



ILMU LINGKUNGAN

untuk Teknik Sipil dan Arsitektur



Assoc. Prof. Dr. Daniel S. I. Sondakh, SE, MT, EEECS

ILMU LINGKUNGAN (UNTUK TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR)

Assoc. Prof. Dr. Daniel S. I. Sondakh, SE, MT, EEECS



ILMU LINGKUNGAN (UNTUK TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR)

Penulis:

Assoc. Prof. Dr. Daniel S. I. Sondakh, SE, MT, EEECS

Editor:

Syifa Ismayanti

Layouter :

Tim Kreatif PRCI

Cover:

Rusli

Cetakan Pertama : September 2025

Hak Cipta 2025, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

**Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT**

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website : www.rcipress.rcipublisher.org

E-mail : rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2025 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I - : Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2025
; 15,5 x 23 cm
ISBN

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia Nya sehingga buku ajar berjudul "Ilmu Lingkungan untuk Teknik Sipil dan Arsitektur" ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun sebagai panduan komprehensif bagi mahasiswa program studi Teknik Sipil dan Arsitektur untuk memahami hubungan timbal balik yang kompleks antara aktivitas rekayasa sipil dengan lingkungan. Dalam era pembangunan yang pesat, peran seorang insinyur sipil dan arsitek tidak lagi terbatas pada perancangan dan pembangunan infrastruktur yang kuat dan fungsional, tetapi juga harus mampu mengintegrasikan prinsip keberlanjutan dan meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem.

Buku ajar ini dirancang untuk membekali para calon insinyur sipil dengan pengetahuan, wawasan, dan kepekaan terhadap isu-isu lingkungan. Harapan kami, setelah mempelajari buku ini, mahasiswa tidak hanya mampu merancang infrastruktur yang andal secara teknis, tetapi juga menjadi agen perubahan yang bertanggung jawab terhadap kelestarian lingkungan untuk generasi mendatang. Setiap bab dalam buku ini disusun secara sistematis, dimulai dari konsep teoretis, diikuti dengan contoh aplikasi, studi kasus, dan latihan soal untuk memperdalam pemahaman.

Urgensi penulisan buku ini didasari oleh meningkatnya tantangan lingkungan global dan nasional, seperti perubahan iklim, krisis air bersih, pencemaran, dan degradasi lahan. Insinyur sipil berada di garda terdepan dalam membentuk lingkungan binaan, sehingga pemahaman mendalam mengenai ilmu lingkungan menjadi sebuah kompetensi wajib. Buku ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara teori ilmu lingkungan dengan aplikasi praktisnya dalam proyek-proyek konstruksi, mulai dari perencanaan, desain, pelaksanaan, hingga operasional dan pemeliharaan. Materi yang disajikan mencakup konsep dasar ekologi, pengelolaan sumber daya alam, analisis dampak

lingkungan, hingga inovasi teknologi hijau yang relevan dengan disiplin teknik sipil.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan inspirasi dalam penyusunan buku ini. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada rekan rekan sejawat, para ahli di bidang teknik sipil dan lingkungan, serta pihak penerbit yang telah memfasilitasi proses penulisan hingga penerbitan. Secara khusus, terima kasih ditujukan kepada para mahasiswa yang senantiasa menjadi sumber motivasi utama kami untuk terus berkarya dan menyajikan materi pembelajaran yang relevan dan aplikatif. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas dan menjadi salah satu pilar dalam mencetak generasi insinyur sipil yang beretika dan berwawasan lingkungan.

Manado, Agustus 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB 1 ILMU LINGKUNGAN: PERAN TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR	1
A. Definisi dan Ruang Lingkup Ilmu Lingkungan	1
B. Prinsip Dasar Ekosistem dan Keseimbangan	4
C. Pembangunan Berwawasan Lingkungan	5
D. Soal Latihan	8
 BAB 2 EKOLOGI DASAR DAN SISTEM LINGKUNGAN	 10
A. Prinsip Dasar Ekologi	10
B. Aliran Materi dan Energi	16
C. Siklus Biogeokimia	21
D. Keseimbangan dan Suksesi Ekosistem	26
E. Kapasitas Daya Dukung Lingkungan	29
F. Soal Latihan	33
 BAB 3 PENGELOLAAN SUMBER DAYA AIR	 35
A. Sumber Daya Air dan Siklus Hidrologi	35
B. Kuantitas dan Kualitas Air	40
C. Perencanaan dan Pemanfaatan Sumber Daya Air	45
D. Konflik Pengelolaan Air	50
E. Teknologi Konservasi Air	54
F. Soal Latihan	59
 BAB 4 PENGENDALIAN PENCEMARAN AIR	 60
A. Sumber dan Karakteristik Pencemar Air	60
B. Proses Pengolahan Air Limbah	67
C. Pencemaran Perairan Permukaan dan Bawah Tanah	75
D. Dampak Pencemaran Air Terhadap Infrastruktur Sipil	81
E. Kebijakan Pengendalian Pencemaran	88
F. Soal Latihan	93

BAB 5 MANAJEMEN LIMBAH PADAT	94
A. Sumber dan Komposisi Limbah Padat	94
B. Teknologi Pengurangan dan Daur Ulang	99
C. Sistem Pengumpulan dan Pengangkutan	105
D. Teknologi Pengolahan Akhir	109
E. Manajemen Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)	114
F. Soal Latihan	119
 BAB 6 PENCEMARAN UDARA DAN PENGENDALIANNYA	 120
A. Sumber dan Sifat Pencemar Udara	120
B. Dampak Pencemaran Udara	126
C. Metode Pengendalian Pencemaran Udara	130
D. Indeks Kualitas Udara	135
E. Soal Latihan	139
 BAB 7 ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN (AMDAL)	 141
A. Konsep Dasar AMDAL	141
B. Proses dan Prosedur AMDAL	148
C. Partisipasi Publik dan Komisi Penilai	151
D. Soal Latihan	155
 BAB 8 PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN DAN ETIKA LINGKUNGAN	 157
A. Konsep Pembangunan Berkelanjutan	157
B. Penerapan Pembangunan Berkelanjutan	162
C. Material Ramah Lingkungan	168
D. Infrastruktur Berbasis Alam (Nature-Based Solutions)	173
E. Etika Lingkungan	178
F. Soal Latihan	183
 BAB 9 MANAJEMEN RISIKO LINGKUNGAN	 185
A. Identifikasi dan Penilaian Risiko	185
B. Mitigasi dan Adaptasi Terhadap Bencana	192
C. Manajemen Lingkungan Proyek	196
D. Aspek Keuangan dalam Risiko Lingkungan	201
DAFTAR PUSTAKA	206

BAB 1

ILMU LINGKUNGAN: PERAN TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan definisi, ruang lingkup, dan prinsip dasar dalam ilmu lingkungan.
2. Mengidentifikasi keterkaitan ilmu lingkungan dengan berbagai disiplin ilmu lain yang relevan bagi teknik sipil.
3. Menganalisis peran, tanggung jawab, dan etika profesi insinyur sipil dalam konteks pembangunan berkelanjutan.
4. Menjelaskan interaksi fundamental antara proyek pembangunan infrastruktur dengan sistem lingkungan.
5. Menguraikan tantangan lingkungan utama di tingkat global dan nasional yang relevan dengan praktik rekayasa sipil.
6. Memahami kerangka dasar kebijakan dan regulasi lingkungan hidup di Indonesia serta standar internasional.

