi lebih dipahami sebagai cabang ilmu pengetahuan yang mengkaji tentang struktur serta fungsi dari komponen-komponen ekosistem di dalamnya. Lampert dan Summer (2007) mendefinisikan ekologi sebagai studi ilmiah atas interaksi penentu distribusi maupun kelimpahan organisme. Konsep yang disampaikan tersebut menjelaskan adanya dinamika interaksi terhadap unsur-unsur yang membangun ekosistem meliputi organisme serta lingkungannya. Menurut Retnaningdyah (2019), ekosistem merupakan suatu wilayah yang di dalamnya dapat ditemukannya hubungan timbal balik antara komunitas makhluk hidup yang menghuni wilayah tersebut dengan komponen abiotik/tidak hidup sebagai penyusun habitat dari komunitas tersebut.

Ekosistem tercipta bermula dari terbentuknya makromolekul, selanjutnya bertransformasi jadi protoplasma, sel, jaringan, organ tubuh sampai kemudian menjadi sebuah organisme atau makhluk hidup. Kumpulan dari organisme yang sejenis, selanjutnya menjadi populasi. Dari berbagai macam populasi makhluk hidup akan membentuk komunitas, misalnya komunitas binatang, komunitas tumbuhan dan juga komunitas manusia. Bergabungnya berbagai komunitas dalam bentuk kerjasama dan interaksi antar komunitas tersebutlah yang membentuk sebuah ekosistem (Retnaningdyah, 2019). Cabang ilmu ekologi sendiri secara mendasar mencakup ruang lingkup terhadap studi *aras*/ tingkatan organisme-organisme tertentu yang dimulai dari populasi, komunitas sampai biosfer.

Awalnya ekologi berkembang berdasarkan dua jalur ilmu hayati, yakni ekologi hewan dan ekologi tumbuhan. Para ahli ekologi hewan concern dalam mengkaji populasi serta tingkah laku hewan yang dinamis, sementara ahli tumbuhan focus pada kajian hubungan antar tumbuhan itu sendiri. Dari dua jalur yang mendasari berkembangnya ekologi tersebut kemudian dibagi menjadi dua, yakni *Autekologi* dan *Sinekologi* (Sembel, 2015).

Autekologi menurut Sembel (2015) adalah ilmu yang mengkaji terkait hubungan timbal balik suatu jenis organisme terhadap lingkungannya yang biasanya memiliki sifat eksperimental dan induktif. Misalnya dari kajian Autokologi yaitu telaah ekologi ular maupun hewan lain yang hanya terdapat di lingkungan tertentu. Adapun Sinekologi adalah ilmu yang mengkaji kelompok-kelompok organisme dalam bentuk satu-keastuan yang memiliki sifat deskriptif,

deduktif serta filosofis. Contoh dari sinekologi adalah kajian ekologi hutan hujan tropis yang didalamnya tidak hanya di huni oleh satu jenis makhluk saja.

Pada sinekologi masih dapat dibedakan lagi, diantaranya adalah menjadi ekologi terrestrial (daratan), ekologi aquatic (perairan) yang meliputi ekologi laut dan ekologi perairan tawar. Ekologi terrestrial membahas hara tanah, makro-mikro nutrien, daur hidrologi, iklim mikro dan lainnya. Ekologi terrestrial relatif “lebih sulit” di kaji dibanding dengan ekologi aquatic karena ekologi terrestrial mempunyai parameter kendali yang kompleks, meliputi faktor fisik lingkungan dan faktor biologis masing-masing organisme. Sementara pada ekosistem akuatik keadaan lingkungan hidup organisme lebih stabil karena hanya dipengaruhi oleh parameter fisika dan kimiawi (Indriyanto, 2017).

Menurut komponen penyusunnya ekosistem tersusun atas komponen produsen, komponen konsumen, komponen abiotik dan juga komponen dekomposer (Indriyanto, 2017). Komponen produsen adalah organisme autotrof yang dapat mensintesa material organik sebagai bahan makanan melalui mekanisme fotosintesis. Produsen ini merupakan organisme berklorofil yang mampu berfotosintesis misalnya tumbuhan, alga, diatom dan lain sebagainya. Komponen konsumen adalah organisme heterotrof yang tidak dapat memproduksi makanan sendiri karena tidak mampu berfotosintesis. Organisme heterotrof ini dalam menjalankan siklus hidup bergantung pada makhluk hidup lainnya, sebagai contoh adalah manusia dan hewan. Komponen pengurai atau biasa disebut sebagai dekomposer merupakan organisme tingkat rendah (mikroorganisme) dan bersifat heterotrof. Dekomposer memiliki kemampuan menguraikan material organik dari

jasad makhluk hidup menjadi komponen anorganik. Komponen dekomposer antara lain bakteri pengurai dan jamur. Komponen abiotik meliputi material fisika dan kimia meliputi udara, air dan tanah. Komponen abiotik merupakan benda mati yang memiliki kemampuan dalam mendukung makhluk hidup dalam kelangsungan hidupnya (Odum, 1998., Indruyanto, 2017).

Ekosistem danau tergolong habitat air tawar yang mempunyai perairan tenang dan dicirikan oleh adanya arus yang sangat lambat berkisar 0,1-1 cm/detik atau tak ada arus sama sekali (Wetzel, 2001). Pada ekosistem danau berdasarkan fungsi yang ada didalamnya terdiri atas komponen heterotrof komponen autotrof (Lampert dan Sommer, 2007). Di dalam ekosistem danau akan terjadi siklus materi serta terdistribusinya energi di dalam sistem rantai makanan karena adanya interaksi antara komponen heterotrof dengan komponen autotrof (Sullivan dan Reynold, 2003).

Studi yang menyangkut ekosistem danau sudah mengalami perkembangan dan kemajuan melalui berbagai disiplin keilmuan. Danau adalah salah satu ekosistem air tawar yang dikelilingi oleh daratan dengan proses pembentukannya secara alamiah. Air yang masuk ke danau bersumber dari hujan, cairnya gletser, aliran sungai, dan terdapatnya mata air (Harmoko dan Krisnawati, 2018). Proses terbentuknya danau secara alami karena adanya kekuatan tektonik, vulkanik maupun glasial, dengan luasan mulai dari beberapa meter sampai ribuan meter persegi. PERMEN LH Nomor 28 Tahun 2009 telah mendiskripsikan danau sebagai wadah air dan ekosistemnya terbentuk secara alamiah termasuk situ dan wadah air sejenis dengan sebutan lokal. Definisi tersebut sejalan dengan Forel

(pendiri limnologi) yang menyebutkan bahwa danau adalah badan air yang terletak di darat dan mempunyai pergerakan air tenang, menempati basin dengan air mengalir ke laut (Sullivan dan Reynold, 2003).

Ekosistem alami danau memiliki sifat terbuka yang berarti keberadaannya mempunyai interaksi secara dinamis terhadap lingkungannya. Sehingga segala bentuk fenomena yang terjadi di lingkungan danau akan mempengaruhi ekosistem danau. Danau dinilai merupakan sistem yang memiliki batasan dengan ditentukan oleh permukaan perairan darat, dengan demikian dari sisi limnologi danau harus dipahami dalam konteks lanskap penampung air. Menurut Soeprbowati (2017) danau memiliki fungsi mengendalikan terjadinya banjir dan kekeringan, penyangkutan air tanah dan pencegah intrusi air laut, jalan transportasi, rekreasi, riset dan pendidikan. Fungsi danau secara ekologis menghentikan sedimen dari daratan dan memperjelas air, pemegang dan penyedia nutrisi, menghentikan dan menetralkan polusi, stabilisasi iklim mikro, dan pengontrol iklim global. Hasil produksi danau (fungsi ekonomi dan nonekonomi) adalah untuk penyedia air bagi masyarakat, pengisi air tanah, penyedia air untuk lahan basah lainnya, sumber perikanan, pendukung pertanian, dan sumber energi. Fungsi dan nilai manfaat danau lainnya adalah sebagai habitat keanekaragaman hayati, keunikan tradisi dan warisan budaya.

Danau adalah pusat keanekaragaman hayati (Krztoń *et al.*, 2019; Rumenova *et al.*, 2019) dan sistem yang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Selain itu, karena wilayah zona perairannya menawarkan begitu banyak jasa ekosistem, danau dapat dilihat sebagai salah satu lingkungan yang

paling terancam di dunia (Strayer, 2010), khususnya yang membutuhkan pemantauan perubahan. Danau terancam oleh efek langsung (misalnya, pengayaan nutrisi, praktik kehutanan, tekanan pertanian) dan tidak langsung (misalnya, perubahan iklim) (Rumenova *et al.*, 2019). Selama beberapa dekade terakhir, studi interdisipliner telah menunjukkan peningkatan dampak perubahan iklim pada kimia air danau, yang mengakibatkan penurunan keanekaragaman hayati yang berbahaya (Ahuerma, 2019; Rumenova *et al.*, 2019).

Ekosistem danau dapat mengalami kerusakan yang disebabkan oleh faktor alami dan juga karena dampak dari aktivitas manusia. Secara alamiah kerusakan danau diakibatkan oleh berbagai hal antara lain aktivitas vulkanik, gempa bumi tektonik maupun banjir. Adapun kerusakan yang diakibatkan oleh aktivitas manusia yang menimbulkan pencemaran misalnya pertanian, budidaya perikanan, perindustrian, jasa wisata dan limbah domestik rumah tangga. Selain itu merubah fungsi tataguna lahan, sistem hidrologi, mengintroduksi spesies asing ke perairan dan pengembangan pemukiman di sekitar perairan (Susmianto, 2004).

2.2. Danau Rawapening

Rawapening termasuk danau semi alami yang berada sekitar 45 kilometer sebelah selatan Kota Semarang dan 9 kilometer sebelah barat laut Kota Salatiga. Rawapening terletak di segitiga emas antara Semarang, Solo dan Yogyakarta. Koordinatnya terletak pada 7°04'-7°30' LS dan 110°24'46"-110°49'06" BT, serta berada pada ketinggian 460 meter di atas permukaan laut. Secara administratif, Danau Rawapening berada di Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Kawasan Danau Rawapening menempati wilayah empat kecamatan

meliputi Kecamatan Bawen di sebelah utara, Kecamatan Banyubiru di sebelah selatan, Kecamatan Tuntang di sebelah timur dan Kecamatan Ambarawa di sebelah barat (RP Rawapening, 2019)

Danau Rawapening beserta dataran alluvial yang ada disekitar kawasannya terbentuk oleh proses *subsident* (amblasan) sebuah Gunung Api Purba Bernama Gunung Api Suropati. Proses tersebut mengakibatkan bagian kaki gunung sebelah utara mengalami pergeseran menjadi lebih ke arah utara sehingga struktur dasarnya menjadi naik. Topografi cekungan Danau Rawapening terbentuk disebabkan terjadinya pembendungan aliran Sungai Tuntang oleh material lahar Gunung Api Ungaran Tua yang memiliki sifat basalistis. Proses terbentuknya Danau Rawapening diprediksi terjadi pada zaman *Holoceen* sampai zaman *Pleicene*. Secara litologis ditemukan breksi vulkanik pada bagian utara danau, berupa jalur lahar beserta sisipan jalur lava dan tufa bertekstur halus hingga kasar yang bersumber dari Formasi Notopuro. Proses pengendapan tersebut terjadi pada zaman *Holoceen* sampai zaman *Pleicene* (KLH, 2012).

Batuan vulkanik yang terbentuk dari aktifitas Gunung Ungaran Tua serta Gunung Merbabu terendapkan di zaman *Holoceen* sampai zaman *Pleicene* dapat ditemukan pada bagian selatan barat laut. Bantuan vulkanik hasil kegiatan dari Gunung Ungaran Purba dan Gunung Merbabu yang diendapkan pada kala Holocene hingga Pleiocene dijumpai di bagian selatan dan barat laut (KLH, 2012).

Kondisi Danau Rawapening saat ini selain terbentuk secara alami karena adanya proses geologis tetapi juga karena terdapat campur tangan pembangunan manusia. Penyempurnaan bendungan dilakukan dengan pembangunan DAM pada masa pemerintahan Hindia-Belanda dalam kurun waktu tahun 1912 hingga 1916. Pembangunan bendungan tersebut dengan menjadikan Sungai Tuntang menjadi satu-satunya *outlet* air di danau tersebut. Pembangunan selanjutnya adalah proyek perluasan yang dikerjakan pada tahun 1936 hingga badan air mencapai luas 2.667 hektar di musim hujan serta seluas 1.650 hektar di musim kemarau (KLH, 2012).

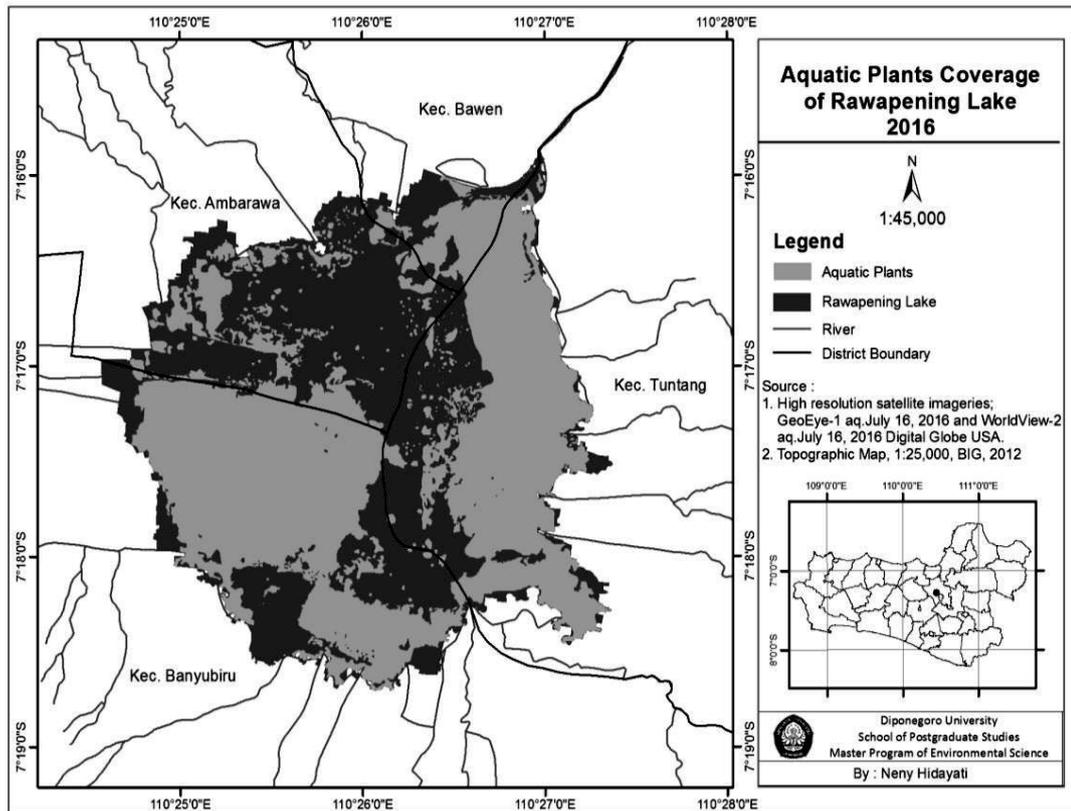
Kawasan Danau Rawapening memiliki kondisi topografis berupa tanah datar hingga lembah. Perairan tersebut dikelilingi oleh dataran tinggi berupa perbukitan dan pegunungan serta terbendung pada Sungai Tuntang. Kawasan hulu yang berupa dataran tinggi memiliki struktur topografi yang beragam mulai datar, kemudian agak bergelombang, bergelombang berbukit, berbukit terjal hingga pegunungan. Hal tersebut dikarenakan Danau Rawapening secara geografis terletak di kaki gunung.

Danau Rawapening memiliki kawasan berupa daerah tangkapan air (DTA) seluas 27.307,25 hektar yang tersebar di dua wilayah administrasi yaitu 24.832,46 hektar berada di Kabupaten Semarang dan 2.474,25 hektar berada di Kota Salatiga. DTA yang berada di wilayah administrasi Kabupaten Semarang meliputi Kecamatan Ambarawa sebanyak 10 desa, Kecamatan Bandungan 8 desa, Kecamatan Sumowono 4 desa, Kecamatan Jambu 9 desa, Kecamatan Getasan 12 desa, Kecamatan Tuntang 10 desa dan Kecamatan Bawen terdiri atas 3 desa. Adapun DTA yang berada di wilayah administrasi Kota Salatiga terdiri atas

Kecamatan Sidorejo sebanyak 4 kelurahan, Kecamatan Sidomukti 4 kelurahan serta Kecamatan Argomulyo sebanyak 2 kelurahan.

Danau Rawapening memiliki berbagai macam kegunaan bagi kesejahteraan penduduknya. Keberadaannya pernah menjadi penopang dalam industri pembangkit listrik yang memasok kebutuhan energi listrik di Jateng sejak beroperasinya PLTA Jelog dan Timo di tahun 1938. Hal tersebut terus berlangsung hingga dibangun Jaringan Listrik Sistem Jawa-Bali di awal Rencana Pembangunan Lima Tahun (REPELITA) II. Danau Rawapening juga berperan dalam menyediakan sumber air untuk irigasi di Daerah Irigasi (DI) Glapan. Hal tersebut dapat berlangsung melalui Bendung Glapan hasil pembangunan rentang tahun 1853 hingga 1859, selain itu danau tersebut juga sebagai penyedia sumber air baku (Mochtar, 2004).

