

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN: KONTRIBUSI TERHADAP KEBERLANJUTAN EKOSISTEM



Penulis :

- Darwel
- Bambang Suhartawan
- Wayan Budiarsa Suyasa
- Niken Prawesti Listyaningrum
- Sariwahyuni
- Alianto
- Rita Kurnia Apindiati



MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN: KONTRIBUSI TERHADAP KEBERLANJUTAN EKOSISTEM

**Darwel
Bambang Suhartawan
Wayan Budiarsa Suyasa
Niken Prawesti Listyaningrum
Sariwahyuni
Alianto
Rita Kurnia Apindiati**



GET PRESS INDONESIA

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN: KONTRIBUSI TERHADAP KEBERLANJUTAN EKOSISTEM

Penulis :

Darwel
Bambang Suhartawan
Wayan Budiarsa Suyasa
Niken Prawesti Listyaningrum
Sariwahyuni
Alianto
Rita Kurnia Apindiati

ISBN : 978-623-125-435-1

Editor : Mila Sari., S.ST, M.Si

Penyunting : Rantika Maida Sahara., S.Tr.Kes

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.getpress.co.id

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Mikrobiologi Lingkungan: Kontribusi Terhadap Keberlanjutan Ekosistem ini.

Buku Ini Membahas Pengantar Mikrobiologi Lingkungan, Mikroorganisme Dan Ekosistem, Siklus Nutrien Dalam Ekosistem, Biorremediasi Dan Pengelolaan Limbah, Mikrobiologi Tanah, Bioindikator Lingkungan, Mikrobiologi Dan Pertanian Berkelanjutan.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 PENGANTAR MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN	1
1.1 Definisi dan sejarah mikrobiologi	1
1.2 Antony Van Leeuwenhoek dan Mikroskopnya	2
1.3 Kemenangan Teori Biogenesis	4
1.4 Bukti Teori Biogenesis	4
1.5 Morfologi Bakteri	6
1.5.1 Struktur sel	6
1.5.2 Morfologi bakteri	6
1.6 Cara Perkembangbiakan bakteri	8
1.6.1 Struktur Tambahan	8
DAFTAR PUSTAKA	11
BAB 2 MIKROORGANISME DAN EKOSISTEM	13
2.1 Dekomposisi:	14
2.2 Siklus Nutrisi	16
2.3 Pembentukan Tanah:	19
2.4 Pertumbuhan Tanaman:	21
2.5 Pengendalian Hama dan Penyakit:	24
2.6 Produksi Oksigen:	27
2.7 Pembersihan Lingkungan:	30
DAFTAR PUSTAKA	35
BAB 3 SIKLUS NUTRIEN DALAM EKOSISTEM	37
3.1 Definisi dan Pentingnya Siklus Nutrien	37
3.2 Siklus Karbon	38
3.3 Peran Mikroorganisme dalam Siklus Karbon	40
3.4 Dampak Antropogenik pada Siklus Karbon	44
3.5 Siklus Nitrogen	46
3.6 Siklus Fosfor	51
3.7 Siklus Sulfur	55
3.8 Siklus Nutrien Lainnya	57
3.9 Teknologi dan Manajemen Siklus Nutrien	58
DAFTAR PUSTAKA	62

BAB 4 BIOREMEDIASI DAN PENGELOLAAN LIMBAH	63
4.1 Pendahuluan	63
4.2 Konsep Dasar Bioremediasi	64
4.2.1 Definisi Bioremediasi.....	64
4.2.2 Jenis – jenis Bioremediasi	65
4.2.3 Peran Mikroorganisme	67
4.3 Teknik – teknik Bioremediasi	69
4.3.1 Bioremediasi Aerobik dan Anaerobik.....	69
4.3.2 Phytoremediasi	70
4.3.3 Biostimulasi dan Bioaugmentasi	72
4.4 Pengelolaan Limbah	74
4.4.1 Klasifikasi Limbah	74
4.4.2 Metode Pengelolaan Limbah.....	76
4.4.3 Teknologi Pengolahan Limbah	78
4.5 Studi Kasus dan Aplikasi	81
4.5.1 Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi	81
4.5.2 Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak di Cepu.....	81
4.5.3 Bioremediasi Udara yang Tercemar Senyawa Organik Volatil (VOCs).....	82
4.6 Implikasi untuk Keberlanjutan Ekosistem	82
DAFTAR PUSTAKA	85
BAB 5 MIKROBIOLOGI TANAH.....	87
5.1 Pendahuluan	87
5.2 Tinjauan Umum Mikrobiologi Tanah	87
5.3 Mikroorganisme Tanah	88
5.3.1 Bakteri	88
5.3.2 <i>Actinomyces</i>	90
5.3.3 Jamur	90
5.3.4 Ganggang (<i>Algae</i>).....	91
5.3.5 Protozoa	91
5.3.6 Virus.....	92
5.4 Peranan Mikroorganisme Tanah	92
5.5 Dampak Pengelolaan Tanah Terhadap Biologi Tanah ...	93
5.6 Mengukur Aktivitas Mikorganisme Tanah.....	95
DAFTAR PUSTAKA	98
BAB 6 BIOINDIKATOR LINGKUNGAN	99
6.1 Pendahuluan	99

6.2 Definisi	100
6.3 Fitoplankton.....	100
6.3.1 Bioindikator Kualitas Air	101
6.3.2 Bioindikator Kesuburan Perairan.....	102
6.3.3 Bioindikator Stabilitas Perairan.....	106
6.4 Zooplankton.....	109
DAFTAR PUSTAKA.....	112
BAB 7 MIKROBIOLOGI DAN PERTANIAN	
BERKELANJUTAN	115
7.1 Pendahuluan.....	115
7.2 Pembentukan Struktur Tanah.....	117
7.3 Probiotik Tanaman	121
7.4 Biopestisida.....	125
7.5 Bioremediasi.....	130
7.6 Penutup	134
DAFTAR PUSTAKA.....	136
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 6.1. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator kualitas air di perairan Indonesia.....	102
Tabel 6.2. Tingkat keakuratan fitoplankton sebagai bioindikator kesuburan perairan	104
Tabel 6.3. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator stabilitas perairan	107
Tabel 6.4. Kelimpahan zooplanton di perairan teluk Doreri.....	110

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Ilustrasi dari siklus karbon	40
Gambar 3.2. Ilustrasi siklus Nitrogen.....	48
Gambar 3.3. Ilustrasi siklus Fosfor	52
Gambar 6.1. Sebaran temporal konsentrasi klorofil-a terendah (a) dan tertinggi (b) di perairan teluk Cenderwasih	105
Gambar 6.2. Sebaran spasial konsentrasi klorofil-a di perairan teluk Doreri.....	106
Gambar 6.3. Kelompok fitoplankton di perairan luar teluk Wondama.....	108
Gambar 6.4. Rantai makanan di perairan teluk Banten	109
Gambar 6.5. Keanekaragaman zooplankton di perairan teluk Doreri	111
Gambar 7.1. Jenis dan peran mikroorganisme dalam bidang pertanian	116
Gambar 7.2. Mikroorganisme dan fauna pada topsoil ...	118
Gambar 7.3. Simbiosis mikroorganisme dengan cacing tanah meningkatkan agregasi tanah.....	120

BAB 1

PENGANTAR MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Oleh Darwel

1.1 Definisi dan sejarah mikrobiologi

Mikrobiologi adalah subdisiplin ilmu biologi yang mempelajari mikroorganisme. Biasanya, objek penelitiannya adalah semua makhluk hidup yang dapat dilihat dengan mikroskop, terutama bakteri, jamur, alga, protozoa, dan Archaea. Walaupun virus tidak sepenuhnya dapat dianggap sebagai makhluk hidup, ia juga sering dimasukkan sebagai salah satu objek mikrobiologi. Dalam Bahasa Yunani "mikros" berarti kecil, "bios" berarti hidup, dan "logos" berarti ilmu. Ilmuwan membuat kesimpulan bahwa mikroorganisme sudah dikenal lebih kurang empat juta tahun yang lalu dari senyawa organik kompleks yang ada di laut, atau mungkin dari gumpalan awan yang sangat besar yang mengelilingi Bumi. Sebagai makhluk hidup pertama di Bumi, mikroorganisme dianggap sebagai nenek moyang semua makhluk hidup.

Mikrobiologi mempelajari beberapa hal, seperti : 1) Karakteristik sel hidup dan bagaimana mereka berfungsi. 2) Karakteristik mikroorganisme, suatu kelompok organisme penting yang mampu hidup bebas, khususnya bakteri. 3) Keanekaragaman dan evolusi, membahas bagaimana dan mengapa berbagai macam mikroorganisme muncul. 4) Keberadaan mikroorganisme pada tubuh manusia, hewan, dan tumbuhan. 5) Peran mikrobiologi sebagai dasar ilmu pengetahuan biologi. 6) Bagaimana pemahaman tentang karakteristik mikroorganisme dapat membantu ilmu pengetahuan biologi.

Secara garis besar, mikrobiologi adalah bidang yang sangat penting dalam biologi sejak ditemukan mikroskop. Ini menjadi sangat penting setelah Louis Pasteur dapat menjelaskan proses fermentasi anggur (juga dikenal sebagai anggur) dan pembuatan

serum rabies. Bidang biologi ini mengalami perkembangan yang pesat pada abad ke-19 dan memberikan landasan bagi bidang penting lain, seperti biokimia.

Beberapa ilmuwan mulai mengembangkan ilmu mikrobiologi pada pertengahan tahun 1800-an dan menemukan bahwa mikroorganisme berasal dari mikroorganisme sebelumnya, bukan dari tanaman atau hewan yang membusuk. Selanjutnya, ilmuwan menemukan bahwa mikroorganisme bukan berasal dari proses fermentasi, tetapi merupakan faktor yang menyebabkan proses fermentasi, seperti membuat minuman dari buah anggur yang mengandung alkohol. Selain itu, ilmuwan menemukan bahwa beberapa mikroba menyebabkan penyakit tertentu.

Mikroorganisme juga dapat menghasilkan produk dan proses yang bermanfaat bagi masyarakat. Sebuah proses fermentasi dapat menghasilkan alkohol yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Strain mikroorganisme yang dibuat melalui rekayasa genetika dapat diterima. Bakteri yang telah direkayasa sekarang dapat memproduksi jumlah insulin yang tak terbatas untuk manusia.

Mikroorganisme juga dapat membersihkan lingkungan, seperti dari tumpukan minyak di Misalnya, tumpukan minyak di lautan digunakan dalam pertanian sebagai insektisida dan herbisida. Ini disebabkan oleh kemampuan mikroorganisme untuk mendekomposisi dan menguraikan senyawa kimia kompleks. Kemampuan mikroorganisme untuk dimodifikasi untuk tujuan tertentu membuka lapangan baru dalam mikrobiologi industri, yang disebut bioteknologi.

Beberapa mikroorganisme berbahaya bagi manusia, hewan, dan tumbuhan karena dapat menyebabkan kayu dan besi lapuk, tetapi banyak di antaranya berfungsi sebagai dekomposer di lingkungan. Beberapa di antaranya digunakan untuk membuat bahan penting di industri kesehatan dan makanan.

1.2 Antony Van Leeuwenhoek dan Mikroskopnya

Antony Van Leeuwenhoek, yang hidup pada tahun 1632–1723, sebenarnya bukan seorang ilmuwan yang bekerja sebagai peneliti tetapi sebagai seorang pekerja *wine taster* di Delf, Belanda

yang biasanya menggunakan kaca pembesar untuk melihat serat kain. Ia bukan orang pertama yang menggunakan mikroskop, tetapi cintanya pada alam semesta menjadikannya salah seorang penemu dibidang mikrobiologi.

Leeuwenhoek menggunakan mikroskop yang sangat sederhana untuk mengamati berbagai hal, termasuk air sungai, air hujan, saliva, dan feses. Ia tertarik dengan banyaknya benda bergerak yang tidak terlihat oleh mata biasa. Ia menyebut benda-benda ini dengan *animalcule*, yang dia pikir adalah hewan yang sangat kecil. Dengan penemuan ini, dia lebih tertarik untuk melihat benda-benda tersebut dan meningkatkan fungsi mikroskopnya. Untuk melakukannya, lensa disusun di atas lempengan perak. Akhirnya, Leewenhoek membuat 250 mikroskop yang mampu memperbesar 200-300 kali. Dia mencatat hasilnya dan mengirimkannya ke Royal Society Inggris.

Pada 7 September 1674, ia mencatat adanya hewan yang sangat kecil yang sekarang disebut protozoa dalam salah satu isi suratnya yang pertama. Dari tahun 1632 hingga 1723, ia menulis lebih dari 300 surat yang membahas berbagai temuan yang dia lakukan. Salah satunya adalah bentuk kokus, batang, atau spiral yang sekarang dikenal sebagai bakteri. Penemuan-penemuan ini menjadi penemuan-penemuan penting dibidang ilmu mikrobiologi.

Penemuan Leewenhoek tentang hewan kecil menyebabkan perdebatan tentang dari mana hewan kecil tersebut berasal. Satu pendapat mengatakan *animacules* muncul karena proses pembusukan hewan atau tanaman, seperti fermentasi. Pendapat ini mendukung teori abiogenesis, yang mengatakan bahwa benda mati berkembang menjadi makhluk hidup (Teori *generatio spontanea*) mengatakan bahwa *animalcules* berasal dari *animalcules*. Kemudian, seperti halnya organisme tingkat tinggi, *animalcules* berasal dari *animalcules* sebelumnya (Teori ini disebut biogenesis). Ilmu Mikrobiologi tidak berkembang sampai perdebatan teori biogenesis dapat dibuktikan. Pembuktian ini dilakukan melalui berbagai eksperimen yang tampaknya mudah, tetapi memerlukan lebih dari seratus tahun.

1.3 Kemenangan Teori Biogenesis

Francesco Redi (1626–1697) menunjukkan bahwa larva, bukan *generatio spontanea*, adalah sumber ulat dalam daging busuk. Untuk menghilangkan organisme yang ada, John Needham (1713–1781) memasak sepotong daging dan memasukkannya ke dalam toples yang terbuka. Terakhir, ia melihat koloni pada permukaan daging. Ia mencapai kesimpulan bahwa mikroorganisme dapat muncul secara spontan dari daging.

Untuk memastikan bahwa mikroorganisme tidak ada dalam kaldu, Lazzaro Spallanzani (1729–1799) merebus kaldu daging selama satu jam dan menempatkannya pada toples yang disegel atau ditutup rapat. Oleh karena itu, teori abiogenesis tidak sejalan dengan hasil eksperimen ini. Namun, menurut Needham, pada percobaan Spallanzani, makhluk hidup tidak berinteraksi langsung dengan udara sebagai sumbernya.

Hampir seratus tahun setelah percobaan Needham, dua peneliti mencoba menyelesaikan perdebatan tentang peran udara. Pada tahun 1836, Franz Schulze memasukkan larutan asam yang kuat ke dalam tabung tertutup yang tertutup dan meletakkan daging yang telah dimasak di dalamnya. Pada tahun 1837, Theodor Schwann memasukkan udara panas melalui pipa ke dalam tabung tertutup yang tertutup dan meletakkan kaldu di dalamnya. Keduanya tidak menemukan mikroba karena mereka mati karena asam kuat dan panas. Namun, mereka yang mendukung teori *generatio spontanea* mengatakan bahwa adanya asam dan panas akan mengubah udara, yang akan mencegah pertumbuhan mikroba. Sampai akhirnya tahun 1954, peneliti mengakhiri perselisihan dengan melakukan percobaan dengan tabung tertutup berisi kaldu yang telah dipanaskan. Pipa yang sebagian diisi kapas dimasukkan ke dalam tabung dan ujungnya dibiarkan terbuka. Oleh karena itu, mikroba akan tersaring dan udara tetap dapat masuk. Fakta bahwa mikroba tidak ditemukan dalam kaldu daging menunjukkan bahwa teori *generatio spontanea* tidak benar.

1.4 Bukti Teori Biogenesis

Pada waktu yang sama, Francis Louis Pasteur (1822–1895), seorang ahli kimia yang berfokus pada mikroorganisme, menjadi

ilmuwan baru. Oleh karena itu, ia tertarik untuk meneliti bagaimana mikroba memainkan peran dalam pembuatan alkohol dalam industri anggur. Felix Archimede Pouchet (1800–1872) adalah salah satu pendukung teori *generatio spontanea* yang hidup pada masa Louis Pasteur. Pada tahun 1859, ia menulis banyak tulisan yang mendukung abiogenesis. Namun, ia tidak dapat membantah hasil penelitian Pasteur.

Pasteur melakukan beberapa eksperimen untuk memastikan pendapatnya. Salah satunya adalah menggunakan bejana panjang dan dibengkokkan yang disebut "leher angsa", yang diisi dengan kaldu dan kemudian dipanaskan. Meskipun udara bebas mengalir melalui pipa atau tabung leher angsa, kaldu tidak mengandung mikroorganisme. Dalam kasus ini, mikroba dan debu atau asap akan mengendap pada bagian tabung U. Selain itu, ia membawa tabung tersebut ke pegunungan Alpen dan Pegunungan Pyrenes. Pasteur menemukan bahwa udara membawa mikroorganisme untuk menghasilkan debu, dan ia menemukan bahwa udara yang masuk ke dalam bejana lebih bersih dan murni. Ia juga menemukan bahwa semakin bersih udara yang masuk ke dalam bejana, semakin sedikit kontaminasi yang terjadi.

Pada tanggal 7 April 1864, muncul salah satu argumen klasik yang menentang teori biogenesis adalah bahwa panas yang digunakan untuk membersihkan udara atau bahan juga dianggap merusak kekuatan vital. Mereka yang mendukung abiogenesis berpendapat bahwa tanpa kekuatan vital tersebut, mikroorganisme tidak dapat muncul secara spontan atau muncul.

John Tyndall menyatakan bahwa percobaan dengan memasukkan tabung reaksi yang mengandung kaldu steril ke dalam kotak tertutup dapat dengan mudah memastikan bahwa mikroorganisme tidak ada di udara. Udara masuk ke dalam kotak melalui pipa yang telah dibengkokkan, yang membentuk dasar U yang menyerupai spiral. Meskipun udara luar dapat masuk ke dalam tabung kaldu, mikroba tidak ditemukan di dalamnya. Percobaan Pasteur dan Tyndall mendorong penerimaan konsep biogenesis. Pasteur kemudian berkonsentrasi pada peran mikroba dalam pembuatan anggur dan mikroba yang menyebabkan penyakit.

1.5 Morfologi Bakteri

1.5.1 Struktur sel

Seperti prokariota (organisme tanpa selaput inti), semua bakteri memiliki struktur sel yang relatif sederhana. Dinding sel adalah struktur utama bakteri. Bakteri gram positif dan gram negatif dibedakan berdasarkan struktur dinding sel mereka. Bakteri gram positif memiliki lapisan peptidoglikan yang tebal dan asam teichoic di luar, sementara bakteri gram negatif memiliki lapisan luar, lipopolisakarida, dan lapisan peptidoglikan tipis di periplasma (di antara lapisan peptidoglikan dan membran). Banyak bakteri memiliki flagela dan fimbria, yang bergerak, melekat, dan konjugasi. Beberapa bakteri juga memiliki kapsul atau lapisan lendir, yang membantu bakteri melekat pada permukaan dan membentuk biofilm. Beberapa spesies bakteri juga memiliki magnetosom, vakuola gas, granula makanan, dan ribosom. Beberapa bakteri memiliki kemampuan untuk membentuk endospora, yang memungkinkan mereka bertahan hidup dalam kondisi ekstrim.

1.5.2 Morfologi bakteri

Istilah "morfologi" secara harafiah berarti "pengetahuan tentang bentuk". Dalam cabang ilmu biologi, morfologi adalah ilmu yang mempelajari bentuk makhluk, terutama hewan dan tumbuhan, dan bagian-bagiannya. Morfologi bakteri dapat dibagi menjadi dua bagian:

1. Morfologi makroskopik (kolonial morfologi) adalah karakteristik koloni yang diamati pada plat agar; bentuk koloni, ukuran, margin, elevasi, warna, permukaan, dan konsistensi. Ketika bakteri ditambahkan dan disesuaikan dengan nutrisi dan kondisi lingkungan yang memungkinkan mereka berkembang, populasi mereka tumbuh dengan sangat cepat. Beberapa koloni mungkin berwarna, lingkaran, atau tidak teratur. Bentuk, ukuran, margin, elevasi, warna, permukaan, dan konsistensi koloni tertentu disebut "morfologi koloni". Metode makroskopis yang digunakan para ilmuwan untuk mengidentifikasi bakteri adalah morfologi koloni.

- a. Ukuran: a. Bentuk titik, b. Kecil, c. Sedang, d. Besar.