A. Definisi dan Ruang Lingkup Ilmu Lingkungan

Ilmu lingkungan merupakan bidang studi yang sangat luas dan bersifat interdisipliner, yang secara fundamental mempelajari interaksi antara manusia dan lingkungan (Khyzhniak et al., 2021). Disiplin ini tidak hanya berfokus pada komponen alamiah seperti ekosistem, siklus biogeokimia, dan keanekaragaman hayati, tetapi juga secara mendalam menganalisis bagaimana aktivitas sosial, ekonomi, dan teknologi manusia memengaruhi serta dipengaruhi oleh sistem tersebut. Ruang lingkungannya mencakup skala yang beragam, mulai dari interaksi mikroorganisme dalam tanah hingga fenomena global seperti perubahan iklim. Tujuan utamanya adalah untuk memahami proses-proses lingkungan, mengidentifikasi masalah, dan mengembangkan solusi berbasis ilmiah untuk pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan.

(Masters & Ela, 2017). Bagi insinyur sipil, pemahaman ini menjadi dasar untuk merancang infrastruktur yang selaras dengan alam.

Pendekatan dalam ilmu lingkungan seringkali bersifat holistik, artinya memandang sistem lingkungan sebagai satu kesatuan yang utuh di mana setiap komponen saling terhubung dan memengaruhi. Perubahan pada satu komponen, misalnya pembangunan bendungan di sebuah sungai, dapat memicu serangkaian dampak berantai pada komponen lain, seperti perubahan sedimentasi, ekosistem akuatik, hingga sosial ekonomi masyarakat sekitar (Wu et al., 2020). Oleh karena itu, analisis dalam ilmu lingkungan tidak dapat dilakukan secara parsial. Disiplin ini mengintegrasikan pengetahuan dari berbagai cabang ilmu, termasuk ekologi, kimia, geologi, hidrologi, sosiologi, dan ekonomi, untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai suatu isu lingkungan.

Prinsip utama yang mendasari ilmu lingkungan adalah konsep daya dukung (*carrying capacity*) dan daya lenting (*resilience*) ekosistem. Daya dukung merujuk pada kapasitas maksimum suatu lingkungan untuk menopang populasi atau aktivitas tertentu tanpa mengalami degradasi permanen. Sementara itu, daya lenting adalah kemampuan ekosistem untuk pulih kembali setelah mengalami gangguan (Cole, 2021). Proyek rekayasa sipil yang tidak mempertimbangkan kedua prinsip ini berisiko melampaui batas kemampuan lingkungan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan permanen dan bahkan membahayakan keberlanjutan proyek itu sendiri.

Dengan demikian, ilmu lingkungan menyediakan kerangka kerja ilmiah bagi para profesional, termasuk insinyur sipil, untuk membuat keputusan yang lebih baik. Ilmu ini menawarkan alat dan metode untuk memprediksi dampak, merancang strategi mitigasi, dan melakukan pemantauan terhadap kinerja lingkungan dari suatu kegiatan. Pemahaman yang kuat terhadap konsep konsep dasar ilmu lingkungan memungkinkan seorang insinyur untuk beralih dari pendekatan konvensional yang reaktif terhadap masalah lingkungan menjadi pendekatan proaktif yang mengintegrasikan pertimbangan lingkungan sejak tahap paling

awal dari siklus hidup proyek (Barsukova, 2023). Hal ini merupakan kunci untuk mewujudkan pembangunan infrastruktur yang tidak hanya melayani kebutuhan manusia saat ini tetapi juga menjaga kelestarian lingkungan untuk generasi mendatang.

Definisi dan Ruang Lingkup. Ilmu lingkungan secara formal didefinisikan sebagai studi sistematis tentang lingkungan hidup dan posisi manusia di dalamnya. Definisi ini mencakup penyelidikan terhadap interaksi antara sistem fisik, biologis, dan sosial, serta analisis dampak aktivitas manusia terhadap sistem tersebut (Cunningham & Cunningham, 2021). Ini adalah ilmu terapan yang bertujuan untuk memberikan solusi praktis terhadap berbagai masalah lingkungan yang kita hadapi. Berbeda dengan ekologi murni yang lebih fokus pada interaksi antar organisme dan lingkungannya, ilmu lingkungan secara eksplisit memasukkan dimensi manusia, termasuk aspek sosial, ekonomi, politik, dan etika, sebagai komponen sentral dalam analisisnya (Sadava et al., 2020).

Ruang lingkup ilmu lingkungan sangatlah luas dan mencakup berbagai tingkatan organisasi, mulai dari skala molekuler hingga skala biosfer. Pada level mikro, ilmuwan lingkungan dapat mempelajari bagaimana polutan seperti logam berat berinteraksi dengan enzim dalam tubuh organisme. Pada skala lanskap, fokusnya bisa pada bagaimana pembangunan jalan memengaruhi pola pergerakan satwa liar. Sedangkan pada skala global, ilmuwan lingkungan mengkaji fenomena seperti perubahan iklim, penipisan lapisan ozon, dan penyebaran polutan lintas batas negara (Withgott & Laposata, 2018). Oleh karena itu, studi ini menuntut pendekatan interdisipliner yang kuat untuk dapat memahami dan mengatasi kompleksitas permasalahan yang ada.

Dalam konteks teknik sipil, ruang lingkup ilmu lingkungan yang paling relevan meliputi pengelolaan sumber daya alam seperti air dan tanah, pengendalian pencemaran air, udara, dan tanah, manajemen limbah padat dan berbahaya, serta analisis dampak lingkungan dari proyek pembangunan. Sebagai contoh, seorang insinyur sipil yang merancang sistem penyediaan air

bersih harus memahami siklus hidrologi, standar kualitas air, dan dampak ekologis dari pengambilan air (Revelle et al., 1996). Demikian pula, saat merancang sebuah tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah, pemahaman tentang dekomposisi limbah, produksi gas metana, dan potensi pencemaran air lindi menjadi sangat krusial. Ini menunjukkan betapa eratnya integrasi antara prinsip rekayasa dengan pengetahuan lingkungan.