Tergolong sebagai ekosistem perairan tawar, Danau Rawapening selalu digenangi oleh air tawar yang kaya akan mineral. Danau ini memiliki keadaan muka airnya selalu tidak tetap karena mengalami kenaikan maupun penurunan bahkan adakalanya mengalami pengeringan. Ekosistem perairan tawar menjadi habitat bagi tumbuhnya beranekaragam spesies vegetasi. Kondisi ini dapat terjadi disebabkan oleh beragamnya jenis tanah di berbagai perairan tawar. Namun, pada ekosistem perairan tawar biasanya tidak memiliki banyak spesies pohon. Pepohonan yang tumbuh biasanya mengelompok sehingga terbentuk komunitas dengan sedikit jenis (Irwan, 1996). Cakupan tanaman air yang menutupi permukaan air Danau Rawapening disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Cakupan tanaman air di Danau Rawapening Tahun 2016 (Hidayati, 2018)

Beraneka ragam sumber daya alam hayati terutama biota akuatik yang bersifat endemik bertumbuhkembang di Danau Rawapening. Sumber daya alam hayati tersebut memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap pengaruh spesies asing yang masuk ke danau. Menghilangnya berbagai spesies endemik karena terdesak oleh pesatnya pertumbuhan spesies asing yang dapat memicu perubahan ekosistem air menjadi daratan. Salah satu spesies asing yang ada di Danau Rawapening adalah eceng gondok (*E. crassipes*), yang sekarang pertumbuhannya tak terkendali sehingga merusak berbagai fungsi ekologi.

Peran penting Danau Rawapening salah satunya adalah dalam berbagai pemenuhan kebutuhan mata pencaharian (Nadjib, 2015). Meningkatnya pembangunan infrastruktur sejalan dengan semakin banyaknya aktivitas yang dilakukan dikawasan Danau Rawapening. Hal tersebut seperti yang diungkapkan oleh Ardi (2013), bahwa guna mencukupi kebutuhan manusia, lingkungan yang berada di sekitar danau dirubah sesuai cara hidup serta bermukim manusia. Tidak dapat dipungkiri bahkan kawasan danau diubah untuk memenuhi beraneka ragam aktivitas manusia misalnya pemukiman, infrastruktur jalan, drainase limbah domestik, lahan pertanian, sestinasasi wisata dan yang lainnya.

Danau Rawapening dapat memberikan nilai tambah ketika dikelola secara tertata, teratur dan professional dengan menjadikan para meter kualitas lingkungan dalam pengelolaannya. Namun sebaliknya jika danau dikelola secara tidak baik akan berdampak terhadap turunnya kualitas lingkungan yang juga memicu menurunnya tingkat kesejahteraan masyarakat pemanfaat danau tersebut. Diperlukan suatu pemantauan kualitas perairan dalam mengelola Danau Rawapening. Hal tersebut perlu dijalankan secara kontinyu di tempat-tempat yang dapat mewakili untuk merepresentasikan danau secara menyeluruh. Adanya informasi perubahan kualitas perairan tersebut dapat dilakukan langkah-langkah penanggulangan sedini mungkin.

SEKOLAH PASCASARJANA

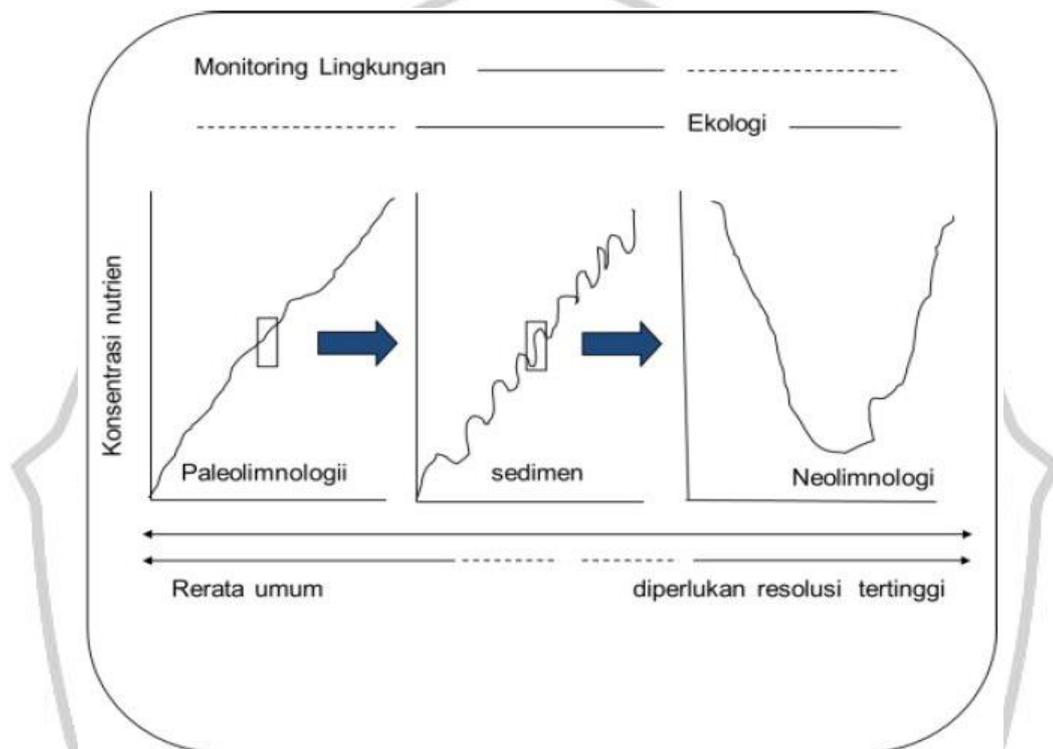
2.3. Limnologi

Limnologi merupakan suatu ilmu yang mengkaji produktivitas perairan tawar pada segala aspek yang terkait di dalamnya. Perairan tawar yang termasuk dalam kajian limnologi badalah perairan menggenang (*lentik*) mencakup rawa, waduk, situ, danau maupun perairan tawar yang mengalir (*lotik*) yaitu sungai dan mata air. Pada kajian limnologi hal yang diungkap meliputi struktur dan fungsi keterkaitan antara makhluk hidup perairan tawar yang terkait atas dinamika fisika, kimiawi dan biologis lingkungannya tersebut (Wetzel, 2001). Aspek kimiawi yang dipelajari dalam kajian limnologi antara lain tingkat keasaman (pH), total phosphor (TP), total nitrogen (TN), kandungan amonia, kadar DO dan lain sebagainya. Adapun aspek fisika misalnya bentuk perairan dan pembagian zona perairan. Aspek biologis meliputi kehidupan flora dan fauna diperairan antara lain plankton, benthos, nekton, dan vegetasi perairan.

2.3.1. Neolimnologi

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 2.2., Anderson, 1995). Sampel sedimen dengan ketebalan 50 – 76 cm mampu mengungkap lingkungan perairan yang terjadi selama kurun waktu 300 tahun (Pienitzs *et al.*, 2006). Perubahan kumpulan diatom di perlapisan sedimen tersebut dapat menjadi cerminan kondisi lingkungan pada saat sedimen

tersebut diendapkan. Hal ini berkaitan dengan struktur dinding sel yang berasal dari susunan silika yang membuatnya terawetkan secara baik di dalam sedimen tanpa mengalami pembusukan (Soeprbowati dan Suedy, 2015).



Gambar 2.2. Konsep limnologi dalam skala temporer (modifikasi dari Anderson, 1995).

2.3.2. Paleolimnologi

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.

Paleolimnologi mempelajari tentang sejarah karakteristik serta sifat dari perairan darat (tawar) Karakteristik tersebut mencakup berbagai aspek yaitu fisika, kimiawi, biologi, zoologi, hidrologi dan geografi yang terawetkan di dalam sedimen. Paleolimnologi juga didefinisikan sebagai ilmu perairan tawar yang memiliki fokus kajian atas interpretasi sekuen pelapisan sedimen serta suatu proses diagenetik yang dapat merubah rekaman tersebut. Paleolimnologi dikaji dengan tujuan menggambarkan produktivitas kondisi perairan dimasa lampau. Kondisi tersebut mencakup perubahan parameternya yang menyebabkan ekosistem akuatik berubah tahapan produktivitasnya (Wetzel, 2001). Secara lebih luas, paleolimnologi mempelajari kaitan antara terjadinya perubahan jangka panjang dalam geomorfologi basin perairan danau (Smoll, 2008).

Informasi fisika, kimia dan biologi yang terawetkan pada sedimen dapat memberikan gambaran keadaan perairan di masa lampau sehingga dapat digunakan untuk menanggulangi masalah kualitas air. Pengetahuan atas kondisi masa lampau tersebut juga dapat digunakan untuk meramalkan kualitas perairan di masa yang akan datang. Pemanfaatan diatom sebagai unsur biologi dalam kajian paleolimnologi telah banyak diaplikasikan antara lain dalam analisis paleoekologi di Everglades National Park Florida Bay, USA (Pyle *et al.*, 1998), Ealden Pond Massachussets USA, Danau Lac Saint Augustine di Quebec City Canada (Pienitz *et al.*, 2006), serta Danau Rawapening Indonesia (Soeprbowati dan Suedy, 2016). Kehandalan diatom untuk bioindikator terjadinya perubahan lingkungan tersebut dapat menunjukkan bukti terkait aktivitas yang dilakukan

manusia adalah parameter yang mendominasi sebagai penyebab terjadinya perubahan kualitas perairan.

Pada analisis paleolimnologi dibutuhkan berbagai informasi terkait luasan DTA, luasan perairan, dalamnya perairan, waktu pembaruan, indeks kualitas air saat sekarang dan kadar klorofil. Penelitian yang dilakukan di Danau Lac saint-Augustine juga dibutuhkan data dukung mencakup dinamika populasi serta *land use* selama periode diatas 100 tahunan (Soeprbowati dan Hadisusanto, 2009). Hal tersebut mampu mengetahui adanya kenaikan jumlah penduduk tergolong pesat semenjak tahun 1960 serta pembangunan *higway di tahun 1977* memberikan dampak terhadap eksplosi demografi. Kondisi tersebut didukung dengan pengambilan doto dari udara di tahun 1937, 1953, 1987 serta tahun 2002, sehingga dapat diketahui dengan cermat adanya perubahan *land use* (Soeprbowati dan Hadisusanto, 2009).

Pendekatan paleolimnologi adalah pendekatan yang penting, sangat efektif dan murah untuk menjawab banyak permasalahan air, terutama di negara berkembang. Pada perspektif sejarah, dengan mengetahui kualitas perairan pada masa lalu, maka akan dapat diprediksi kualitas perairan pada masa yang akan datang. Sejarah tak sebatas menceritakan kembali masa lalu, namun memiliki arti yang mendalam sebagai pengingat dan pemeringat. Paleolimnologi merupakan ilmu yang mempelajari masa lampau untuk memprediksi masa depan (Soeprbowati dan Suedy, 2015).

Studi paleolimnologi perlu dikembangkan sebagai dasar perencanaan masa depan danau. Paleolimnologi merupakan salah satu alat dalam merencanakan mitigasi terhadap perubahan iklim global berdasarkan korelasinya dengan jejak masa lalu. Teknik paleolimnologi dapat mengungkapkan gangguan jangka panjang dan transisi ekosistem danau (Kattel *et al.*, 2016).

2.4. Kualitas Air Danau

Kualitas air danau memiliki peran penting, karena dapat menggambarkan kesesuaian ataupun kecocokan untuk pemanfaatannya, antara lain untuk bahan baku air minum, perikanan, pertanian, rekreasi dan lain sebagainya. Pada sektor perikanan kualitas air menjadi penentu dalam pengembangan budidaya, karena alasan tersebut analisis terhadap kualitas air penting dilakukan (Panggabean *et al.*, 2016; Zamzami *et al.*, 2019). Hal tersebut sejalan dengan penjelasan Pulford *et al.* (2017), bahwa monitoring atas kualitas air danau menjadi kegiatan yang penting dikarenakan danau adalah sumber penghasil ikan air tawar serta sarana rekreasi. Monitoring kualitas air pada danau penting sebagai dasar mengambil dan memutuskan kebijakan dalam pengelolaan sumber air (Lihawa dan Mahmud, 2017).

Kualitas air menjadi salah satu pedoman dalam upaya mencapai tujuan pengelolaan air sesuai dengan peruntukannya secara lestari dan berkelanjutan. Parameter kualitas air yang digunakan untuk menilai kondisi perairan diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Pada

peraturan tersebut klasifikasi baku mutu air (BMA) danau dan sejenisnya dibagi menjadi 4 kelas dengan rincian sebagai berikut:

1. Kelas 1, merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
2. Kelas 2, merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
3. Kelas 3, merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
4. Kelas 4, merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanian dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Monitoring kualitas air dan lingkungan tepat dilakukan sebagai salah satu komponen dasar dalam menyusun strategi pengelolaan danau secara terpadu dan berkelanjutan.

2.5. Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)

Nama ilmiah Eceng gondok yang terkenal adalah (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms), dianggap sebagai gulma paling berbahaya, mengerikan, dan pengganggu perairan di dunia yang menghasilkan 14×10^7 tanaman anak setiap tahun; meliputi perairan seluas $1,4 \text{ km}^2$ dengan jumlah biomassa segar yang mengandung $28 \times 10^3 \text{ t}$ (Ruan *et al.*, 2016). Eceng gondok merupakan gulma air yang tergolong famili Pontederiaceae (Gaikwad dan Gawande 2017; Roopnarain

et al., 2019). Saat ini, mengancam ekosistem perairan, dan menghambat pengelolaan dan pemberian layanan air tawar di bagian dunia yang maju dan berkembang (Kriticos dan Brunel, 2016).

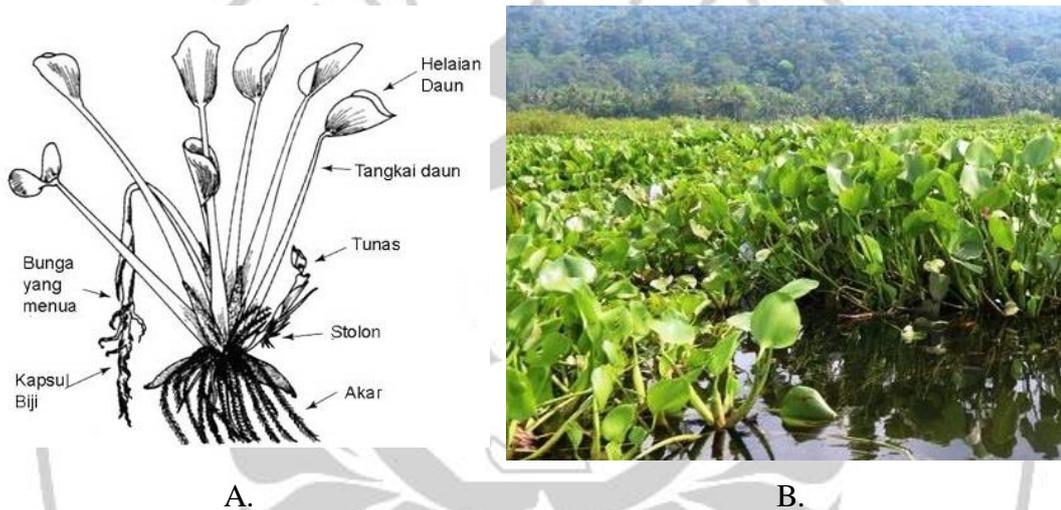
Eceng gondok akan mengapung saat air dalam dan berakar di dasar saat air dangkal. Eceng gondok di Indonesia pertama kali diperkenalkan oleh Kebun Raya Bogor pada tahun 1894. Eceng gondok merupakan jenis tumbuhan air yang pertama kali ditemukan secara tidak sengaja oleh seorang ilmuwan bernama Karl Von Mortius pada tahun 1824 saat melakukan ekspedisi di Sungai Amazon Brasil (Setyanto, 2011).

Klasifikasi eceng gondok menurut Suhono (2010) adalah sebagai berikut:

Regnum	: Plantae
Divisio	: Spermatophyta
Classis	: Monocotyledoneae
Ordo	: Commelinales
Familia	: Pontederiaceae
Genus	: <i>Eichhornia</i>
Spesies	: <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart) Solms

Secara morfologis eceng gondok memiliki daun yang masuk kedalam kategori *macrophyta* dengan posisi berada diatas permukaan air (Gambar 2.3.). Eceng gondok memiliki struktur dengan rongga udara dengan fungsi mengapung di perairan. Tumbuhan yang tergolong sebagai gulma ekstotis tersebut mempunyai daun berwarna hijau dengan bentuk lonjong (*oval*) serta lancip pada bagian ujung dan pangkal. Pada bagian pangkal tangkai gulma tersebut memiliki bentuk gelembung yang licin pada permukaannya. Chlorofil sebagai material yang

berperan dalam proses fotosintesis terletak di dalam sel epidermis. Pada bagian permukaan atas daun terdapat mulut daun (*stomata*) yang memenuhi permukaan. Seluruh bagian organ eceng gondok memiliki rongga udara yang memiliki fungsi untuk mengapung di permukaan air dan juga untuk penyimpanan oksigen yang dihasilkan selama proses fotosintesis.