- b. Pigmentasi (warna koloni): a. Putih, b. Kuning, c. Merah, d. Ungu, dan lain-lain.
 - c. Form (bentuk koloni) a. Sirkuler : bulat, bertepi b. Ireguler : tidak beraturan, bertepi c. Rhizoid : bentuk seperti akar, pertumbuhan menyebar
 - d. Margin a. Enpitire : tepian rata b. Lobate : tepian berlekuk c. Undulate : tepian bergelombang d. Serrate : tepian bergerigi e. Filamentous : tepian seperti benang-benang f. Elevasi (ketinggian koloni bakteri) g. Flat: ketinggian tidak dapat diukur, nyaris sama dengan medium h. Raised: ketinggian sebenarnya dapat dilihat, tetapi rata di seluruh permukaan i. Convex: memiliki bentuk cembung yang mirip dengan tetesan air; j. Umbonate: memiliki bentuk cembung yang lebih menonjol di bagian tengah;
2. Morfologi mikroskopik (seluler morfologi) adalah struktur sel bakteri yang diamati di bawah mikroskop dan Komponen-komponen yang termasuk flagella, pili. Meskipun ada banyak jenis bakteri yang berbeda, bentuk umumnya adalah tiga jenis:
- a. Kokus (Coccus): bakteri berbentuk bola bulat dengan berbagai variasi sebagai berikut: a) Mikrococcus, yang kecil dan tunggal b) Diplococcus, yang berganda dua-dua c) Tetracoccus, yang bergandengan empat dan membentuk bujursangkar d) Sarcina, yang bergerombol membentuk kubus e) Staphylococcus, yang bergerombol f) Streptococcus, yang bergandengan membentuk rantai
 - b. Basil (Bacillus) adalah kelompok bakteri berbentuk batang atau silinder yang memiliki variasi sebagai berikut: a) Satu sel (monobasil), seperti *Escherichia coli* b) Dua sel (diplobasil), seperti *diplococcus pneumonia* c) Rantai atau jaringan tiang (streptobasil), seperti *bacillus anthrax* d)
 - c. Bentuk lengkung atau spiral dapat dibagi menjadi: a) Koma (vibrio), berbentuk lengkungan kurang dari setengah lingkaran, seperti *Vibrio colerae*, yang menyebabkan penyakit kolera. b) Spiral, berbentuk lengkungan lebih dari setengah lingkaran, seperti *Spirillum minor*, yang menyebabkan demam karena

gigitan tikus atau hewan pengerat lainnya. c) Spiroooseta, berbentuk lengkungan halus dan lentur, seperti *Treponema pallidum*, yang menyebabkan penyakit sifilis.

Keadaan lingkungan, medium, dan usia mempengaruhi bentuk bakteri. Oleh karena itu, kondisinya harus sama untuk membandingkan bentuk dan ukuran bakteri. Bakteri yang lebih muda biasanya lebih besar daripada yang lebih tua.

Flagel digunakan oleh banyak bakteri untuk bergerak, Flagel bakteri kokus sangat kecil, tebalnya 0,02–0,1 mikro, dan panjangnya melebihi sel bakteri, tetapi hampir semua bakteri yang berbentuk lengkung dan sebagian yang berbentuk batang memiliki flagel.

Bakteri dibagi menjadi lima golongan berdasarkan lokasi dan jumlah flagelnya: 1) Atrik tidak memiliki flagel; 2) Monotrik memiliki satu flagel pada salah satu ujungnya; 3) Lofotrik memiliki banyak flagel pada salah satu ujungnya; dan 4) Amfitrik memiliki banyak flagel pada kedua ujungnya 5) Peritrik, yang memiliki flagel di seluruh tubuhnya.

1.6 Cara Perkembangbiakan bakteri

Bakteri biasanya membelah diri untuk berkembang biak atau berkembang biak secara asexual (vegetatif = tak kawin). Bakteri membelah sel menjadi dua, yang dikenal sebagai pembelahan biner. Reproduksi bakteri secara seksual terjadi ketika materi genetik ditukar dengan bakteri lain. Rekombinasi genetik, juga dikenal sebagai rekombinasi DNA, dapat terjadi dalam tiga cara berbeda. Yang pertama adalah transformasi, di mana materi genetik yang kecil, bahkan satu gen, ditransfer dari satu sel bakteri ke sel bakteri lain. Yang kedua adalah transduksi, di mana materi genetik ditransfer dari satu sel bakteri ke sel bakteri lain melalui bakteriofage, yaitu organisme yang lain. Yang terakhir adalah konjugasi, di mana materi genetik ditransfer dari satu sel bakteri ke sel bakteri lain melalui organisme yang lain.

1.6.1 Struktur Tambahan

1. Kapsul

Sebagian besar bakteri memiliki lapisan lendir di dinding sel. Kapsul terbentuk jika lapisan lendir ini cukup tebal.

Lendir tidak mudah menghisap zat warna, sehingga hanya dapat dilihat dengan pewarnaan tertentu. Kapsul berbeda dengan lendir yang dihasilkan metabolisme yang dikeluarkan melalui sekresi.

Beberapa bakteri tumbuh pada media yang mengandung gula tertentu dan menghasilkan lendir sebagai hasil sekresi. Morfologi dan biokimia lendir dan kapsul dapat berbeda. Sementara lendir adalah produk sekresi, kapsul adalah bagian dari sel.

Kapsul tidak hanya melindungi sel dari faktor lingkungan seperti kekeringan, tetapi juga berfungsi sebagai pengikat antar sel. Karena hubungannya dengan tingkat virulensi bakteri, maka kapsul dianggap suatu hal yang sangat penting.

2. Flagel

Adalah alat yang digunakan untuk menggerakkan bakteri. Flagel ada pada semua bakteri lengkung dan sebagian bakteri batang; jarang sekali bakteri coccus memiliki flagel. Flagel sangat kecil sehingga tidak dapat dilihat dengan mikroskop tanpa pengecatan. Flagel memiliki ketebalan antara 0,02 dan 1 mikron, tergantung pada spesies bakteri, dan biasanya flagel lebih panjang daripada sel bakteri. Flagel mirip dengan myosin, suatu protein yang ada di otot, dan terdiri dari protein yang elastik yang disebut flagelin. Flagel tidak berasal dari dinding sel, tetapi dari protoplasma.

3. Pili

Pili adalah benang-benang halus yang menonjol keluar dari dinding sel dimana Bakteri gram negatif biasanya memilikinya. Pili memiliki panjang antara 0,5 dan 20 mikron. Setiap sel memiliki pili dengan kurang lebih 150 buah. Pili adalah protein yang ada di dalam pili. Bakteri tertentu dapat melekat dekat permukaan medium cair dengan kadar oksigen yang lebih tinggi karena adanya pili sel-sel. Pili juga dapat melekat pada sel seperti pada peristiwa konjugasi membutuhkan fungsi perlekatan ini. Sel-sel bakteri jantan memiliki pili kelamin, atau pilus seksual, yang memungkinkan

mereka bergabung dengan sel-sel bakteri betina saat proses konjugasi terjadi. Selama proses konjugasi, sel ini menempel pada dinding sel betina.

4. Endospora

Endospora adalah benda berbentuk bulat atau bulat lonjong yang sangat peka cahaya, sulit diwarnai, dan sangat tahan terhadap kondisi luar yang tidak baik. Tidak seperti fungi, spora bakteri berfungsi sebagai alat reproduksi. Spora bakteri adalah bentuk bakteri yang berusaha mengamankan diri dari tekanan luar. Contoh Bakteri yang membentuk spora adalah *Bacillus* dan *Clostridium*, serta beberapa spesies *Sarcina* sp.

5. Klorosom

Hanya ada pada bakteri yang melakukan fotosintesis—terletak di bawah membran plasma dan mengandung pigmen untuk proses fotosintesis, termasuk klorofil. *Rhodobacter sphaeroides* adalah salah satu contoh bakteri yang mengandung klorosom.

DAFTAR PUSTAKA

- Irianto, Koes (2013) Mikrobiologi Medis, Bandung : Alfabeta
Lucia W.Muslimin (1995) Mikrobiologi lingkungan, Jakarta : Dikti
Satish Gupte (1990) Mikrobiologi Dasar, Jakarta : Bina Rupa Aksara
Suhendra S, Nyoman (1991) Buku pedoman mata ajaran
mikrobiologi lingkungan, Jakarta : Depkes
Volk & Wheeler (1989) Mikrobiologi Dasar, Jakarta : Erlangga

BAB 2

MIKROORGANISME DAN EKOSISTEM

Oleh Bambang Suhartawan

Mikroorganisme adalah makhluk hidup kecil yang tidak dapat dilihat dengan mata telanjang dan umumnya hanya dapat dilihat dengan mikroskop. Mereka meliputi berbagai jenis organisme, seperti bakteri, virus, jamur, alga mikroskopis, dan protozoa. Mikroorganisme dapat ditemukan di hampir semua lingkungan, dari tanah dan air hingga dalam tubuh manusia dan hewan. Mereka memainkan peran penting dalam ekosistem, termasuk dalam proses seperti dekomposisi bahan organik, siklus nutrisi, dan bahkan dalam produksi makanan dan obat-obatan.

Ekosistem adalah suatu sistem yang terdiri dari komunitas makhluk hidup (biotik) dan lingkungan fisiknya (abiotik) yang saling berinteraksi dan saling mempengaruhi. Ekosistem mencakup semua elemen biotik, seperti tumbuhan, hewan, mikroorganisme, serta elemen abiotik seperti tanah, air, udara, dan cahaya matahari.

Interaksi dalam ekosistem melibatkan berbagai proses seperti aliran energi, siklus nutrisi, dan hubungan antara organisme (misalnya predator dan mangsa, kompetisi, simbiosis). Ekosistem bisa berupa ekosistem alami seperti hutan, lautan, atau padang rumput, maupun ekosistem buatan seperti taman kota atau pertanian. Setiap ekosistem memiliki struktur dan fungsi yang unik, dan menjaga keseimbangan ekosistem sangat penting untuk keberlangsungan hidup makhluk hidup di dalamnya.

Dalam kehidupannya, mikroorganisme memainkan berbagai peran penting dalam ekosistem, yang mencakup:

2.1 Dekomposisi:

Dekomposisi adalah proses penting dalam ekosistem yang melibatkan penguraian bahan organik oleh mikroorganisme menjadi komponen yang lebih sederhana. Proses ini memungkinkan nutrisi penting dikembalikan ke tanah, di mana mereka dapat digunakan kembali oleh tanaman dan mendukung kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme berperan dalam proses dekomposisi:

1. Tahapan Dekomposisi

a. Degradasi Awal:

- **Penguraian Fisik:** Proses dekomposisi sering kali dimulai dengan pemecahan fisik bahan organik, seperti daun dan kayu, oleh organisme makroskopis seperti cacing tanah dan serangga. Proses ini mengurangi ukuran partikel dan meningkatkan aksesibilitas bahan organik bagi mikroorganisme.
- **Penguraian Kimia:** Beberapa mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, mulai menguraikan bahan organik dengan melepaskan enzim yang memecah senyawa kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana.

b. Degradasi Sekunder:

- **Bakteri:** Bakteri adalah mikroorganisme utama dalam dekomposisi. Mereka menguraikan senyawa organik kompleks seperti protein, karbohidrat, dan lemak menjadi molekul yang lebih sederhana seperti asam amino, gula, dan asam lemak. Proses ini menghasilkan produk sampingan seperti gas karbon dioksida, metana, dan amonia.
- **Jamur:** Jamur, terutama jamur saprofitik, memainkan peran besar dalam dekomposisi, terutama pada bahan organik yang sulit terurai seperti lignin dalam kayu. Jamur memproduksi enzim yang mampu memecah lignin dan selulosa, dua komponen utama dalam dinding sel tanaman.

c. Komposisi Akhir:

- Pembentukan Humus: Produk akhir dari dekomposisi adalah humus, yaitu bahan organik yang terurai secara mendalam dan stabil. Humus meningkatkan struktur tanah, kapasitas retensi air, dan ketersediaan nutrisi.
- Mineralisasi: Nutrisi yang dihasilkan dari dekomposisi, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, diubah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Proses ini disebut mineralisasi, yang penting untuk siklus nutrisi tanah.

2. Peran Enzim dalam Dekomposisi

- a. Enzim Selulase: Menguraikan selulosa dalam dinding sel tumbuhan.
- b. Enzim Lignase: Menguraikan lignin, komponen utama dalam kayu dan bahan tumbuhan keras.
- c. Enzim Protease: Menguraikan protein menjadi asam amino.
- d. Enzim Lipase: Menguraikan lemak menjadi asam lemak dan gliserol.

3. Faktor yang Mempengaruhi Dekomposisi

- a. Kelembaban: Kelembaban yang cukup diperlukan untuk aktivitas enzim dan pertumbuhan mikroorganisme.
- b. Suhu: Suhu mempengaruhi laju dekomposisi. Suhu yang lebih tinggi biasanya mempercepat proses, tetapi suhu ekstrem dapat menghambat aktivitas mikroorganisme.
- c. Ketersediaan Oksigen: Dekomposisi aerobik memerlukan oksigen, sedangkan dekomposisi anaerobik terjadi tanpa oksigen.
- d. pH Tanah: pH tanah yang sesuai mendukung aktivitas mikroorganisme yang terlibat dalam dekomposisi.

4. Manfaat Dekomposisi

- a. Pemulihan Nutrisi: Mengembalikan nutrisi penting ke tanah, mendukung pertumbuhan tanaman.
- b. Peningkatan Kualitas Tanah: Humus meningkatkan struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air dan udara.

- c. Pengurangan Limbah: Mengurangi jumlah bahan organik yang menumpuk di lingkungan.

Secara keseluruhan, proses dekomposisi oleh mikroorganisme adalah kunci dalam siklus nutrisi tanah dan mendukung kesehatan ekosistem dengan memastikan bahwa bahan organik diolah menjadi bentuk yang berguna untuk organisme lain.

2.2 Siklus Nutrisi

Mikroorganisme berperan penting dalam siklus nutrisi biogeokimia, yang mencakup siklus nitrogen, karbon, dan sulfur. Proses ini memastikan bahwa elemen-elemen penting ini tetap tersedia dalam bentuk yang dapat digunakan oleh makhluk hidup. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme terlibat dalam siklus-siklus ini:

1. Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen adalah proses di mana nitrogen bergerak melalui atmosfer, tanah, dan organisme hidup. Mikroorganisme memainkan peran kunci dalam beberapa tahapan utama dari siklus ini:

a. Fiksasi Nitrogen:

Bakteri Pengikat Nitrogen: Bakteri seperti *Rhizobium* (yang bersimbiosis dengan tanaman legum) dan *Azotobacter* (yang hidup bebas di tanah) mengubah nitrogen atmosfer (N_2) menjadi bentuk amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+) yang dapat digunakan oleh tanaman. Proses ini dikenal sebagai fiksasi nitrogen.

b. Nitrifikasi:

Bakteri Nitrifikasi: Proses ini terdiri dari dua langkah. Pertama, bakteri seperti *Nitrosomonas* mengubah amonia menjadi nitrit (NO_2^-). Kedua, bakteri seperti *Nitrobacter* mengubah nitrit menjadi nitrat (NO_3^-). Nitrat adalah bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman.

c. Denitrifikasi:

Bakteri Denitrifikasi: Bakteri seperti *Pseudomonas* dan *Paracoccus* mengubah nitrat dan nitrit kembali menjadi nitrogen gas (N_2) atau nitrogen oksida (N_2O), yang

kemudian dilepaskan kembali ke atmosfer. Proses ini menyelesaikan siklus nitrogen dan mengembalikan nitrogen ke atmosfer.

d. Ammonifikasi:

Bakteri dan Jamur: Proses ini melibatkan penguraian bahan organik yang mengandung nitrogen, seperti sisa-sisa tanaman dan hewan mati, menjadi amonia atau amonium oleh bakteri dan jamur. Ammonia ini kemudian dapat digunakan dalam proses nitrifikasi atau diserap oleh tanaman.

2. Siklus Karbon

Siklus karbon adalah proses di mana karbon bergerak melalui atmosfer, biosfer, dan geosfer. Mikroorganisme terlibat dalam beberapa aspek siklus karbon:

a. Fotosintesis:

Fitoplankton dan Tumbuhan: Mikroorganisme fotosintetik, seperti fitoplankton di lautan dan alga, serta tumbuhan di darat, mengubah karbon dioksida (CO_2) menjadi senyawa organik melalui fotosintesis, menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan.

b. Respiration:

Mikroorganisme Decomposer: Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur menguraikan bahan organik, seperti sisa-sisa tanaman dan hewan, menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) sebagai produk sampingan dari respirasi. CO_2 kembali ke atmosfer.

c. Penguraian:

Decomposer: Mikroorganisme berperan dalam penguraian bahan organik menjadi senyawa karbon sederhana seperti CO_2 , yang dilepaskan ke atmosfer atau disimpan dalam tanah sebagai humus.

d. Penyimpanan Karbon:

Mikroorganisme Tanah: Beberapa mikroorganisme berperan dalam pembentukan dan penyimpanan karbon dalam tanah dalam bentuk humus atau bahan organik stabil lainnya, yang dapat mengurangi konsentrasi CO_2 di atmosfer.

3. Siklus Sulfur

Siklus sulfur adalah proses di mana sulfur bergerak melalui atmosfer, tanah, dan organisme hidup. Mikroorganisme berperan dalam beberapa tahap utama:

a. Oksidasi Sulfur:

Bakteri Oksidasi Sulfur: Bakteri seperti *Thiobacillus* mengubah hidrogen sulfida (H_2S) dan senyawa sulfur lainnya menjadi sulfur oksida, seperti sulfat (SO_4^{2-}), yang dapat digunakan oleh tanaman.

b. Reduksi Sulfur:

Bakteri Reduksi Sulfur: Bakteri seperti *Desulfovibrio* mengubah sulfat (SO_4^{2-}) menjadi hidrogen sulfida (H_2S) dalam kondisi anaerobik. Proses ini terjadi terutama di lingkungan yang kekurangan oksigen seperti tanah basah atau lumpur.

c. Pembentukan Asam Sulfat:

Bakteri Pembentuk Asam: Beberapa mikroorganisme mengoksidasi sulfur atau hidrogen sulfida menjadi asam sulfat (H_2SO_4), yang dapat diserap oleh tanaman atau dilepaskan ke atmosfer melalui proses presipitasi.

d. Dekomposisi:

Decomposer: Mikroorganisme menguraikan senyawa organik yang mengandung sulfur, seperti protein dari sisa-sisa makhluk hidup, melepaskan sulfur kembali ke tanah dan atmosfer dalam bentuk senyawa sulfur.

Mikroorganisme memainkan peran krusial dalam siklus biogeokimia dengan memastikan bahwa elemen-elemen penting seperti nitrogen, karbon, dan sulfur tetap dalam bentuk yang dapat digunakan oleh ekosistem. Dengan memfasilitasi proses seperti fiksasi nitrogen, nitrifikasi, denitrifikasi, fotosintesis, respirasi, dan penguraian, mikroorganisme mendukung keseimbangan ekosistem dan kesehatan tanah, serta mempengaruhi perubahan iklim global.

2.3 Pembentukan Tanah:

Pembentukan tanah adalah proses yang melibatkan berbagai faktor dan mekanisme, di mana mikroorganisme memainkan peran penting dalam menguraikan bahan organik dan membentuk humus. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme berkontribusi dalam pembentukan tanah:

1. Penguraian Bahan Organik

a. Degradasi Awal:

Bakteri dan Jamur: Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur menguraikan bahan organik seperti daun yang jatuh, sisa-sisa tanaman, dan hewan mati. Mereka menggunakan enzim untuk memecah senyawa kompleks dalam bahan organik menjadi komponen yang lebih sederhana. Proses ini mengubah bahan organik menjadi bahan yang lebih mudah diuraikan.

b. Penguraian Komponen Utama:

- **Selulosa:** Jamur saprofitik memproduksi enzim selulase yang menguraikan selulosa, komponen utama dinding sel tumbuhan.
- **Lignin:** Jamur lignolitik memproduksi enzim yang menguraikan lignin, senyawa yang memberikan kekuatan struktural pada kayu dan bahan tanaman lainnya.
- **Protein dan Lemak:** Bakteri dan jamur juga menguraikan protein menjadi asam amino dan lemak menjadi asam lemak dan gliserol.

2. Pembentukan Humus

a. Pembentukan Humus:

- **Proses Stabilitas:** Setelah bahan organik terurai menjadi komponen yang lebih sederhana, mikroorganisme seperti bakteri dan jamur terus menguraikan produk-produk ini menjadi humus. Humus adalah bahan organik yang sangat terurai dan stabil, yang memiliki struktur yang kompleks dan kaya akan nutrisi.

- **Komponen Humus:** Humus terdiri dari molekul-molekul besar yang mengikat elemen seperti karbon, nitrogen, dan mineral. Ini termasuk humik asam, fulvic asam, dan senyawa organik lainnya.

b. Peran Humus:

- **Peningkatan Struktur Tanah:** Humus meningkatkan struktur tanah dengan meningkatkan agregasi tanah, yang membantu menciptakan pori-pori yang memungkinkan pergerakan air dan udara. Ini membantu mencegah erosi tanah dan meningkatkan kapasitas retensi air.
- **Kapasitas Tukar Kation:** Humus memiliki kapasitas tinggi untuk menukar kation (CAT), yang berarti ia dapat menyerap dan menyimpan nutrisi penting seperti kalsium, magnesium, dan kalium, dan melepaskannya sesuai kebutuhan tanaman.

3. Interaksi dengan Faktor Lain

a. Kegiatan Organisme Makroskopis:

Cacing Tanah: Cacing tanah dan organisme makroskopis lainnya berinteraksi dengan mikroorganisme dalam proses dekomposisi. Mereka menggali tanah, mencampur bahan organik dengan tanah mineral, dan mempercepat proses pembentukan humus.

b. Pengaruh Lingkungan:

- **Kelembaban dan Suhu:** Kelembaban yang cukup dan suhu yang moderat mendukung aktivitas mikroorganisme dan mempercepat proses dekomposisi dan pembentukan humus.
- **pH Tanah:** pH tanah mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan efisiensi proses dekomposisi. pH yang ekstrem dapat menghambat aktivitas mikroorganisme.