B. Prinsip Dasar Ekosistem dan Keseimbangan

Ekosistem didefinisikan sebagai suatu sistem ekologi yang terbentuk oleh hubungan timbal balik tak terpisahkan antara makhluk hidup dengan lingkungannya. Konsep ini mencakup semua organisme (komponen biotik) di suatu area beserta faktor fisik (komponen abiotik) yang berinteraksi, seperti cahaya matahari, air, tanah, dan iklim (Chapin et al., 2011). Prinsip fundamental ekosistem adalah adanya aliran energi dan siklus materi. Energi mengalir secara searah, dari matahari ke produsen (tumbuhan), kemudian ke konsumen (herbivora, karnivora), dan akhirnya dilepaskan sebagai panas. Sebaliknya, materi seperti air, karbon, dan nitrogen didaur ulang secara terus menerus dalam siklus biogeokimia. Pemahaman ini krusial bagi insinyur sipil karena setiap proyek konstruksi pada dasarnya mengintervensi atau mengubah aliran energi dan siklus materi ini.

Setiap ekosistem memiliki struktur dan fungsi yang khas. Strukturnya terdiri dari keanekaragaman spesies, distribusi organisme, dan jumlah biomassa. Fungsinya mencakup proses proses vital seperti produksi primer (fotosintesis), dekomposisi, dan siklus nutrisi. Ekosistem yang sehat cenderung berada dalam keadaan keseimbangan dinamis, yang disebut homeostasis (Odum & Barrett, 2005). Ini berarti, meskipun terjadi fluktuasi internal dan gangguan eksternal minor, sistem memiliki mekanisme umpan balik untuk menjaga stabilitasnya. Misalnya, peningkatan populasi mangsa akan diikuti oleh peningkatan populasi pemangsa, yang pada gilirannya akan mengendalikan kembali populasi mangsa.

Konsep keseimbangan ini sangat terkait dengan resiliensi dan resistensi ekosistem. Resistensi adalah kemampuan ekosistem untuk menahan gangguan tanpa mengalami perubahan signifikan, sementara resiliensi adalah kemampuan untuk pulih dengan cepat setelah gangguan terjadi (Gunderson, 2000). Proyek rekayasa sipil seringkali bertindak sebagai gangguan besar bagi ekosistem. Pembangunan bendungan, misalnya, secara drastis mengubah ekosistem sungai menjadi ekosistem danau. Memahami ambang batas (tipping point) di mana suatu ekosistem kehilangan resiliensinya dan beralih ke kondisi baru yang seringkali tidak diinginkan adalah pengetahuan penting bagi perencana untuk merancang proyek yang meminimalkan kerusakan permanen.

C. Pembangunan Berwawasan Lingkungan

Menghadapi berbagai dampak negatif tersebut, muncullah konsep pembangunan yang berwawasan lingkungan, atau yang sering disebut sebagai pembangunan berkelanjutan. Konsep ini secara fundamental mengubah cara pandang terhadap pembangunan, dari yang semula bersifat eksploitatif menjadi restoratif dan integratif (Kates et al., 2005). Pembangunan berwawasan lingkungan bertujuan untuk menyelaraskan tujuan pembangunan ekonomi dan sosial dengan imperatif pelestarian fungsi ekosistem dan sumber daya alam. Ini bukan berarti menghentikan pembangunan, melainkan mencari cara-cara inovatif untuk membangun dengan lebih cerdas, efisien, dan ramah lingkungan.

Prinsip utama dari konsep ini adalah pencegahan polusi dan minimalisasi dampak di sumbernya, bukan penanganan di akhir (end of pipe treatment). Ini diwujudkan melalui penerapan hierarki pengelolaan lingkungan: reduce (mengurangi kebutuhan akan sumber daya dan energi), reuse (menggunakan kembali material atau komponen), dan recycle (mendaur ulang limbah menjadi produk baru). Dalam konteks rekayasa sipil, ini bisa berarti merancang bangunan yang membutuhkan lebih sedikit energi untuk pendinginan, menggunakan kembali elemen

bangunan dari struktur yang dibongkar, atau memanfaatkan agregat daur ulang dalam campuran beton (Gálvez Martos et al., 2018).

Konsep ini juga menekankan pentingnya bekerja selaras dengan proses alam, yang dikenal sebagai pendekatan biomimikri atau solusi berbasis alam (*nature-based solutions*). Alih alih mengganti fungsi ekosistem dengan solusi rekayasa yang mahal dan padat energi, pendekatan ini justru memanfaatkan atau meniru proses alam untuk mencapai tujuan rekayasa. Contohnya adalah restorasi dataran banjir alami untuk mengelola banjir, bukan hanya membangun tanggul yang lebih tinggi, atau menciptakan taman kota yang luas untuk mendinginkan suhu udara secara alami, bukan hanya mengandalkan pendingin udara (Cohen Shacham et al., 2016). Pendekatan ini seringkali lebih hemat biaya, resilien, dan memberikan manfaat ganda, seperti peningkatan keanekaragaman hayati dan kualitas hidup.

Analisis studi kasus nyata memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana interaksi antara pembangunan dan lingkungan dapat bermanifestasi. Salah satu contoh klasik interaksi negatif adalah pembangunan Bendungan Tiga Ngarai (*Three Gorges Dam*) di Tiongkok. Meskipun berhasil menyediakan tenaga air dalam jumlah besar dan mengendalikan banjir di Sungai Yangtze, proyek ini menyebabkan dampak ekologis dan sosial yang masif. Dampaknya termasuk relokasi lebih dari satu juta penduduk, tergenangnya situs arkeologi penting, perubahan drastis pada ekosistem sungai yang mengancam spesies langka seperti lumba lumba baiji (yang kini dianggap punah), dan peningkatan risiko tanah longsor di sekitar waduk (Stone, 2008). Kasus ini menjadi pelajaran penting tentang pentingnya AMDAL yang komprehensif dan pertimbangan yang cermat terhadap *trade off*.

Sebaliknya, ada banyak contoh interaksi positif di mana proyek infrastruktur dirancang untuk memberikan manfaat lingkungan. Di Indonesia, pembangunan Ekowisata Mangrove di Wonorejo, Surabaya, dapat menjadi contoh interaksi yang lebih positif. Alih alih melakukan reklamasi untuk pembangunan komersial, pemerintah kota mengembangkan kawasan mangrove yang sudah ada menjadi destinasi wisata edukasi. Pembangunan infrastruktur seperti jembatan kayu dan jalur pejalan kaki dilakukan dengan desain yang seminimal mungkin mengganggu ekosistem. Hasilnya, fungsi ekologis mangrove sebagai pelindung pantai dan habitat biota laut tetap terjaga, sementara masyarakat mendapatkan manfaat ekonomi dari pariwisata dan peningkatan kesadaran lingkungan (Pamungkas et al., 2021). Kasus kasus ini menunjukkan bahwa dengan perencanaan yang tepat, pembangunan dan konservasi lingkungan dapat berjalan beriringan.