Gambar 2.3. Morfologi eceng gondok secara sistematis (A) dan eceng gondok di Danau Rawapening (B)

Oksigen yang dihasilkan selama fotosintesis dimanfaatkan dalam mekanisme respirasi pada malam hari dan menghasilkan karbon dioksida (CO_2) untuk dilepaskan ke dalam air. Lingkungan perairan dengan kandungan N tinggi akan ditumbuhi oleh eceng gondok yang mempunyai daun dengan warna hijau tua dan berukuran relatif lebar. Adapun perairan dengan kandungan N rendah yang tumbuh adalah eceng gondok berdaun dengan ukuran relatif kecil serta memiliki warna kekuning-kuningan, sebab gulma tersebut tumbuh bergantung pada nutrisi yang tersedia dan juga sinar matahari untuk melangsungkan mekanisme fotosintesis (Repley, 2006).

Lapisan paling luar petiole berupa epidermis. Pada bagian bawahnya terdapat jaringan tipis yang disebut sklerenkim berbentuk sel tebal (parenkim). Di dalam jaringan parenkim inilah terdapat *xylem* dan *floem* yang merupakan jaringan pengangkut, berupa rongga-rongga udara di dalam batang yang dibatasi oleh dinding penyekat dalam bentuk selaput tipis berwarna putih (Pandey, 1980). Eceng gondok memiliki sistem perakaran serabut yang berfungsi sebagai pegangan atau jangkar tumbuhan tersebut. Akar memiliki fungsi dalam penyerapan nutrisi yang diperlukan dari dalam air. Terdapat kantung berwarna merah pada bagian ujung akar yang berfungsi untuk mengumpulkan sedimen/partikel terlarut dalam air. Eceng gondok memiliki bunga yang tergolong dalam klasifikasi bunga majemuk bertangkai. Morfologi bunga eceng gondok yaitu bentuknya karangan bunga bulir dengan kelopak berbentuk tabung, memiliki warna ungu muda pada mahkotanya, bijinya berbentuk bulat dengan warna hitam. Adapun buah dari tumbuhan eceng gondok berwarna hijau dengan bentuk kotak tiga ruang (Ardiwinata, 1985).

Eceng gondok melakukan perkembangbiakan secara generative dan vegetatif. Perkembangbiakan vegetatif melalui tunas baru yang tumbuh dari ketiak daun, kemudian membesar menjadi tumbuhan baru. Kemampuan eceng gondok dalam berkembang biak sangat tinggi yaitu dari 10 tanaman akan menjadi 600.000 tanaman dalam waktu 8 bulan. Potensi yang dimiliki tumbuhan eceng gondok membuatnya digunakan pada sistem pengolahan air limbah. Eceng gondok tumbuh dengan tinggi berkisar antara 40-80 cm, dengan daun licin sepanjang 7-25 cm. Morfologi eceng gondok tersusun atas helai daun, pengapung,

leher daun, ligula, akar, akar rambut, ujung akar dan stolon sebagai tempat perkembangbiakan secara vegetatif (Nursyakia, 2014).

Eceng gondok mampu tumbuh dengan kecepatan tinggi sehingga dianggap sebagai gulma yang dapat menyebabkan kerusakan lingkungan ekosistem perairan. Gulma ini secara mudah dapat menyebar lewat saluran air ke badan air dan berkembang biak dengan pesat, sehingga dapat mengganggu saluran transportasi perairan (Budi, 2003). Laju pertumbuhan gulma ini semakin pesat di habitat perairan yang dipenuhi oleh limbah pertanian atau pabrik. Karena itulah banyaknya eceng gondok pada suatu perairan menjadi indikator dari tercemar tidaknya perairan tersebut (Nursyakia, 2014).

Pertumbuhan massal eceng gondok dimungkinkan terjadi karena keadaan perairan sebagai habitatnya relatif tenang. Kondisi perairan yang bergolak karena mengalir maupun bergelombang karena angin dapat menghambat laju pertumbuhan gulma tersebut. Cahaya matahari yang cukup dan suhu optimum antara 25-30°C sangat penting bagi pertumbuhan eceng gondok. Hal tersebut dapat terpenuhi dengan baik pada perairan yang berada di iklim tropis, terkecuali pada rawa-rawa yang terlindung oleh hutan. Keberadaan cahaya sangat berpengaruh pada proses perkecambahan biji eceng gondok, karena pada kondisi gelap biji gulma tersebut tidak mampu berkecambah (Ratnani, 2010).

Pertumbuhan tanaman air yang tidak terkendali adalah karakteristik danau yang paling terkenal dan paling umum di dunia. Fenomena ini terjadi karena eutrofikasi, suatu kondisi peningkatan kandungan hara perairan (Cole dan Weihe, 2016). Eutrofikasi merupakan masalah utama di beberapa danau atau waduk di

Indonesia dan dampak nyata dari eutrofikasi adalah melimpahnya eceng gondok (Soeprbowati dan Suedy 2010). Tingginya nutrisi yang masuk ke badan danau terutama nitrogen dan phosphor menjadi penyebab tingginya laju pertumbuhan eceng gondok hingga sulit dikendalikan (Siahaan *et al.*, 2016).

Masukan hara dapat bersumber dari limbah dan aktivitas pertanian yang berlangsung di DTA serta sisa pakan ikan dari keramba jaring apung. Sebagai contoh, Danau Rawapening telah mengalami fenomena pulau terapung sejak tahun 1920-an. Sejak saat itu, permasalahan tanaman air khususnya eceng gondok mulai bermunculan. Pada tahun 2005 teramati eceng gondok menutupi perairan hingga 65% (Soeprbowati, 2015) bahkan lebih, hingga 70%, pada musim kemarau (Soeprbowati dan Suedy, 2010). Pertumbuhan dan tutupan eceng gondok di Waduk Batujai misalnya hampir mencapai 30% dari luas waduk (Firdaus 2011) dan berdampak negatif terhadap fungsi PLTA, air minum, irigasi pertanian, perikanan, dan pariwisata. Sisi positif eceng gondok adalah mampu sebagai fitoremediasi polutan karena pertumbuhan yang cepat dan akar yang luas (Nirmal *et al.*, 2008; Kumari dan Tripathi, 2014).

Eceng gondok memiliki efek merugikan pada lingkungan, kesehatan manusia, dan ekonomi (Patel 2012; Sharma *et al.*, 2016; Moorthy 2017). Karena dampak ekologi dan sosial ekonominya, eceng gondok tergolong ke dalam 100 spesies invasif paling membahayakan di dunia (Guezo *et al.*, 2017). Eceng gondok membentuk hamparan yang mengurangi transmisi cahaya ke tanaman terendam dan bersaing dengan tanaman lain, sering mengusur makanan dan habitat satwa liar, menghabiskan oksigen dalam komunitas air, mengakibatkan

kurangnya fitoplankton dan perubahan komposisi komunitas invertebrate. Pada akhirnya mempengaruhi perikanan. Keberadaan eceng gondok dalam jumlah besar mengancam keanekaragaman hayati (Plaza *et al.*, 2010), mengurangi area yang tersedia untuk burung air habitat mikro vektor penyakit dan hama (Ndimele *et al.*, 2011; Waithaka 2013; Gupta dan Yadav, 2020), termasuk malaria dan filariasis (Mcbeath *et al.*, 2014).

Spesies invasif dari Amerika Selatan ini sekarang keberadaannya telah tersebar ke seluruh penjuru dunia selain benua antartika (Jiménez dan Balandra 2007; Gaikwad dan Gawande, 2017). Laju pertumbuhan eceng gondok dengan umur yang relatif pendek dapat mempengaruhi ekosistem dan menjadi ancaman terutama di perairan tropis (Allo *et al.*, 2013; Gaikwad dan Gawande 2017). Ancaman ini sangat serius bagi sistem perairan dan menghambat penggunaan air permukaan oleh manusia (Chander *et al.*, 2018). Semakin tinggi kandungan unsur hara khususnya Nitrogen (N) dan Fosfor (P), maka semakin tinggi pula pertumbuhan eceng gondok (Verma dan Sivappa, 2017). Sehingga keberadaan eceng gondok yang menyebar tidak terkendali seringkali menimbulkan masalah seperti tersumbatnya saluran air dan menyebabkan banjir (Kriticos dan Brunel 2016). Hamparan eceng gondok yang menutupi permukaan perairan menjadi penyebab menipisnya oksigen terlarut (Hasiubuan *et al.*, 2020) sehingga menurunkan kualitas air, keanekaragaman hayati, salah satunya penurunan jumlah ikan (Güereña *et al.*, 2015).

Eceng gondok juga meningkatkan laju evapotranspirasi (Honlah *et al.*, 2019; Goshu dan Aynalem 2017; Kamau *et al.*, 2015). Eceng gondok

membutuhkan waktu satu hingga dua minggu untuk berkembang biak (Dickinson 2014), hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan di India bahwa satu tanaman eceng gondok dapat berkembang biak dalam waktu 14 hari dan mencakup area seluas 1 m² dalam waktu 52 hari (Guitierrez *et al.*, 2001). Siahaan (2016) dalam penelitiannya menemukan bahwa laju pertumbuhan relatif eceng gondok di Danau Toba adalah 4,21%. Soeprbowati (2017) menemukan bahwa satu tanaman eceng gondok dari Danau Rawapening mampu menutupi 1 m² dalam waktu 22 hari. Pertumbuhan eceng gondok yang cepat merupakan hasil dari perkembangbiakan unsur hara di air tawar.

Kandungan kimia eceng gondok tergantung pada unsur hara media tumbuh dan kemampuan daya serap gulma tersebut. Gulma tersebut memiliki sifat yang baik yaitu mampu menyerap logam berat, senyawa sulfida, memiliki kadar protein lebih dari 11,5% dan kadar selulosa yang lebih tinggi dibandingkan nonselulosanya seperti lignin, lemak, abu, serta zat lainnya. Gulma air yang sering jadi masalah perairan tersebut dapat bermanfaat dalam menghilangkan material pencemar (polutan), sebab berfungsi sebagai sistem filtrasi biologis yang mampu menyerap logam berat diantaranya cuprum, aurum, cobalt, timbal, cadmium, nikel dan mineral lainnya (Julhim, 2012).

Eceng gondok mengandung kalsium sebanyak 1,66% dari berat keringnya. Kalium merupakan unsur logam yang paling melimpah dalam eceng gondok yang merupakan sekitar 3% dari berat kering tanaman. Peningkatan biomassa tertinggi diperoleh pada konsentrasi kalium 6 mg/L. Kalium tidak berpengaruh pada perbanyakan eceng gondok tetapi meningkatkan biomassa individu tanaman.

Kadar BOD dan DO terhadap laju pertumbuhan eceng gondok menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara pertumbuhan hidrofita dengan penghilangan unsur hara dari limbah cair (Verma dan Sivappa, 2017).

Program pengendalian eceng gondok melibatkan tiga instansi pemerintah dari berbagai tingkat pemerintahan yaitu Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana (BBWSPJ), Dinas Pekerjaan Umum Sumber daya Air dan Tata Ruang/Dinas PUSDATARU) dan Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Jawa Tengah (DKP). BBWSPJ ditunjuk sebagai leading sector dan koordinator program. Atas dasar PERMEN PUPR No.4/2015, Danau Rawapening dikelola oleh pemerintah pusat (BBWSPJ), sedangkan sungai-sungai yang melintasi batas kabupaten di sekitar Rawapening dikelola oleh pemerintah daerah (Dinas PUSDATARU) (Hidayati *et al.*, 2016).

2.6. Pola Osmoregulasi dan Tingkat Kerja Osmotik (TKO) Biota Air

Biota dengan kondisi tekanan osmotik mediana berbeda dengan tubuhnya akan menjalankan suatu mekanisme pengaturan osmosis sehingga dapat mencapai kesetimbangan osmotik tubuh dengan mediana. Mekanisme yang terjadi di dalam tubuh biota dalam pengaturan osmotik tersebut disebut osmoregulasi (Riza *et al.*, 2020). Pengertian tersebut sejalan dengan yang disampaikan oleh Puryono *et al* (2019), bahwa osmoregulasi adalah sebuah sistem homeostatis untuk menyeimbangkan kemantapan milieu interieur-nya melalui suatu mekanisme dengan mengatur keseimbangan konsentrasi osmotik cairan intrasel dengan cairan ekstraselnya (Puryono *et al.*, 2019). Menurut Anggoro (2010), osmoregulasi juga

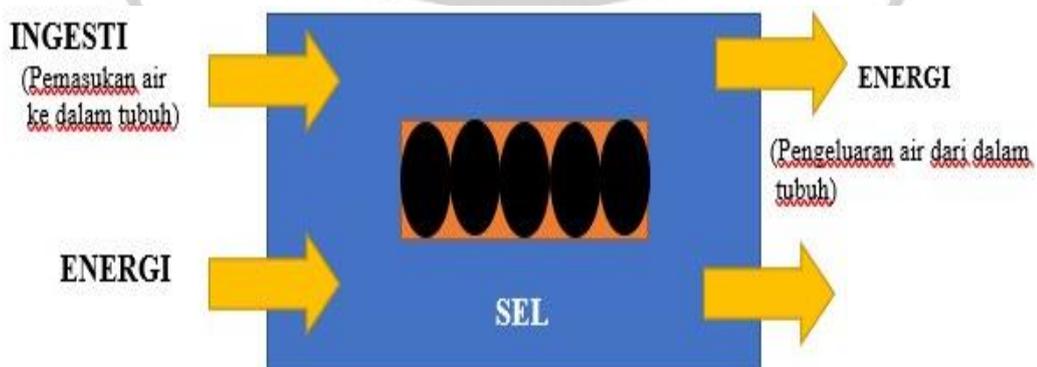
merupakan fungsi fisiologis yang membutuhkan energi dan dikontrol oleh penyerapan selektif ion-ion yang melewati insang. Sementara itu pada organ tubuh melalui mekanisme pengontrolan pembuangan yang selektif terhadap garam (Maulana *et al.*, 2013). Osmoregulasi juga dikatakan proses pengaturan konsentrasi cairan dalam menyeimbangkan pemasukan dan pengeluaran cairan tubuh oleh sel atau organisme hidup (Temmy *et al.*, 2017). Proses osmoregulasi untuk mengetahui perbedaan konsentrasi cairan tubuh dengan lingkungan di sekitar (Hadid, *et al.*, 2014).

Salinitas merupakan parameter yang berpengaruh terhadap proses osmoregulasi. Jika tingkat salinitas media berada jauh dari kondisi isoosmotik akan menyebabkan proses osmoregulasi berlangsung lebih berat. Semakin berat proses osmoregulasi yang terjadi semakin banyak pula energi yang diserap sehingga akan berdampak pada laju pertumbuhan dan perkembangannya (Riza *et al.*, 2020). Ketika salinitas media tinggi, biota perairan akan mengalami kondisi hipoosmotik yaitu air dari dalam tubuh cenderung bergerak keluar secara osmosis (Temmy *et al.*, 2017). Sehingga, biota akan berusaha mempertahankan keseimbangan cairan tubuh dengan mencegah agar cairan urin tidak lebih pekat dari hemolimfanya (Romano dan Zeng, 2012). Mekanisme yang dilakukan biota perairan tersebut dengan mengekstrak H₂O dengan cara meminum air serta memasukkan air lewat insang dan kulit (Novian *et al.*, 2013).

Ketika proses osmoregulasi berlangsung, hewan air memerlukan kondisi osmotik yang seimbang antara cairan tubuh dengan media. Hal tersebut begitu vital bagi keberlangsungan hidup hewan tersebut (Temmy *et al.*, 2017).

Osmoregulasi biasanya terjadi pada kebanyakan invertebrata laut yang tak secara aktif mengontrol sistem osmosis. Golongan fauna tersebut dikenal sebagai osmoconformer. Osmoconformer mempunyai osmolaritas internal yang sama dengan lingkungannya sehingga tak ada tendensi untuk mendapatkan atau kehilangan air. Kebanyakan spesies osmoconformer hidup di lingkungan yang memiliki komposisi kimia yang sangat stabil (di laut) maka osmoconformer memiliki osmolaritas yang cenderung konstan (Anggoro, 2010).

Selain osmoconformer juga terdapat osmoregulator, golongan organisme yang mampu menjaga osmolaritasnya tanpa tergantung lingkungan sekitar sehingga dikatakan memiliki kemampuan meregulasi (Yuliani *et al.*, 2018). Karena itulah osmoregulator dapat hidup di lingkungan air tawar, daratan, serta lautan. Ketika lingkungan hidupnya memiliki konsentrasi cairan yang rendah, osmoregulator akan melepaskan cairan berlebihan dan sebaliknya di lingkungan dengan konsentrasi cairan yang tinggi, osmoregulator akan melepaskan cairan dalam jumlah yang sedikit (Temmy *et al.*, 2017). Mekanisme tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Bagan alir proses osmoregulasi tubuh organisme air
Sumber: Taufik dan Kusri (2006)

Osmolaritas media adalah penentu tingkat kerja osmotik (TKO) yang dialami oleh biota. TKO merupakan selisih antara tekanan osmotik cairan di dalam tubuh (hemolimfe) dengan osmolaritas media. Osmoregulasi merupakan proses untuk menjaga keseimbangan antara osmolaritas media dan osmolaritas tubuh (Maghfiroh *et al.*, 2019).