4. Fungsi Mikroorganisme dalam Kesehatan Tanah

a. Penyedia Nutrisi:

Ketersediaan Nutrisi: Mikroorganisme membantu melepaskan nutrisi dari bahan organik yang terurai,

membuatnya tersedia bagi tanaman. Ini termasuk nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium.

b. Pengendalian Patogen:

Kompetisi dan Antagonisme: Beberapa mikroorganisme bersaing dengan patogen tanah atau memproduksi senyawa antimikroba yang dapat mengendalikan penyakit tanaman.

Mikroorganisme memainkan peran vital dalam pembentukan tanah dengan menguraikan bahan organik, membentuk humus, dan meningkatkan kesuburan tanah. Mereka mendukung struktur tanah, kapasitas retensi air, dan ketersediaan nutrisi, yang semuanya penting untuk pertumbuhan tanaman dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Dengan berkontribusi pada proses-proses ini, mikroorganisme membantu menciptakan tanah yang subur dan berfungsi sebagai fondasi bagi kehidupan tanaman dan organisme lainnya di ekosistem.

2.4 Pertumbuhan Tanaman:

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme, salah satunya adalah melalui hubungan simbiotik seperti mikoriza. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme mendukung pertumbuhan tanaman, dengan fokus pada mikoriza dan bentuk-bentuk simbiosis lainnya:

1. Mikoriza

a. Definisi dan Jenis Mikoriza:

- **Mikoriza:** Mikoriza adalah hubungan simbiotik antara jamur dan akar tanaman. Jamur mikoriza membentuk jaringan yang menyatu dengan akar tanaman, membantu tanaman dalam penyerapan nutrisi.
- **Jenis Mikoriza:**
 - **Ektomikoriza:** Jamur membentuk jaringan di luar sel akar (di luar sel epidermis) dan membentuk miselium yang menyebar di sekitar akar.

Ektomikoriza umumnya ditemukan pada tanaman pohon dan semak.

- **Endomikoriza (Arbuskular Mikoriza):** Jamur menembus sel-sel akar tanaman dan membentuk struktur yang disebut arbuskula di dalam sel. Endomikoriza umum pada tanaman herba dan beberapa tanaman perkebunan.

b. Fungsi Mikoriza:

- **Penyerapan Nutrisi:** Mikoriza meningkatkan kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi, terutama fosfor (P), yang seringkali terbatas dalam tanah. Jamur mikoriza memperluas zona penyerapan akar dengan miselium mereka, meningkatkan area kontak dengan tanah dan kemampuan penyerapan nutrisi.
- **Penyerapan Air:** Mikoriza juga membantu tanaman dalam penyerapan air, terutama dalam kondisi kekeringan. Miselium jamur dapat menyerap air dari tanah yang lebih dalam dan menyediakan air tambahan untuk tanaman.
- **Peningkatan Ketersediaan Mineral:** Selain fosfor, mikoriza membantu tanaman menyerap mineral lain seperti nitrogen, kalium, kalsium, dan magnesium, dengan cara mengubah bentuk-bentuk mineral yang sulit diserap menjadi bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman.

c. Manfaat Ekosistem:

- **Stabilitas Tanah:** Mikoriza membantu memperbaiki struktur tanah dengan meningkatkan agregasi tanah melalui jaringan miselium mereka, yang dapat mengurangi erosi tanah.
- **Pengendalian Patogen:** Beberapa mikoriza memiliki kemampuan untuk mengurangi infeksi oleh patogen tanah dengan bersaing untuk sumber daya atau dengan menghasilkan senyawa antimikroba.

2. Bakteri Pengikat Nitrogen

a. Bakteri Pengikat Nitrogen:

- **Jenis Bakteri:** Bakteri seperti *Rhizobium* yang bersimbiosis dengan tanaman legum dan *Azotobacter* yang hidup bebas di tanah, mengubah nitrogen atmosfer (N_2) menjadi bentuk amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+) yang dapat digunakan oleh tanaman.
- **Fungsi:** Nitrogen adalah nutrisi penting untuk pertumbuhan tanaman, dan bakteri pengikat nitrogen menyediakan nitrogen tambahan yang esensial untuk sintesis protein dan pertumbuhan.

3. Bakteri Pelarut Fosfat

a. Bakteri Pelarut Fosfat:

- **Jenis Bakteri:** Bakteri seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat yang tidak larut dalam tanah menjadi bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman.
- **Fungsi:** Dengan mengubah fosfat dari bentuk yang tidak tersedia (seperti fosfat kalsium) menjadi bentuk yang larut dalam air, bakteri ini membantu tanaman mendapatkan fosfor yang esensial untuk fotosintesis, pembentukan energi, dan pertumbuhan akar.

4. Pengaruh Terhadap Kesehatan Tanaman

a. Pertumbuhan dan Kesehatan Tanaman:

- **Peningkatan Pertumbuhan:** Mikroorganisme seperti mikoriza dan bakteri pelarut fosfat meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan menyediakan akses yang lebih baik ke nutrisi penting. Tanaman yang mendapatkan nutrisi yang cukup cenderung tumbuh lebih kuat dan lebih produktif.
- **Ketahanan terhadap Stres:** Tanaman yang bersimbiosis dengan mikroorganisme tertentu seringkali lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan, salinitas, atau penyakit tanaman.

b. Interaksi dengan Mikroorganisme Lain:

- **Komunitas Mikroba:** Interaksi antara mikoriza, bakteri pengikat nitrogen, dan bakteri pelarut fosfat

dapat menciptakan komunitas mikroba yang saling mendukung, meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas tanaman.

Mikroorganisme memainkan peran krusial dalam mendukung pertumbuhan tanaman dengan meningkatkan penyerapan nutrisi dan air, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kesehatan tanaman. Melalui hubungan simbiotik seperti mikoriza dan interaksi dengan bakteri pelarut fosfat dan pengikat nitrogen, mikroorganisme membantu tanaman dalam mendapatkan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan adaptasi terhadap stres lingkungan. Dengan memfasilitasi proses-proses ini, mikroorganisme berkontribusi pada produktivitas pertanian dan keberlanjutan ekosistem secara keseluruhan.

2.5 Pengendalian Hama dan Penyakit:

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam pengendalian hama dan penyakit dengan berbagai mekanisme yang membantu mengurangi populasi patogen dan hama yang merugikan tanaman. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme dapat mengontrol hama dan penyakit:

1. Persaingan Sumber Daya

a. Kompetisi Nutrisi:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dapat bersaing dengan patogen dan hama untuk mendapatkan nutrisi dan sumber daya dari lingkungan mereka. Dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia, mikroorganisme dapat mengurangi ketersediaan nutrisi untuk patogen atau hama, sehingga menghambat pertumbuhannya.
- **Contoh:** Bakteri dari genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* dapat bersaing dengan patogen tanaman untuk nutrisi dalam tanah atau pada permukaan akar tanaman.

b. Kompetisi Ruang:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme juga dapat bersaing untuk ruang hidup pada permukaan tanaman atau dalam tanah. Dengan mengisi ruang yang tersedia, mikroorganisme mencegah patogen atau hama menetap dan berkembang biak.
- **Contoh:** Jamur mikoriza yang membentuk simbiosis dengan akar tanaman dapat mencegah patogen akar seperti *Fusarium* dan *Phytophthora* dengan mengisi ruang di sekitar akar dan mencegah infeksi.

2. Produksi Antibiotik

a. Produksi Senyawa Antimikroba:

- **Mekanisme:** Beberapa mikroorganisme menghasilkan senyawa antimikroba atau antibiotik yang dapat menghambat pertumbuhan atau membunuh patogen. Senyawa ini dapat bersifat bakteriostatik (menghentikan pertumbuhan) atau bakterisidal (membunuh patogen).
- **Contoh:** Bakteri dari genus *Bacillus* seperti *Bacillus thuringiensis* (Bt) menghasilkan toksin yang spesifik untuk larva serangga, membunuh hama tanpa membahayakan tanaman atau organisme lain.

b. Penggunaan dalam Pengendalian Hayati:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme yang memproduksi antibiotik dapat digunakan sebagai agen pengendali hayati untuk mengelola populasi patogen tanaman secara ekologis.
- **Contoh:** *Streptomyces* adalah bakteri tanah yang menghasilkan berbagai antibiotik seperti streptomisin dan tetracycline yang digunakan untuk mengendalikan patogen tanaman.

3. Predasi dan Parasitisme

a. Predasi oleh Jamur:

- **Mekanisme:** Beberapa jamur berfungsi sebagai predator terhadap hama dan patogen. Jamur ini dapat menyerang dan membunuh hama secara langsung.

- **Contoh:** Jamur dari genus *Entomopathogenic* seperti *Beauveria bassiana* dan *Metarhizium anisopliae* dapat menginfeksi dan membunuh serangga hama dengan menembus tubuh mereka dan menyebar di dalamnya.

b. Parasitisme oleh Mikroba:

- **Mekanisme:** Mikroba tertentu bertindak sebagai parasit terhadap patogen atau hama, menginfeksi dan menghancurkan mereka dari dalam.
- **Contoh:** Bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt) menghasilkan protein yang bersifat toksik terhadap larva serangga, dan mikroba parasit seperti *Nematoda* entomopatogenik menyerang dan membunuh larva hama.

4. Induksi Pertahanan Tanaman

a. Stimulan Pertahanan Tanaman:

- **Mekanisme:** Beberapa mikroorganisme dapat merangsang tanaman untuk meningkatkan sistem pertahanannya melalui produksi senyawa kimia atau perubahan dalam metabolisme tanaman.
- **Contoh:** Bakteri dari genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* dapat meningkatkan produksi senyawa pertahanan tanaman seperti asam salisilat atau jasmonat, yang memperkuat kekebalan tanaman terhadap infeksi patogen.

b. Efek Pengendalian Sistemik:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme dapat menginduksi respons pertahanan sistemik dalam tanaman, meningkatkan kekebalan tanaman terhadap berbagai patogen.
- **Contoh:** Jamur mikoriza dan bakteri pemacu pertumbuhan tanaman dapat merangsang respons pertahanan sistemik yang meningkatkan kemampuan tanaman untuk melawan infeksi.

5. Bioremediasi dan Pengendalian Patogen Tanah

a. Bioremediasi Tanah:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme dapat digunakan untuk membersihkan tanah dari patogen atau bahan kimia

beracun yang mungkin mendukung pertumbuhan patogen.

- **Contoh:** Mikroorganisme pengurai dapat digunakan untuk membersihkan tanah dari sisa-sisa pestisida atau bahan kimia berbahaya yang mungkin mendukung pertumbuhan patogen.

b. Pengendalian Patogen Tanah:

- **Mekanisme:** Mikroorganisme dapat mengurangi populasi patogen tanah dengan cara memecah sisa-sisa tanaman atau bahan organik yang menjadi tempat berkembang biaknya patogen.
- **Contoh:** Jamur saprofitik seperti *Trichoderma* dapat mengendalikan patogen akar seperti *Rhizoctonia* dan *Fusarium* dengan mengurai bahan organik yang mendukung patogen.

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam pengendalian hama dan penyakit dengan berbagai mekanisme seperti persaingan sumber daya, produksi antibiotik, predasi, dan parasitisme. Mereka tidak hanya mengurangi populasi patogen dan hama secara langsung tetapi juga dapat merangsang pertahanan tanaman dan meningkatkan kesehatan tanah. Dengan menggunakan mikroorganisme untuk pengendalian hayati, kita dapat mengelola hama dan penyakit tanaman dengan cara yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2.6 Produksi Oksigen:

Mikroorganisme laut, terutama fitoplankton, memainkan peran krusial dalam produksi oksigen di atmosfer melalui proses fotosintesis. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme laut berkontribusi terhadap produksi oksigen:

1. Fitoplankton dan Fotosintesis

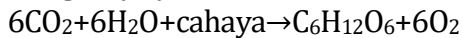
a. Definisi Fitoplankton:

Fitoplankton: Fitoplankton adalah mikroorganisme fotosintetik yang hidup melayang di lapisan permukaan

laut. Mereka mencakup berbagai jenis alga mikroskopis, seperti diatom, dinoflagellata, dan coccolithophores, serta cyanobacteria (ganggang biru-hijau).

b. Proses Fotosintesis:

Fotosintesis: Fitoplankton melakukan fotosintesis dengan menggunakan cahaya matahari, karbon dioksida (CO_2), dan air (H_2O) untuk menghasilkan glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dan oksigen (O_2). Reaksi kimia utama fotosintesis adalah:



Dalam proses ini, fitoplankton menyerap CO_2 dari atmosfer atau air laut dan melepaskan O_2 sebagai produk sampingan.

2. Kontribusi Fitoplankton terhadap Produksi Oksigen

a. Persentase Kontribusi:

Prosentase: Fitoplankton berkontribusi sekitar 50% dari total produksi oksigen di atmosfer bumi. Mereka merupakan salah satu sumber utama oksigen di planet ini, lebih besar dari kontribusi seluruh vegetasi darat gabungan.

b. Distribusi Global:

Oksigen Global: Fitoplankton berkembang biak terutama di daerah lautan yang kaya nutrisi, seperti zona upwelling (peningkatan air dingin dari kedalaman laut yang membawa nutrisi ke permukaan). Mereka menyebar di seluruh lautan, dari perairan tropis hingga dingin, dan sangat penting bagi keseimbangan ekosistem laut dan atmosfer.

3. Faktor yang Mempengaruhi Produksi Oksigen oleh Fitoplankton

a. Ketersediaan Nutrisi:

Nutrisi: Produksi oksigen oleh fitoplankton dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan silika. Kekurangan nutrisi dapat menghambat pertumbuhan fitoplankton dan, akibatnya, produksi oksigen.

b. Suhu dan Cahaya:

- **Suhu:** Suhu air mempengaruhi laju fotosintesis. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mempengaruhi kesehatan dan aktivitas fitoplankton.
- **Cahaya:** Intensitas cahaya matahari yang mencapai permukaan laut mempengaruhi fotosintesis. Di daerah yang kekurangan cahaya, seperti kedalaman laut yang lebih dalam atau daerah yang tertutup oleh awan, produksi oksigen oleh fitoplankton dapat berkurang.

c. Kualitas Air:

Oksigen dan Kontaminasi: Kualitas air laut, termasuk tingkat polusi atau kontaminasi, dapat mempengaruhi kesehatan fitoplankton dan, secara langsung, produksi oksigen.

4. Peran Fitoplankton dalam Siklus Karbon

a. Penyerapan Karbon:

Penyerapan CO₂: Fitoplankton menyerap CO₂ dari atmosfer melalui fotosintesis, mengurangi konsentrasi gas rumah kaca dan membantu mengendalikan perubahan iklim. CO₂ yang diambil oleh fitoplankton dapat disimpan dalam biomassa mereka atau terlarut dalam air laut.

b. Pembentukan Sedimen:

Karbonat: Beberapa fitoplankton, seperti coccolithophores, membentuk kerangka karbonat yang dapat mengendap ke dasar laut. Proses ini membantu mengurangi CO₂ atmosfer dalam jangka panjang dengan mengunci karbon di dalam sedimen laut.

5. Dampak Perubahan Iklim

a. Dampak Perubahan Suhu:

Perubahan Iklim: Perubahan suhu dan pola cuaca global dapat mempengaruhi distribusi fitoplankton dan produksinya. Kenaikan suhu permukaan laut dapat mengubah pola migrasi dan produktivitas fitoplankton.

b. Dampak Asidifikasi Laut:

Asidifikasi: Peningkatan konsentrasi CO₂ dapat menyebabkan asidifikasi laut, yang mempengaruhi kemampuan fitoplankton untuk melakukan fotosintesis

dan mempengaruhi keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan.

Fitoplankton merupakan komponen vital dalam produksi oksigen atmosfer melalui proses fotosintesis. Mereka tidak hanya menyediakan sebagian besar oksigen yang kita hirup tetapi juga memainkan peran kunci dalam siklus karbon global, mempengaruhi iklim dan kesehatan ekosistem laut. Dengan memahami peran fitoplankton dan faktor-faktor yang mempengaruhi produksinya, kita dapat lebih baik menghargai dan melindungi ekosistem laut serta mengatasi tantangan perubahan iklim dan dampaknya terhadap produksi oksigen.

2.7 Pembersihan Lingkungan:

Bioremediasi adalah proses pembersihan lingkungan yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan atau menghilangkan polutan dari tanah dan air. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam mengatasi pencemaran dan membersihkan lingkungan dari zat berbahaya seperti minyak tumpah dan limbah industri. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana mikroorganisme digunakan dalam bioremediasi:

1. Konsep Bioremediasi

a. Definisi Bioremediasi:

Bioremediasi: Bioremediasi adalah penggunaan organisme hidup, terutama mikroorganisme, untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminan lingkungan dari tanah, air, atau udara. Tujuan utama bioremediasi adalah mengubah polutan berbahaya menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau tidak berbahaya.

b. Mekanisme:

Metabolisme Mikroorganisme: Mikroorganisme menguraikan polutan melalui berbagai proses metabolik, seperti respirasi, fermentasi, dan transformasi enzimatis. Proses ini dapat melibatkan konversi polutan menjadi bentuk yang lebih sederhana atau mengubahnya menjadi produk yang tidak berbahaya.

2. Jenis Polutan yang Dapat Dikelola dengan Bioremediasi

a. Polutan Organik:

- **Minyak Tumpah:** Minyak tumpah di perairan atau tanah dapat diuraikan oleh mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk memecah hidrokarbon. Mikroorganisme ini termasuk bakteri, jamur, dan mikroalga yang dapat mendegradasi minyak menjadi senyawa yang lebih sederhana.
- **Limbah Industri:** Limbah industri sering mengandung senyawa organik kompleks yang dapat diuraikan oleh mikroorganisme. Contoh termasuk senyawa organik dari proses kimia, pelarut, dan bahan kimia sintetis.

b. Polutan Anorganik:

- **Logam Berat:** Beberapa mikroorganisme dapat mengubah logam berat seperti merkuri, timbal, dan kadmium menjadi bentuk yang kurang toksik atau mencegah penyerapan logam berat oleh tanaman.
- **Nutrisi Berlebih:** Mikroorganisme dapat membantu mengurangi kadar nutrisi berlebih, seperti nitrat dan fosfat, yang menyebabkan eutrofikasi di perairan.

3. Teknik Bioremediasi

a. Bioremediasi di Lokasi (In Situ):

- **Definisi:** Proses ini dilakukan langsung di lokasi pencemaran tanpa memindahkan tanah atau air yang terkontaminasi. Teknik ini memanfaatkan mikroorganisme alami atau yang diinokulasi di tempat pencemaran.
- **Contoh:** Penerapan bahan tambahan seperti nutrisi atau oksigen untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme di lokasi pencemaran minyak.

b. Bioremediasi di Luar Lokasi (Ex Situ):

- **Definisi:** Teknik ini melibatkan pemindahan tanah atau air yang terkontaminasi ke lokasi terpisah untuk dilakukan proses remediasi.
- **Contoh:** Pengolahan tanah yang terkontaminasi dengan mengeluarkannya dan memprosesnya dalam sistem tertutup yang disebut "bioreaktor," di mana

mikroorganisme ditambahkan untuk mempercepat proses pembersihan.

4. Jenis Mikroorganisme yang Terlibat

a. Bakteri:

- **Kemampuan:** Banyak bakteri memiliki kemampuan untuk menguraikan hidrokarbon, logam berat, dan senyawa organik kompleks. Contoh bakteri yang terlibat dalam bioremediasi adalah *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Mycobacterium*.
- **Aplikasi:** Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* sering digunakan untuk menguraikan tumpahan minyak, sementara *Bacillus subtilis* dapat membantu dalam penguraian limbah industri.

b. Jamur:

- **Kemampuan:** Jamur, terutama jamur saprofitik, dapat menguraikan bahan organik kompleks dan senyawa toksik. Jamur seperti *Trichoderma* dan *Phanerochaete chrysosporium* digunakan untuk menguraikan polutan organik dan limbah beracun.
- **Aplikasi:** Jamur *Phanerochaete chrysosporium* dikenal untuk kemampuannya dalam menguraikan polutan seperti dioxin dan polutan organik lainnya.

c. Mikroalga:

- **Kemampuan:** Mikroalga dapat mengadsorpsi logam berat dan senyawa beracun serta memanfaatkan nutrisi berlebih dalam proses eutrofikasi.
- **Aplikasi:** Mikroalga seperti *Chlorella* dan *Spirulina* digunakan dalam proses bioremediasi untuk mengurangi kadar logam berat dan nutrisi berlebih dalam air.

5. Aplikasi Bioremediasi dalam Lingkungan

a. Pembersihan Minyak Tumpah:

Proses: Mikroorganisme yang dapat memecah hidrokarbon dalam minyak digunakan untuk membersihkan tumpahan minyak di laut atau tanah. Proses ini melibatkan inokulasi mikroorganisme, penambahan

nutrisi, dan pengaturan kondisi lingkungan untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme.

b. Pengolahan Limbah Industri:

Proses: Limbah industri yang mengandung senyawa organik kompleks diuraikan dengan bantuan mikroorganisme dalam bioreaktor atau melalui metode bioremediasi in situ.

c. Pengelolaan Kontaminasi Logam Berat:

Proses: Mikroorganisme digunakan untuk mengubah logam berat menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau untuk menstabilkan logam berat di lingkungan.