Penilaian Siklus Hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah metodologi sistematis untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sebuah produk, proses, atau layanan sepanjang seluruh siklus hidupnya. Pendekatan ini sering disebut sebagai analisis "dari buaian hingga liang lahat" (*from cradle to grave*) (ISO 14040, 2006). Untuk proyek infrastruktur, siklus hidup ini mencakup tahap ekstraksi dan pemrosesan bahan baku, tahap konstruksi, tahap operasional dan pemeliharaan, hingga tahap pembongkaran (dekomisioning) dan pengelolaan limbah di akhir masa layannya. LCA bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi semua input (energi, material) dan output (emisi, limbah) pada setiap tahapan tersebut.

Proses LCA terdiri dari empat fase utama: (1) penetapan tujuan dan ruang lingkup, (2) analisis inventaris (mengumpulkan data input dan output), (3) penilaian dampak (menghubungkan data inventaris dengan indikator dampak lingkungan seperti potensi pemanasan global, pengasaman, atau eutrofikasi), dan (4) interpretasi hasil. Hasil dari LCA memungkinkan para insinyur untuk mengidentifikasi "titik panas" (*hotspots*), yaitu tahapan atau komponen dalam siklus hidup proyek yang memberikan

kontribusi terbesar terhadap total dampak lingkungan (Finnveden et al., 2009). Informasi ini sangat berharga untuk memprioritaskan upaya perbaikan.

Penerapan LCA dalam teknik sipil dapat mengubah cara pandang dalam pengambilan keputusan desain. Sebagai contoh, sebuah material mungkin memiliki dampak yang rendah pada tahap produksi tetapi membutuhkan pemeliharaan yang intensif dan sulit didaur ulang di akhir masa pakainya. LCA akan mengungkap dampak totalnya, yang mungkin lebih tinggi dari material alternatif yang dampak produksinya sedikit lebih tinggi tetapi sangat tahan lama dan mudah didaur ulang. Dengan demikian, LCA mendorong pemikiran jangka panjang dan holistik, membantu insinyur sipil untuk menghindari pergeseran beban lingkungan dari satu tahap siklus hidup ke tahap lain atau dari satu jenis dampak ke jenis dampak lainnya, menuju solusi yang benar benar optimal secara lingkungan (Cabeza et al., 2014).

D. Soal Latihan

1. Jelaskan mengapa ilmu lingkungan dianggap sebagai disiplin yang bersifat interdisipliner. Berikan contoh spesifik bagaimana pengetahuan dari ekologi, kimia, dan geologi dibutuhkan secara bersamaan dalam merancang sebuah Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) saniter.
2. Uraikan peran dan tanggung jawab etis seorang insinyur sipil dalam konteks pembangunan berkelanjutan. Mengapa kepatuhan terhadap regulasi minimum saja dianggap tidak cukup dalam etika profesi modern?
3. Analisislah interaksi dua arah antara proyek pembangunan jalan tol di daerah perbukitan dengan lingkungan sekitarnya. Sebutkan minimal tiga dampak dari proyek terhadap lingkungan, dan tiga pengaruh dari kondisi lingkungan terhadap desain jalan tol tersebut.

4. Perubahan iklim menimbulkan tantangan ganda bagi insinyur sipil, yaitu mitigasi dan adaptasi. Jelaskan perbedaan kedua konsep tersebut dan berikan masing masing dua contoh konkret tindakan yang dapat dilakukan oleh insinyur sipil untuk mitigasi dan adaptasi dalam sektor konstruksi.
5. Bandingkan peran pemerintah, sektor swasta, dan organisasi non pemerintah (LSM) dalam upaya perlindungan lingkungan di Indonesia. Menurut Anda, bagaimana sinergi antara ketiga pihak ini dapat dioptimalkan untuk mengatasi masalah seperti pencemaran sungai?

BAB 2

EKOLOGI DASAR DAN SISTEM LINGKUNGAN

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan hierarki organisasi ekologi mulai dari populasi, komunitas, hingga biosfer.
2. Menganalisis struktur dan komponen fungsional yang membentuk sebuah ekosistem.
3. Menggambarkan proses aliran energi dan materi melalui rantai dan jaring makanan.
4. Menjelaskan mekanisme siklus biogeokimia utama (air, karbon, nitrogen) dan relevansinya bagi teknik sipil.
5. Membedakan konsep keseimbangan, resiliensi, dan suksesi dalam dinamika ekosistem.
6. Menerapkan konsep daya dukung lingkungan dalam konteks perencanaan pembangunan infrastruktur.
7. Mengidentifikasi peran insinyur sipil dalam upaya restorasi ekosistem yang terdegradasi.

A. Prinsip Dasar Ekologi

Ekologi adalah cabang ilmu biologi yang secara spesifik mengkaji interaksi antara organisme dengan lingkungannya, baik lingkungan biotik (organisme lain) maupun abiotik (faktor fisik dan kimia). Istilah ini berasal dari kata Yunani *oikos* (rumah) dan *logos* (ilmu), sehingga secara harfiah dapat diartikan sebagai ilmu tentang rumah tangga alam (Cain et al., 2021). Prinsip dasar ekologi adalah bahwa semua komponen dalam suatu sistem lingkungan saling bergantung. Tidak ada satu organisme atau proses pun yang berdiri sendiri. Perubahan pada satu elemen akan memicu serangkaian efek berantai yang dapat menyebar ke seluruh sistem. Pemahaman ini krusial bagi insinyur sipil, karena

setiap proyek yang dibangun pada dasarnya adalah pengenalan elemen baru atau perubahan drastis pada sistem yang sudah ada.

Studi dalam ekologi diorganisasikan dalam sebuah hierarki, mulai dari tingkat individu, populasi (kelompok individu sejenis), komunitas (kumpulan berbagai populasi), ekosistem (komunitas beserta lingkungan abiotiknya), lanskap (mosaik dari berbagai ekosistem), hingga biosfer (keseluruhan bagian bumi yang dihuni kehidupan). Seorang insinyur sipil mungkin berinteraksi pada semua level ini. Misalnya, desain sebuah gorong gorong jalan dapat memengaruhi pergerakan individu satwa, pembangunan perumahan dapat mengisolasi sebuah populasi, dan kebijakan pembangunan regional dapat mengubah seluruh lanskap (Turner & Gardner, 2015). Oleh karena itu, kemampuan untuk berpikir dalam berbagai skala ekologis ini sangat penting.

Fokus utama ekologi adalah untuk memahami distribusi dan kelimpahan organisme. Mengapa suatu spesies ditemukan di satu tempat tetapi tidak di tempat lain? Faktor apa yang mengontrol jumlah individu dalam suatu populasi? Jawaban atas pertanyaan pertanyaan ini terletak pada interaksi kompleks antara kebutuhan organisme dengan kondisi lingkungan serta interaksinya dengan spesies lain. Bagi insinyur sipil, pengetahuan ini dapat membantu dalam memprediksi spesies apa yang akan terkena dampak oleh sebuah proyek dan bagaimana mitigasi dapat dirancang secara efektif. Misalnya, memahami kebutuhan habitat spesifik dari suatu jenis burung air akan memandu desain restorasi lahan basah yang berhasil (Chapin et al., 2011).