Pada proses pengaturan osmotik dalam tubuh, semakin tinggi salinitas media, maka semakin tinggi pula beban kerja organisme untuk menyeimbangkan tekanan osmolaritas (media dan darah) maupun menyeimbangkan kandungan elektrolit (media dan darah), sehingga energi yang terbuang ke arah kinerja osmotik lebih besar (Rachmawati *et al.*, 2012)

Tekanan osmotik pada sel akan memberikan pengaruh terhadap komposisi protein ketika dalam kondisi stress osmotik dan terhadap penggunaan energi akibat aktivitas transport aktif. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya gradasi protein karena turut berperan pada sistem pompa ion dalam membran sel (protein membran sel/carrier) dan biokatalisator (enzim Na-K ATP ase). Kehidupan dan pertumbuhan biota (udang) akan optimal apabila kondisi lingkungan sesuai dengan kebutuhan ekofisiologis dengan menjadikan salinitas sebagai faktor utama yang berpengaruh terhadap metabolisme terutama proses osmoregulasi (Anggoro dan Subandiyono, 2010).

Osmolaritas cairan (*haemulymph*) merupakan skala kadar partikel solut (zat terlarut) di dalam suatu larutan (Anggoro, 2018). Semakin tinggi osmolaritas, semakin tinggi pula konsentrasi solute atau semakin rendah konsentrasi air dalam

larutan tersebut. Di dalam cairan tubuh terlarut zat-zat makanan dan ion-ion yang dibutuhkan oleh sel untuk hidup, berkembang, dan menjalankan fungsinya dengan baik. Oleh karena itu sangat diperlukan peranan dari lingkungan di sekitarnya.

2.7. Stratigrafi

Stratigrafi berasal dari bahasa latin *stratum* dan *graphia* yang artinya adalah ilmu tentang batuan dan proses korelasinya terhadap proses geologi yang terjadi dari waktu ke waktu. Stratigrafi adalah cabang pada ilmu geologi yang mengkaji terkait komposisi, serta korelasi perlapisan batuan. Fokus dari ilmu stratigrafi adalah mempelajari sedimentasi batuan per strata Pada tahun 1900an diperlukan suatu alat untuk mengetahui umur dari suatu mineral dengan menggunakan radioisotope sehingga memberikan gambaran stratigrafi (Koutsoukos, 2005; Nichols, 2009; MacLeod, 2014).

Stratigrafi memiliki tujuan untuk mengkaji terjadinya perubahan lingkungan oleh pengendapan baik lateral maupun vertikal, kemudian dikategorikan pada urutan stratigrafi. Dengan mekanisme tersebut maka akan diketahui parameter yang memberikan pengaruh terbentuknya stratigrafi tersebut (Mochtar, 2007).

SEKOLAH PASCASARJANA

Terdapat tiga prinsip tentang stratigrafi dikembangkan oleh Steno yang digunakan untuk menganalisis dan merekonstruksi sejarah geologis yang terdiri dari :

1. Prinsip Akumulasi Vertikal (*Original horizontality*)

Sedimen yang terdeposit harus memiliki formasi horisontal kemudian akan turun menuju wilayah yang lebih rendah sehingga akan terakumulasi secara vertikal.

2. Prinsip Kesenambungan Lateral (*Original continuity*)

Lapisan sedimen yang terdeposit akan membentuk formasi yang berurutan, kemudian sedimen yang mengalami konsolidasi terbentuk secara terus menerus secara lateral

3. Hukum Superposisi

Setiap sedimen yang terdeposit memiliki beberapa perbedaan umur, yang lebih tua berada pada bagian yang lebih atas dan lapisan yang tua terdapat pada lapisan bawah.

Sedimen terdeposit secara terus menerus dan membentuk suatu stratigrafi, ketika terdapat kekosongan pada lapisan bawah tanah maka akan terjadi erosi dan lapisan pada permukaan akan jatuh ke bawah, seiring berjalannya waktu lapisan tersebut akan kembali terdeposit oleh lapisan yang baru dan akan membentuk stratigrafi (Mac Leod, 2014).

Naik dan turunnya permukaan danau, terkhusus terhadap pasokan sedimen dipengaruhi oleh parameter lokal yang stabil misalnya elevasi dan juga susunan batuan dasar (Mochtar, 2007). Kombinasi dari prinsip stratigrafi akan

memunculkan klasifikasi stratigrafi berdasarkan konsep yang dikembangkan oleh Steno, Hutton, Cuvier, Smith, Lyell antara lain:

1. Litologi (*Lithostratigraphy*)

Hal mendasar yang harus dipelajari adalah tentang formasi, litostratigrafi merupakan cabang dari ilmu stratigrafi berdasarkan karakteristik lithologinya atau struktur batuan (Mac Leod, 2014).

2. Umur relatif (*Cronostratigraphy*)

Secara singkat kronostratigrafi merupakan ilmu dari pencabangan stratigrafi yang mempelajari dari suatu strata yang membentuk suatu formasi selama interval waktu geologi. Kronostratigrafi diibaratkan sebagai *hourglass* atau jam pasir. Jam pasir apabila dibalik pasir akan jatuh melalui leher botol yang sempit dan akan menumpuk menjadi sebuah formasi dan habis selama interval waktu tertentu (1 jam). Unit kronostratigrafi sama dengan pasir yang terdeposit sedangkan unit geokronologic sama dengan jumlah waktu yang dibutuhkan oleh pasir untuk terakumulasi (Koutsoukos, 2005).

3. Kandungan fosil (*Biostratigraphy*)

Ilmu yang mempelajari komposisi dan karakteristik dari batuan berdasarkan fosil yang ada di dalamnya. Hal mendasar yang dipelajari dalam biostratigrafi adalah biozone, yang mana tiap unit perlapisan sediment terdapat fosil di dalamnya. Keberadaan biozone tidak perlu dipetakan sehingga persebaran secara geografiknya sangatlah luas. Biozone sendiri adalah suatu kriteria dari suatu fosil makhluk hidup

yang menjadi suatu penanda, interval dari suatu strata biozone akan menyusun suatu hierarki biostratigrahy. Stratigrafi dari biotik komponen yang ada di dalam sedimen akan mampu memberikan karakteristik stratigrafi (Nichols, 2009).

Unit yang diteliti dalam kajian biostratigrafi disebut sebagai biozone. Secara umum biozone adalah organisme yang terdapat per lapisan stratigrafi. Organisme yang ideal untuk digunakan sebagai *biostratigraphy marker* adalah organisme yang mampu terawetkan atau terdeposit di dalam sedimen dan dapat ditemukan diseluruh dunia serta memiliki kelimpahan yang tinggi (Nichols, 2009).

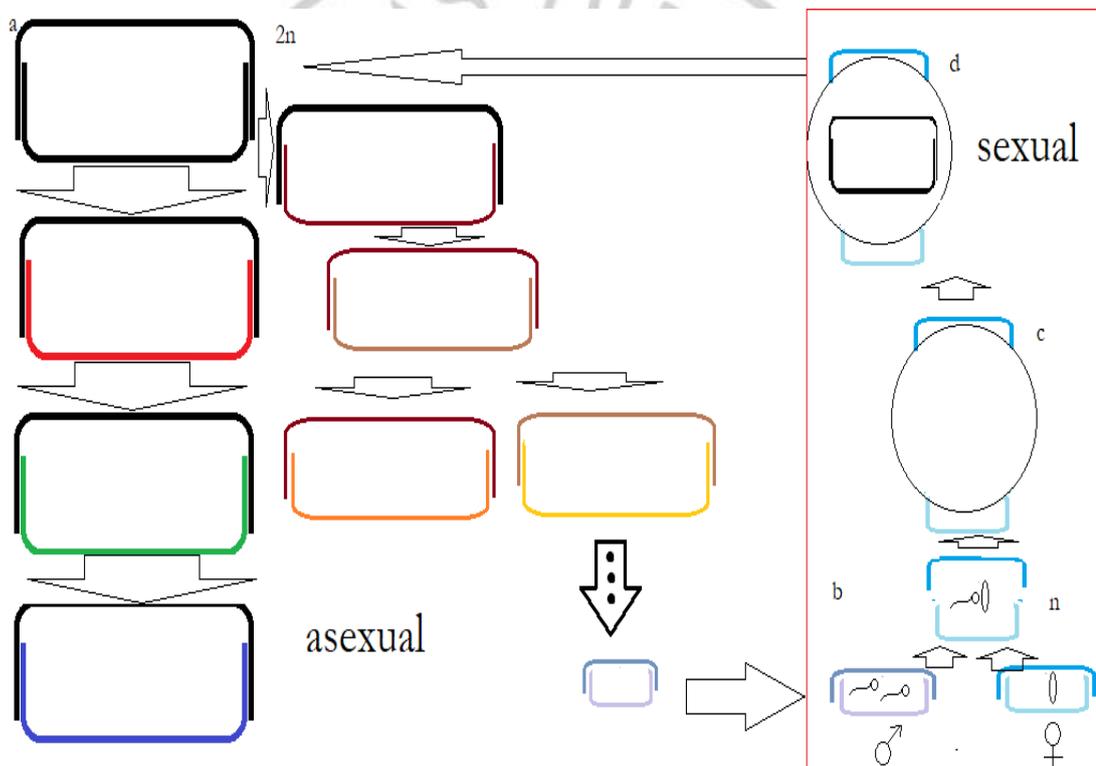
2.8. Diatom

Diatom adalah nama umum mikroalga milik Bacillariophyte yang tersebar luas dari laut, air tawar hingga tanah lembab dan bagian dari jaring makanan perairan. Dinding sel silika yang dihias secara unik tetap tidak terganggu setiap kali difosilkan. Itulah mengapa diatom adalah alat yang baik untuk paleolimnologi (Soeprbowati *et al.*, 2016). Diatom atau Bacillariophyta adalah organisme bersel tunggal, sebagian besar autotrofik. Filum ini telah ditemukan di hampir semua jenis badan air dan itu adalah salah satu yang paling produktif dan memiliki banyak spesies dari kelompok alga yang mencapai 100.000-200.000 taksa (Mann dan Vanormelingen, 2013).

Diatom biasa dijumpai sebagai kelompok produsen primer dominan maupun subdominan terkecuali di sungai yang berlumpur (Sundari, 2016). Diatom memiliki peran yang mendasar terhadap produktivitas primer (organisme autotrof) karena sebagai penghasil oksigen dan produktivitas sekunder (Organisme heterotrof) pada merupakan suatu komponen yang utama dalam ekosistem akuatik (Karthick et al., 2010). Diatom (Bacillariophyta) merupakan kelompok mikroalga yang mudah diidentifikasi dibawah mikroskop karena memiliki pigmen kuning-coklat dan keberadaan dinding sel yang terbuat dari silika. Diatom dijumpai dalam jumlah besar dan banyaknya mikroalga tersebut diperairan disebabkan oleh kemampuannya beradaptasi dengan lingkungan, bersifat kosmopolit, mampu bertahan dalam kondisi ekstrim serta memiliki kemampuan bereproduksi yang tinggi (Harmoko dan Krisnawati, 2018; Harmoko dan Sepriyaningsih, 2019). Diatom sangat tergantung pada kualitas dan kuantitas senyawa kimia yang terlarut dalam air (Aryani *et al.*, 2020).

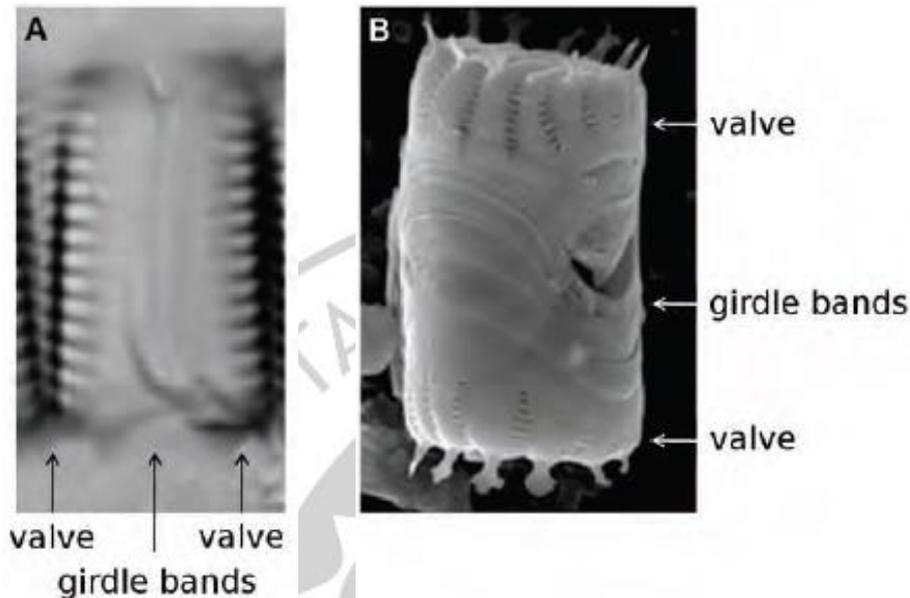
Diatom memiliki keunikan tersendiri dengan adanya frustule di dinding sel silika, memiliki pigmen fotosintetik serta cadangan makanan yang bersifat spesifik (minyak dan *chrysolaminarin*) (Taylor *et al.*, 2007). Terbagi menjadi *epitheca* atas dan bawah, *hypotheca* lebih kecil. Reproduksi sebagian besar aseksual (Gambar 2.5 a), di mana ukuran sel menurun dengan setiap duplikasi (Castellanos, 2018). Selama masing-masing bagian pada *hypotheca* baru tumbuh di dalam masing-masing *thecae*, sampai ukurannya terlalu kecil untuk melanjutkan duplikasi. Kemudian, set reproduksi seksual di (Gambar 2.5 b-d), dan

berbeda tergantung pada apakah diatom yang sentris, dengan (multi) simetri polar, atau pennate (dengan simetri bilateral) (Sato, 2008). Puncak reproduksi seksual adalah terbentuknya pada zigot diatom yang disebut *auxospore*, yang dapat memanjang. Ini menimbulkan sel awal, menciptakan sel terbesar baru.



Gambar 2.5. Diskripsi dari siklus kehidupan diatom dari diatom sentris.
 (a) Reproduksi aseksual (b). Reproduksi seksual (persegi merah) mengikuti perpaduan gamet. (c) Ini menciptakan sel vegetatif atau auxospore (d) yang berisi sel awal nanti (Castellanos, 2018)

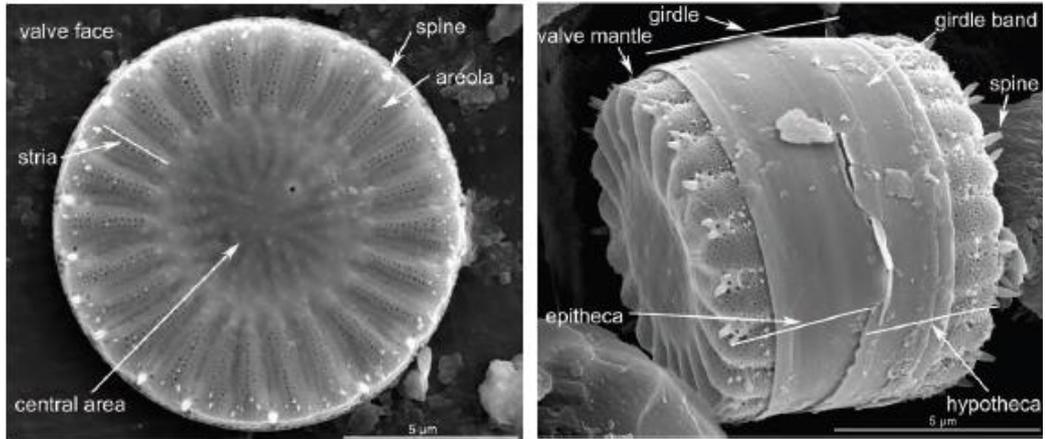
Frustule diatom terdiri dari dua valve saling tumpang tindih, bentuknya menyerupai cawan petri (Gambar 2.6.). Setiap valve dilengkapi dengan satu atau lebih girdle bands (Gell *et al.*, 1999). Valve atas disebut epivalve, sedangkan valve bawah disebut hypovalve. Diatom memiliki garis berlubang-lubang yang terletak diantara Raphe yang di sebut Striae (Soeprbowati dan Hariyati, 2016).



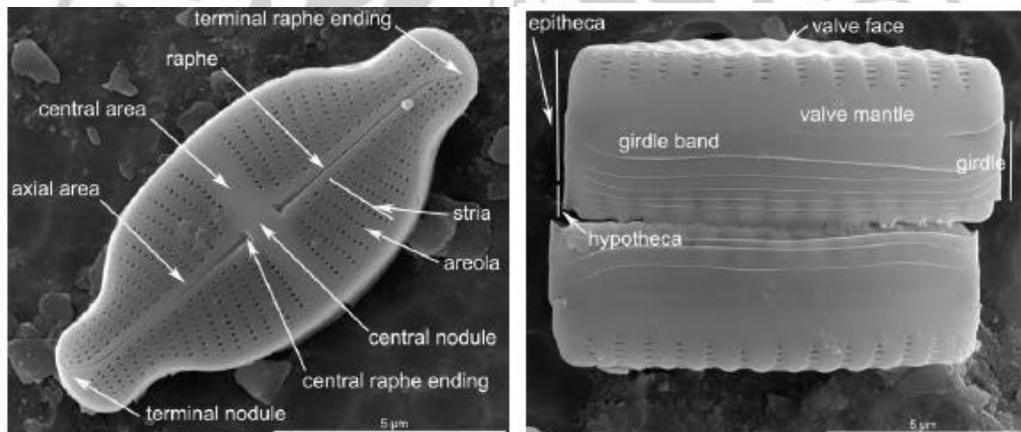
Gambar 2.6. Frustul diatom A) mikroskop cahaya B) Mikroskop electron (Taylor, 2016)

Ornamentasi dari dinding sel diatom ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) merupakan struktur spesial yang membuat diatom dapat diidentifikasi (Luo, 2011). Struktur tersebut dapat dilihat secara jelas dengan resolusi yang lebih besar dengan menggunakan scanning mikroskop sehingga memudahkan dalam identifikasi dan enumerasi (Bellinger *et al.*, 2010).