6. Keuntungan dan Tantangan Bioremediasi

a. Keuntungan:

- **Ramah Lingkungan:** Bioremediasi merupakan metode pembersihan yang ramah lingkungan karena memanfaatkan organisme hidup untuk mengurangi polutan.
- **Kost-Efektif:** Biasanya lebih murah dibandingkan metode pengolahan fisik atau kimia.
- **Permanen:** Proses ini dapat mengubah polutan menjadi senyawa yang tidak berbahaya secara permanen.

b. Tantangan:

- **Efektivitas:** Tidak semua polutan dapat diuraikan dengan efektif oleh mikroorganisme. Beberapa polutan mungkin memerlukan kondisi khusus atau kombinasi mikroorganisme.
- **Kondisi Lingkungan:** Kondisi lingkungan seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi dapat mempengaruhi efektivitas bioremediasi.

Mikroorganisme berperan penting dalam bioremediasi untuk membersihkan lingkungan dari polutan seperti minyak tumpah dan limbah industri. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk menguraikan polutan, bioremediasi menawarkan metode yang ramah lingkungan dan efektif untuk mengatasi pencemaran. Namun, tantangan seperti

efektivitas dan kondisi lingkungan perlu diperhatikan untuk memastikan keberhasilan proses bioremediasi.

Peran-peran ini menunjukkan betapa vitalnya mikroorganisme bagi kesehatan dan keseimbangan ekosistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Clapham, Jr. W.B. 1973. *Natural Ecosystems*. New York: Macmillan Publishing Co. Inc.
- Clarke, G.L. 1954. *Elements of Ecology*. New York: Joh Wiley & Sons Inc.
- Cannon, W.B. 1939. *The Wisdom of the Body*. New York: W.W.Norton & Co.
- Diesendorf, M. dan Hamilton, C. 1997. *Human Ecology, Human Economy*. Sydney: Allen & Unwin
- Marten, G.G. 2001. *Human Ecology: Basic Concept for Sustainable Development*. New York: Earthscan Publications
- Odum, E.P. 1996. *Dasar-Dasar Ekologi*. Edisi Ketiga. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Taylor, W.P. 1934. Significance of Extreme or Intermittent Conditions in Distribution of Species and Management of Natural Resources, with A Restatement of Liebig's Law of the Minimum. *Ecology*, 15:274-379
- Wirakusumah, S. 2003. *Dasar-Dasar Ekologi: Menopang Pengetahuan Ilmu-Ilmu Lingkungan*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia

BAB 3

SIKLUS NUTRIEN DALAM EKOSISTEM

Oleh Wayan Budiarsa Suyasa

3.1 Definisi dan Pentingnya Siklus Nutrien

Siklus nutrien adalah proses alami di mana nutrien penting untuk kehidupan dipindahkan dan didaur ulang melalui komponen biotik (makhluk hidup) dan abiotik (lingkungan fisik) dalam suatu ekosistem. Proses ini melibatkan pergerakan unsur-unsur seperti karbon, nitrogen, fosfor, dan kalium, yang semuanya esensial untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidup organisme. Siklus ini terdiri dari berbagai tahap, termasuk asimilasi, dekomposisi, mineralisasi, dan transpor.

Nutrien utama yang terlibat dalam siklus ini termasuk karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, dan kalium. Masing-masing memiliki jalur dan mekanisme tersendiri dalam ekosistem. Misalnya, dalam siklus karbon, karbon dioksida diambil oleh tumbuhan melalui fotosintesis dan diubah menjadi bahan organik, yang kemudian dikonsumsi oleh hewan. Ketika tumbuhan dan hewan mati, dekomposer seperti bakteri dan jamur menguraikan bahan organik ini, melepaskan karbon kembali ke atmosfer sebagai karbon dioksida.

Pentingnya siklus nutrien tidak bisa dilebih-lebihkan. Pertama, siklus ini memastikan ketersediaan nutrien esensial yang terus menerus bagi organisme hidup. Nutrien yang didaur ulang memungkinkan tumbuhan untuk tumbuh, yang pada gilirannya menyediakan makanan dan habitat bagi berbagai hewan. Kedua, siklus nutrien membantu dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Dengan mengatur distribusi dan ketersediaan nutrien, siklus ini mencegah kelebihan atau kekurangan unsur-unsur tertentu yang bisa mengganggu fungsi ekosistem. Selain itu, siklus nutrien memainkan peran penting dalam mitigasi perubahan iklim. Misalnya, siklus karbon mempengaruhi jumlah karbon dioksida di atmosfer, yang

merupakan gas rumah kaca utama. Dengan mengikat karbon di dalam biomassa dan sedimen, siklus ini membantu mengurangi konsentrasi karbon dioksida atmosferik, yang pada akhirnya bisa mengurangi pemanasan global. Namun, kegiatan manusia seperti deforestasi, pembakaran bahan bakar fosil, dan penggunaan pupuk kimia secara berlebihan dapat mengganggu siklus nutrisi alami. Gangguan ini bisa menyebabkan masalah lingkungan seperti eutrofikasi, perubahan iklim, dan hilangnya keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, memahami dan melindungi siklus nutrisi adalah kunci untuk menjaga kesehatan ekosistem dan keberlanjutan kehidupan di Bumi.

Dengan demikian, siklus nutrisi adalah mekanisme fundamental yang mendasari fungsi ekosistem, menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk kehidupan, menjaga keseimbangan lingkungan, dan membantu dalam mitigasi perubahan iklim. Perlindungan dan pemulihan siklus

3.2 Siklus Karbon

Siklus karbon adalah serangkaian proses alami yang mengatur pertukaran karbon di antara komponen biosfer, atmosfer, hidrosfer, dan geosfer. Karbon, sebagai elemen dasar kehidupan, berperan penting dalam berbagai reaksi kimia dan biologis yang mendukung kehidupan di Bumi.

Siklus karbon adalah proses penting yang melibatkan pertukaran karbon di antara biosfer, atmosfer, hidrosfer, dan geosfer. Proses ini mempengaruhi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer dan oleh karena itu, berperan dalam pengendalian iklim global. Berikut adalah narasi detail mengenai proses utama dalam siklus karbon:

1. Fotosintesis dan Respirasi

Fotosintesis adalah proses di mana tumbuhan hijau, alga, dan beberapa bakteri mengubah karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) menjadi glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dan oksigen (O_2) menggunakan energi dari sinar matahari. Reaksi kimia fotosintesis: $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{energi matahari} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$. Fotosintesis berperan dalam mengurangi konsentrasi CO_2 di

atmosfer dan menyimpan karbon dalam bentuk biomassa tumbuhan

Respirasi adalah proses di mana organisme mengkonversi glukosa dan oksigen menjadi energi, karbon dioksida, dan air. Reaksi kimia respirasi: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + \text{energi}$. Respirasi terjadi di semua organisme hidup, termasuk tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme, yang mengeluarkan CO_2 kembali ke atmosfer.

2. Degradasi Bahan Organik

Bahan organik dari organisme mati dan produk limbah diuraikan oleh mikroorganisme seperti bakteri dan fungi. Proses ini menghasilkan CO_2 dan metana (CH_4) yang dilepaskan ke atmosfer atau tanah. Pembusukan adalah proses alami di mana bahan organik diubah menjadi zat yang lebih sederhana. Kompos adalah proses pembusukan yang dikontrol untuk mengubah limbah organik menjadi pupuk yang kaya nutrisi.

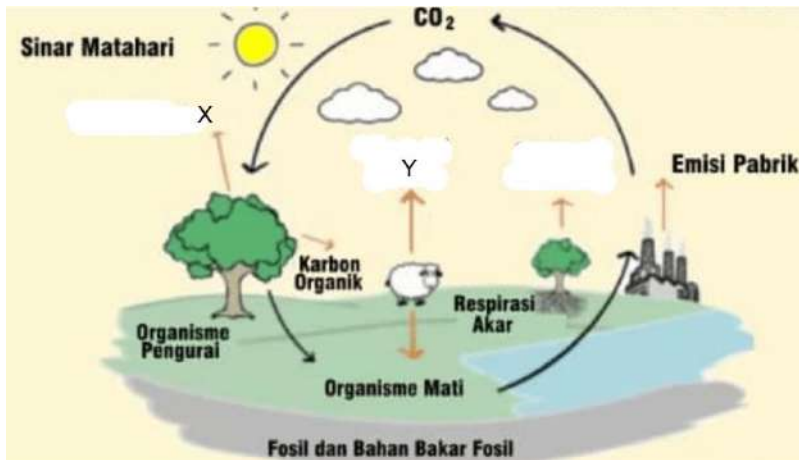
3. Penyimpanan Karbon di Biosfer, Atmosfer, Hidrosfer, dan Geosfer

Biosfer: Karbon disimpan dalam bentuk biomassa tumbuhan dan hewan. Tumbuhan menyerap CO_2 melalui fotosintesis dan menyimpan karbon dalam jaringan mereka.

Atmosfer: Atmosfer mengandung karbon dalam bentuk CO_2 dan metana (CH_4). Gas-gas ini berperan dalam efek rumah kaca dan pengendalian suhu bumi.

Hidrosfer: Karbon disimpan dalam air laut dan danau dalam bentuk karbonat (CO_3^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-). Lautan adalah penyimpan karbon terbesar di bumi, menyerap CO_2 dari atmosfer melalui proses difusi dan fotosintesis oleh fitoplankton.

Geosfer: Karbon disimpan dalam bentuk batuan karbonat (seperti kalsit dan dolomit) dan bahan bakar fosil (seperti batubara, minyak, dan gas alam). Proses geologis seperti pelapukan batuan dan pembentukan fosil turut menyimpan dan melepaskan karbon dalam jangka waktu yang sangat panjang.



Gambar 3.1. Ilustrasi dari siklus karbon

Gambar 3.1 menunjukkan pertukaran karbon antara atmosfer, biosfer, hidrosfer, dan geosfer. Panah menunjukkan arah aliran karbon, dan ukuran panah menunjukkan seberapa besar aliran tersebut. Siklus ini melibatkan berbagai proses seperti fotosintesis, respirasi, degradasi bahan organik, penyimpanan dalam biomassa, dan interaksi dengan laut serta batuan.

Proses-proses ini membentuk keseimbangan karbon di alam dan mempengaruhi konsentrasi gas rumah kaca yang berdampak pada perubahan iklim. Pemahaman tentang siklus karbon sangat penting untuk mengelola dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan, seperti emisi CO_2 dari pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan penggunaan lahan.

3.3 Peran Mikroorganisme dalam Siklus Karbon

Mikroba Fotosintetik

Mikroba fotosintetik, seperti sianobakteri dan alga, memainkan peran krusial dalam siklus karbon melalui proses fotosintesis. Proses ini memungkinkan mereka untuk mengubah karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer menjadi bahan organik, sekaligus menghasilkan oksigen (O_2) sebagai produk sampingan. Proses fotosintesis pada mikroba fotosintetik berlangsung di kloroplas atau bagian sel yang mengandung pigmen

fotosintetik seperti klorofil. Reaksi fotosintesis dapat dirangkum sebagai berikut:



Melalui reaksi ini, mikroba mengubah CO_2 dan air menjadi glukosa (bahan organik) dan oksigen. Glukosa digunakan sebagai sumber energi dan sebagai bahan penyusun sel.

Sianobakteri adalah kelompok bakteri yang mampu melakukan fotosintesis oksigenik, menghasilkan O_2 sebagai produk sampingan. Mereka ditemukan di berbagai lingkungan, mulai dari perairan laut hingga air tawar, dan bahkan di tanah. Sianobakteri dianggap sebagai salah satu organisme pertama yang melakukan fotosintesis oksigenik, berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kadar oksigen di atmosfer Bumi pada masa lalu. Alga terdiri dari berbagai jenis organisme, termasuk alga hijau, alga coklat, dan alga merah. Mereka ditemukan di berbagai habitat akuatik. Selain berperan dalam fotosintesis, alga juga berfungsi sebagai produsen utama dalam rantai makanan akuatik, menyediakan bahan organik untuk organisme lainnya.

Melalui fotosintesis, mikroba fotosintetik menyerap CO_2 dari atmosfer dan mengubahnya menjadi bahan organik. Bahan organik ini dapat disimpan dalam sel atau diekskresikan ke lingkungan. Ketika mikroba mati atau dimakan oleh organisme lain, karbon yang tersimpan dalam bahan organik tersebut akan kembali ke lingkungan, baik melalui dekomposisi atau melalui respirasi organisme yang memakannya.

Dengan menyerap CO_2 , mikroba fotosintetik membantu mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, yang berperan dalam mitigasi perubahan iklim. Beberapa penelitian juga mengembangkan teknologi yang memanfaatkan mikroba fotosintetik untuk produksi biofuel dan bioplastik, yang dapat menjadi alternatif berkelanjutan bagi bahan bakar fosil dan plastik konvensional. Secara keseluruhan, mikroba fotosintetik memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan siklus karbon di Bumi. Mereka tidak hanya mendukung kehidupan melalui produksi oksigen, tetapi juga berkontribusi terhadap stabilitas iklim global dengan menyerap CO_2 dari atmosfer.

Mikroba Dekomposer

Mikroba dekomposer memainkan peran penting dalam siklus ekosistem dengan menguraikan bahan organik mati. Mikroba ini, yang meliputi bakteri, jamur, dan organisme mikro lainnya, bertanggung jawab untuk memecah sisa-sisa tumbuhan dan hewan mati serta limbah organik. Proses dekomposisi ini sangat penting untuk mendaur ulang karbon dan nutrisi, memastikan ketersediaan unsur-unsur penting bagi organisme lain dalam ekosistem.

Dekomposisi bahan organik oleh mikroba dapat dibagi menjadi beberapa tahap:

1. **Fragmentasi:** Pada tahap awal, bahan organik yang mati akan dipecah secara fisik menjadi potongan-potongan yang lebih kecil oleh hewan tanah, seperti cacing tanah dan serangga. Proses ini meningkatkan luas permukaan bahan organik, memudahkan akses mikroba.
2. **Penguraian Enzimatik:** Bakteri dan jamur mengeluarkan enzim yang mampu memecah molekul kompleks dalam bahan organik. Misalnya, selulase memecah selulosa dalam dinding sel tumbuhan, sedangkan ligninase memecah lignin yang merupakan komponen utama kayu.
3. **Fermentasi dan Respirasi Anaerobik:** Dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen), beberapa mikroba melakukan fermentasi, menghasilkan produk seperti asam organik, alkohol, CO_2 , dan CH_4 . Metana (CH_4) adalah gas rumah kaca yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik oleh bakteri metanogenik.
4. **Respirasi Aerobik:** Dalam kondisi aerobik (dengan oksigen), mikroba mengoksidasi bahan organik, melepaskan energi, CO_2 , dan air. Proses ini lebih efisien dibandingkan respirasi anaerobik dan tidak menghasilkan metana.

Mikroba dekomposer berperan dalam mendaur ulang karbon, nitrogen, fosfor, dan nutrisi lainnya. Mereka memastikan bahwa elemen-elemen ini kembali ke tanah dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman dan organisme lain. Berikut adalah beberapa aspek penting dari peran mereka:

1. Siklus Karbon: Mikroba mengubah bahan organik mati menjadi CO_2 melalui respirasi. CO_2 kemudian dapat digunakan oleh tanaman dalam fotosintesis, menghubungkan kembali siklus karbon.
2. Siklus Nitrogen: Mikroba dekomposer menguraikan protein dan asam nukleat dalam bahan organik menjadi amonia (NH_3) dan nitrat (NO_3^-), yang dapat diambil oleh tanaman. Beberapa bakteri juga terlibat dalam fiksasi nitrogen, mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh organisme.
3. Siklus Fosfor: Fosfor dalam bahan organik dipecah menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap oleh tanaman. Fosfor adalah nutrisi penting untuk pertumbuhan tanaman dan pembentukan DNA.
4. Pembentukan Humus: Mikroba membantu dalam pembentukan humus, materi organik stabil dalam tanah yang meningkatkan struktur tanah, retensi air, dan kapasitas penyerapan nutrisi.

Beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi dan kecepatan dekomposisi bahan organik oleh mikroba meliputi:

1. Suhu: Suhu yang lebih tinggi biasanya meningkatkan aktivitas mikroba, mempercepat dekomposisi. Namun, suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat menghambat proses ini.
2. Kelembaban: Kelembaban yang cukup diperlukan untuk aktivitas mikroba, tetapi kondisi yang terlalu basah atau terlalu kering dapat menghambat dekomposisi.
3. pH Tanah: pH yang terlalu asam atau basa dapat mengurangi aktivitas mikroba dekomposer. pH netral atau sedikit asam umumnya paling ideal.
4. Kandungan Oksigen: Dekomposisi aerobik lebih cepat dan efisien dibandingkan dekomposisi anaerobik. Tanah yang terlalu padat atau tergenang air cenderung memiliki oksigen rendah, memperlambat dekomposisi.

Mikroba dekomposer adalah komponen kunci dalam ekosistem, memungkinkan siklus berkelanjutan dari karbon dan nutrisi. Tanpa mereka, bahan organik mati akan menumpuk, menghambat pertumbuhan tanaman baru dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Oleh karena itu, memahami dan mendukung aktivitas mikroba dekomposer adalah penting untuk kesehatan lingkungan dan pertanian berkelanjutan.

3.4 Dampak Antropogenik pada Siklus Karbon

Siklus karbon adalah proses alamiah yang mengatur aliran karbon di seluruh ekosistem Bumi, yang melibatkan atmosfer, biosfer, litosfer, dan hidrosfer. Aktivitas manusia, atau dampak antropogenik, telah mengganggu keseimbangan alami siklus ini, menyebabkan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca dan perubahan iklim. Pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam adalah sumber utama emisi CO_2 . Aktivitas ini melepaskan karbon yang telah tersimpan di dalam bumi selama jutaan tahun ke atmosfer dalam waktu singkat. Sektor transportasi, industri, dan pembangkit listrik adalah kontributor utama emisi ini. Kendaraan bermotor, pesawat terbang, dan kapal laut membakar bahan bakar fosil dalam jumlah besar, menghasilkan emisi CO_2 yang signifikan. Pabrik dan fasilitas industri lainnya juga membakar bahan bakar fosil untuk proses produksi, sementara pembangkit listrik membakar batu bara, minyak, atau gas alam untuk menghasilkan listrik. Proses pembuatan semen juga merupakan sumber besar emisi CO_2 . Pembakaran kalsium karbonat (CaCO_3) untuk menghasilkan kapur (CaO) melepaskan CO_2 sebagai produk sampingan. Semen digunakan dalam konstruksi di seluruh dunia, menjadikan industri ini sebagai salah satu penyumbang utama emisi karbon.

Dampak antropogenik terutama dari deforestasi dan perubahan penggunaan lahan. Deforestasi, atau penggundulan hutan, memiliki dampak signifikan pada siklus karbon. Hutan berperan penting dalam menyerap CO_2 dari atmosfer melalui fotosintesis dan menyimpan karbon dalam biomassa tumbuhan dan tanah. Ketika hutan ditebang, kapasitas biosfer untuk menyerap karbon berkurang. Selain itu, proses deforestasi sering kali

melibatkan pembakaran atau dekomposisi biomassa, yang melepaskan karbon yang tersimpan kembali ke atmosfer sebagai CO₂. Perubahan Penggunaan Lahan merupakan konversi lahan untuk pertanian, perkebunan, atau pembangunan juga mengurangi kapasitas biosfer untuk menyerap karbon. Penggunaan lahan untuk pertanian sering kali melibatkan penebangan hutan dan pembakaran biomassa, yang melepaskan CO₂. Penggunaan pupuk sintetis dan metode pertanian intensif juga dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca lainnya, seperti dinitrogen oksida (N₂O). Konsekuensi dan Tantangan peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer memperkuat efek rumah kaca, menyebabkan peningkatan suhu global dan perubahan iklim. Perubahan iklim ini berdampak luas, termasuk peningkatan frekuensi dan intensitas peristiwa cuaca ekstrem, kenaikan permukaan laut, dan perubahan pola curah hujan, yang semuanya mengancam ekosistem dan kehidupan manusia.

Memahami dan mengelola dampak manusia terhadap siklus karbon adalah kunci untuk menjaga keseimbangan alam yang mendukung kehidupan di planet kita. Upaya mitigasi, seperti pengurangan emisi karbon, reforestasi, dan adopsi teknologi ramah lingkungan, sangat penting untuk mengurangi dampak negatif antropogenik pada siklus karbon. Selain itu, kebijakan dan peraturan yang mendukung penggunaan energi terbarukan dan praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan dapat membantu menjaga keseimbangan karbon global. Dampak antropogenik pada siklus karbon memiliki implikasi besar bagi iklim global dan keseimbangan ekosistem. Aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi telah mengganggu siklus karbon alami, menyebabkan peningkatan emisi CO₂ dan perubahan iklim. Untuk mengurangi dampak ini, diperlukan upaya global untuk mengurangi emisi karbon, melindungi hutan, dan mengadopsi praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan. Memahami siklus karbon dan dampak aktivitas manusia adalah langkah penting menuju pengelolaan lingkungan yang lebih baik dan masa depan yang lebih berkelanjutan.

3.5 Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen adalah rangkaian proses biogeokimia yang mengubah nitrogen di lingkungan, memfasilitasi transfernya antara atmosfer, tanah, dan organisme hidup. Nitrogen adalah unsur esensial bagi semua makhluk hidup karena menjadi komponen utama asam amino, protein, dan DNA. Meskipun nitrogen merupakan gas yang melimpah di atmosfer (sekitar 78%), bentuk ini tidak dapat langsung digunakan oleh sebagian besar makhluk hidup. Oleh karena itu, nitrogen harus melalui berbagai transformasi kimia agar dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan dan hewan.