Ekosistem, sebagai unit fungsional dasar dalam ekologi, memiliki dua proses utama yang menjadi fondasinya yaitu aliran energi dan daur materi. Energi, yang sebagian besar berasal dari matahari, mengalir secara satu arah melalui sistem, dari produsen ke konsumen dan akhirnya hilang sebagai panas. Sebaliknya, materi atau nutrien (seperti air, karbon, nitrogen) tidak pernah hilang dari sistem tetapi didaur ulang secara terus menerus (Odum & Barrett, 2005). Aktivitas rekayasa sipil seringkali secara fundamental mengubah kedua proses ini, misalnya dengan menutup permukaan tanah dengan beton yang menghalangi daur

air atau dengan melepaskan sejumlah besar karbon ke atmosfer yang mengganggu daur karbon global.

Analogi: Sebuah ekosistem dapat dianalogikan sebagai sebuah kota yang kompleks dan berfungsi. Tumbuhan hijau (produsen) adalah "pabrik makanan dan pembangkit listrik" kota tersebut, yang mengubah energi matahari menjadi energi yang dapat digunakan. Hewan herbivora dan karnivora (konsumen) adalah "penduduk" yang mengonsumsi produk dari pabrik tersebut. Bakteri dan jamur (dekomposer) adalah "departemen sanitasi dan daur ulang" yang mengolah sampah dan mengembalikan bahan baku ke sistem. Faktor abiotik seperti sungai, jalan, dan iklim adalah "infrastruktur dan layanan publik" yang mendukung semua aktivitas. Seorang insinyur sipil yang membangun proyek baru di "kota" ini harus memahami bagaimana semua komponen tersebut bekerja sama agar tidak menyebabkan "kemacetan lalu lintas", "pemadaman listrik", atau "krisis sampah" dalam ekosistem.

Populasi dalam ekologi didefinisikan sebagai sekelompok individu dari spesies yang sama yang hidup di wilayah geografis tertentu pada waktu yang sama dan memiliki kemampuan untuk saling bereproduksi. Studi tentang populasi, atau ekologi populasi, berfokus pada dinamika ukuran populasi (penambahan melalui kelahiran dan imigrasi, serta pengurangan melalui kematian dan emigrasi) dan faktor-faktor yang memengaruhinya (Gotelli, 2008). Bagi seorang insinyur sipil, memahami dinamika populasi menjadi relevan saat proyeknya dapat secara langsung memengaruhi faktor-faktor tersebut. Pembangunan jalan raya, misalnya, dapat menjadi penghalang fisik yang membagi satu populasi besar menjadi dua populasi kecil yang terisolasi, yang dapat meningkatkan risiko kepunahan lokal karena perkawinan sedarah dan kerentanan terhadap gangguan.

Tingkat organisasi berikutnya adalah komunitas, yang terdiri dari semua populasi dari spesies yang berbeda yang hidup dan berinteraksi dalam suatu area tertentu. Ekologi komunitas mempelajari sifat dan pola interaksi antarspesies, seperti persaingan, predasi, herbivori, dan simbiosis, serta bagaimana interaksi ini membentuk struktur komunitas (Morin, 2011). Proyek infrastruktur dapat secara drastis mengubah struktur komunitas. Misalnya, pengalihan aliran air untuk proyek irigasi dapat mengurangi ketersediaan air di hilir, yang akan menguntungkan spesies tumbuhan yang tahan kekeringan tetapi merugikan spesies yang membutuhkan banyak air. Perubahan pada komunitas tumbuhan ini selanjutnya akan memengaruhi hewan-hewan yang bergantung padanya, menciptakan efek riak di seluruh komunitas.

Tingkat organisasi tertinggi adalah biosfer, yang mencakup semua ekosistem di planet Bumi. Biosfer adalah sistem ekologis global yang mengintegrasikan semua makhluk hidup dan hubungan mereka, termasuk interaksinya dengan litosfer (batuan), hidrosfer (air), dan atmosfer (udara). Pada skala ini, aktivitas manusia, termasuk rekayasa sipil, dilihat sebagai kekuatan global yang mampu mengubah proses fundamental bumi. Emisi gas rumah kaca dari produksi semen dan penggunaan bahan bakar fosil dalam konstruksi di seluruh dunia secara kumulatif berkontribusi terhadap perubahan iklim global, yang merupakan perubahan pada tingkat biosfer (Rockström et al., 2009). Ini menunjukkan bahwa tindakan rekayasa yang tampaknya lokal dapat memiliki konsekuensi yang menjangkau seluruh planet, menekankan tanggung jawab global yang diemban oleh profesi ini.

Setiap ekosistem, baik itu hutan hujan, terumbu karang, atau bahkan taman kota, memiliki struktur dasar yang terdiri dari dua jenis komponen utama yaitu komponen abiotik dan komponen biotik. Komponen abiotik adalah faktor non hidup yang mencakup semua elemen fisik dan kimia di lingkungan. Ini termasuk energi matahari (sumber energi utama), suhu, air, kelembapan udara, komposisi atmosfer, serta jenis tanah atau

substrat beserta kandungan mineralnya (Smith & Smith, 2015). Komponen abiotik ini menentukan jenis organisme apa yang dapat hidup di suatu ekosistem. Insinyur sipil secara langsung memanipulasi komponen abiotik ini, misalnya dengan mengubah topografi, memodifikasi pola drainase air, atau menciptakan iklim mikro baru melalui pembangunan gedung tinggi.

Komponen biotik adalah semua organisme hidup dalam ekosistem, yang dapat dikelompokkan berdasarkan peran fungsionalnya dalam aliran energi, atau tingkat trofik. Tingkat pertama adalah produsen atau autotrof, yaitu organisme (terutama tumbuhan hijau, alga, dan beberapa bakteri) yang mampu menghasilkan makanannya sendiri melalui fotosintesis, mengubah energi cahaya menjadi energi kimia. Produsen membentuk dasar dari hampir semua ekosistem di bumi (Begon et al., 2006). Proyek konstruksi yang menghilangkan vegetasi secara langsung mengurangi kapasitas produksi primer suatu ekosistem, yang merupakan fondasi bagi seluruh jaring makanan.

Tingkatan selanjutnya adalah konsumen atau heterotrof, yaitu organisme yang mendapatkan energi dengan memakan organisme lain. Konsumen primer (herbivora) memakan produsen, konsumen sekunder (karnivora) memakan herbivora, dan konsumen tersier (karnivora puncak) memakan karnivora lain. Kelompok terakhir dalam komponen biotik adalah dekomposer atau pengurai (terutama bakteri dan jamur). Peran mereka sangat krusial karena mereka menguraikan bahan organik dari organisme mati (baik tumbuhan maupun hewan) dan produk limbahnya, melepaskan nutrisi sederhana kembali ke tanah atau air sehingga dapat digunakan kembali oleh produsen (Swift et al., 1979). Gangguan pada populasi dekomposer, misalnya melalui kontaminasi tanah oleh bahan kimia konstruksi, dapat secara serius menghambat proses daur ulang nutrisi dan menurunkan kesuburan ekosistem.