Diatom merupakan mikroalga uniceluler dengan dinding sel yang mengandung silika, diatom dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan morfologi bentuk dasar penyusunan yaitu *radial simetrik* atau *centric diatom* (Gambar 2.7) dan juga simetri bilateral atau pennate diatom (Gambar 2.8). Di ekosistem perairan jenis centrik diatom lebih banyak ditemukan tersuspensi di dalam air karena berat selnya lebih ringan, sedangkan jenis pennate diatom biasanya ditemukan menempel di tanaman atau tersuspensi di dalam sedimen.



Gambar 2.7. Jenis *Centric* diatom A) dilihat dari Valva view dan B) dilihat dari gridle view (Taylor, 2016)



Gambar 2.8. Jenis *Pennate* diatom A) dilihat dari Valva view dan B) dilihat dari gridle view (Taylor, 2016)

Simetri diatom pennate pada dasarnya terkait dengan sumbu mereka. Sumbu apikal menghubungkan dua kutub valve dan sumbu transapical yang menghubungkan pusat epivalve untuk yang dari hypovalve tersebut. Simetri dan struktur frustule sangat penting dalam sistematika diatom (Taylor *et al.*, 2016).

SEKOLAH PASCASARJANA

Kloroplas pada diatom memiliki empat membran yang mengandung klorofil a, c1 dan c2. Selain itu ditemukan juga diatom yang mengandung pigmen seperti karoten, fucoxanthin dan xanthinoid lainnya (Round *et al.*, 2000). Pigmen tersebut menjadikan diatom berwarna khas coklat keemasan. Beberapa diatom bersifat *heterotrofik* atau *saprotitik*. Sebagian besar diatom melakukan fotosintesis yang sangat efisien. Fotosintesis tersebut menghasilkan produk samping lendir atau zat polimerik ekstraseluler (*extracellular polymeric substances/ EPS*) dalam bentuk polisakarida yang dapat meningkatkan adhesi ke substrat (Smol dan Stoermer, 2010). EPS juga memiliki bagian penting dalam interaksi ekologi dengan bakteri (Windler *et al.*, 2014; Bruckner *et al.*, 2011).

Diatom dapat terdistribusi secara luas dan merupakan komponen ekologi yang penting di semua ekosistem perairan karena diatom bertanggung jawab terhadap 40% produktivitas primer dan berperan dalam siklus silikon yang ada di ekosistem laut (Luo, 2011). Diatom merupakan komponen kunci dari ekosistem akuatik karena menghubungkan organisme autotrof dan organisme *heterotrof*.

Beberapa organisme *heterotrof* memangsa diatom di dalam rantai makanan karena kedudukannya sebagai organisme autotrof. Apabila kestabilan diatom terganggu di suatu perairan maka kestabilan organisme *heterotrof* yang lain akan terganggu, diatom banyak digunakan sebagai bioindikator suatu perairan. Komunitas diatom dapat ditemukan pada substrat yang terlihat licin hal ini karena mucilago (lapisan film kuning kecoklatan) melapisi substrat, diatom juga dapat ditemukan di substrat yang solid, sedimen, melekat pada substrat dan juga tersuspensi di dalam air (Taylor *et al.*, 2016).

Terdapat dua kelompok pembagian diatom sesuai dengan habitat hidupnya yaitu planktonic dan benthic. Kelompok diatom planktonik hidup pada habitat berupa kolam air yang memperoleh pengaruh dari arus air. Sementara kelompok diatom benthic hidup dengan cara menempel di substrat tertentu. Diatom benthic memiliki struktur dinding sel dengan lebih tebal (berat) jika dibandingkan dengan diatom planktonic. *Centrales* adalah ordo dalam diatom yang keberadaannya mendominasi kelompok diatom planktonik. Adapun pada kelompok diatom benthic didominasi oleh ordo *Pennales*. Menurut Soeprbowati *et al* (2011) dan Taylor (2016) diatom benthic dikelompokkan sesuai dengan jenis substrat tempatnya menempel yang meliputi :

1. *Epiphytic*, diatom benthic hidupnya menempel pada tumbuhan
2. *Epipsammic* diatom benthic hidupnya menempel pada pasir
3. *Epipellic*, diatom benthic hidupnya menempel pada sedimen
4. *Epilithic*, diatom benthic hidupnya menempel pada permukaan batu
5. *Epizoic*, diatom benthic hidupnya menempel pada hewan
6. *Fouling*, diatom benthic hidupnya menempel obyek yang ditempatkan dalam air.

Salah satu komunitas diatom yang tinggal di dalam habitat berupa sedimen adalah diatom epipelik. Diatom ini dapat ditemukan di bebatuan, lumpur dan sisa – sisa bahan organik. Sifat diatom epipelik yang hidup di dalam substrat berupa sedimen menyebabkan alga tersebut dipengaruhi oleh keadaan sedimen. Tiap – tiap sedimen dikatakan memiliki perbedaan distribusi diatom epipelik yang hidup di dalamnya. Bukan hanya itu alkalinitas juga berkaitan erat dengan kondisi

diatom epipelik pada suatu lingkungan. Namun demikian sebenarnya perkembangan diatom epipelik lebih dipengaruhi oleh perubahan kondisi musiman dari beberapa faktor lingkungan (Kadhim *et. al.*, 2013).

Di Danau Rawapening, *E. bilunaris*, *E. minor*, *E. monodon* (Hustedt) dan *E. pectinalis* var. *pectinalis* yang banyak ditemukan menunjukkan pH kurang dari 6 atau netral (Soeprbowati *et al.*, 2012). Dalam kasus Danau Rawapening, suhu, fosfat dan kalsium adalah parameter modern yang ditemukan mempengaruhi kumpulan diatom (Soeprbowati *et al.*, 2016b).

E. exigua (Brébisson ex Kützing) Rabenhorst adalah spesies kosmopolitan yang ditemukan dari daerah tropis hingga Arktik di danau, kolam, rawa dan mata air panas (Joynt dan Wolfe, 2001). Dominasi takson *acidobiontic E. exigua* (Brébisson ex Kützing) Rabenhorst di Danau Warna dari tahun 1991–2007 menunjukkan pH 2–4 hingga saat ini (Hobbs *et al.*, 2009). Kondisi asam juga ditunjukkan oleh dominasi *A. minutissimum* (Kützing) pada sentimeter paling atas sedimen (Soeprbowati *et al.*, 2017).

2.8.1. Respon Fisiologi Diatom terhadap Senyawa Kimia dan Sifat Fisiko-Kimia

Diatom merupakan organisme yang memiliki pengaruh penting pada siklus biogeokimia secara umum misalnya siklus karbon, fosfat, nitrat dan silika (Brembu *et al.*, 2017). Keberadaan diatom ditandai dengan partisipasinya terhadap siklus silika. Dengan demikian, penyerapan mineral ini sangat penting. Sel mendapatkan silikon dari asam ortosilikat larut, silikat larut dan organosilik.

Senyawa-senyawa ini terbungkus dalam plasmalemma dan disisihkan ke dalam vakuola selama pembentukan sel (Round *et al.*, 2000). Silikat ($\text{SiO}_4 - n\text{H}_2\text{O}$) membentuk 10 - 72% dari dinding sel (Schmid *et al.*, 1981). Penyerapan asam silikat dicapai melalui Silicon Transfer Proteins aktif dan dengan demikian memerlukan ATP (Shrestha dan Hildebrand, 2015). Sebagian besar silikat terlarut ditemukan pada pH di bawah 9. Sehingga, diatom biasanya tidak ditemukan di perairan yang sangat basa. Kehadiran silikon terkait dengan mengatur ekspresi gen. Tidak adanya silikon juga melumpuhkan pembelahan sel pada diatom, menghambat replikasi DNA dan menurunkan klorofil maupun produksi karotenoid, mengurangi fotosintesis, glikolisis dan justru meningkatkan sintesis lipid (Sarhou *et al.*, 2005).

Peningkatan konsentrasi silikat biasanya diikuti oleh perubahan kearah dominansi diatom pada substrat (Round *et al.*, 2000). Kondisi seperti ini meningkatkan tingkat pertumbuhan diatom, mendukung kisaran yang lebih tinggi dari ukuran diatom intraspesifik dan frustula yang lebih tipis (Round *et al.*, 2000). Selain itu, penyerapan nutrisi fungsional penting lainnya tergantung pada keberadaan silikat. Sebagai contoh, konsentrasi nitrat dan fosfat, dapat menjadi faktor pembatas. Nitrat cenderung diperoleh sebagai natrium nitrat. Hal ini diangkut ke dalam sel aktif, seperti yang diamati di *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin (Syrett *et al.*, 1986).

Secara umum, serapan nitrogen terkait dengan jalur amino dan juga membutuhkan amonium aksesibilitas (Rhee, 1978). Beberapa spesies yang lebih mahir daripada yang lain untuk penyerapan nitrogen atau fosfat (Suttle dan

Harrison, 1988). Bentuk kehidupan juga dapat menentukan kemudahan atau kesulitan dalam penyerapan nutrisi (Burkholder *et al.*, 1990). Keterbatasan nitrogen atau fosfat memiliki hasil yang berbeda. Keterbatasan nitrogen mendorong peningkatan ukuran sel untuk penyimpanan (misalnya dalam sistem kelautan) sementara pembatasan fosfat cenderung menurunkan ukuran sel, seperti yang ditemukan di perairan benua (Litchman *et al.*, 2008).

Peningkatan suhu juga dapat berdampak pada volume diatom, penurunan ukuran sel, meskipun hal ini bukan sebagai satu-satunya parameter yang relevan (Svensson *et al.*, 2014). Sifat ini tidak memiliki efek universal yang jelas pada penyerapan karbon dan nitrogen dari diatom yang lebih besar (Montagnes dan Franklin, 2001). Di sisi lain, konduktivitas mempengaruhi diatom ke tingkat substansial. Gradien ionik yang lebih kuat meningkatkan kemungkinan deplesi sel-sel dari lingkungan hipertonik, sehingga beberapa perkiraan ukuran mungkin juga disebabkan oleh konduktivitas (Potapova dan Snoeijjs, 1997).

Diatom dapat dipengaruhi oleh polusi logam misalnya germanium, tembaga dan seng yang mengganggu jalur silikat (Jaccard *at al*, 2009). Unsur merkuri, kadmium dan timbal dapat menghambat pembelahan sel (Kohušová *et al.*, 2011). Logam tersebut mengganggu pembentukan dinding sel, sering menghasilkan diatom teratologis (Pandey dan Bergey, 2016). Logam berat lainnya ditargetkan oleh tindakan substansi prioritas Eropa (Parlemen Eropa dan Dewan Uni Eropa 2001, 2013). Chrome, nikel, selenium dan antimon tidak mempengaruhi diatom hingga konsentrasi sekitar 1 μm (Round *et al.*, 2000),

sementara konsentrasi ini menghasilkan kematian pada organisme lain. Dengan demikian, diatom adalah indikator biasa-biasa saja pada logam-logam ini.

2.8.2. Diatom sebagai Bioindikator

Diatom adalah salah satu indikator yang juga digunakan dalam menilai fitur lingkungan perairan yang berhubungan dengan alam dan manusia (Marra *et al.*, 2018). Keragaman dan distribusi diatom (Bacillariophyta) terutama didorong oleh kondisi lingkungan, dan kumpulannya merupakan bioindikator yang sangat berguna dan sering dianalisis dari inti sedimen untuk menyimpulkan kondisi masa lalu (Kowalska dan Wojtal, 2020). Nilainya dalam penilaian kualitas air/kesehatan lingkungan telah dihargai sejak lama. Kegunaan itu dapat dilihat terletak pada sifat cepat dan tepat dari respon kumpulan diatom terhadap perubahan kondisi, dengan perhatian khusus dicatat di mana lingkungan yang diuji memiliki pH rendah (Rybak, 2018).

Diatom dapat merespon dengan kuat atas perubahan kondisi suatu lingkungan (eutrofikasi, kontaminasi oleh logam berat, acidifikasi). Respon tersebut dapat dideteksi dengan menggabungkan pengaruh dari faktor lingkungan seperti pH, suhu, salinitas, oksigen terlarut, turbiditas, konduktivitas, logam berat (Lavoie *et al.*, 2014). Diatom sangat sensitif terhadap variasi lingkungan perairan sehingga dapat digunakan sebagai bioindikator kondisi danau. Akibatnya, mereka dianggap sebagai indikator kuat perubahan lingkungan, termasuk eutrofikasi, perubahan iklim, dan pengasaman baik dalam studi saat ini dan masa lalu (Dianto *et al.*, 2020). Sedimen danau mencerminkan sejarah perubahan di daerah tangkapan air (Tolkkinen *et al.*, 2014; Gell dan Reid, 2014). Sejarah ini dapat

direkonstruksi dengan mengacu pada kebutuhan nutrisi atau habitat khas setiap takson fosil, atau dengan pertimbangan kelimpahan spesies relatif mereka.

Kajian diatom pada sedimen danau Indonesia secara umum masih sangat terbatas dalam analisis untuk menentukan spesies indikator dan perubahan kelimpahan relatif dari waktu ke waktu (Soeprbowati *et al.*, 2018). Komunitas diatom responsif terhadap perubahan lingkungan seperti pH, kedalaman air, nutrisi, salinitas, dan juga kondisi lingkungan saat ini. Kumpulan diatom seringkali spesifik untuk habitat tertentu, oleh karena itu fosil diatom dapat digunakan untuk mengkarakterisasi habitat tersebut. Untuk alasan itu, diatom telah banyak digunakan untuk menyelidiki status danau dan dapat menjelaskan tentang pengendalian pencemaran, program pemantauan kualitas air dan paleoekologi danau (Kattel *et al.*, 2016).

Banyak organisme diatom yang mampu mentoleransi kondisi lingkungan yang ada seperti: pH (Batarbee *et al.*, 2010), salinitas (Fritsz *et al.*, 2010), total fosfat (Hall and Smol, 2010), oksigen terlarut (Lotter *et al.*, 2010). Taxa diatom memiliki respon terhadap perubahan struktur fisik yang terjadi di dalam Danau termasuk stratifikasi termal (Rühland *et al.*, 2015). Hal tersebut membuat diatom dapat mengalami reaksi yang cepat dengan adanya perubahan lingkungan (Griffiths, 2015), secara umum diatom tersebar di semua bentuk habitat atau kosmopolit. Ukuran dari diatom yang kecil membuat diatom efisien untuk terdistribusi selain itu memiliki kemampuan yang tahan terhadap perubahan karena memiliki dinding sel bersilika, auxospore (Julius and Theriot, 2012). Maka, keberadaan struktur komunitas diatom yang ada di suatu ekosistem

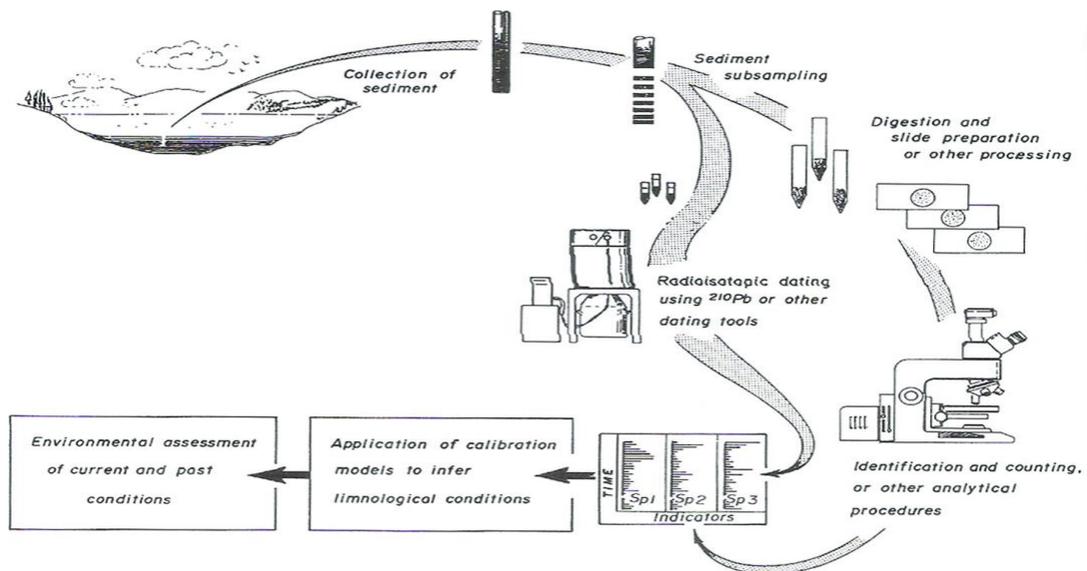
tergenang atau Danau secara garis besar mampu merefleksikan perubahan yang ada di suatu perairan karena Danau merupakan ekosistem perairan yang sensitif terhadap fluktuasi iklim yang ada (Batarbee *et al.*, 2010).