Nitrogen di alam dapat ditemukan dalam beberapa bentuk utama:

1. **Nitrogen Gas (N_2)**: Bentuk paling melimpah di atmosfer, tetapi tidak dapat digunakan langsung oleh organisme kecuali melalui proses fiksasi.
2. **Amonium (NH_4^+)**: Hasil dekomposisi materi organik dan fiksasi nitrogen, dapat diserap oleh tumbuhan.
3. **Nitrit (NO_2^-) dan Nitrat (NO_3^-)**: Produk nitrifikasi yang diserap oleh tumbuhan sebagai sumber nitrogen.
4. **Urea ($CO(NH_2)_2$)**: Bentuk nitrogen organik yang dihasilkan oleh hewan dan manusia, yang kemudian diuraikan menjadi amonia dan nitrat.

Proses dalam Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen adalah rangkaian proses biogeokimia yang mengubah nitrogen dari atmosfer menjadi berbagai bentuk kimiawi yang bisa digunakan oleh makhluk hidup, dan kemudian mengembalikan nitrogen ke atmosfer. Proses ini sangat penting untuk kehidupan di bumi karena nitrogen adalah komponen utama dalam asam amino, protein, dan DNA. Berikut adalah tahapan utama dalam siklus nitrogen:

Fiksasi Nitrogen (Nitrogen Fixation):

1. Proses di mana nitrogen atmosfer (N_2) diubah menjadi amonia (NH_3) oleh bakteri fiksasi nitrogen, seperti *Rhizobium* yang hidup dalam akar tanaman leguminosa.
2. Reaksi kimia: $N_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow 2NH_3 + H_2$

Nitrifikasi (*Nitrification*):

1. Proses dua langkah di mana amonia dioksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) dan kemudian nitrit dioksidasi menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri nitrifikasi, seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*.
2. Reaksi kimia:
 - $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$ (oleh *Nitrosomonas*)
 - $\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ (oleh *Nitrobacter*)

Asimilasi (*Assimilation*):

1. Proses di mana tanaman menyerap nitrat (NO_3^-) atau amonia (NH_4^+) dari tanah dan menggunakannya untuk membentuk protein dan asam nukleat.
2. Reaksi kimia tidak spesifik karena ini melibatkan berbagai proses biokimia internal tanaman.

Amonifikasi (*Ammonification*):

1. Proses di mana sisa-sisa organisme mati dan produk limbah diuraikan oleh bakteri dan jamur saprofit, mengubah nitrogen organik kembali menjadi amonia (NH_3) atau ion amonium (NH_4^+).
2. Reaksi kimia: $\text{R-NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{R-OH}$

Denitrifikasi (*Denitrification*):

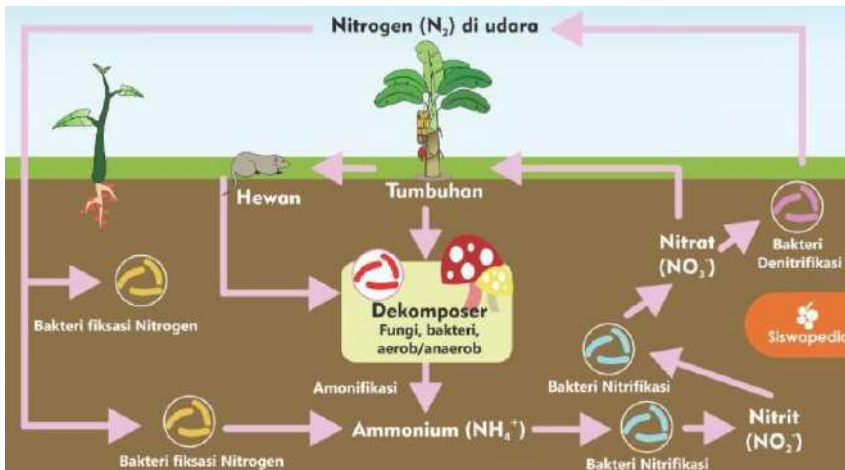
1. Proses di mana nitrat (NO_3^-) diubah kembali menjadi nitrogen gas (N_2) atau gas nitrogen oksida (N_2O) oleh bakteri denitrifikasi, seperti *Pseudomonas* dan *Clostridium*, dalam kondisi anaerob.
2. Reaksi kimia:
 - $2\text{NO}_3^- + 10\text{e}^- + 12\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
 - $2\text{NO}_3^- + 5\text{e}^- + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$

Setiap tahapan dalam siklus nitrogen memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan nitrogen di ekosistem, serta mendukung pertumbuhan dan reproduksi organisme. Siklus ini juga sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, seperti penggunaan pupuk nitrogen, pembakaran bahan bakar fosil, dan pengelolaan limbah.

Peran Mikroorganisme dalam Siklus Nitrogen

Bakteri Pengikat Nitrogen

Bakteri pengikat nitrogen adalah mikroorganisme penting dalam siklus nitrogen karena mereka memiliki kemampuan untuk mengubah nitrogen gas (N_2), yang merupakan bentuk utama nitrogen di udara, menjadi senyawa yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan, seperti amonium (NH_4^+). Proses ini disebut sebagai fiksasi nitrogen. Contoh utama bakteri pengikat nitrogen termasuk *Rhizobium* dan *Azotobacter*. *Rhizobium* adalah jenis bakteri yang membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman leguminosa, seperti kacang-kacangan, kedelai, dan kacang tanah. Dalam hubungan ini, *Rhizobium* menginfeksi akar tanaman dan membentuk struktur khusus yang disebut nodul. Di dalam nodul ini, bakteri *Rhizobium* melakukan fiksasi nitrogen, mengubah nitrogen gas menjadi amonium yang diserap oleh tanaman sebagai sumber nutrisi.



Gambar 3.2. Ilustrasi siklus Nitrogen

Sementara itu, *Azotobacter* adalah bakteri pengikat nitrogen yang hidup bebas di tanah. Mereka dapat melakukan fiksasi nitrogen tanpa hubungan simbiotik dengan tanaman. *Azotobacter* umumnya ditemukan di tanah yang kaya organik dan berperan penting dalam menyediakan sumber nitrogen yang tersedia untuk tanaman lain. Kedua jenis bakteri ini, baik *Rhizobium* maupun *Azotobacter*, merupakan contoh penting dari bagaimana

mikroorganisme berperan dalam memperkaya ketersediaan nitrogen dalam tanah, yang pada gilirannya mendukung pertumbuhan tanaman dan produktivitas ekosistem.

Bakteri Nitrifikasi dan Denitrifikasi

Bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi memegang peran penting dalam siklus nitrogen di lingkungan. Berikut adalah penjelasan lebih detail mengenai keduanya:

Bakteri nitrifikasi meliputi nitrosomonas adalah jenis bakteri nitrifikasi pertama yang terlibat dalam proses oksidasi amonium (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-). Proses ini merupakan langkah pertama dalam nitrifikasi, yang terjadi di dalam tanah, air, dan sistem ekosistem air tawar. Selanjutnya nitrobacter adalah bakteri nitrifikasi kedua yang mengoksidasi nitrit (NO_2^-), yang dihasilkan oleh Nitrosomonas, menjadi nitrat (NO_3^-). Nitrat merupakan bentuk nitrogen yang lebih stabil dan mudah tersedia bagi tumbuhan dalam bentuk nutrisi.

Bakteri Denitrifikasi yaitu bakteri Pseudomonas adalah contoh umum dari bakteri denitrifikasi. Mereka hidup di lingkungan anaerobik (tanpa oksigen) di dalam tanah atau air tergenang. Pseudomonas dan bakteri denitrifikasi lainnya mengurangi nitrat (NO_3^-) menjadi nitrogen gas (N_2) atau nitrogen oksida (NO), melepaskannya ke atmosfer. Proses denitrifikasi ini mengurangi ketersediaan nitrat bagi tumbuhan dan kembali mengubah nitrogen oksida ke nitrogen gas yang tidak berbahaya. Clostridium juga merupakan kelompok bakteri denitrifikasi yang berperan dalam mengubah nitrat menjadi nitrogen gas di lingkungan anaerobik. Mereka dapat ditemukan di dalam tanah, lumpur, atau lingkungan lain yang memiliki kondisi anaerobik yang cocok.

Nitrifikasi dan **denitrifikasi** merupakan proses yang berseberangan tetapi saling melengkapi dalam siklus nitrogen. **Nitrifikasi** meningkatkan ketersediaan nitrogen dalam bentuk yang dapat diserap oleh tumbuhan, sementara **denitrifikasi** mengembalikan nitrogen atmosfer ke dalam siklus biogeokimia. Keseimbangan antara aktivitas kedua jenis bakteri ini penting dalam menjaga kualitas tanah, air, dan ekosistem secara keseluruhan.

Dampak Antropogenik pada Siklus Nitrogen

Penggunaan pupuk nitrogen dalam pertanian memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan. Secara positif, pupuk nitrogen meningkatkan produksi tanaman karena tanaman memerlukan nitrogen untuk pertumbuhan mereka. Ini meningkatkan hasil panen dan mendukung ketahanan pangan.

Namun, penggunaan pupuk nitrogen yang berlebihan dapat menyebabkan beberapa masalah lingkungan yang serius. Salah satunya adalah peningkatan kandungan nitrat di tanah. Nitrat ini dapat larut dalam air hujan atau irigasi dan mencuci ke dalam sumber air seperti sungai, danau, atau akhirnya ke dalam laut. Di sana, nitrat dapat menyebabkan eutrofikasi, fenomena di mana nutrisi yang berlebihan menyebabkan pertumbuhan alga yang cepat. Alga yang berlebihan ini mengurangi kadar oksigen di dalam air saat mereka membusuk, yang pada gilirannya mengganggu ekosistem perairan. Misalnya, kelebihan alga dapat menyebabkan "mati lelehan" di mana organisme lain tidak dapat bertahan hidup karena kekurangan oksigen.

Pencemaran nitrat juga dapat mempengaruhi kesehatan manusia. Konsumsi air yang terkontaminasi nitrat dapat menyebabkan methemoglobinemia (sindrom biru bayi) pada bayi atau nitrosamin yang berpotensi karsinogenik pada orang dewasa.

Oleh karena itu, manajemen yang bijaksana dalam penggunaan pupuk nitrogen sangat penting. Ini mencakup praktik-praktik seperti pemilihan dosis yang tepat, penggunaan pupuk secara bertarget, penggunaan teknik irigasi yang efisien, dan perlindungan vegetasi penutup tanah untuk mengurangi erosi dan hilangnya nitrogen dari tanah. Dengan pendekatan ini, kita dapat memaksimalkan manfaat pertanian sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Pencemaran air oleh nitrogen, terutama melalui nitrat dan amonia, adalah masalah serius yang dapat berdampak pada kesehatan manusia dan ekosistem akuatik. Siklus nitrogen alami melibatkan transformasi antara berbagai bentuk nitrogen oleh mikroorganisme. Namun, aktivitas manusia seperti pertanian intensif, penggunaan pupuk nitrogen, dan limbah domestik serta industri, dapat mengganggu siklus ini. Ketika nitrat tercuci ke

dalam sumber air minum, misalnya, dapat menyebabkan methemoglobinemia pada bayi, atau yang dikenal sebagai sindrom bayi biru, yang mengurangi kemampuan darah untuk membawa oksigen. Di perairan, konsentrasi tinggi nitrat dapat memicu pertumbuhan alga berlebihan, yang disebut eutrofikasi. Alga ini mengurangi kadar oksigen terlarut dalam air saat mati dan membusuk, mengancam kehidupan ikan dan organisme akuatik lainnya. Mikroorganisme seperti bakteri denitrifikasi memainkan peran penting dalam mengubah nitrat kembali menjadi nitrogen gas, yang melepaskan nitrogen dari siklus air dan mencegah akumulasi berlebihan. Namun, ketidakseimbangan dalam siklus ini disebabkan oleh aktivitas manusia dapat mengakibatkan pencemaran yang berkelanjutan. Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan yang berkelanjutan meliputi pengelolaan pertanian yang bijaksana, teknologi penanganan limbah, dan regulasi yang ketat terhadap pelepasan nitrat dan amonia ke dalam lingkungan. Dengan memahami dan menghargai kompleksitas siklus nitrogen serta dampaknya, kita dapat mengambil langkah-langkah proaktif untuk melindungi kesehatan manusia dan mempertahankan keseimbangan ekosistem air yang penting bagi kehidupan semua makhluk

3.6 Siklus Fosfor

Siklus fosfor adalah proses alami di mana fosfor berpindah antara berbagai kompartemen dalam lingkungan, termasuk udara, air, tanah, dan makhluk hidup. Proses ini penting karena fosfor merupakan unsur esensial dalam kehidupan, terutama dalam pembentukan DNA, RNA, dan energi seluler. Siklus fosfor dimulai dengan fosfor yang terdapat dalam batuan fosfat, yang secara alami tererosi oleh cuaca dan erosi. Proses ini membebaskan fosfor ke dalam tanah dan air melalui pelarutan dan transportasi oleh air hujan. Fosfor yang terlarut dalam air dapat diambil oleh tanaman melalui proses penyerapan akar. Selanjutnya, fosfor dari tanaman ini dapat beralih ke hewan herbivora yang memakan tanaman tersebut. Ketika hewan atau tanaman mati, dekomposisi oleh mikroorganisme akan melepaskan fosfor ke dalam tanah kembali. Fosfor dalam tanah dapat tetap ada dalam bentuk organik atau

dapat diikat dalam mineral tanah. Sebagian fosfor dapat masuk ke dalam air melalui erosi tanah atau melalui limbah domestik dan industri. Di dalam air, fosfor bisa diserap oleh tumbuhan air dan alga, membentuk dasar rantai makanan di ekosistem air. Ketika organisme ini mati, fosfor mereka kembali ke siklus melalui dekomposisi dan mineralisasi.

Selain itu, ada proses geologi jangka panjang yang melibatkan siklus fosfor. Proses ini mencakup pengendapan fosfor di dasar laut selama jutaan tahun, membentuk batuan fosfat baru. Peristiwa geologi seperti angin dan erosi kemudian dapat mengangkat fosfor dari deposit ini kembali ke siklus di daratan. Siklus fosfor memainkan peran penting dalam mempertahankan ketersediaan fosfor yang cukup untuk kehidupan tanaman dan hewan di Bumi. Perubahan dalam siklus ini dapat mempengaruhi produktivitas ekosistem air dan daratan, serta dapat berdampak pada kualitas air dan ekosistem yang tergantung padanya.



Gambar 3.3. Ilustrasi siklus Fosfor

Siklus fosfor adalah proses alami di mana fosfor bergerak melalui lingkungan dalam berbagai bentuk kimia, mirip dengan siklus karbon atau nitrogen. Berikut adalah beberapa tahap utama dan reaksi yang terjadi dalam siklus fosfor:

1. **Erosi dan Pelapukan:** Batuan fosfat tererosi dari tanah oleh air hujan dan aliran sungai. Proses pelapukan juga melepaskan fosfor organik dari bahan organik yang membusuk.
2. **Penyerapan oleh Tumbuhan:** Tanaman menyerap fosfor dalam bentuk ion fosfat (PO_4^{3-}) dari tanah melalui akar mereka.
3. **Translokasi dalam Organisme:** Fosfor bergerak melalui rantai makanan saat tumbuhan dimakan oleh hewan dan hewan dimakan oleh hewan lainnya. Fosfor organik dari jaringan organisme ini kemudian dilepaskan kembali ke lingkungan saat organisme mati dan terurai.
4. **Siklus Laut:** Fosfor juga dapat beredar di ekosistem laut, di mana organisme seperti fitoplankton menyerap fosfor dari air laut.
5. **Siklus Sedimen:** Sebagian besar fosfor mengendap ke dasar laut atau danau sebagai endapan organik atau mineral, membentuk batuan fosfat baru.
6. **Pemulihan dan Pemanfaatan:** Fosfor yang terperangkap di endapan sedimen dapat kembali ke ekosistem melalui erosi, atau dimanfaatkan manusia dalam pertanian sebagai pupuk fosfat.

Reaksi utama yang terlibat dalam siklus fosfor meliputi pelapukan batuan fosfat, penyerapan oleh tumbuhan, dekomposisi bahan organik, dan proses kimia di dalam air yang menghasilkan ion fosfat yang dapat diserap kembali oleh tanaman. Siklus ini penting karena fosfor adalah nutrien esensial untuk pertumbuhan tanaman dan regulasi ekosistem.

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam siklus fosfor di lingkungan. Beberapa peran utama mereka meliputi:

1. **Mineralisasi:** Mikroba seperti bakteri dan fungi dapat mengurai bahan organik yang mengandung fosfor organik menjadi senyawa anorganik, seperti fosfat. Ini memungkinkan fosfor untuk kembali ke lingkungan dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman dan makhluk hidup lainnya.

2. **Fiksasi Fosfor:** Beberapa mikroorganisme, seperti bakteri *Rhizobium* pada akar tanaman leguminosa, mampu mengubah fosfor anorganik menjadi bentuk organik yang tersedia bagi tanaman.
3. **Denitrifikasi:** Beberapa bakteri dalam proses denitrifikasi mampu melepaskan fosfor dari senyawa organik dalam kondisi anaerobik, meskipun ini terkait dengan siklus nitrogen, tetapi juga mempengaruhi ketersediaan fosfor dalam ekosistem.
4. **Simbiotik dan Parasitik:** Mikroorganisme dalam tanah dapat hidup dalam hubungan simbiotik dengan tanaman atau dalam bentuk parasitik untuk memperoleh fosfor.
5. **Dekomposisi:** Mikroorganisme terlibat dalam dekomposisi bahan organik yang mengandung fosfor, seperti sisa tanaman dan hewan. Proses ini membebaskan fosfor kembali ke lingkungan.

Secara keseluruhan, mikroorganisme memainkan peran krusial dalam mempertahankan dan mengubah siklus fosfor di lingkungan, yang mendukung kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Mikoriza adalah jenis hubungan simbiotik di mana fungi mikoriza membentuk asosiasi mutualistik dengan akar tanaman. Ada dua tipe utama mikoriza: mikoriza arbuskular (AM) dan mikoriza ektomikoriza (EM).

1. **Mikoriza Arbuskular (AM):**

- a. **Fungsi:** Fungi mikoriza arbuskular, seperti dari genus *Glomus*, membentuk struktur khusus yang disebut arbuskula di dalam sel-sel akar tanaman. Arbuskula ini meningkatkan area permukaan akar yang tersedia untuk penyerapan nutrisi, terutama fosfor.
- b. **Manfaat:** Dalam pertukaran, fungi mikoriza arbuskular mendapatkan karbohidrat dari tanaman sebagai sumber energi, sementara tanaman mendapat akses lebih baik terhadap fosfor dan nutrisi lain yang kurang larut dalam tanah.

2. Mikoriza Ektomikoriza (EM):

- a. **Fungsi:** Fungi ektomikoriza, seperti dari genus *Amanita* dan *Boletus*, membentuk jaringan miselium di luar permukaan akar tanaman. Ini membantu dalam penyerapan air dan mineral dari tanah.
- b. **Manfaat:** Sama seperti mikoriza arbuskular, tanaman memberikan karbohidrat sebagai sumber energi untuk fungi, sementara fungi meningkatkan kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi, terutama fosfor.

Bakteri pelarut fosfat, di sisi lain, seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas*, memiliki kemampuan untuk melepaskan fosfat dari ikatan kimia yang kurang larut dalam tanah. Mereka mengeluarkan asam organik atau enzim fosfatase yang membantu mengubah fosfat yang tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Hal ini meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Kedua mekanisme ini, baik melalui mikoriza maupun bakteri pelarut fosfat, memberikan contoh konkret bagaimana organisme tanah dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial seperti fosfor bagi tanaman, memperbaiki kualitas tanah, dan meningkatkan hasil pertanian secara keseluruhan.

Eutrofikasi Perairan merupakan dampak antropogenik dari siklus fosfor. Peningkatan penggunaan pupuk fosfor dalam pertanian dan limbah domestik dapat menyebabkan eutrofikasi, di mana terjadi pertumbuhan alga yang berlebihan di perairan, mengganggu ekosistem dan kualitas air. Siklus fosfor adalah bagian penting dari ekosistem global dan memainkan peran krusial dalam keseimbangan nutrisi di alam. Pemahaman tentang proses ini penting untuk menjaga keberlanjutan lingkungan dan kehidupan manusia.

3.7 Siklus Sulfur

Siklus sulfur melibatkan serangkaian proses biogeokimia kompleks yang terjadi di dalam dan di antara berbagai komponen lingkungan, termasuk organisme hidup dan bagian non-hidup dari

biosfera. Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai proses dan reaksi utama dalam siklus sulfur:

Proses dimulai dengan mineralisasi, di mana senyawa organik yang mengandung sulfur, seperti asam amino dan protein, diurai oleh bakteri dan fungi pengurai. Dalam proses ini, sulfur dalam senyawa organik dilepaskan ke lingkungan sebagai senyawa anorganik.

Contoh Reaksi: Organik sulfur (misalnya dari asam amino): $R-SH \rightarrow R-S^- + H^+$

Oksidasi sulfur : Setelah dilepaskan dari senyawa organik, sulfur berubah menjadi bentuk oksidasi yang lebih tinggi, terutama sulfat (SO_4^{2-}), dalam kondisi aerobik di lingkungan. Proses oksidasi ini dapat terjadi secara biologis maupun abiotik.

Contoh Reaksi: Oksidasi sulfur: $H_2S + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + H_2O$

Reduksi sulfur : Di lingkungan anaerobik, bakteri sulfat-reduksi menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron untuk proses respirasi mereka. Hal ini menghasilkan senyawa sulfur yang lebih rendah, seperti hidrogen sulfida (H_2S) atau senyawa organosulfur lainnya.