Simbiosis, Predasi. Interaksi antar organisme merupakan inti dari dinamika ekosistem dan menjadi pendorong utama evolusi. Interaksi ini dapat diklasifikasikan berdasarkan dampaknya terhadap pihak-pihak yang terlibat. Salah satu interaksi yang paling dikenal adalah predasi, di mana satu organisme (predator) memangsa dan memakan organisme lain (mangsa). Predasi memainkan peran penting dalam mengatur ukuran populasi mangsa dan mendorong evolusi adaptasi pertahanan pada mangsa (seperti kamuflase atau racun) serta adaptasi penyerangan pada predator (seperti kecepatan atau cakar yang tajam). Pembangunan infrastruktur dapat mengganggu hubungan predasi ini, misalnya dengan menciptakan koridor (seperti jalan) yang memudahkan predator untuk mengakses area mangsa yang sebelumnya terpencil.

Interaksi penting lainnya adalah kompetisi, yang terjadi ketika dua atau lebih organisme membutuhkan sumber daya yang sama yang ketersediaannya terbatas, seperti makanan, air, atau ruang. Kompetisi dapat terjadi antar individu dari spesies yang sama (intraspesifik) atau antar spesies yang berbeda (interspesifik). Kompetisi yang kuat dapat menyebabkan salah satu spesies tersingkir dari suatu habitat, sebuah prinsip yang dikenal sebagai eksklusi kompetitif (Hardin, 1960). Proyek restorasi lingkungan yang dilakukan oleh insinyur sipil harus mempertimbangkan dinamika kompetisi ini, misalnya dengan memastikan bahwa spesies asli yang ditanam kembali tidak kalah bersaing dengan spesies invasif yang agresif.

Simbiosis adalah istilah luas untuk interaksi jangka panjang antara dua spesies yang berbeda yang hidup berdekatan. Simbiosis dapat berupa mutualisme, di mana kedua spesies mendapat manfaat (contoh: lebah dan bunga), komensalisme, di mana satu pihak diuntungkan sementara yang lain tidak terpengaruh (contoh: anggrek yang menempel di pohon), atau parasitisme, di mana satu pihak (parasit) diuntungkan dengan merugikan pihak lain (inang). Banyak proses ekosistem fundamental bergantung pada interaksi mutualistik, seperti penyerbukan tanaman atau fiksasi nitrogen oleh bakteri di akar

tanaman kacang kacangan (Bronstein, 2015). Kerusakan lingkungan akibat proyek konstruksi dapat menghancurkan hubungan simbiosis yang rapuh ini, yang dampaknya seringkali tidak terlihat secara langsung tetapi bisa sangat merusak dalam jangka panjang.

B. Aliran Materi dan Energi

Salah satu prinsip paling fundamental dalam ekologi adalah bahwa ekosistem berjalan berdasarkan dua proses yang saling terkait namun berbeda secara konseptual yaitu aliran energi dan siklus materi. Energi mengalir *melalui* ekosistem, sementara materi berputar *di dalam* ekosistem. Aliran energi bersifat searah atau linear. Energi memasuki ekosistem, sebagian besar dalam bentuk radiasi matahari, ditangkap oleh produsen (tumbuhan), kemudian berpindah dari satu tingkat trofik ke tingkat trofik berikutnya ketika satu organisme memakan yang lain, dan pada setiap langkah, sebagian besar energi hilang sebagai panas sesuai dengan hukum kedua termodinamika (Lindeman, 1942). Energi ini tidak dapat didaur ulang. Akibatnya, ekosistem membutuhkan pasokan energi eksternal yang terus menerus, yaitu dari matahari, untuk dapat terus berfungsi.

Sebaliknya, materi yang menyusun organisme, seperti atom karbon, nitrogen, dan fosfor, bersifat terbatas di biosfer. Oleh karena itu, materi harus didaur ulang secara efisien agar kehidupan dapat berkelanjutan. Proses daur ulang ini dikenal sebagai siklus biogeokimia, yang akan dibahas lebih detail pada subbab berikutnya. Dekomposer memainkan peran yang sangat vital dalam proses ini dengan memecah materi organik kompleks dari organisme mati menjadi senyawa anorganik sederhana yang dapat diserap dan digunakan kembali oleh produsen (Cebrian, 1999). Intervensi rekayasa sipil, seperti pembangunan TPA yang mengubur materi organik dalam kondisi anaerobik, dapat mengganggu siklus alami ini, menghambat kembalinya nutrisi ke ekosistem.

Pemahaman tentang dinamika ini penting bagi insinyur sipil. Misalnya, saat merancang proyek restorasi lahan, mereka tidak hanya perlu menanam vegetasi (memulihkan komponen produsen), tetapi juga harus memastikan kondisi tanah mendukung kehidupan dekomposer untuk memulai kembali siklus nutrisi. Dalam konteks yang lebih luas, ketergantungan ekosistem pada aliran energi matahari menggarisbawahi pentingnya transisi ke sumber energi terbarukan. Proyek infrastruktur yang mengandalkan bahan bakar fosil pada dasarnya melepaskan energi matahari purba yang tersimpan, namun dengan konsekuensi pelepasan karbon yang mengganggu keseimbangan iklim global (Schlesinger & Bernhardt, 2020).

Koneksi antara aliran energi dan materi sangat erat. Energi dibutuhkan untuk mendorong siklus materi. Misalnya, energi kimia yang tersimpan dalam biomassa digunakan oleh organisme untuk mencari makan, tumbuh, dan bereproduksi, yang semuanya merupakan bagian dari pergerakan materi melalui jaring makanan. Memahami bagaimana aktivitas pembangunan dapat memengaruhi salah satu dari proses ini (misalnya, mengurangi input energi dengan menebang pohon atau menghambat siklus materi dengan mencemari tanah) sangat penting untuk memprediksi dampak ekologis secara keseluruhan. Pendekatan rekayasa yang berkelanjutan akan berupaya merancang sistem yang berintegrasi dengan aliran energi dan siklus materi alami, bukan melawannya.

Analogi: Proses aliran energi dan materi dalam ekosistem dapat dianalogikan dengan operasional sebuah restoran. Aliran energi adalah seperti uang. Pemasukan uang (sinar matahari) datang setiap hari, digunakan untuk membeli bahan baku, membayar gaji, dan biaya operasional lainnya (proses metabolisme). Sebagian "uang" berpindah tangan dari pemasok ke restoran, lalu ke karyawan. Di setiap transaksi, ada "pajak" atau "biaya" yang hilang (panas). Pada akhirnya, uang tersebut keluar dari sistem restoran dan tidak bisa didaur ulang di dalamnya. Restoran butuh pemasukan uang baru setiap hari untuk bertahan. Sementara itu, siklus materi adalah seperti peralatan dapur

(piring, panci, sendok). Peralatan ini (atom karbon, nitrogen) digunakan berulang kali. Setelah dipakai, piring kotor (materi organik mati) akan dicuci (dekomposisi) dan siap digunakan kembali untuk menyajikan makanan baru (diserap produsen). Jika piring piring ini dibuang dan tidak dicuci, restoran akan kehabisan peralatan dan tidak bisa beroperasi.