Diatom benthic yang cara hidupnya dengan menempel di sedimen memiliki sejumlah kelebihan meliputi, luasnya persebaran dengan jumlah yang melimpah, memiliki peran penting pada sistem rantai makanan, memiliki siklus kehidupan yang sederhana, terdapat beberapa jenis yang sensitive dengan adanya perubahan lingkungan. Siklus hidup yang relatif pendek tersebut menjadi keunggulan yang dapat dimanfaatkan untuk memberikan gambaran terjadinya perubahan lingkungan dengan periode pendek maupun jangka panjang, selain itu juga mudah untuk disampling dan diidentifikasi. Berbagai keunggulan yang dimiliki diatom tersebut menjadikannya sebagai indikator perubahan lingkungan yang baik. Kajian atas diatom benthic meliputi struktur komunitas serta kelimpahannya sangat penting guna menentukan status ekologi lingkungan perairan (Kelly *et al.*, 2014).

Sedimen yang ada di ekosistem Danau merupakan media yang sangatlah baik untuk analisis paleoclimate karena sedimen yang ada di dasar Danau tidak terganggu, secara periodik menjelaskan perubahan yang berlangsung, dan dapat dijadikan data sehingga ekosistem Danau sangatlah baik untuk dijadikan lokasi pengambilan sampel (Joynt and Wolfe, 2001). Diatom merupakan mikroorganisme yang dapat terawetkan di dalam sedimen selain itu jumlahnya juga melimpah di dalam sedimen ($\geq 10^6$ valve per cm^3).

Diatom bentik yang hidup pada dasar perairan/sedimen sangat tepat saat dijadikan bioindikator. Hal tersebut dikarenakan diatom bentik dapat mengatasi berbagai kelemahan yang terdapat plankton maupun makrobentik. Keberadaan diatom di dalam sedimen dapat dianalisis untuk merekonstruksi kondisi danau di masa lalu. Menurut Smol (2008), pendekatan paleolimnologi untuk rekonstruksi lingkungan perairan oleh faktor antropogenik dapat dilaksanakan dengan 8 tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan lokasi penelitian berdasarkan permasalahan yang spesifik di lokasi tersebut;
2. Penentuan lokasi pengambilan sampel (*coring*), yang harus merupakan representasi dari kondisi lingkungan;
3. Pengambilan sampel sedimen di lokasi terdalam dari danau yang mewakili profil perubahan danau;
4. Sub-seksi sampel sedimen dengan interval tertentu untuk keperluan ekstraksi dan preparasi diatom;
5. *Radioactive dating* profil sedimen untuk mengetahui kronologi pengendapan;
6. Koleksi data berdasarkan identifikasi dan enumerasi diatom pada tiap lapisan sedimen dilakukan menggunakan mikroskop;
7. interpretasi data untuk pengkajian lingkungan; aplikasi model kalibrasi terhadap kondisi lingkungan sehingga diperoleh informasi kondisi lingkungan masa sekarang dan masa lampau;
8. presentasi data baik dari para ilmuwan, manajer, politikus, pengambil kebijakan, dan masyarakat umum yang tertarik dengan aplikasi paleolimnologi (Gambar 2.9.).



Gambar 2.9. Tahapan Analisis Diatom (Smol, 2008)

Terdapat indikator kualitas lingkungan berdasarkan diatom yang telah banyak digunakan di beberapa negara, Penggunaan diatom untuk monitoring kualitas perairan telah banyak dilakukan. Kova'cs *et al* (2007) menggunakan diatom sebagai indikator Danau dangkal ditinjau dari Trophic Diatom Index yang dikembangkan di Hungaria. di Perancis, Desrosiers *et al* (2013) menggunakan benthic diatom sebagai bioindikator kualitas perairan dari eutrofik hingga oligotrofik di ekosistem pesisir, di Hungaria, Bennton *et al* (2013) yang ada di Inggris menggunakan diatom untuk menganalisis status ekologis Danau. Di Kanada, Lavoie *et al* (2014) menggunakan diatom untuk memonitor kualitas perairan di sungai Kanada, Diatom mampu dijadikan sebagai bioindikator meskipun berada di perairan yang memiliki ph rendah, salah satu contohnya adalah penelitian di Amerika, Hobbs *et al* (2009) menggunakan diatom eppipelic sebagai bioindikator kualitas Danau asam yang ada di Beowulf Spring di Taman Nasional Yellowstone Amerika.

Terdapat beberapa indeks yang dibentuk berdasarkan kelimpahan suatu organisme dengan nilai toleransi misalnya: Spesifik polusi- sensitivitas Indeks (Coste, 1982); *Diatom Biological Index* (Prygiel and Coste, 1998); *Trophic Diatom Index* (Kelly and Whitton, 1995); Indikator berdasarkan pengaruh total nitrogen dan fosfat (Potapova *et al.*, 2004; Ponader *et al.*, 2007). Secara umum penggunaan biomonitoring *tool* tergantung terhadap variabel lingkungan yang dihitung, tujuan utama dari biomonitoring adalah menyediakan informasi mengenai kondisi lingkungan perairan dengan memanfaatkan komposisi organisme.

2.8.3. Distribusi Vertikal Diatom

Menurut Susanti (2010), distribusi adalah penyebaran individu di suatu area tertentu. Penyebaran menjadi cara untuk mendapatkan keanekaragaman yang seimbang, sebab penyebaran membantu pertumbuhan dan kepadatan populasi. Distribusi diatom secara horizontal banyak dipengaruhi oleh faktor fisik seperti pergerakan massa air. Oleh sebabnya, pengelompokan (*patchiness*) diatom banyak terjadi di daerah neritik terutama yang dipengaruhi estuari dibanding daerah oseanik. Faktor-faktor fisik yang mempengaruhi distribusi diatom tidak merata, di antaranya adalah arus, kandungan nutrisi, suhu, cahaya, kecerahan, angin, pH, kekeruhan, dan migrasi diurnal dari diatom itu sendiri (Sediadi, 2004).

Distribusi vertikal diatom sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor terkait produktivitasnya, selain kemampuan pergerakan maupun faktor lingkungan yang mendukung plankton dapat bermigrasi secara vertikal. Sama halnya dengan

spesies ganggang yang lainnya, Diatom juga berfotosintesis untuk menghasilkan energi. Organisme ini juga mempunyai pergerakan yang sangat terbatas; sejumlah spesies Diatom dapat melakukan pergerakan lambat, tetapi yang lain mengandalkan arus untuk berpindah tempat. Saat mengalami kematian, Diatom akan mengendap ke dasar perairan, berkontribusi terhadap lapisan lumpur yang membentuk dasar perairan. Lumpur tersebut membentuk lapisan fosil tanah Diatom, zat yang dimanfaatkan pada manufaktur dan sebagai pestisida alami (Campbell, 2010).

2.9. Sistem Sosial – Ekologi Danau

Campur tangan manusia sering menjadi awalan terjadinya berbagai perubahan di alam akibat interaksinya dengan lingkungan. Dari sudut pandang ekologis manusia melihat bahwa hubungan sistem ekologis (*ekosistem*) saling memberikan pengaruh dengan sistem sosial. Sistem sosial – ekologi diartikan sebagai sistem yang terpadu dari alam dan manusia dengan hubungan yang timbal balik (Folke *et al.*, 2005). Lebih lanjut lagi Anderies *et al.*, (2004) menjelaskan bahwa sistem sosial-ekologis adalah sebuah sistem dari unit biologi/ekosistem dihubungkan dengan dan dipengaruhi oleh satu atau lebih sistem sosial, dalam arti membentuk ko-operasi dan hubungan saling tergantung dengan orang yang lain. Dengan demikian sistem sosial-ekologis ini membicarakan unit ekosistem seperti wilayah pesisir, ekosistem mangrove, danau, terumbu karang, pantai yang berasosiasi dengan struktur dan proses sosial.

Sistem sosial – ekologi mungkin tidak akan menjadi sesuatu yang tidak dapat diprediksi, jika perilakunya dilihat dari perspektif yang lebih makro.

Sebagai contoh, kita tahu bahwa sistem mengalami perubahan, tapi kita menyadari bahwa periode yang konstan juga dapat dirasakan. Kita tahu bahwa kedua sistem sosial dan ekologi memiliki mekanisme untuk memperkuat diri yang mencegah berubah ke keadaan lainnya (Gunderson dan Holling, 2002).

Pada pengkajian ekosistem danau, keadaan perubahan atas komponen ekologi misalnya blooming ganggang serta berubahnya komunitas vegetasi lahan basah menjadi indikator perubahan keadaan ekologi yang dipandang sebagai krisis ekologi. Semua itu berhubungan dengan bagaimana komponen sosial dari sistem ekologi dapat menjawab perubahan kondisi masa lalu atau akan memberikan respon perubahan di masa depan (Gunderson *et al.*, 2006).

2.9.1. Ketergantungan (*Dependence*) Masyarakat terhadap Sumber Daya

Danau Rawapening

Ketergantungan masyarakat dari dimensi ekonomi dapat diamati dari distribusi jenis pekerjaannya. Jenis pekerjaan masyarakat yang tinggal di kawasan Danau Rawapening dapat digolongkan menjadi dua, yaitu sumber penghasilan yang bergantung pada sumber daya alam dan yang tidak bergantung pada sumber daya alam. Ketergantungan sumber penghasilan masyarakat terhadap sumber daya alam dan lingkungan terkait dengan empat fungsi pokok yang meliputi (1) penyedia sumber daya alam, (2) penyedia jasa pendukung kehidupan, (3) penyedia jasa-jasa kenyamanan, dan (4) penerima limbah (Dahuri *et al.*, 2001).

Ketergantungan masyarakat pada Danau Rawapening selanjutnya menyebabkan tekanan masyarakat untuk terus memanfaatkan sumber daya alam

yang ada. Akibat dari tekanan masyarakat tersebut menimbulkan berbagai kegiatan alih fungsi lahan. Contoh tekanan masyarakat terhadap sumber daya alam yaitu, lahan yang seharusnya menjadi daerah tangkapan air beralih menjadi lahan pertanian ataupun pemukiman. Eksploitasi lahan juga terjadi guna memenuhi kebutuhan mereka. Alih fungsi lahan yang menyebabkan terkikisnya jumlah vegetasi mengakibatkan degradasi daya dukung lahan. Hal tersebut diperparah dengan rendahnya pengetahuan penduduk mengenai pola penggarapan lahan serta kurangnya pemahaman terhadap dampak jangka panjang. Menurut Sutarwi (2008), tataguna lahan sub DAS Danau Rawapening sebagian besar dimanfaatkan untuk tegalan, sawah dan pemukiman. Ketidakseimbangan dalam pemanfaatan lahan tersebut yang kemudian diasumsikan sebagai faktor mendasar terjadinya kerusakan lingkungan.

Penelitian yang dilakukan oleh BPSDA Jratun (2009), menyebutkan bahwa ketergantungan masyarakat atas sumber daya alam Danau Rawapening berhubungan dengan (1) pertanian pasang surut memanfaatkan lahan 1.020 hektar, (2) nelayan dan petani ikan sebanyak 1.589 orang, (3) budidaya karamba ikan sebanyak 200 KJA dan 500 KJT, (4) pemanfaatan eceng gondok sebanyak 1.000 kg/hari, (5) pemanfaatan gambut dengan kapasitas 54.000 m³/ tahun, serta (6) pariwisata alam dengan jumlah pengunjung 50-100 orang/hari.

2.9.2. Kerentanan (*Vulnerability*) Masyarakat Terhadap Kerusakan Danau Rawapening

Kerentanan dapat diartikan sebagai potensi terhadap hilangnya sesuatu (manusia, benda fisik, ekonomi, alam atau sosial) yang dapat terjadi karena dalam

kondisi bahaya. Kerentanan juga dapat pula didefinisikan sebagai atribut yang potensial dari suatu sistem untuk dirusakkan oleh dampak-dampak yang bersifat *exogenous* (Adrianto dan Matsuda, 2004). Hal tersebut menjadi ciri dan keadaan masyarakat, sistem atau kepemilikan yang peka atau rentan terhadap dampak kerusakan dari bahaya yang ada (UNISDR, 2009). Kerentanan merupakan kondisi yang ditentukan oleh faktor atau proses fisik, sosial, ekonomi dan lingkungan, yang mana dapat meningkatkan kelemahan masyarakat dari dampak bahaya (UN, 2004).

Gangguan eksternal dapat diprediksi menggunakan vberbagai variabel ekologi dan ekonomi di dalam penyusunan indeks kerentanan. Penyusunan indeks kerentanan bertujuan untuk memprediksi tingkat gangguan eksternal dalam suatu sistem. Potensi kerusakan yang dianggap berbahaya yaitu resiko-resiko secara antropogenik dan alamiah. Resiko-resiko tersebut adalah suatu kejadian dan proses-proses yang dapat mempengaruhi integritas biologi atau kesehatan ekosistem. Manusia dan lingkungan alami telah memiliki kapasitas untuk menyerap gangguan kecil. Semakin besar tingkat kerentanan maka akan menjadi penghalang yang lebih besar pada pembangunan berkelanjutan (Adrianto dan Matsuda, 2004).

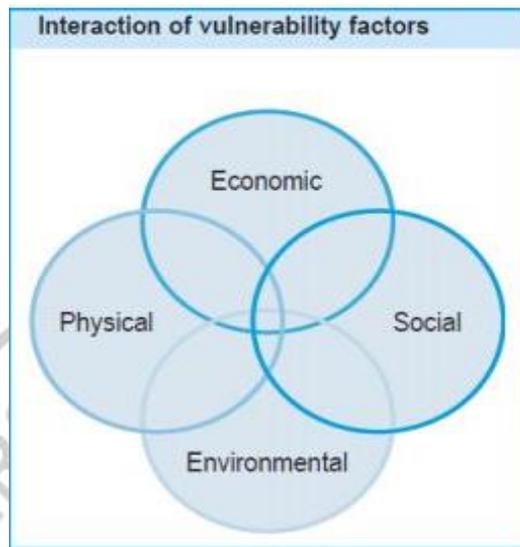
Banyak peneliti yang memandang ketahanan sebagai kebalikan dari kerentanan. Usamah *et al* (2014) menjelaskan bahwa ketahanan merupakan faktor kerentanan dan mereka berpotongan konsep. Pada penilaiannya, kerentanan dapat dibedakan secara keruangan dan komunitas/individu. Masyarakat adalah kelompok yang terdampak paling besar akibat sistem terkena bencana. Oleh

karena itulah perlu dilakukan usaha peningkatan kesadaran serta kapasitas masyarakat agar bisa mengantisipasi terjadinya bencana di wilayahnya, sehingga bencana dapat dicegah, dikurangi dan bahkan dihilangkan.

Dapat disimpulkan bahwa kerentanan merupakan cerminan kondisi fisik individu dan kelompok, sosial, ekonomi dan lingkungan yang dipengaruhi sikap, perilaku, budaya, sosial, ekonomi dan politik individu atau keluarga, kelompok dan bahkan negara yang menggambarkan adanya potensi bagi hilangnya sesuatu karena kondisi bahaya. Pada proses pembangunan, tidak dapat dihindari adanya kerentanan. Pengaturan pada aspek-aspek kritis yang mempengaruhi kerentanan perlu dibuat dan diterapkan agar pembangunan tetap berkelanjutan.

Ketika melakukan penilaian kerentanan suatu wilayah perlu dicermati empat faktor yang mempengaruhinya. Faktor tersebut yaitu kondisi fisik, sosial, ekonomi dan lingkungan. Empat faktor tersebut digambarkan dalam suatu interaksi yang saling mempengaruhi dan bersinggungan satu sama lain (Gambar 2.10.). Namun demikian, masing-masing faktor memiliki kondisi yang mencerminkan kerentanan yang khas yang apabila berada pada situasi yang kurang baik akan membuat dan mempengaruhi kerentanan secara keseluruhan pada suatu wilayah.

SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar 2.10. Keterkaitan antar faktor kerentanan (UN, 2004)

Aspek kunci dalam kerentanan lingkungan adalah menurunnya kualitas sumber daya alam dan meningkatnya kerusakan sumber daya alam. Selain itu, kurangnya daya tahan dalam sistem ekologi dan paparan bahan beracun dan polusi berbahaya merupakan elemen penting yang mempertajam kerentanan lingkungan (UN, 2004).

2.9.3. Ketahanan (*Resilience*) Masyarakat Sekitar Danau Rawapening

Ketahanan (*resilience*) adalah kapasitas individu, masyarakat atau Lembaga untuk merespon pergeseran iklim secara dinamis dan efektif hingga pada tingkatan yang dapat diterima. Hal ini mencakup kemampuan untuk menolak atau menahan dampak, serta kemampuan untuk memulihkan atau mengatur kembali sistem agar bias berkembang dengan lebih baik (Brown *et al.*, 2012).

Perspektif terkait resiliensi pertama kali muncul dari ilmu ekologi pada decade 60-an dan 70-an dari studi interaksi populasi seperti antara mangsa dan pemangsa dan respon fungsional dalam kaitan dengan teori stabilitas ekologi.

Konsep resiliensi dalam sistem ekologi diperkenalkan Holing pada tahun 1973 dalam *Annual Review of Ecology and Systematics* mengenai hubungan antara resiliensi dan stabilitas. Pada tulisannya mengilustrasikan adanya beberapa domain stabilitas (*multiple stability domains* atau *multiple basins of attraction*) dalam sistem alam, serta domain tersebut berhubungan dengan proses ekologi, kejadian acak (misalnya gangguan), dan heterogenitas berdasarkan skala spasial temporal. Holing memperkenalkan konsep resiliensi sebagai kapasitas untuk bertahan dalam sebuah domain pada saat menghadapi perubahan, dalam mengajukan teori bahwa resiliensi menentukan presistensi hubungan dalam sebuah sistem dan merupakan ukuran kemampuan sistem tersebut untuk menyerap perubahan keadaan, mengarahkan, dan mempertahankan keadaan variabelnya.