Contoh Reaksi: Reduksi sulfur: $SO_4^{2-} + 8e^- + 8H^+ \rightarrow H_2S + 4H_2O$

Siklus biologis melibatkan asimilasi sulfur oleh organisme hidup. Organisme seperti tanaman mengambil sulfat dari tanah melalui akar mereka dan menggunakannya untuk sintesis senyawa organik yang lebih kompleks, seperti asam amino, protein, dan koenzim.

Contoh Reaksi: Asimilasi sulfur oleh tanaman: $SO_4^{2-} \rightarrow \text{Cysteine}$

Proses ini melibatkan pengembalian sulfur ke lingkungan dari organisme yang mati, baik melalui dekomposisi mikroba maupun melalui siklus ekosistem yang lebih besar. Sulfur yang terikat dalam senyawa organik dilepaskan kembali ke lingkungan dan dapat diubah kembali menjadi senyawa anorganik oleh proses mineralisasi.

Siklus sulfur memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekologi dan kimiawi di bumi. Sulfur merupakan komponen kunci dalam asam amino, vitamin, dan enzim, yang diperlukan untuk pertumbuhan dan fungsi normal organisme. Perubahan dalam siklus sulfur dapat mempengaruhi kualitas air,

produktivitas tanah, dan komposisi atmosfer. Melalui serangkaian reaksi ini, siklus sulfur menggambarkan bagaimana unsur ini bergerak melalui berbagai reservoir dalam biosfera, menunjukkan kompleksitas dan saling ketergantungan proses biologis dan kimia dalam menjaga keseimbangan ekologis global.

3.8 Siklus Nutrien Lainnya

Sumber dan Siklus Kalsium di Alam: Kalsium adalah salah satu unsur penting yang terdapat secara melimpah di alam, terutama dalam batuan seperti kapur, dolomit, dan gamping. Siklus kalsium dimulai ketika batuan-batuan ini tererosi oleh air dan iklim, melepaskan ion kalsium ke dalam tanah dan air. Proses ini juga melibatkan organisme seperti tanaman dan mikroorganisme yang mengambil kalsium dari tanah untuk pertumbuhan dan metabolisme mereka. Kalsium yang terlarut dalam air tanah kemudian dapat masuk ke dalam siklus air, dimana air hujan membawa kalsium ke dalam sungai dan laut. Kalsium memiliki peran penting dalam kesehatan tanaman dan hewan. Tanaman memanfaatkan kalsium untuk memperkuat dinding sel dan struktur tanaman, serta sebagai kofaktor dalam proses enzimatik. Hewan, terutama vertebrata, memerlukan kalsium untuk pembentukan tulang dan fungsi sistem saraf yang optimal. Di lingkungan air, kalsium juga mempengaruhi keseimbangan pH dan ketersediaan nutrien bagi organisme akuatik.

Sumber dan Siklus Magnesium di Alam: Magnesium juga ditemukan dalam berbagai mineral dan batuan, seperti dolomit dan magnesit. Proses pelapukan batuan ini melepaskan magnesium ke dalam tanah dan air. Tanaman mengambil magnesium dari tanah untuk memenuhi kebutuhan mereka, dan kemudian magnesium ini masuk ke dalam rantai makanan melalui konsumsi oleh herbivor dan karnivor. Magnesium berperan sebagai komponen penting dalam klorofil, pigmen hijau yang esensial untuk fotosintesis pada tanaman. Tanaman yang kekurangan magnesium akan mengalami gangguan dalam produksi energi dan pertumbuhan mereka. Selain itu, magnesium juga penting bagi kesehatan hewan sebagai bagian dari struktur tulang dan fungsi enzimatik yang vital.

Sumber dan Siklus Kalium di Alam: Kalium terdapat dalam mineral seperti kalium feldspar dan sylvite, yang tersebar luas di kerak bumi. Proses pelapukan dan erosi membebaskan kalium ke dalam tanah, di mana ia tersedia untuk tanaman. Tanaman mengambil kalium untuk berbagai fungsi fisiologis mereka, sementara organisme tanah seperti bakteri mengubah senyawa kalium menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Kalium adalah kation esensial yang diperlukan oleh tanaman untuk mengatur tekanan osmotik sel, mempertahankan keseimbangan air, dan memfasilitasi transpor gula dan nutrisi lainnya. Tanaman yang cukup kalium cenderung lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan dan penyakit. Kalium juga mempengaruhi aktivitas enzimatik dan metabolisme dalam organisme tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi ketersediaan nutrisi dalam tanah untuk tanaman dan organisme lainnya.

3.9 Teknologi dan Manajemen Siklus Nutrien

Teknologi pengolahan limbah berfokus pada metode-metode untuk mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan dan memulihkan nilai dari limbah tersebut. Beberapa teknologi yang umum digunakan meliputi:

1. **Biological Treatment (Pengolahan Biologi):** Meliputi proses-proses seperti penguraian biologi, di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik dalam limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti CO₂ dan air.
2. **Advanced Oxidation Processes (AOPs):** Proses ini menggunakan reaksi kimia kuat untuk menguraikan senyawa organik yang kompleks dalam limbah, meningkatkan efisiensi pengolahan limbah.
3. **Adsorpsi:** Teknologi ini melibatkan penyerapan zat-zat berbahaya atau senyawa-senyawa organik dari limbah dengan menggunakan bahan adsorben seperti karbon aktif atau zeolit.

Teknologi pemulihan nutrisi bertujuan untuk mengambil kembali dan mengolah nutrisi yang terkandung dalam limbah, seperti nitrogen dan fosfor, untuk digunakan kembali atau dimanfaatkan dengan cara yang berguna. Beberapa teknologi yang

terkait antara lain: ***Stripping Ammonia (Penghilangan Amonia)***: Proses ini bertujuan untuk menghilangkan amonia (NH_3) dari limbah cair menggunakan udara atau gas lainnya sebagai agen penghilang. Amonia sering kali merupakan komponen yang tidak diinginkan dalam limbah cair, terutama berasal dari limbah domestik atau industri. Dalam proses stripping, udara atau gas lainnya diumpankan ke dalam limbah cair. Amonia yang larut dalam air akan berdifusi dari air ke fase gas karena perbedaan konsentrasi, kemudian dapat ditangkap kembali untuk digunakan kembali sebagai sumber nitrogen dalam produksi pupuk.

Biosolid Management (Manajemen Biosolid): Limbah padat yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah, yang dikenal sebagai biosolid, sering mengandung nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan bahan organik yang dapat bermanfaat. Manajemen biosolid melibatkan pemulihan dan pemanfaatan kembali nutrisi ini sebagai pupuk organik. Proses ini mencakup pengeringan, pengomposan, atau proses lain untuk mengubah biosolid menjadi produk yang aman dan berguna untuk keperluan pertanian atau kegiatan lainnya.

Precipitation and Crystallization (Presipitasi dan Kristalisasi): Proses presipitasi dan kristalisasi digunakan untuk mengendapkan fosfor dari limbah cair dalam bentuk kristal fosfat yang stabil. Fosfor adalah salah satu komponen penting dalam pupuk fosfat. Dalam proses ini, senyawa kimia seperti garam logam berat digunakan untuk mengendapkan fosfor dari larutan limbah cair. Kristal fosfat yang terbentuk kemudian dapat dipisahkan dari larutan, dibersihkan, dan digunakan kembali sebagai pupuk fosfat yang efektif.

Proses-proses ini merupakan bagian penting dari teknologi pengolahan limbah modern yang tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan tetapi juga memungkinkan pemanfaatan kembali nutrisi yang berharga untuk keperluan pertanian dan industri lainnya. Manfaat teknologi ini meliputi :

1. **Pengurangan Pencemaran Lingkungan**: Mengurangi jumlah nutrisi berlebih di lingkungan yang dapat menyebabkan eutrofikasi dan kerusakan ekosistem air.

2. **Pemulihan Sumber Daya:** Memungkinkan pengambilan kembali nutrisi dari limbah sebagai sumber daya yang berharga.
3. **Efisiensi Energi:** Mengurangi kebutuhan energi dan mempertahankan siklus nutrisi yang lebih berkelanjutan.

Teknologi-teknologi ini menjadi krusial dalam upaya untuk mengelola limbah secara berkelanjutan dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Manajemen Lingkungan dan Kebijakan terkait dengan nutrisi sering kali fokus pada kebijakan dan praktik terbaik untuk mengelola nutrisi dalam lingkungan. Nutrisi seperti nitrogen dan fosfor adalah penting untuk pertumbuhan tanaman, tetapi dapat menjadi polutan serius jika berlebihan dalam lingkungan air. Beberapa aspek yang relevan dalam kebijakan pengelolaan nutrisi mencakup:

1. **Kebijakan Pengelolaan Nutrisi:** Ini mencakup regulasi pemerintah atau kebijakan yang mengatur pemakaian pupuk, penggunaan limbah pertanian, dan praktik lain yang mempengaruhi kadar nutrisi di lingkungan. Tujuannya adalah untuk mengurangi pencemaran nutrisi yang berlebihan dan dampak negatifnya terhadap lingkungan.
2. **Praktik Terbaik dalam Manajemen Nutrisi:** Ini meliputi teknik dan strategi untuk mengurangi aliran nutrisi ke lingkungan air, seperti:
 - a. Penggunaan pupuk yang tepat waktu dan jumlah yang tepat.
 - b. Penggunaan teknologi pertanian yang lebih efisien untuk mengurangi kehilangan nutrisi.
 - c. Pengelolaan sisa tanaman dan limbah ternak secara bijaksana untuk menghindari runoff nutrisi ke perairan.
3. **Teknologi dan Inovasi:** Pengembangan teknologi untuk memonitor dan mengelola nutrisi secara efektif, misalnya penggunaan sistem pengolahan air limbah yang dapat menghilangkan nutrisi sebelum dibuang ke lingkungan.
4. **Kolaborasi dan Pendidikan Masyarakat:** Pentingnya kolaborasi antara pemerintah, industri pertanian, dan

masyarakat dalam menerapkan praktik terbaik ini. Pendidikan masyarakat juga diperlukan untuk meningkatkan kesadaran akan pentingnya manajemen nutrisi yang baik untuk menjaga kualitas air dan lingkungan secara keseluruhan.

Manajemen nutrisi yang efektif dan kebijakan yang kuat adalah kunci untuk menjaga keseimbangan ekologi lingkungan air yang rentan terhadap pencemaran nutrisi

DAFTAR PUSTAKA

- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Mooney, H. A. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science & Business Media.
- Arief, A., 2005. Hutan: Hakikat dan Pengaruhnya terhadap Lingkungan. Jakarta: Penerbit Yayasan Obor Indonesia
- Arsyad, S., 1989. Konservasi Tanah dan Air. Bogor : Penerbit IPB.
- Brown, S., 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. Rome : FAO Forestry Paper.
- Daniel, T.W., J.A. Helms, F.S. Baker., 1992. Prinsip-Prinsip Silvicultural Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hairiah, K dan Rahayu, S., 2007. Pengukuran Karbon Tersimpan Di Berbagai Macam Penggunaan Lahan. Bogor: Pusat Agroforestri.
- Longman, K.A. & J. Jenik., 1987. Tropical Forest and Its Environment. London: Longman Group Limited.
- Mahmood, 2009. "Impacts of Land Use Land Cover Change on Climate and Future Research Priorities". America : American Meteorological Society In Press
- Purwanto, R.H. and Shiba, M., 2005. Allometric Equations for Estimating Above Ground Biomass and Leaf Area of Planted Teak (Tectona Grandis) Forest Under Agroforestry Management in East Java, Indonesia.
- Rahayu, S, Lusiana, B, van Noordwijk, M., 2007. Pendugaan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Tanah pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur. Bogor: World Agroforestry Centre.
- Simon, H., 2007. Metode Inventori Hutan. Jakarta: Penerbit Pustaka Pelajar.
- Soekotjo, 2009. Teknik Silvikultur Intensif (SILIN). Penerbit Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

BAB 4

BIOREMEDIASI DAN PENGELOLAAN LIMBAH

Oleh Niken Prawesti Listyaningrum

4.1 Pendahuluan

Pencemaran lingkungan merupakan tantangan serius yang dihadapi dunia saat ini. Aktivitas industri, pertanian, dan domestik menghasilkan limbah yang mencemari air, tanah, dan udara, menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia serta kerusakan ekosistem. Di tengah urgensi untuk menemukan solusi yang efektif dan berkelanjutan, bioremediasi muncul sebagai pendekatan inovatif yang menjanjikan.

Bioremediasi adalah proses penggunaan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga untuk menguraikan dan menetralkan polutan di lingkungan. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme ini, bioremediasi menawarkan metode yang lebih ramah lingkungan dan efisien dibandingkan metode konvensional seperti pembakaran atau penimbunan. Proses ini dapat dilakukan di lokasi pencemaran (*in situ*) maupun di luar lokasi pencemaran (*ex situ*), memberikan fleksibilitas dalam menangani berbagai jenis kontaminasi (Melati, 2020).

Di sisi lain, pengelolaan limbah merupakan komponen kunci dalam upaya menjaga kebersihan dan kesehatan lingkungan. Limbah, baik yang padat, cair, maupun gas, perlu dikelola dengan baik untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Pengelolaan limbah yang efektif melibatkan berbagai teknik seperti pengurangan, pemanfaatan kembali, dan daur ulang, serta pengolahan limbah menggunakan metode fisik, kimia, dan biologi (Lukić et al., 2017).

Integrasi bioremediasi dalam strategi pengelolaan limbah membuka peluang untuk mengatasi pencemaran dengan cara yang lebih berkelanjutan. Misalnya, penggunaan bakteri pengurai minyak

untuk membersihkan tumpahan minyak di laut, atau pemanfaatan jamur dalam menguraikan senyawa organik kompleks di tanah yang tercemar. Meski begitu, tantangan tetap ada, seperti kondisi lingkungan yang dapat mempengaruhi efektivitas bioremediasi dan kebutuhan untuk terus mengembangkan teknologi yang mendukung proses ini.

4.2 Konsep Dasar Bioremediasi

4.2.1 Definisi Bioremediasi

Bioremediasi adalah suatu proses yang memanfaatkan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga untuk menguraikan dan menetralkan polutan atau kontaminan di lingkungan. Proses ini bekerja dengan cara memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme dalam menguraikan senyawa kimia kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Bioremediasi dapat diterapkan untuk membersihkan berbagai jenis kontaminasi, termasuk limbah organik, logam berat, dan senyawa kimia beracun lainnya, baik di tanah, air, maupun udara (Fidiastuti et al., 2019).

Pada dasarnya, bioremediasi memanfaatkan jalur metabolisme mikroorganisme. Mikroorganisme ini menggunakan polutan sebagai sumber karbon dan energi, menguraikan senyawa tersebut melalui proses biologis yang alami. Misalnya, bakteri pengurai hidrokarbon dapat memetabolisme minyak bumi, mengubahnya menjadi karbon dioksida dan air. Proses ini tidak hanya mengurangi tingkat polusi tetapi juga menghasilkan produk akhir yang ramah lingkungan (Hanifah et al., 2018).

Keberhasilan bioremediasi tergantung pada berbagai faktor, termasuk jenis dan konsentrasi polutan, karakteristik situs, dan kondisi lingkungan seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi. Penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk mengoptimalkan proses ini, termasuk identifikasi mikroorganisme yang lebih efisien dan rekayasa genetik untuk meningkatkan kemampuan degradasi polutan.

4.2.2 Jenis – jenis Bioremediasi

Bioremediasi adalah metode pengolahan polutan lingkungan menggunakan mikroorganisme, dan dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan teknik dan lokasi penerapannya. Setiap jenis bioremediasi memiliki karakteristik dan aplikasi spesifik yang disesuaikan dengan kondisi serta jenis kontaminasi yang dihadapi. Berikut merupakan jenis – jenis bioremediasi (Lukić et al., 2017; Melati, 2020), yaitu:

1. Bioremediasi In Situ

Bioremediasi in situ dilakukan langsung di lokasi yang terkontaminasi tanpa perlu memindahkan material yang tercemar. Teknik ini sering digunakan untuk menangani pencemaran tanah dan air tanah, dan melibatkan beberapa metode utama, antara lain:

a. Bioventing

Proses ini melibatkan injeksi udara atau oksigen ke dalam tanah yang terkontaminasi untuk merangsang aktivitas mikroorganisme aerobik yang mendegradasi polutan. Bioventing efektif untuk mengatasi kontaminasi hidrokarbon di tanah.

b. Biosparging

Dalam teknik ini, udara atau gas lainnya diinjeksi ke dalam air tanah yang terkontaminasi untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dan merangsang aktivitas mikroorganisme aerobik. Biosparging cocok untuk mengatasi kontaminasi organik di air tanah.

c. Phytoremediation

Metode ini memanfaatkan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, dan/atau mendegradasi polutan dari tanah atau air. Tanaman tertentu mampu mengakumulasi logam berat atau menguraikan senyawa organik, membuat nya efektif untuk berbagai jenis kontaminasi.

2. Bioremediasi Ex Situ

Bioremediasi ex situ melibatkan pemindahan material yang terkontaminasi ke lokasi lain untuk diolah. Teknik ini memungkinkan kontrol yang lebih besar atas kondisi

pengolahan, meskipun seringkali lebih mahal dan memerlukan infrastruktur tambahan. Beberapa metode utama, antara lain :

a. Landfarming

Teknik ini melibatkan penyebaran tanah yang terkontaminasi di permukaan tanah yang telah disiapkan, kemudian diaduk secara periodik untuk meningkatkan aerasi dan aktivitas mikroorganisme. Landfarming sering digunakan untuk mengolah tanah yang tercemar oleh hidrokarbon.

b. Biopile

Tanah yang terkontaminasi ditumpuk menjadi gundukan dan diaerasi secara sistematis. Sistem ini memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap suhu, kelembaban, dan oksigen, sehingga meningkatkan efisiensi degradasi mikroba.

c. Composting

Proses ini melibatkan pencampuran bahan organik yang terkontaminasi dengan material organik lainnya, seperti serbuk kayu atau kompos, untuk menciptakan kondisi yang optimal bagi dekomposisi mikroba. Komposting efektif untuk mengolah limbah organik yang terkontaminasi senyawa kimia kompleks.

3. Bioaugmentation dan Biostimulation

Selain klasifikasi berdasarkan lokasi, ada dua pendekatan utama dalam bioremediasi yang juga sering digunakan, yaitu :

a. Bioaugmentation

Penambahan mikroorganisme spesifik yang memiliki kemampuan mendegradasi polutan tertentu ke dalam lokasi yang terkontaminasi. Teknik ini digunakan ketika populasi mikroba alami tidak cukup atau tidak efektif dalam mengatasi kontaminasi.

b. Biostimulation

Peningkatan aktivitas mikroorganisme alami dengan menambahkan nutrisi atau bahan lain yang diperlukan untuk merangsang pertumbuhan dan aktivitas mikroba. Biostimulation efektif untuk mempercepat degradasi

polutan oleh mikroorganisme yang sudah ada di lingkungan.

4.2.3 Peran Mikroorganisme

Mikroorganisme memainkan peran sentral dalam proses bioremediasi, menggunakan kemampuan alami mereka untuk menguraikan dan menetralkan polutan di lingkungan (Firdaus, 2015). Berbagai jenis mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga berkontribusi dalam degradasi bahan kimia berbahaya menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang beracun (Asril et al., 2024).

1. Bakteri

Bakteri adalah mikroorganisme yang paling sering digunakan dalam bioremediasi. Mereka mampu mendegradasi berbagai polutan melalui proses metabolisme alami. Bakteri aerobik, seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus*, membutuhkan oksigen untuk memetabolisme polutan organik menjadi karbon dioksida dan air. Mereka efektif dalam menguraikan hidrokarbon, pestisida, dan senyawa organik lainnya. Bakteri anaerobik, seperti *Desulfovibrio* dan *Methanogens*, bekerja tanpa oksigen dan dapat menguraikan polutan dalam kondisi reduksi, termasuk logam berat dan senyawa klorinasi (Fitriadi et al., 2016).

2. Jamur

Jamur, khususnya jamur lignolitik seperti spesies *Phanerochaete chrysosporium*, memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan organik kompleks seperti pestisida, hidrokarbon aromatik, dan pewarna industri. Jamur ini menghasilkan enzim seperti lignin peroksidase dan mangan peroksidase yang dapat memecah struktur kimia kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Kemampuan jamur untuk tumbuh dalam kondisi lingkungan yang bervariasi membuatnya sangat berguna dalam bioremediasi tanah dan air yang terkontaminasi.

3. Alga

Alga juga memiliki peran penting dalam bioremediasi, terutama dalam pengolahan air limbah.

Mikroalga dapat menyerap nutrisi berlebih seperti nitrogen dan fosfor dari air, membantu mengurangi eutrofikasi. Selain itu, beberapa jenis alga dapat mengakumulasi logam berat dan senyawa organik beracun, menjadikannya alat yang efektif untuk membersihkan badan air yang tercemar (Fidiastuti et al., 2019).

4. Peran Enzim

Enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme berperan kunci dalam proses bioremediasi. Enzim seperti oksidoreduktase, hidrolase, dan transferase berfungsi mengkatalisis reaksi kimia yang menguraikan polutan. Misalnya, enzim oksidoreduktase dapat memecah hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Dengan meningkatkan aktivitas enzimatis melalui manipulasi genetik atau penambahan nutrisi, efektivitas bioremediasi dapat ditingkatkan.

5. Interaksi Simbiotik

Seringkali, bioremediasi melibatkan konsorsium mikroorganisme yang bekerja secara sinergis untuk mendegradasi polutan. Interaksi simbiotik antara bakteri dan jamur, misalnya, dapat mempercepat degradasi senyawa kompleks. Bakteri dapat memecah polutan menjadi senyawa sederhana yang kemudian digunakan oleh jamur sebagai sumber energi, atau sebaliknya.