Rantai dan Jaring Makanan. Aliran energi dan nutrisi melalui komponen biotik suatu ekosistem digambarkan melalui konsep rantai makanan dan jaring makanan. Rantai makanan adalah representasi linear sederhana dari jalur energi, menunjukkan urutan organisme di mana satu organisme menjadi makanan bagi organisme berikutnya. Rantai makanan selalu dimulai dengan produsen (misalnya, rumput), diikuti oleh konsumen primer (misalnya, belalang yang memakan rumput), kemudian konsumen sekunder (misalnya, katak yang memakan belalang), konsumen tersier (misalnya, ular yang memakan katak), dan seterusnya, hingga konsumen puncak (misalnya, elang yang memakan ular) (Elton, 1927). Setiap langkah dalam rantai makanan ini disebut tingkat trofik.

Namun, di alam, hubungan makan memakan jarang sekali sesederhana rantai linear. Kebanyakan hewan memakan lebih dari satu jenis makanan, dan sebaliknya, kebanyakan organisme dimakan oleh lebih dari satu jenis predator. Oleh karena itu, representasi yang lebih realistis dari hubungan trofik dalam suatu komunitas adalah jaring makanan, yang merupakan gabungan dari banyak rantai makanan yang saling berhubungan (Pimm, 1982). Jaring makanan menunjukkan kompleksitas interaksi dan berbagai jalur alternatif bagi aliran energi. Kompleksitas jaring makanan seringkali dikaitkan dengan stabilitas ekosistem. Teori menyatakan bahwa ekosistem dengan jaring makanan yang lebih kompleks cenderung lebih stabil karena jika satu spesies mangsa menurun jumlahnya, predatornya memiliki sumber makanan alternatif lain.

Proyek rekayasa sipil dapat secara signifikan mengganggu jaring makanan. Pembangunan bendungan, misalnya, dapat menghalangi migrasi ikan salmon, yang merupakan sumber makanan utama bagi beruang, elang, dan mamalia lainnya di ekosistem darat sekitarnya. Hilangnya salmon ini dapat menyebabkan penurunan populasi para predatornya dan mengubah seluruh struktur jaring makanan (Helfield & Naiman, 2001). Demikian pula, penggunaan pestisida di area sekitar proyek konstruksi dapat membunuh serangga (konsumen primer), yang akan berdampak pada populasi burung pemakan serangga (konsumen sekunder). Pemahaman tentang jaring makanan lokal sangat penting dalam AMDAL untuk mengidentifikasi potensi dampak tidak langsung dan berantai dari suatu proyek.

Efisiensi Transfer Energi dalam Ekosistem. Salah satu aturan paling penting yang mengatur aliran energi adalah bahwa transfer energi dari satu tingkat trofik ke tingkat trofik berikutnya sangat tidak efisien. Rata-rata, hanya sekitar 10 persen dari energi yang tersimpan dalam biomassa di satu tingkat trofik yang diubah menjadi biomassa di tingkat trofik berikutnya. Fenomena ini dikenal sebagai "aturan 10 persen" (Slobodkin, 1960). Sisa 90 persen energi hilang, terutama sebagai panas metabolik selama respirasi, atau tidak dikonsumsi, atau dikonsumsi tetapi tidak dapat dicerna dan dikeluarkan sebagai limbah.

Inefisiensi transfer energi ini memiliki konsekuensi ekologis yang mendalam. Pertama, ini menjelaskan mengapa rantai makanan jarang memiliki lebih dari empat atau lima tingkat trofik. Setelah beberapa kali transfer, tidak ada cukup energi yang tersisa untuk menopang populasi di tingkat trofik yang lebih tinggi. Kedua, ini menjelaskan mengapa jumlah total biomassa (massa total organisme hidup) biasanya menurun secara drastis pada setiap tingkat trofik yang lebih tinggi. Dibutuhkan sejumlah besar biomassa produsen (misalnya, 1.000 kg rumput) untuk menopang biomassa herbivora yang jauh lebih kecil (misalnya, 100 kg belalang), yang pada gilirannya hanya dapat menopang biomassa karnivora yang lebih kecil lagi (misalnya, 10 kg katak).

Implikasi dari efisiensi transfer energi yang rendah ini juga relevan dalam konteks keberlanjutan manusia. Pola makan manusia pada tingkat trofik yang lebih rendah (sebagai konsumen primer atau vegetarian) jauh lebih efisien secara energi daripada pola makan pada tingkat trofik yang lebih tinggi (sebagai konsumen sekunder atau tersier). Dibutuhkan lebih banyak lahan, air, dan energi untuk menghasilkan satu kilogram daging daripada menghasilkan satu kilogram biji-bijian. Meskipun ini bukan domain langsung teknik sipil, insinyur yang merancang infrastruktur untuk sistem pangan (seperti sistem irigasi atau fasilitas pengolahan makanan) secara tidak langsung terlibat dalam sistem energi ini. Selain itu, konsep efisiensi ini menjadi dasar bagi fenomena biomagnifikasi, di mana polutan tertentu menjadi lebih terkonsentrasi di tingkat trofik yang lebih tinggi, sebuah topik yang sangat relevan dengan pencemaran lingkungan.

Konsep Tingkat Trofik dan Piramida Ekologi. Untuk memvisualisasikan struktur ekosistem berdasarkan aliran energi dan distribusi biomassa, para ahli ekologi menggunakan model grafis yang disebut piramida ekologi. Ada tiga jenis utama piramida ekologi: piramida jumlah, piramida biomassa, dan piramida energi. Setiap piramida terdiri dari lapisan-lapisan horizontal yang mewakili tingkat trofik, dengan produsen di bagian dasar dan konsumen tingkat tinggi di bagian puncak. Lebar setiap lapisan sebanding dengan kuantitas yang diukur pada tingkat trofik tersebut (Odum, 1971).

Piramida jumlah menggambarkan jumlah total individu organisme di setiap tingkat trofik. Biasanya, piramida ini berbentuk tegak, dengan jumlah individu menurun di setiap tingkat trofik yang lebih tinggi. Namun, piramida ini bisa terbalik, misalnya dalam ekosistem hutan di mana satu pohon besar (satu individu produsen) dapat menopang ribuan serangga (banyak individu konsumen primer). Karena kelemahan ini, piramida jumlah kurang informatif dibandingkan jenis piramida lainnya.