Resiliensi memiliki tujuan menghindarkan sistem sosial – ekologi berpindah ke formasi yang tidak dikehendaki. Hal ini bergantung pada sistem yang dapat menanggulangi *external shock* walaupun berhadapan dengan ketidakpastian. Hal ini membutuhkan pemahaman dimana resiliensi berada di dalam sistem, dan kapan serta bagaimana dapat bertahan atau justru hilang. Ada perbedaan antara proses peningkatan resiliensi untuk perubahan yang tak terduga dengan proses untuk memperbaiki sistem selama masa masa pertumbuhan dan keseimbangan. Dua hal tersebut diperlukan, namun lebih ditekankan pada ekosistem yang sudah dimanfaatkan manusia. Pengambilan keputusan melalui proses analisis kebijakan yang memaksimalkan kegunaan atau memperkecil kerugian (Walker *et al.*, 2002).

Resiliensi ekosistem merupakan topik yang relatif baru dibidang ekologi. Holing adalah orang pertama yang memunculkan istilah ini dalam jurnal ilmiahnya yang memperkenalkan konsep resiliensi. Secara mendasar resiliensi ekosistem adalah kapasitas dari suatu ekosistem untuk mentolerir suatu gangguan tanpa merubah struktur dan fungsi utamanya (*Walker et al.*, 2006).

Konsep resiliensi untuk memahami sumber dan peran perubahan khususnya jenis perubahan transformasi dalam sistem kapasitas beradaptasi (Redman dan Kinzig, 2003). Kemampuan beradaptasi adalah kemampuan sistem sosial – ekologi guna menghadapi situasi baru tanpa kehilangan pilihan dimasa depan. Artinya resiliensi adalah kunci untuk meningkatkan kapasitas beradaptasi. Kapasitas beradaptasi dalam sistem ekologi terkait dengan keanekaragaman genetik, biologi, kemajemukan lanskap.

Pada sistem sosial, keberadaan institusi dan jaringan pembelajaran yang memiliki pengetahuan, pengalaman dalam pemecahan masalah, serta keseimbangan kekuatan diantara kelompok kepentingan memiliki peran penting dalam kapasitas beradaptasi. Peningkatan stres atau pengurangan resiliensi pada suatu sistem ekologi membuatnya lebih rentan terhadap guncangan eksogen atau perubahan dalam kondisi lingkungan. Banyak kasus hubungan antara stres dan hilangnya resiliensi adalah perubahan dalam komposisi spesies dalam sistem (*Perrings et al.*, 1995).

2.10. Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Danau Berkelanjutan

2.10.1. Konsep Kebijakan

Kebijakan (*policy*) merupakan suatu kumpulan keputusan yang diambil dan ditetapkan oleh seorang pelaku maupun kelompok politik, sebagai upaya memilih tujuan serta cara untuk meraih tujuan. Secara prinsipil, pihak yang menyusun kebijakan tersebut memiliki kekuasaan untuk merealisasikannya. Kebijakan sendiri dapat diartikan sebagai aktivitas manusia dalam memecahkan suatu masalah. Kebijakan dibuat dengan tujuan sebagai solusi atas permasalahan manusia yang bermacam-macam. Sebagai lembaga tinggi negara, pemerintahan mengambil kebijakan bagi rakyatnya yang terkadang kebijakan tersebut dapat diterima dan juga ditolak oleh rakyat (Abdal, 2015).

Kebijakan dan kelembagaan merupakan dua hal yang selalu melekat dan tidak bisa dipisahkan. Suatu kebijakan yang bagus tanpa didukung dengan kelembagaan yang kuat, maka akan kesulitan menghasilkan output yang optimal. Begitupula sebaliknya, kelembagaan yang bagus dan kuat tanpa didukung oleh kebijakan yang bagus juga akan memberikan hasil tidak optimal. Kelembagaan tidak sekedar wadah ataupun organisasi tetapi melingkupi kode etik, aturan main, sikap serta perilaku suatu sistem atau organisasi. Terdapat dua pengertian umum dari kelembagaan yaitu : Pertama, kelembagaan sebagai aturan main (*the rules of the game*), yang diartikan kelembagaan berupa aturan baik formal maupun non formal, baik tertulis maupun tak tertulis berkaitan tata hubungan manusia. Kedua, kelembagaan sebagai sebuah organisasi, terdapat beberapa stakeholders yang terlibat di dalam pengelolaan sumber daya alam termasuk hutan dan juga danau (Lestaria *et al.*, 2016).

Kebijakan merupakan sesuatu yang kompleks dan dinamis saat elit politik melakukan pelipatgandaan kapasitas pengaruhnya, ruang lingkup maupun efisiensi keputusan-keputusan resmi. Oleh karena itu pemerintah wajib mendiferensiasi struktural dan spesialisasi fungsional yang tinggi sehingga tidak keliru membuat kebijakan, sebab kebijakan yang keliru akan memunculkan dampak yang fatal atas keberlangsungan hidup masyarakat (Alamsyah, 2016).

Seringkali kebijakan yang lahir tidak memiliki efektifitas dalam penyelesaian masalah, sebab masalah yang dikonstruksikan salah. Padahal kebijakan terkait sumber daya alam yang salah akan berdampak pada dimensi ekologis, ekonomis serta sosial baik secara dependen maupun independen. Kebijakan dan pembangunan seharusnya adalah dua hal yang saling terkait. Secara kontekstual adalah wilayah kebijakan diimplementasikan, Adapun kebijakan merujuk pada kerangka kerja bagaimana pembangunan dilaksanakan (Suharto, 2008).

2.10.2. Konsep Pembangunan Berkelanjutan

Pembangunan mempunyai hubungan yang erat dengan lingkungan. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa pembangunan yang memberikan manfaat adalah pembangunan yang dalam prosesnya memperhatikan konsep kelestarian lingkungan hidup. Jika pembangunan dilakukan dengan mengabaikan konsep tersebut, maka akan memunculkan dampak negatif akibat dari adanya pembangunan (Rosana, 2018).

Konsep pembangunan yang bertahan lama dan berkelanjutan diharapkan mampu memfasilitasi persoalan lingkungan yang terjadi. Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) merupakan proses pembangunan yang meliputi lahan, kota, masyarakat, bisnis, lingkungan dan lain sebagainya dengan berprinsip memenuhi kebutuhan sekarang tanpa mengorbankan pemenuhan kebutuhan generasi masa depan (Warlina, 2017). Hal tersebut sejalan dengan pernyataan Suparmoko (2020) bahwa konsep dari pembangunan berkelanjutan adalah pembangunan yang dilakukan generasi sekarang jangan sampai membutuhkan kompromi dari generasi yang akan datang melalui pengorbanan mereka dalam bentuk kesejahteraan sosial yang lebih rendah dibandingkan dengan kesejahteraan generasi saat ini. Kesejahteraan yang dimaksud yaitu kesejahteraan ekonomi, kesehatan, pendidikan dan juga kesejahteraan lingkungan. Paradigma terkait pembangunan berkelanjutan dapat diterima sebagai agenda politik pembangunan untuk semua negara di dunia. Hubungan antara dimensi ekonomi dan ekologis menjadi sangat penting di dalam pembahasan pembangunan berkelanjutan.

Diperlukan pemahaman terkait berbagai unsur yang yang dibutuhkan untuk pembangunan berkelanjutan. Pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup memuat substansi yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan dan penegakan hukum Lingkungan Hidup, yang sejalan dengan ruang lingkup Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup sebagaimana tercantum dalam Pasal 4 Undang-

Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Pertumbuhan ekonomi memiliki batas dan pertumbuhan ekonomi yang mengandalkan dari ekstraksi sumber daya alam tidak akan bertahan lama. Sehingga dapat diartikan bahwa pertumbuhan ekonomi yang tinggi tidak akan dapat memberikan kebermanfaatan yang berarti, jika sumber daya alam beserta lingkungannya mengalami kerusakan. Sumberdaya alam dan lingkungan merupakan modal utama pembangunan jika mengalami degradasi akan mengancam pembangunan. Paradigma tersebut menjelaskan bahwa pembangunan berkelanjutan didominasi oleh dimensi ekonomi (Hasim, 2012).

World Comission on Environment and Development (WCED) yang diketuai oleh Gro Harlem Brundland adalah komisi tingkat dunia yang dibentuk pada Sidang Umum PBB tahun 1983. WCED menghasilkan “Our Common Future” di tahun 1987 yang merupakan sebuah dokumen berisi analisis serta saran bagi proses pembangunan berkelanjutan. Pada dokumen yang disusun oleh WCED tersebut memperkenalkan konsep baru yang disebut sebagai suatu konsep pembangunan berkelanjutan yaitu pembangunan yang memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri (WCED, 1987).

Menurut Rogers *et al* (2007), konsep pembangunan berkelanjutan mengeksplorasi secara komprehensif yang meliputi dimensi ekologi, dimensi ekonomi dan dimensi sosial. Semua dimensi yang menjadi pilar utama pembangunan berkelanjutan tersebut secara rinci dijelaskan sebagai berikut :

1. Dimensi ekologi, memiliki arti bahwa dalam pembangunan tidak boleh mengabaikan unsur keberlanjutan fungsi ekologi, dengan demikian sumber daya alam sebagai sumber utama modal pembangunan dapat digunakan tidak hanya generasi saat ini tetapi juga generasi yang akan datang. Pandangan ini sejalan dengan hakikat dari sumber daya alam yang memiliki sifat transgenerasi.
2. Dimensi ekonomi, memiliki arti bahwa pembangunan harus dapat menaikkan pertumbuhan ekonomi secara proporsional, sehingga hal tersebut memiliki implikasi terhadap pengentasan kemiskinan melalui pemanfaatan sumber daya alam secara optimal serta efisien. Dimensi ekonomi diharapkan menjadi *leverage* terhadap berbagai dimensi yang lainnya yaitu pendidikan, kesehatan dan kesejahteraan.
3. Dimensi sosial, memiliki arti bahwa pembangunan harus dapat menciptakan keadilan sosial bagi masyarakat. Sumber daya manusia (SDM) adalah bagian yang tak dapat dipisahkan dengan lingkungan dan sumber daya alamnya. Perhatian terhadap dimensi sosial menjadi prinsip dasar dalam pembangunan dikarenakan manusia adalah obyek sekaligus subyek dari pembangunan. Kualitas SDM ini menjadi faktor kunci dalam menjaga kelestarian fungsi ekosistem. Atas dasar tersebut maka di dalam dimensi sosial harus ada persamaan hak bagi setiap warga negara dalam pemanfaatan sumber daya alam serta memperoleh pelayanan pemerintah.

Ketiga dimensi diatas disebut *three dimension model* yang harus digerakkan secara simultan di dalam setiap pembangunan (Hasim, 2012), dan sangat penting diaplikasikan dalam merumuskan strategi pengelolaan Danau Rawapening secara terpadu dan berkelanjutan.

2.10.3. Daya Dukung Lingkungan Perairan

Undang-undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang lingkungan hidup, menerangkan bahawa daya dukung lingkungan hidup diartikan sebagai suatu kemampuan lingkungan hidup dalam mendukung perikehidupan manusia beserta makhluk hidup lainnya. Menurut undang-undang tersebut, daya dukung lingkungan terdapat tiga perbedaan daya dukung alam yaitu, daya dukung alamiah, daya tampung lingkungan binaan serta daya tampung lingkungan sosial.

Carrying Capacity atau daya dukung lingkungan memiliki arti sebagai kemampuan suatu tempat dalam menunjang kehidupan organisme baik tingkat spesies maupun populasi secara maksimum pada masa waktu yang Panjang (Novita *et al.*, 2015). Daya dukung lingkungan mencakup daya dukung biofisik dan juga daya dukung sosial yang keduanya saling berkaitan. Daya dukung mendapatkan pengaruh dari parameter sumber daya, sosial, ekonomi, budaya, teknologi dan juga kebijakan (Febrianto, 2017). Daya dukung biofisik merupakan jumlah maksimum penduduk yang dapat didukung oleh sumber daya menggunakan tingkatan teknologi tertentu. Adapun tingkat kontinuitas daya dukung biofisik yang ditetapkan oleh organisasi sosial meliputi tingkat konsumsi serta perniagaan. McKindsey *et al.*, (2006) menyebutkan bahwa daya dukung lingkungan dikelompokkan menjadi empat komponen yakni komponen fisik,

komponen produksi, komponen ekologi dan juga komponen sosial. Daya dukung lingkungan secara ekologis merupakan tingkat suatu proses yang dapat berubah pada suatu sistem, tetapi tak membuat struktur fungsinya melampaui batasan tertentu yang dapat diterima (Costa *et al.*, 2010).

Penentuan *carrying capacity* di dalam lingkungan dapat melalui pendekatan biologis serta pendekatan kimiawi. Pada pendekatan biologis, daya dukung lingkungan akan terkait dengan status trofik. Adapun pendekatan kimiawi berupa besarnya perubahan kadar komponen indikator yang merupakan petunjuk telah terjadi perubahan kualitas lingkungan. Unsur-unsur kimiawi yang dapat digunakan sebagai indikator perubahan lingkungan antara lain DO, phosphor, sulfur dan nitrogen (Husamah dan Rarhardjanto, 2019).

Suatu lingkungan dapat diukur daya dukungnya melalui dua cara yaitu, pertama dengan mengukur cemaran total phosphor (TP) melalui sistem budidaya terbuang ke lingkungan yang berkaitan dengan *influx nutrien*, *budget nutrien* serta *flux nutrien*. Kedua berdasarkan kapasitas ketersediaan DO di dalam lingkungan perairan tersebut. Adapun parameter untuk mengukur kualitas air pada suatu lingkungan perairan meliputi tingkat keasaman (pH), kadar oksigen terlarut (DO), N terlarut, tingkat salinitas, kedalaman perairan, kecepatan arus, ammonia, phosphat, TDS, TSS, konduktivitas, dan juga turbiditas (Febrianto, 2017).

2.10.3.1. Unsur Nitrogen (N) dan Phosphore (P)

Nutrien merupakan unsur ataupun senyawa kimiawi yang dimanfaatkan pada proses metabolisme maupun proses-proses fisiologis organisme. Terdapat

dua macam nutrisi yang ada di dalam perairan yaitu makro nutrisi dan juga mikro nutrisi. Termasuk sebagai makro nutrisi meliputi C, H, O, N, S, P, K, Mg, Ca, Na serta Cl. Adapun yang termasuk dalam mikro nutrisi adalah Fe, Co, Zn, B, Si, Mn serta Cu. Terdapat beberapa nutrisi yang selalu atau paling dibutuhkan Organisme dalam menjalankan aktivitas metabolisme dan juga aktivitas fisiologis yaitu C, N dan P. Nutrisi yang berperan vital pada pertumbuhan serta aktivitas metabolisme phytoplankton yaitu N dan P (Risamasu dan Prayitno, 2011). Unsur C di alam ditemukan dalam jumlah yang melimpah dalam bentuk CO_2 , hal tersebut menjadikan N dan P menjadi unsur yang paling dipertimbangkan. Sebagai makro nutrisi, N dan P memiliki peranan sebagai faktor pembatas pertumbuhan phytoplankton (Putri *et al.*, 2014). Phytoplankton membutuhkan N dan P dalam jumlah yang banyak, tetapi jika keduanya hanya tersedia dalam jumlah minimum akan mengganggu laju pertumbuhan diatom tersebut. Total nitrogen (TN) dan total phosphor (TP) yang ada di dalam perairan merupakan parameter yang dapat digunakan untuk menduga tingkat kesuburan perairan (Mustofa, 2015).

Nitrogen dan phosphor adalah unsur hara utama yang keberadaannya dibutuhkan dalam proses fisiologis phytoplankton. Proses metabolisme serta pertumbuhan dari diatom tersebut dapat optimum ketika jumlah keberadaan unsur-unsur tersebut dapat tercukupi. Pada proses fotosintesis phytoplankton juga dapat menyerap senyawa nitrat dan fosfat (Kurniawan, 2016).

Keputusan Kementerian Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 menyebutkan bahwa baku mutu konsentrasi maksimum fosfat (PO_4) yang

layak bagi kehidupan makhluk hidup perairan yaitu 0,015 mg/L. Baku mutu konsentrasi nitrat (NO_3) air laut yang layak untuk kehidupan makhluk hidup laut yaitu 0,008 mg/L. Tingginya konsentrasi nitrogen dan phosphor di perairan akan menyebabkan pertumbuhan alga yang tak terkendali. Jika kondisi tersebut terjadi tentu menimbulkan kerugian besar sebab mempengaruhi kesehatan dan keanekaragaman ekosistem perairan. Nitrat yang terakumulasi di perairan biasanya bersumber dari limbah domestik perkotaan, aktivitas industrial dan juga aktivitas pertanian (Risamasu dan Prayitno, 2011).