Dengan memahami dan memanfaatkan peran mikroorganisme dalam bioremediasi, kita dapat mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk mengatasi pencemaran lingkungan. Penelitian berkelanjutan untuk mengeksplorasi potensi mikroorganisme baru dan rekayasa genetika untuk meningkatkan kemampuan degradasi mereka akan terus menjadi kunci dalam pengembangan teknologi bioremediasi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

4.3 Teknik – teknik Bioremediasi

4.3.1 Bioremediasi Aerobik dan Anaerobik

Bioremediasi adalah teknik pengolahan lingkungan yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan dan menetralkan polutan. Berdasarkan kebutuhan oksigen, bioremediasi dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu bioremediasi aerobik dan anaerobik (Lukić et al., 2017; Melati, 2020).

1. Bioremediasi Aerobik

Bioremediasi aerobik melibatkan mikroorganisme yang memerlukan oksigen untuk mendegradasi polutan. Mikroorganisme aerobik, seperti bakteri *Pseudomonas* dan *Bacillus*, menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron akhir dalam proses metabolisme mereka, menghasilkan karbon dioksida, air, dan biomassa sebagai produk akhir. Teknik ini sangat efektif untuk menguraikan senyawa organik seperti hidrokarbon, pestisida, dan pelarut organik (Asril et al., 2024). Salah satu metode bioremediasi aerobik adalah bioventing, di mana udara atau oksigen diinjeksi ke dalam tanah yang terkontaminasi untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme aerobik. Proses ini efektif untuk mengatasi pencemaran hidrokarbon di tanah. Contoh lain adalah biosparging, yang melibatkan injeksi udara ke dalam air tanah yang terkontaminasi untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dan mendorong degradasi polutan oleh mikroorganisme aerobik. Adapun keuntungan bioremediasi aerobik yaitu kecepatan degradasi yang relatif tinggi dan kemampuan untuk menguraikan berbagai polutan organik. Namun, teknik ini memerlukan suplai oksigen yang cukup dan pengendalian kondisi lingkungan seperti suhu dan pH untuk memastikan efektivitas mikroorganisme.

2. Bioremediasi Anaerobik

Bioremediasi anaerobik melibatkan mikroorganisme yang mendegradasi polutan tanpa memerlukan oksigen. Mikroorganisme anaerobik, seperti bakteri *Desulfovibrio* dan *Methanogens*, menggunakan akseptor elektron alternatif seperti nitrat, sulfat, atau karbon dioksida dalam proses

metabolisme mereka. Teknik ini efektif untuk menguraikan senyawa organik yang sangat terklorinasi, seperti pestisida, pelarut klorinasi, dan logam berat.

Salah satu teknik bioremediasi anaerobik adalah bioreaktor anaerobik, di mana material yang terkontaminasi diolah dalam lingkungan tertutup tanpa oksigen. Metode ini sering digunakan untuk mengolah air limbah industri yang mengandung senyawa organik beracun dan logam berat. *In situ anaerobic bioremediation* adalah teknik lain di mana bahan-bahan seperti molase atau minyak sayur diinjeksi ke dalam tanah untuk menciptakan kondisi anaerobik yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme anaerobik.

Keuntungan dari bioremediasi anaerobik yaitu kemampuan untuk menguraikan polutan yang tidak dapat diurai oleh mikroorganisme aerobik dan pengurangan emisi gas rumah kaca karena tidak adanya kebutuhan oksigen. Namun, proses ini cenderung lebih lambat dibandingkan bioremediasi aerobik dan memerlukan kondisi yang lebih spesifik untuk mendukung aktivitas mikroorganisme anaerobik.

4.3.2 Phytoremediasi

Phytoremediasi adalah teknik bioremediasi yang memanfaatkan tanaman untuk menghilangkan, menstabilkan, atau menguraikan polutan dari lingkungan, terutama dari tanah dan air. Teknik ini mengandalkan kemampuan alami tanaman tertentu untuk menyerap, mengakumulasi, dan memetabolisme berbagai zat berbahaya, termasuk logam berat, pestisida, pelarut organik, dan senyawa beracun lainnya.

1. Mekanisme Phytoremediasi

Menurut (Melati, 2020), Phytoremediasi terdiri dari beberapa mekanisme utama, yaitu :

a. *Phytoextraction* (Fitoretraksi)

Tanaman menyerap polutan dari tanah atau air melalui akarnya dan memindahkannya ke bagian-bagian tanaman seperti batang dan daun. Tanaman yang kaya akan logam berat kemudian dapat dipanen dan dibuang dengan aman. Contohnya adalah tanaman

hiperakumulator seperti *Brassica juncea* (sawi India) yang efektif menyerap logam berat seperti timbal dan kadmium.

b. *Phytostabilization* (Fitostabilisasi)

Tanaman menstabilkan polutan di tanah dengan mengurangi mobilitasnya, mencegah polutan berpindah ke air tanah atau tersebar oleh angin. Akar tanaman memperkuat struktur tanah dan mengurangi erosi, sementara tanaman itu sendiri mengeluarkan senyawa yang dapat mengubah bentuk kimia polutan menjadi kurang beracun.

c. *Phytodegradation* (Fitodegradasi)

Tanaman menguraikan polutan organik melalui aktivitas enzimatik. Enzim yang dihasilkan oleh akar tanaman atau mikroorganisme yang berasosiasi dengan akar tanaman dapat memetabolisme senyawa berbahaya menjadi zat yang kurang beracun atau tidak berbahaya.

d. *Phytovolatilization* (Fitovolatilisasi)

Tanaman menyerap polutan melalui akarnya dan mengubahnya menjadi bentuk gas yang kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui daun. Contohnya adalah poplar (pohon kapas) yang dapat menguapkan senyawa organik volatil seperti trikloretilen (TCE) dari tanah.

2. Keunggulan Phytoremediasi

Phytoremediasi menawarkan beberapa keunggulan yang signifikan, antara lain :

- a. Ramah Lingkungan, teknik ini alami dan tidak memerlukan bahan kimia tambahan, sehingga mengurangi risiko pencemaran sekunder.
- b. Biaya Efektif, phytoremediasi umumnya lebih murah dibandingkan metode fisik dan kimia karena menggunakan tanaman yang relatif mudah diperoleh dan dirawat.
- c. Estetika dan Kualitas Hidup, tanaman tidak hanya membantu membersihkan lingkungan tetapi juga meningkatkan estetika area yang terkontaminasi, menciptakan ruang hijau yang dapat digunakan untuk

rekreasi atau pertanian setelah proses remediasi selesai.

3. Tantangan dan Batasan

Meskipun memiliki banyak keunggulan, phytoremediasi juga memiliki beberapa tantangan dan batasan, yaitu

- a. Kecepatan Remediasi, proses ini seringkali memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan metode remediasi konvensional karena tergantung pada siklus pertumbuhan tanaman.
- b. Keterbatasan Kedalaman Akar, efektivitas phytoremediasi terbatas pada kedalaman akar tanaman. Polutan yang berada di lapisan tanah yang lebih dalam mungkin tidak dapat dijangkau oleh akar.
- c. Spesifisitas Tanaman, tidak semua tanaman memiliki kemampuan untuk menyerap atau menguraikan polutan tertentu. Pemilihan tanaman yang tepat sangat penting untuk keberhasilan phytoremediasi.

Phytoremediasi merupakan teknik bioremediasi yang menjanjikan untuk menangani berbagai jenis kontaminasi lingkungan. Dengan penelitian dan pengembangan lebih lanjut, potensi phytoremediasi dapat dioptimalkan untuk menjadi solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam upaya melindungi dan memperbaiki ekosistem kita.

4.3.3 Biostimulasi dan Bioaugmentasi

Bioremediasi adalah proses menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan dan menetralkan polutan di lingkungan. Dalam bioremediasi, terdapat dua teknik utama yang sering digunakan untuk meningkatkan efektivitas penguraian polutan dengan menggunakan biostimulasi dan bioaugmentasi. Kedua teknik ini menawarkan pendekatan yang berbeda namun saling melengkapi dalam mengoptimalkan degradasi polutan oleh mikroorganisme.

1. Biostimulasi

Biostimulasi adalah teknik di mana nutrisi dan bahan pendukung lainnya ditambahkan ke lingkungan yang terkontaminasi untuk merangsang pertumbuhan dan aktivitas

mikroorganisme yang ada. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kondisi yang mendukung mikroorganisme dalam mendegradasi polutan.

- a. **Penambahan Nutrisi.** Nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan karbon ditambahkan ke tanah atau air yang terkontaminasi untuk mempercepat pertumbuhan mikroorganisme yang mendegradasi polutan. Tanpa nutrisi yang cukup, mikroorganisme mungkin tidak dapat berkembang dengan optimal.
- b. **Optimasi Kondisi Lingkungan.** Faktor-faktor seperti pH, suhu, dan kadar oksigen dioptimalkan untuk mendukung aktivitas mikroorganisme. Misalnya, menambahkan aerasi untuk meningkatkan kandungan oksigen dapat mempercepat proses biodegradasi oleh mikroorganisme aerobik.
- c. **Keuntungan Biostimulasi.** Teknik ini relatif sederhana dan biaya efektif karena memanfaatkan mikroorganisme alami yang sudah ada di lingkungan. Selain itu, biostimulasi dapat diterapkan pada area yang luas dengan intervensi minimal.
- d. **Tantangan Biostimulasi.** Salah satu tantangan utama adalah memastikan bahwa nutrisi dan kondisi lingkungan yang ditambahkan tidak menimbulkan dampak negatif pada ekosistem lokal. Pemantauan dan penyesuaian yang tepat diperlukan untuk menghindari gangguan ekosistem.

2. Bioaugmentasi

Bioaugmentasi adalah teknik di mana mikroorganisme spesifik atau yang telah dimodifikasi secara genetik ditambahkan ke lingkungan yang terkontaminasi untuk meningkatkan kapasitas degradasi polutan. Teknik ini sering digunakan ketika populasi mikroorganisme alami tidak cukup efektif dalam menguraikan polutan tertentu.

a. Penambahan Mikroorganisme Spesifik:

Mikroorganisme yang memiliki kemampuan khusus untuk mendegradasi polutan tertentu diperkenalkan ke lingkungan yang terkontaminasi.

Contohnya adalah penggunaan bakteri *Pseudomonas* untuk menguraikan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH).

b. Mikroorganisme Modifikasi Genetik:

Mikroorganisme yang telah dimodifikasi secara genetik untuk memiliki kemampuan degradasi yang lebih baik dapat digunakan dalam bioaugmentasi. Hal ini memungkinkan penguraian senyawa kimia yang sangat kompleks atau beracun.

c. Keuntungan Bioaugmentasi:

Teknik ini memungkinkan penanganan polutan yang sangat spesifik dan kompleks yang mungkin tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme alami. Bioaugmentasi dapat mempercepat proses remediasi dan meningkatkan efektivitas keseluruhan.

d. Tantangan Bioaugmentasi:

Mikroorganisme yang ditambahkan harus mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang baru dan bersaing dengan mikroorganisme alami. Selain itu, potensi dampak ekologis dari penambahan mikroorganisme asing perlu dipertimbangkan dan dimonitor dengan cermat.

Aplikasi Biostimulasi dan Bioaugmentasi

Kedua teknik ini digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk remediasi tanah yang terkontaminasi oleh hidrokarbon, logam berat, dan senyawa kimia berbahaya lainnya. Dengan kombinasi biostimulasi dan bioaugmentasi, proses bioremediasi dapat dioptimalkan untuk mencapai hasil yang lebih efektif dan efisien dalam upaya melindungi dan memperbaiki kondisi lingkungan.

4.4 Pengelolaan Limbah

4.4.1 Klasifikasi Limbah

Limbah adalah material sisa yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia, baik industri, domestik, pertanian, maupun kegiatan lainnya. Pengelolaan limbah yang efektif memerlukan

pemahaman mendalam tentang jenis-jenis limbah dan karakteristiknya. Secara umum, limbah dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber asal, sifat fisik, sifat kimia, dan tingkat bahayanya (Astina et al., 2020).

1. Berdasarkan Sumber Asal

Berdasarkan sumber asal limbah dibedakan menjadi beberapa macam, yaitu :

- a. **Limbah Domestik:** Limbah yang dihasilkan dari kegiatan rumah tangga, seperti sisa makanan, kertas, plastik, dan bahan-bahan lain yang biasa ditemukan di rumah tangga.
- b. **Limbah Industri:** Limbah yang dihasilkan dari proses produksi di industri, termasuk logam berat, bahan kimia, pelarut, dan produk sampingan lainnya.
- c. **Limbah Pertanian:** Limbah yang dihasilkan dari kegiatan pertanian, seperti sisa tanaman, pupuk, pestisida, dan bahan kimia pertanian lainnya.
- d. **Limbah Medis:** Limbah yang dihasilkan dari fasilitas kesehatan, seperti rumah sakit dan klinik, termasuk jarum suntik, obat-obatan kedaluwarsa, dan bahan infeksius.

2. Berdasarkan Sifat Fisik

- a. **Limbah Padat:** Limbah yang berbentuk padat dan tidak dapat mengalir, seperti plastik, logam, kertas, dan kaca.
- b. **Limbah Cair:** Limbah yang berbentuk cair dan dapat mengalir, seperti limbah industri cair, air limbah domestik, dan cairan kimia.
- c. **Limbah Gas:** Limbah yang berbentuk gas, seperti emisi dari kendaraan bermotor, pabrik, dan proses pembakaran.

3. Berdasarkan Sifat Kimia

- a. **Limbah Organik:** Limbah yang berasal dari makhluk hidup dan mudah terurai secara alami, seperti sisa makanan, kayu, dan kertas. Limbah organik cenderung menghasilkan bau yang tidak sedap jika tidak dikelola dengan baik.

- b. Limbah Anorganik:** Limbah yang tidak berasal dari makhluk hidup dan sulit terurai secara alami, seperti plastik, logam, dan kaca. Limbah anorganik sering kali memerlukan waktu yang sangat lama untuk terurai di lingkungan.

4. Berdasarkan Tingkat Bahaya

- a. Limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun):** Limbah yang mengandung zat berbahaya dan beracun, yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan (T. I. Putra et al., 2019). Contoh limbah B3 termasuk limbah medis, limbah kimia industri, dan limbah elektronik.
- b. Limbah Non-B3:** Limbah yang tidak mengandung zat berbahaya dan beracun, dan relatif lebih aman untuk lingkungan dan kesehatan manusia. Contohnya adalah sisa makanan, kertas, dan limbah pertanian.

Pengelolaan limbah yang efektif dan berkelanjutan sangat penting untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Pengelolaan limbah meliputi berbagai tahap, seperti pengumpulan, pengangkutan, pemrosesan, daur ulang, dan pembuangan akhir. Klasifikasi limbah membantu menentukan metode pengelolaan yang paling sesuai untuk setiap jenis limbah, memastikan bahwa limbah tersebut ditangani dengan cara yang aman dan efisien.

4.4.2 Metode Pengelolaan Limbah

Pengelolaan limbah merupakan langkah penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem dan kesehatan manusia. Metode pengelolaan limbah yang efektif harus mempertimbangkan jenis limbah, sifatnya, dan dampaknya terhadap lingkungan. Menurut Rizky & Rahayu (2024), berikut adalah beberapa metode utama dalam pengelolaan limbah:

1. Pengurangan Sumber (*Source Reduction*)

Pengurangan sumber bertujuan untuk mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan sejak awal. Ini dapat dilakukan melalui

desain produk yang lebih efisien, penggunaan bahan baku yang lebih sedikit, dan perubahan proses produksi.

- a. Desain Produk: Mengembangkan produk yang lebih tahan lama, dapat didaur ulang, dan menggunakan bahan yang ramah lingkungan.
- b. Proses Produksi: Mengoptimalkan proses produksi untuk mengurangi limbah, seperti menggunakan teknologi bersih dan efisien.

2. Daur Ulang (*Recycling*)

Daur ulang melibatkan pengumpulan dan pemrosesan material limbah untuk digunakan kembali sebagai bahan baku dalam pembuatan produk baru. Proses ini mengurangi kebutuhan bahan baku baru dan mengurangi volume limbah yang dibuang.

- a. Limbah Anorganik: Material seperti plastik, logam, kaca, dan kertas dapat didaur ulang melalui proses mekanis atau kimia.
- b. Limbah Organik: Sisa makanan dan bahan organik lainnya dapat diolah menjadi kompos yang berguna sebagai pupuk.

3. Pemanfaatan Kembali (*Reuse*)

Pemanfaatan kembali melibatkan penggunaan ulang produk atau material tanpa proses pemrosesan tambahan yang signifikan. Ini mengurangi kebutuhan akan produk baru dan mengurangi limbah.

Barang Bekas: Barang-barang seperti pakaian, perabot, dan perangkat elektronik dapat digunakan kembali setelah diperbaiki atau disumbangkan.

4. Pengolahan Secara Biologis

Pengolahan limbah secara biologis melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam limbah. Metode ini meliputi komposting dan pengolahan limbah cair.

- a. Komposting: Proses aerobik di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi kompos yang dapat digunakan sebagai pupuk (Hanifah et al., 2018).
- b. Pengolahan Limbah Cair: Menggunakan bakteri dan mikroorganisme lainnya untuk menguraikan bahan

organik dalam air limbah sebelum dibuang ke lingkungan.

5. Pengolahan Secara Fisik dan Kimia

Metode pengolahan ini melibatkan perubahan sifat fisik atau kimia dari limbah untuk mengurangi volume, toksisitas, atau memudahkan pembuangan. Pengendapan merupakan proses fisik di mana partikel padat dalam limbah cair dipisahkan melalui pengendapan, sedangkan netralisasi adalah proses kimia di mana bahan asam atau basa dalam limbah dinetralkan untuk mengurangi dampak lingkungan.

6. Pembuangan Akhir (Disposal)

Pembuangan akhir adalah metode terakhir dalam pengelolaan limbah, digunakan ketika limbah tidak dapat diolah atau didaur ulang. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yaitu area yang dirancang khusus untuk menampung limbah dengan pengelolaan yang meminimalkan dampak lingkungan. Sedangkan insinerasi merupakan proses pembakaran limbah untuk mengurangi volume dan menghilangkan bahan berbahaya, sering disertai dengan teknologi pengendalian emisi untuk mengurangi polusi udara.

Pengelolaan limbah yang efektif memerlukan pendekatan terpadu yang melibatkan kombinasi dari metode-metode di atas, serta partisipasi aktif dari masyarakat, industri, dan pemerintah. Dengan pendekatan yang holistik dan berkelanjutan, pengelolaan limbah dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan mendukung keberlanjutan ekosistem.

4.4.3 Teknologi Pengolahan Limbah

Pengolahan limbah merupakan bagian integral dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Teknologi pengolahan limbah terus berkembang untuk mengatasi tantangan limbah yang semakin kompleks dan beragam (Rizky & Rahayu, 2024). Berikut adalah beberapa teknologi utama yang digunakan dalam pengolahan limbah:

1. Teknologi Pengolahan Limbah Padat

Ada beberapa macam pengolahan limbah padat, antara lain Insinerasi (Pembakaran) dan Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Insinerasi adalah proses pembakaran limbah padat pada suhu tinggi untuk mengurangi volumenya dan mengubahnya menjadi abu, gas, dan panas. Teknologi ini efektif untuk mengurangi volume limbah, namun memerlukan sistem pengendalian emisi yang baik untuk mengurangi polusi udara. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang dikelola TPA modern dilengkapi dengan lapisan pelindung untuk mencegah leachate (cairan yang dihasilkan dari limbah) meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Sistem pengumpulan dan pengolahan gas metana yang dihasilkan juga diterapkan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca.

2. Teknologi Pengolahan Limbah Cair

Beberapa teknologi pengolahan limbah cair, yaitu pengolahan primer, pengolahan sekunder dan pengolahan tersier. Pengolahan Primer adalah tahap awal yang melibatkan proses fisik seperti penyaringan dan pengendapan untuk menghilangkan partikel besar dan padatan tersuspensi dari limbah cair. Namun pada pengolahan sekunder, melibatkan proses biologis di mana mikroorganisme digunakan untuk menguraikan bahan organik dalam limbah cair. Sistem aerasi digunakan untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme aerobik dalam menguraikan polutan organik. Pada pengolahan tersier adalah tahap akhir yang mencakup proses fisik, kimia, atau biologis tambahan untuk menghilangkan kontaminan yang tersisa, seperti nutrien, logam berat, dan senyawa kimia beracun. Teknologi ini sering digunakan untuk menghasilkan air yang memenuhi standar lingkungan yang ketat.

3. Teknologi Pengolahan Limbah Gas

Teknologi pengolahan limbah gas dapat dilakukan dengan sistem pengendalian emisi dan pengolahan gas metana dari TPA. Teknologi Sistem Pengendalian Emisi ini digunakan untuk mengurangi emisi gas berbahaya dari proses industri dan insinerasi. Seperti pada scrubber (penyaring gas) yang menggunakan cairan untuk menghilangkan polutan dari gas

buang, dan filter partikel untuk menghilangkan partikel padat dari gas buang. Sedangkan sistem pengolahan Gas Metana dari TPA merupakan cara pengumpulan gas metana yang dihasilkan dari dekomposisi limbah organik di TPA. Gas metana kemudian dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

4. Teknologi Daur Ulang dan Pemanfaatan Kembali

Teknologi daur ulang material sangat memungkinkan adanya pemrosesan kembali material seperti plastik, logam, kertas, dan kaca menjadi produk baru. Proses ini melibatkan pengumpulan, pemilahan, pembersihan, dan pemrosesan ulang material untuk digunakan kembali. Namun teknologi pemanfaatan kembali energi mampu mengubah limbah menjadi energi melalui proses seperti gasifikasi, pirolisis, dan produksi biogas. Energi yang dihasilkan dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau sebagai bahan bakar.