Piramida biomassa mengukur massa total materi organik kering (biomassa) di setiap tingkat trofik. Piramida ini memberikan gambaran yang lebih baik tentang jumlah materi hidup yang ada. Di sebagian besar ekosistem darat, piramida biomassa berbentuk tegak. Namun, di beberapa ekosistem akuatik, piramida ini juga bisa terbalik. Hal ini terjadi karena produsen utamanya adalah fitoplankton yang memiliki siklus hidup sangat cepat dan biomassa yang rendah pada satu waktu, tetapi mereka bereproduksi begitu cepat sehingga dapat menopang populasi zooplankton (konsumen primer) yang memiliki biomassa lebih besar pada saat pengukuran (Pauly & Christensen, 1995).

Jenis piramida yang paling fundamental dan informatif adalah piramida energi. Piramida ini menggambarkan jumlah total energi yang mengalir melalui setiap tingkat trofik per satuan luas per satuan waktu. Berdasarkan hukum kedua termodinamika dan inefisiensi transfer energi, piramida energi selalu berbentuk tegak dan tidak pernah bisa terbalik. Ini menunjukkan bahwa jumlah energi yang tersedia selalu menurun secara drastis dari satu tingkat trofik ke tingkat berikutnya (Lindeman, 1942). Piramida energi secara jelas mengilustrasikan mengapa ekosistem membutuhkan pasokan energi yang konstan dan mengapa populasi di puncak jaring makanan sangat rentan terhadap gangguan yang terjadi di tingkat yang lebih rendah.

C. Siklus Biogeokimia

Siklus biogeokimia adalah jalur pergerakan unsur unsur kimia esensial bagi kehidupan melalui komponen biotik (bio) dan abiotik (geo) bumi. Tidak seperti energi yang mengalir, materi di bumi ini terbatas, sehingga harus terus menerus didaur ulang agar dapat menopang kehidupan (Schlesinger & Bernhardt, 2020). Siklus ini didorong oleh energi matahari dan aktivitas metabolisme organisme. Setiap siklus melibatkan reservoir (tempat unsur disimpan untuk jangka waktu tertentu, seperti atmosfer, lautan, atau batuan) dan proses (mekanisme yang memindahkan unsur antar reservoir, seperti fotosintesis, respirasi, atau dekomposisi).

Pemahaman tentang siklus ini sangat penting bagi insinyur sipil karena hampir semua aktivitas konstruksi dan operasional infrastruktur secara signifikan memodifikasi satu atau lebih siklus ini.

Aktivitas manusia telah menjadi kekuatan dominan yang mengubah siklus biogeokimia global dalam skala yang belum pernah terjadi sebelumnya. Pembakaran bahan bakar fosil secara besar-besaran memindahkan karbon dari reservoir geologis (minyak, gas, batu bara) ke atmosfer dengan laju yang jauh lebih cepat daripada yang dapat diserap kembali oleh proses alami, menyebabkan perubahan iklim. Penggunaan pupuk nitrogen sintetis dalam pertanian telah menggandakan laju fiksasi nitrogen alami, menyebabkan pencemaran nutrisi di perairan (eutrofikasi) (Galloway et al., 2008). Pembangunan perkotaan dengan permukaan kedap air yang luas secara drastis mengubah jalur siklus air lokal, meningkatkan aliran permukaan dan mengurangi infiltrasi ke air tanah.

Insinyur sipil berada di posisi yang unik untuk merancang solusi yang dapat memitigasi gangguan ini. Mereka dapat merancang bangunan hemat energi untuk mengurangi intervensi pada siklus karbon. Mereka dapat membangun instalasi pengolahan air limbah canggih yang mampu menghilangkan nitrogen dan fosfor sebelum efluen dibuang ke sungai, sehingga melindungi siklus nutrisi perairan. Mereka juga dapat menerapkan teknik pembangunan berwawasan lingkungan seperti atap hijau atau kolam retensi yang meniru fungsi alami dalam siklus air (Vitousek et al., 1997). Oleh karena itu, pengetahuan yang mendalam tentang cara kerja siklus biogeokimia adalah prasyarat untuk praktik rekayasa sipil yang berkelanjutan.

Setiap siklus, seperti siklus air, karbon, dan nitrogen, memiliki karakteristik, reservoir, dan proses yang unik, namun semuanya saling berhubungan. Perubahan pada satu siklus dapat berdampak pada siklus lainnya. Misalnya, peningkatan CO₂ di atmosfer (siklus karbon) menyebabkan pemanasan global, yang pada gilirannya mengintensifkan penguapan dan curah hujan

(siklus air). Memahami interkoneksi ini membantu dalam mengembangkan pendekatan solusi yang holistik, bukan parsial, terhadap masalah lingkungan yang kompleks.

Siklus Air (Hidrologi) dan Implikasinya bagi Teknik Sipil. Siklus air, atau siklus hidrologi, adalah proses pergerakan air yang berkelanjutan di atas, di permukaan, dan di bawah permukaan bumi. Siklus ini didorong oleh energi matahari, yang menyebabkan evaporasi (penguapan air dari permukaan laut, danau, dan sungai) dan transpirasi (penguapan air dari tumbuhan). Uap air ini kemudian naik ke atmosfer, mendingin, dan mengembun membentuk awan. Ketika tetesan air di awan menjadi cukup berat, mereka jatuh kembali ke bumi sebagai presipitasi (hujan, salju, atau hujan es) (Brutsaert, 2005). Air yang jatuh ke daratan dapat mengikuti beberapa jalur: sebagian mengalir di permukaan sebagai aliran permukaan (*runoff*), sebagian meresap ke dalam tanah (infiltrasi) menjadi air tanah, dan sebagian kembali diuapkan atau ditranspirasikan oleh tumbuhan.

Implikasi siklus hidrologi bagi teknik sipil sangatlah luas dan fundamental. Seluruh subdisiplin rekayasa sumber daya air berurusan langsung dengan pengelolaan komponen siklus ini. Insinyur sipil merancang bendungan dan waduk untuk menyimpan air dari aliran permukaan, sistem irigasi untuk mendistribusikan air ke lahan pertanian, serta sumur untuk mengekstraksi air tanah. Mereka juga merancang sistem drainase perkotaan untuk mengelola aliran permukaan dari hujan dan jembatan serta gorong gorong yang harus mampu mengakomodasi aliran sungai pada debit puncaknya.

Aktivitas pembangunan secara signifikan mengubah siklus hidrologi lokal. Urbanisasi menggantikan permukaan tanah yang permeabel (dapat meresap air) dengan permukaan kedap air seperti aspal dan beton. Hal ini secara drastis mengurangi infiltrasi dan meningkatkan volume serta kecepatan aliran permukaan. Akibatnya, risiko banjir di daerah hilir meningkat, erosi saluran meningkat, dan pengisian kembali cadangan air tanah berkurang (Shuster et al., 2005). Deforestasi juga memiliki