2.10.3.2. Nitrat (NO_3)

Di perairan unsur nitrogen (N) ditemukan dalam bentuk berbagai macam ion meliputi ion nitrat (NO_3^-), ion nitrit (NO_2) serta amoniak (NH_3). Selain itu juga bisa ditemukan dalam bentuk molekul gas dan nitrogen oksida. Unsur N bersama zat lain ataupun N yang berbentuk gas nitrogen terlarut di perairan dapat membentuk senyawa. Sebagai unsur penting dalam mekanisme hidup organisme, unsur N dapat ditemukan pada bentuk senyawa organik baik yang ada di dalam organisme ataupun bentuk partikulatnya di perairan. NO_3 dapat menjadi parameter pembatas terhadap reproduksi phytoplankton jika kadarnya dibawah kadar minimal yakni 0,2 mg/L. Kadar minimal NO_3 berada dipelapisan permukaan sedangkan kadar maksimal terpadap pada pelapisan tengah yakni di kedalaman beberapa ratus meter di permukaan perairan (Paramitha, 2014).

NO_3 merupakan bentuk dari unsur N yang mendominasi di perairan bersifat alamiah. Sumber utama NO_3 di perairan bersumber dari berbagai macam antara lain penguraian makhluk hidup, kegiatan pertanian, perikanan tambak,

industry dan juga kegiatan domestik masyarakat. Kegiatan pertanian dan perikanan tambak memakai pupuk dengan kandungan unsur N dan unsur P relatif banyak (Faizal *et al.*, 2012). Kadar NO_3 pada perairan mengalami penurunan jika memiliki jarak yang semakin jauh dari area pembuangan yang terjadi akibat adanya aktivitas mikroba perairan misal *Nitrosomonas* sp (Mustofa, 2015). Pengklasifikasian tingkat kesuburan perairan sesuai konsentrasi NO_3 disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tingkat Kesuburan Perairan Berdasarkan Kadar Rata-rata Total N ($\mu\text{g/l}$) Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Tahun 2009

Status Trofik	Kadar Rata-rata Total N ($\mu\text{g/l}$)	Kecerahan Rata-rata (m)
Oligotrofik	≤ 650	> 10
Mesotrofik	≤ 750	> 4
Eutrofik	≤ 1900	$> 2,5$
Hypereutrofik	> 1900	$\leq 2,5$

NO_3 yang dibantu sinar matahari digunakan phytoplankton sebagai komponen utama sumber makanan primer di dalam sistem rantai makanan perairan. Phytoplankton menggunakan NO_3 untuk proses metabolismenya dalam kadar terbatas. Sehingga jumlah NO_3 yang berlimpah pada perairan akan terakumulasi di perairan dan menyebabkan proses eutrofikasi. Eutrofikasi pada perairan akan memicu terjadinya blooming alga serta vegetasi air lainnya yang dapat menimbulkan gangguan lingkungan (Tungka *et al.*, 2016).

2.10.3.3. Phosphat (PO_4)

Di dalam perairan phosphor tersedia dalam bentuk phosphat (PO_4) terlarut maupun dalam bentuk partikulat. Phosphat yang ditemukan di dalam perairan

tersusun atas phosphat organik yang berupa gula phosphat, nucleoprotein maupun phosphoprotein. Adapun phosphat non organik dalam bentuk orophosphat dan poliphosphat. Phosphat dalam perairan berada dalam perairan akan mengalami penguraian jadi senyawa ion berbentuk H_2PO_4^+ , HPO_4^{2-} serta dalam bentuk PO_4^{3-} yang selanjutnya terabsorpsi oleh phytoplankton sehingga masuk dalam rantai makanan. Kadar phosphat tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kadar klorofil-a dalam perairan (Hutagalung dan Rozak, 1997).

Ortofosfat merupakan bentuk fosfat yang dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tumbuhan akuatik, sedangkan polifosfat harus mengalami hidrolisis membentuk ortofosfat terlebih dahulu sebelum dapat dimanfaatkan sebagai sumber fosfat. Ortofosfat yang merupakan produk ionisasi dari asam ortofosfat adalah bentuk fosfat yang paling sederhana di perairan (Aziz *et al.*, 2014). Ortofosfat merupakan nutrisi yang hal ini dapat berasal dari buangan limbah organik yang berasal dari drainase sekitar sehingga bahan organik dalam perairan tinggi.

Vegetasi akuatik dapat menggunakan ortophosphat dengan langsung. Pada poliphosphat harus melewati proses hidrolisis menjadi ortophosphat sebelum digunakan sebagai sumber phosphat. Ortophosphat adalah bentuk phosphat paling sederhana di perairan dan merupakan produk dari asam ortophosphat (Aziz *et al.*, 2014).

Ortophosphat di perairan bersumber dari material organik yang masuk ke dalam badan air. Berbagai aktivitas yang dilakukan manusia berkontribusi terhadap masuknya phosphat ke dalam perairan diantaranya adalah sektor industri

yang melibatkan unsur P, aktivitas domestik masyarakat, pertanian, perikanan dan lain sebagainya (Purba *et al.*, 2015). Ortofosfat dapat bersumber dari air buangan penduduk dan industri yang menggunakan bahan deterjen yang mengandung ortofosfat, seperti industri pencucian, industri logam, air buangan penduduk dan sisa makanan yang dibuang secara langsung ke perairan (Purba *et al.*, 2015). Klasifikasi kesuburan perairan berdasarkan kadar rata-rata total P ($\mu\text{g/l}$) disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Tingkat Kesuburan Perairan Berdasarkan Kadar Rata-rata Total P ($\mu\text{g/l}$) Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Tahun 2009

Status Trofik	Kadar Rata-rata Total P ($\mu\text{g/l}$)	Kecerahan Rata-rata (m)
Oligotrofik	≤ 10	> 10
Mesotrofik	≤ 30	> 4
Eutrofik	≤ 100	$> 2,5$
Hypereutrofik	> 100	$\leq 2,5$

Unsur P yang jumlahnya berlebihan pada perairan akan memicu proses eutrofikasi yang mengakibatkan terjadinya blooming alga maupun vegetasi air lainnya. Dampak buruk bagi lingkungan perairan dengan adanya blooming vegetasi air tersebut adalah menurunnya kadar DO di dalam air. Walaupun dilakukan upaya pengurangan kadar phosphat yang ada di perairan, proses eutrofikasi masih dapat tetap terjadi dikarenakan terdapat mobilisasi phosphat yang berasal dari sedimen yang mengalami proses biokimia, fisika dan kimiawi (Rumhayati, 2010).

2.10.4. Pengelolaan Sumber Daya Danau Terpadu dan Berkelanjutan

Pemerintah telah membuat konsep dalam pengelolaan sumber daya alam lewat sistem perundangan. Konsep pengelolaan tersebut secara implisit dibingkai dalam konsep perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, sebuah langkah sistematis dan terpadu yang dilakukan guna menjaga kelestarian dan fungsi lingkungan hidup. Berbagai komponen tersebut meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan serta penegakan hukum (UU Nomor 32 Tahun 2009). Substansi-substansi tersebut dirinci secara mendetail dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Terdapat banyak faktor yang memberikan pengaruh terhadap pengelolaan sumber daya alam sehingga hasilnya tidak efektif. Faktor tersebut antara lain kuatnya dalam pembangunan sektoral, adanya konflik dalam pengelolaan dan terjadinya ambiguitas kepemilikan. Terdapat banyak kasus terkait pembangunan sektoral yang tidak kondusif dalam mendorong pembangunan sumber daya alam secara terpadu. Pada pembangunan tingkat sektoral cenderung mengutamakan keuntungan sektornya saja dan mengabaikan akibat yang muncul dari atau terhadap sektor yang lain. Sikap pembangunan sektoral tersebut memicu berkembangnya konflik pengelolaan sumber daya alam yang ada. Konflik tersebut terjadi dan berkembang dikarenakan tidak adanya kepastian hukum, sehingga tidak ada suatu aturan manajemen yang dapat diimplementasikan secara konsisten. Selain itu juga tidak adanya komitmen dalam penerapan sanksi bagi pelanggar. Upaya mengelola sumber daya alam tidak hanya dibutuhkan peraturan yang mengarahkan terhadap putusan-putusan terbaik secara individu, tetapi juga

dibutuhkan aksi bersama. Terkait aksi bersama terdapat dua tingkatan dalam pengelolaan sumber daya alam yaitu: Pertama, mengenali kebutuhan koordinasi dan pengaturan perilaku, yaitu agar menghindari terjadinya *free rider*. Kedua, menyepakati aturan main serta pemberian sanksi terhadap hal yang menyimpang (Kartodihardjo, 2009).

Perencanaan sumber daya alam menjadi salah satu instrumen terpenting bagi pemerintah pada upaya pengawasan survey, eksplorasi, pengembangan, pengambilan manfaat, dan kegiatan konservasi sumber daya alam yang menjadikannya sebagai dasar dalam manajemen efektif. Hal demikian menjadikannya sebagai langkah pendekatan yang sangat signifikan untuk mencapai tujuan pemanfaatan sumber daya alam secara berkelanjutan. Akan tetapi secara faktual pendekatan pada pengelolaan sumber daya alam selama ini berlangsung secara sektoralis dan reduksionis (*patial*), sementara sumber daya alam kenyataannya memiliki sifat sistemik serta saling interdependensif. Ciri sumber daya alam yang bersifat sistemik ini menyebabkan biaya ekologis dan sosial yang tinggi saat diabaikan dalam pengelolaannya. Dasar tersebutlah yang menjadikan pengelolaan sumber daya alam secara terpadu sangat strategis untuk dipilih (Hasim, 2012).

Secara ekologis, danau mempunyai keterkaitan terhadap lingkungan kawasannya. Konsekuensinya dalam pengelolaan danau harus dilakukan secara terpadu dan tidak secara sektoral. Pengelolaan yang dilakukan secara terpadu artinya dalam mengelola sumber daya harus dilakukan melalui penilaian secara menyeluruh. Langkah tersebut dengan diawali pengidentifikasian penyusun

ekosistem, pengkajian masalah dan hambatan, penyusunan tujuan dan sasaran serta pengelolaan segenap aktivitas pemanfaatan untuk mencapai pembangunan yang optimal dan berkelanjutan. Tujuan dari pengelolaan sumber daya alam adalah untuk tercapainya kesejahteraan dan peningkatan sumber daya alam secara berkelanjutan (Hasim, 2012).

Pada konferensi Ramsar tahun 1971 telah disepakati secara internasional bahwa konservasi dan pemanfaatan lahan basah termasuk danau harus dilakukan secara bijaksana. Indonesia telah ikut meratifikasi Ramsar lewat Kepres RI No. 48 tahun 1991. Pada kenyataannya kebijakan tersebut tidaklah efektif yang menjiwai dalam kebijakan operasional dalam mengelola danau. Indikator yang bisa diamati adalah banyaknya danau di Indonesia yang mengalami kerusakan ekosistem dan dalam kondisi degradasi parah. Penting secara politis pemerintah mendorong lahirnya spirit pengelolaan danau secara terpadu dan berkelanjutan, karena perairan danau merupakan sumber ketersediaan air bersih terbesar bagi berlangsungnya kehidupan.

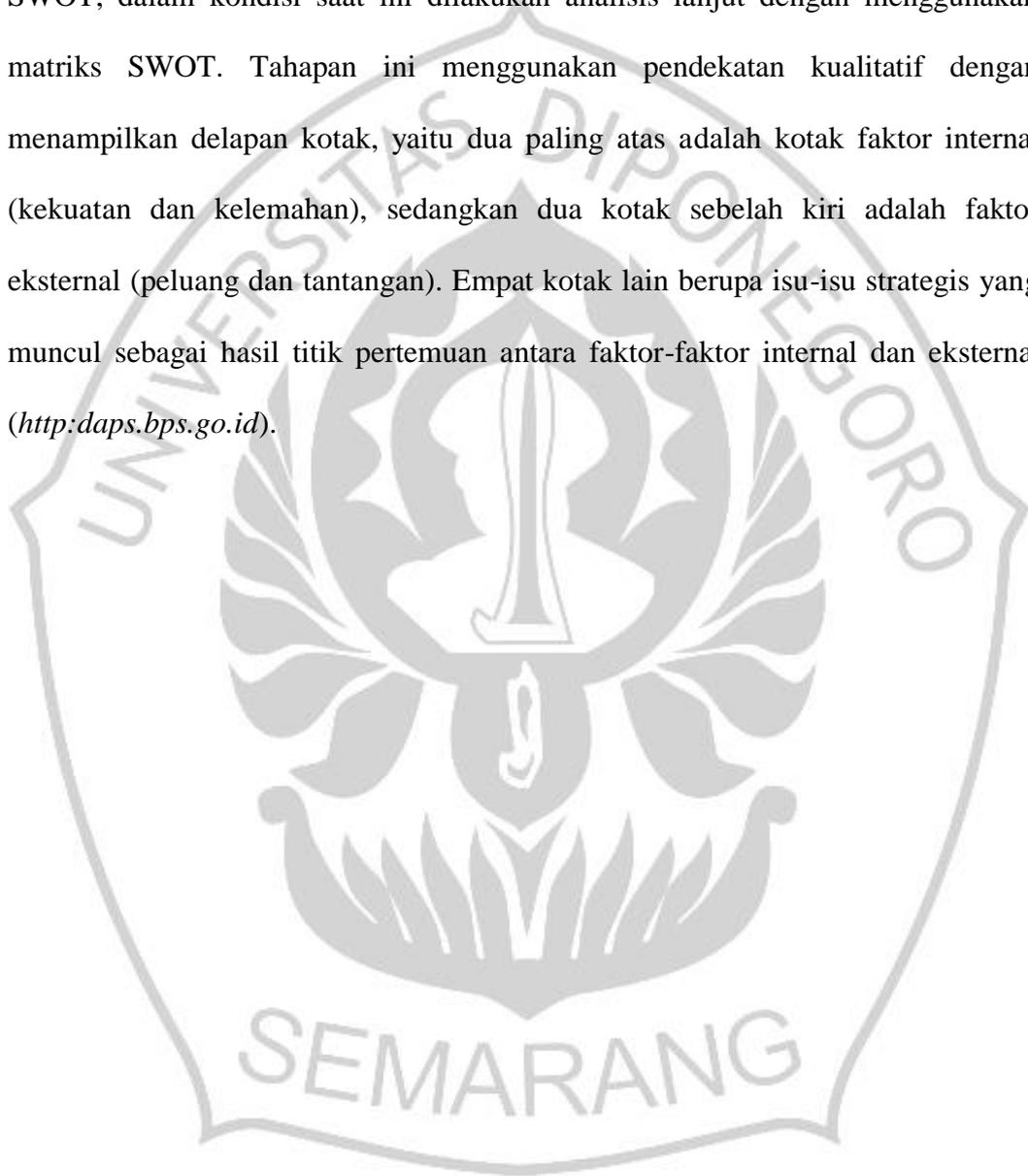
2.10.5. Analisis SWOT

Salah satu model perencanaan strategis untuk pengelolaan Danau Rawapening adalah analisis SWOT (*Strength, Weaknesses, Opportunities dan Threats*) (Syafri dan Albayudi, 2020). Analisis tersebut dapat digunakan untuk menyusun strategi dan program kerja. Analisis SWOT efektif dalam menstrukturisasikan masalah, terutama melakukan analisis atas lingkungan

internal maupun eksternal digunakan untuk menentukan strategi yang dilakukan. Komponen faktor internal yaitu: (1) *Strenght* (S) merupakan kekuatan dan potensi suatu sektor yang digunakan sebagai penunjang pengembangan, (2) *Weakness* (W) merupakan kelemahan/masalah yang dihadapi oleh sektor yang dikembangkan dan dapat menghambat pengembangan potensi yang dimiliki. Komponen faktor eksternal yaitu: (1) *Opportunity* (O) merupakan peluang/kesempatan berasal dari luar yang dapat digunakan bagi pengembangan potensi, (2) *Threats* (T) merupakan ancaman/hambatan berasal dari luar yang dapat mengganggu pengembangan potensi (Dhokhikah dan Koessoemawati, 2007).

Analisis SWOT menggunakan dasar logika yang dapat mengoptimalkan kekuatan dan peluang, tetapi secara bersamaan dapat meminimalisir kelemahan dan ancaman. Agar dapat mengambil keputusan strategis, penting dilakukan analisis faktor-faktor strategis (kekuatan, kelemahan, peluang dan ancaman) pada kondisi yang ada saat ini (Rangkuti, 2013). Analisis SWOT dilakukan dengan pembobotan terhadap setiap komponen pada kekuatan, kelemahan, ancaman dan peluang. Kegiatan pembobotan tersebut adalah cara untuk menentukan besar kecilnya tingkat kekuatan, kelemahan, peluang dan ancaman untuk diperbandingkan antara kekuatan dan kelemahan sebagai kemampuan internal dan antara peluang dan ancaman sebagai faktor eksternal. Hasil perbandingan antara kemampuan internal dan eksternal akan menentukan posisinya pada kuadran SWOT.

Penyusunan strategi pengelolaan Danau Rawapening secara terpadu dan berkelanjutan dengan pendekatan neopaleolimnologi didasarkan pada analisis SWOT, dalam kondisi saat ini dilakukan analisis lanjut dengan menggunakan matriks SWOT. Tahapan ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan menampilkan delapan kotak, yaitu dua paling atas adalah kotak faktor internal (kekuatan dan kelemahan), sedangkan dua kotak sebelah kiri adalah faktor eksternal (peluang dan tantangan). Empat kotak lain berupa isu-isu strategis yang muncul sebagai hasil titik pertemuan antara faktor-faktor internal dan eksternal (<http://daps.bps.go.id>).



SEKOLAH PASCASARJANA