5. Teknologi Pengolahan Limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun)

Dalam pengolahan limbah B3 perlu adanya stabilisasi dan solidifikasi, dimana adanya proses kimia yang mengubah limbah B3 menjadi bentuk yang lebih stabil dan tidak mudah larut untuk mengurangi risiko pencemaran lingkungan. Sedangkan pengolahan termal merupakan proses seperti insinerasi dan plasma arc yang digunakan untuk menghancurkan senyawa beracun dalam limbah B3.

Penggunaan teknologi pengolahan limbah yang tepat sangat penting untuk mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Inovasi dan penelitian terus diperlukan untuk mengembangkan teknologi yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan limbah di masa depan. Dengan teknologi yang tepat, limbah dapat diolah menjadi sumber daya yang bermanfaat, mendukung keberlanjutan ekosistem, dan memperbaiki kualitas lingkungan hidup.

4.5 Studi Kasus dan Aplikasi

4.5.1 Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi

Bioremediasi merupakan salah satu teknik yang efektif untuk menangani tanah yang tercemar minyak bumi (Buana et al., 2021; Firdaus, 2015). Penelitian tentang kemampuan bioremediasi untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi minyak bumi telah banyak dilakukan (Buana et al., 2021; R. S. Putra, 2008). Para peneliti menggunakan mikroorganisme tertentu yang bisa menguraikan hidrokarbon minyak bumi menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (R. S. Putra, 2008). Salah satu contohnya penelitian R. S. Putra (2008) meneliti kemampuan bakteri *Bacillus* sp dan *Klebsiella* sp dalam mendegradasi hidrokarbon minyak bumi pada tanah. Penelitian lain yang dilakukan oleh Buana et al., (2021) membahas tentang bioremediasi lahan yang tercemar limbah oli bekas menggunakan konsorsium mikroba.

Studi kasus bioremediasi ini menunjukkan bahwa mikroorganisme memiliki potensi untuk membersihkan tanah yang tercemar minyak bumi. Namun, efektivitas bioremediasi dapat terpengaruh oleh berbagai faktor seperti jenis dan konsentrasi minyak bumi, kondisi lingkungan, dan jenis mikroorganisme yang digunakan (Buana et al., 2021; R. S. Putra, 2008).

4.5.2 Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak di Cepu

Wilayah Cepu, Jawa Tengah, merupakan salah satu daerah penghasil minyak bumi di Indonesia. Aktivitas industri perminyakan tersebut dapat menyebabkan pencemaran tanah oleh limbah minyak (Sinaga, 2022). Para ahli mikrobiologi lingkungan seperti yang tertulis dalam admin fahatan (2024), Dr. Valeria Verrone menyatakan bahwa bioremediasi dapat berperan penting dalam menangani permasalahan ini. Mikroorganisme seperti bakteri mampu mendegradasi hidrokarbon minyak bumi menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Asril et al., 2024; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2015).

Beberapa penelitian mengenai bioremediasi tanah yang tercemar minyak di Cepu pernah dilakukan oleh Sinaga (2022). Penelitian tersebut menguji efektivitas metode *ex-situ* composting

yang menggunakan konsorsium mikroba untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi (Sinaga, 2022). Studi kasus seperti ini menunjukkan potensi bioremediasi sebagai solusi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan (Hanifah et al., 2018). Namun Sinaga, (2022) menambahkan catatan penting bahwa efektivitas bioremediasi dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan antara lain jenis dan konsentrasi minyak bumi, serta karakteristik mikroorganisme yang digunakan.

4.5.3 Bioremediasi Udara yang Tercemar Senyawa Organik Volatil (VOCs)

Bioremediasi memang bisa menjadi solusi untuk udara yang tercemar senyawa organik volatil (VOCs) (Kementerian Lingkungan Hidup dan kehutanan, 2015; Pertamina, 2023). Mikroorganisme seperti bakteri mampu mendegradasi VOCs menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Pertamina, 2023). Salah satu contoh penerapannya adalah biofilter (Melati, 2020). Biofilter merupakan suatu wadah yang dipenuhi dengan material berpori dan dihuni oleh komunitas mikroorganisme pengurai. Udara yang tercemar VOCs dialirkan melalui biofilter, dimana VOCs akan terserap oleh material pori dan didegradasi oleh mikroorganisme tersebut.

4.6 Implikasi untuk Keberlanjutan Ekosistem

Pengelolaan limbah dan bioremediasi memainkan peran penting dalam keberlanjutan ekosistem. Implikasi dari kedua proses ini meluas ke berbagai aspek lingkungan dan sosial, membantu menjaga keseimbangan ekosistem, kesehatan manusia, serta mempromosikan praktik berkelanjutan (Fidiastuti et al., 2019). Berikut adalah beberapa implikasi utama:

- 1. Pengurangan Pencemaran Lingkungan**

Pengelolaan limbah yang efektif dan praktik bioremediasi dapat secara signifikan mengurangi pencemaran tanah, air, dan udara. Limbah yang diolah dengan benar mengurangi risiko kontaminasi polutan berbahaya yang dapat merusak ekosistem. Misalnya, bioremediasi menggunakan mikroorganisme untuk

menguraikan polutan organik membantu membersihkan tanah dan air dari bahan kimia berbahaya, menjaga kesehatan ekosistem akuatik dan daratan.

2. Konservasi Sumber Daya Alam

Proses daur ulang dan pemanfaatan kembali limbah membantu dalam konservasi sumber daya alam. Dengan mendaur ulang material seperti plastik, logam, dan kertas, kebutuhan akan bahan baku baru berkurang. Ini tidak hanya mengurangi tekanan pada penambangan dan eksploitasi sumber daya alam tetapi juga mengurangi jejak karbon yang terkait dengan produksi material baru.

3. Peningkatan Kualitas Kesehatan

Pengelolaan limbah yang baik mencegah penyebaran penyakit dan risiko kesehatan yang diakibatkan oleh paparan limbah berbahaya. Dengan mengolah limbah medis dan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) secara aman, risiko kesehatan bagi pekerja dan masyarakat sekitar dapat diminimalisir. Selain itu, air bersih yang dihasilkan dari pengolahan limbah cair berkontribusi terhadap kesehatan masyarakat yang lebih baik.

4. Dukungan terhadap Keanekaragaman Hayati

Mengurangi pencemaran dan kerusakan habitat melalui pengelolaan limbah yang tepat dan bioremediasi membantu melindungi keanekaragaman hayati. Ekosistem yang bersih dan sehat menyediakan lingkungan yang lebih baik bagi flora dan fauna untuk berkembang. Pengurangan polutan beracun dalam tanah dan air juga mendukung kelangsungan hidup spesies yang terancam punah dan meningkatkan keanekaragaman hayati secara keseluruhan.

5. Ekonomi Sirkular dan Keberlanjutan Ekonomi

Implementasi teknologi pengolahan limbah dan bioremediasi mendukung ekonomi sirkular, di mana limbah dilihat sebagai sumber daya yang dapat digunakan kembali. Ini mendorong inovasi dan pengembangan industri hijau yang menciptakan lapangan kerja baru dan mendukung pertumbuhan ekonomi berkelanjutan. Pendekatan ini mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas dan mendorong efisiensi dalam penggunaan sumber daya.

6. Kesadaran dan Pendidikan Lingkungan

Upaya dalam pengelolaan limbah dan bioremediasi meningkatkan kesadaran dan pendidikan lingkungan di kalangan masyarakat. Program-program edukasi dan partisipasi publik dalam kegiatan daur ulang dan konservasi membantu membentuk perilaku yang lebih ramah lingkungan. Kesadaran ini penting untuk menciptakan budaya berkelanjutan yang mendukung pelestarian lingkungan dalam jangka panjang.

Dengan memahami dan menerapkan pengelolaan limbah serta bioremediasi yang efektif, kita dapat menciptakan lingkungan yang lebih bersih, sehat, dan berkelanjutan. Implikasi positif dari tindakan ini tidak hanya dirasakan oleh generasi sekarang, tetapi juga memastikan kelestarian ekosistem untuk generasi mendatang. Upaya bersama dalam pengelolaan limbah dan bioremediasi merupakan langkah penting menuju keberlanjutan ekosistem global.

DAFTAR PUSTAKA

- Admin fahatan. (2024). *KULIAH UMUM PULAI SERIES 13: FAKULTAS KEHUTANAN UNTAN HADIRKAN DR. VALERIA VERRONE BAHAS PERAN MIKROBA DALAM EKOSISTEM*. Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. <https://fahatan.untan.ac.id/kuliah-umum-pulai-series-13-fakultas-kehutanan-untan-hadirkan-dr-valeria-verrone-bahas-peran-mikroba-dalam-ekosistem/>
- Asril, M., Erdiandini, I., Sari, S. P., Mohamad, E., Hasibuan, H. S., Tangio, J. S., Novianto, E. D., Apriliya, I., & Lestari, W. (2024). Mikrobiologi Tanah. In *Yayasan Kita Menulis* (Vol. 1, Issue juli).
- Astina, N., Fauzan, A., & Rahman, E. (2020). Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Perilaku Masyarakat Dalam Membuang Sampah Rumah Tangga Ke Sungai Di Desa Pamarangan Kanan Kabupaten Tabalong Tahun 2019. *Medical Technology and Public Health Journal*, 4(2), 181–190. <https://doi.org/10.33086/mtphj.v4i2.1632>
- Buana, R. A. D. L. L., Winardi, & Sulastris, A. (2021). Bioremediasi Lahan Tercemar Limbah Oli Bekas Menggunakan Biokomposting. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Tropis*, 2(1), 1–10.
- Fidiastuti, H. R., Prabowo, C. A., Lathifah, A. S., Amin, M., & Utomo, Y. (2019). Bioremediasi Limbah Industri. In *Forind*.
- Firdaus, M. (2015). Pemulihan Tanah Tercemar Minyak Bumi Dengan Teknik Bioremediasi Menggunakan Bacillus Sp. Dan Pseudomonas Sp. *Minyak Dan Gas Bumi*, 49(2), 111–118.
- Fitriadi, R., Dan Churun A'in Program, H., Manajemen, S., Perairan, S., Perikanan, J., Perikanan, F., & Kelautan, I. (2016). EFEKTIVITAS MIKROORGANISME SEBAGAI BAHAN BIOREMEDIASI PADA LIMBAH PENCUCIAN IKAN TONGKOL (*Auxis thazard*) (SKALA LABORATORIUM). *Available Online at Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology (IJFST) Saintek Perikanan*, 12(1), 52–59.
- Hanifah, N. N., Yuliani, & Fitrihidajati, H. (2018). Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi dengan Penambahan Kompos

- Berbahan Baku Limbah Cair Tahu dan Kulit Pisang. *LenteraBio*, 7(1), 61–65.
<http://ejournal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan kehutanan. (2015). *TEKNOLOGI BIOREMEDIASI UNTUK PENGOLAHAN POPS*. Direktorat Pengelolaan B3.
<https://sib3pop.menlhk.go.id/index.php/articles/view?slug=teknologi-bioremediasi-untuk-pengolahan-pops>
- Lukić, B., Panico, A., Huguenot, D., Fabbicino, M., van Hullebusch, E. D., & Esposito, G. (2017). A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 94–116.
<https://doi.org/10.1080/21622515.2017.1310310>
- Melati, I. (2020). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan Dan Prospek Riset. *Prosiding Seminar Biotik, Rahayu 2005*, 272–286.
- pertamina. (2023). *Pengertian Bioremediasi*.
https://onesolution.pertamina.com/Insight/Page/Pengertian_Bioremediasi_adalah
- Putra, R. S. (2008). *Bioremediasi Tanah Terkontaminasi*.Pdf.
- Putra, T. I., Setyowati, N., & Apriyanto, E. (2019). Identifikasi Jenis Dan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun Rumah Tangga: Studi Kasus Kelurahan Pasar Tais Kecamatan Seluma Kabupaten Seluma. *Naturalis: Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam Dan Lingkungan*, 8(2), 49–61. <https://doi.org/10.31186/naturalis.8.2.9209>
- Rizky, P. N., & Rahayu, W. (2024). *Pencemaran perairan*.
- Sinaga, S. C. (2022). *BIOREMEDIASI TANAH TERCEMAR LIMBAH MINYAK BUMI DARI CEPU JAWA TENGAH SECARA EX-SITU MENGGUNAKAN METODE COMPOSTING*. UPN"Veteran" Yogyakarta.

BAB 5

MIKROBIOLOGI TANAH

Oleh Sariwahyuni

5.1 Pendahuluan

Mikrobiologi tanah adalah ilmu yang mempelajari organisme dalam tanah, fungsinya dan pengaruhnya terhadap sifat-sifat mikrobiologi tanah dan lingkungan. Struktur tanah dan interaksi antar mikroorganisme (termasuk jamur tanah, bakteri tanah dan spesies seperti nematoda) dapat berdampak pada biologi dan biokimia tanah serta sifat-sifat tanah lainnya.

Mikroorganisme tanah adalah elemen penting dalam ekosistem tanah yang berkontribusi secara signifikan terhadap keseimbangan nutrisi tanah dan pertumbuhan tanaman. Mereka memiliki peran yang krusial dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman.

Struktur mikroba tanah sebanding dengan kandungan bahan organik, sehingga mikroba tanah, bakteri tanah dan organisme tanah berperan penting terhadap kesuburan dan kesehatan tanah. Tanah yang mengandung residu organik dalam jumlah besar secara teratut cenderung mendukung lebih banyak mikroorganisme tanah, yang berkontribusi terhadap kesehatan tanah secara keseluruhan.

Mikrobiologi tanah mengatur pengolahan dan daur ulang unsur hara di dalam tanah, dan juga mempengaruhi penguraian bahan organik di dalam tanah, salinitas tanah dan keasaman tanah, sehingga berdampak pada kesuburan tanah dan kesehatan tanaman.

5.2 Tinjauan Umum Mikrobiologi Tanah

Terdapat jutaan mikroorganisme dalam satu gram tanah, termasuk jamur tanah, bakteri tanah, *actinomycetes*, *alga*, organisme bersel satu seperti protozoa dan spesies animalia seperti nematoda. Biomassa dan aktivitas masing-masing spesies mikroba bervariasi dan berkembang sepanjang siklus hidup tanah. Jamur

biasanya mendominasi biomassa sampel yang sehat, meskipun rapuh dan sensitif, sedangkan bakteri tetap paling tahan terhadap berbagai perubahan kondisi. Biomassa mikroba tanah dapat berkisar dari beberapa ratus hingga ribuan pon per hektar. Variasi tingkat dan aktivitas mikroba berkorelasi langsung dengan pengelolaan tanah.

Tanah merupakan campuran yang terdiri dari bahan organik, anorganik, air dan udara yang semuanya tercampur menjadi satu, sehingga sulit dipisahkan antara satu dengan yang lainnya.

Populasi mikro di dalam tanah terbagi menjadi 3 golongan besar yaitu:

1. Golongan *autohtonus*, yaitu mikroba yang tidak terpengaruh dengan lingkungan luar, misalnya *arthrobacter* dan *nocardia*
2. Golongan *zimogenik*, yaitu mikroba yang terpengaruh dengan lingkungan yang baru, sebagai contoh terjadinya penambahan senyawa organik. Golongan ini diantaranya *pseudomonas* dan *bacillus*.
3. Golongan *transien*, yaitu mikroba yang kehadirannya bersamaan dengan penambahan mikroba secara buatan.

5.3 Mikroorganisme Tanah

Kesuburan tanah tidak hanya ditentukan oleh susunan kimia tanah tetapi juga jumlah dan jenis biota yang terdapat di dalam tanah. Biota tanah dapat dikelompokkan sebagai *protista eukariotik* dan *protista prokariotik*.

Protista prokariotik yang berperan penting di dalam tanah meliputi kelompok bakteri, ganggang biru dan *actinomycetes*, sedangkan *protista eukariotik* meliputi jamur, protozoa, ganggang dan metazoa. Perbedaan antara *prokariotik* dan *eukariotik* terutama pada struktur dan ultra strukturnya. Pada jasad prokariotik tidak mempunyai sistem membran inti, *retikulum endoplasmik* dan mitokondria, sedang eukariotik memiliki ketiga organel tersebut.

5.3.1 Bakteri

Di dalam tanah bakteri merupakan kelompok yang paling dominan dan kurang lebih setengah dari biomassa adalah mikrobia tanah. Bakteri terdapat pada semua jenis tanah, yang makin ke

dalam, populasinya makin sedikit. Bakteri berbentuk batang, kokus dan spiral. Bakteri bentuk batang merupakan kelompok dominan di dalam tanah.

Berdasarkan kebutuhan oksigen, bakteri dikelompokkan menjadi :

1. Kelompok bakteri aerob : bakteri yang membutuhkan oksigen.
2. Kelompok bakteri anaerob: hanya akan tumbuh jika tidak ada oksigen
3. Kelompok fakultatif anaerob: bakteri yang dapat tumbuh baik tanpa atau dengan adanya oksigen.

Saat oksigen tidak ada, bakteri kelompok anaerob yang paling aktif, karena keadaan ini menyebabkan jamur dan ctonomycetes mengalami pertumbuhan dan kativitas yang terganggu.

Populasi bakteri di dalam tanah dipengaruhi oleh tekstur, kandungan air, aerasi, suhu, bahan organik, kemasaman dan tersedinya nutrien anorganik. Keberadaan kandungan organik juga mempengaruhi populasi bakteri didalam tanah. Sebagai contoh bahwa meningkatnya jumlah dan kegiatan bakteri dalam tanah akan sejalan dengan terjadinya penambahan sisa tanaman dan pupuk hijau.

Berdasarkan kebutuhan nutrisinya, bakteri dikelompokkan menjadi *ototrof* dan *heterotrof*. Jasad yang memerlukan sumber karbon yang berasal dari senyawa anorganik disebut jasad *ototrof* atau *litotrof* (misalnya CO_2). Sedangkan jasad yang memerlukan sumber kanrbon organik disebut *heterotrof* atau *organotrof*.

Berdasarkan sumber energinya, maka bakteri dikelompokkan menjadi:

1. Fototrof, jika sumber energinya adalah cahaya
2. Organotrof, jika sumber energinya adalah senyawa kimia
3. Kemootrof obligat, jika menggunakan nitra seperti *nitrobacter*, *nitrosomonas* yang menggunakan nitrat dan amonium
4. Fotootrof, misalnya bakteri fotosintetik.

5.3.2 Actinomycetes

Actinomycetes bersifat *heterotrof*. *Actinomycetes* tidak toleran terhadap pH tanah. Bertahan pada kisaran pH 6,5 – 8,0. Pengasaman tanah sampai pH 5 digunakan untuk memberantas penyakit tanaman skabies pada kentang yang disebabkan oleh *streptomyces*. Penggunaan pupuk amonium yang terus menerus dapat menekan pertumbuhan *actinomycetes*, karena amonium dioksidasi menjadi nitrat yang dapat menurunkan pH. Aktivitas pengapuran dapat meningkatkan populasi *actinomycetes*.

5.3.3 Jamur

Jumlah dan kualitas bahan organik berpengaruh pada jumlah jamur dalam tanah, karena jamur bersifat heterotrof. Pemberian bahan organik merubah susunan jamur yang dominan dan genur *penicillium*, *trichoderma*, *aspergillus*, *fusarium* dan *mucor*. Jamur dominan pada tanah masam meskipun terdapat juga pada tanah netral atau alkali dan beberapa diantaranya toleran pada pH 9,0. Kepekaan terhadap pH mempunyai arti penting di dalam usaha mengatasi penyakit tanaman yang hidup di dalam tanah (*soil-borne*). Misalnya *plasmidiophora brassicae* paling banyak terdapat pada tanah masam, dan penyakit ini tidak terdapat pada tanah dengan pH 7,5. Pemberian pupuk organik dapat merubah populasi jamur misalnya pemupukan dengan garam amonium jika mengalami oksidasi menjadi nitrat atau menurunkan pH.

Jamur dibagi menjadi beberapa kelompok, yaitu *Phycomycetes*, *Ascomycetes*, *Basidiomycetes*, dan Fungi *Imperfecti*. Banyak jamur yang menyebabkan pembusukan kayu, seperti *Polyporus* dan *Ektomikorisa* (misalnya *Boletus*), memiliki peran penting bagi tanaman hutan. *Endomikorisa* juga penting dalam penyerapan unsur Fosfat pada tanaman, termasuk yang berasal dari kelompok *Phycomycetes*. Jamur penyebab penyakit tanaman dapat ditemukan di keempat golongan tersebut.

Jamur memiliki peran utama di dalam tanah, yaitu memecah bahan organik dan membentuk agregat tanah. Beberapa jenis jamur, seperti *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Dematium*, *Gliocladium*, *Helminthosporium*, *Humicola*, dan *Metarhizium*, dapat menghasilkan bahan humat dalam tanah. Selain itu, ada juga jamur yang mampu

menghasilkan senyawa dengan struktur kimia yang mirip dengan kebanyakan karbohidrat yang diekstraksi dari bahan organik tanah. Beberapa jenis jamur dapat berasosiasi dengan akar tanaman, seperti *Ektomikorisa* dari genus *Boletus* dan *Lactarius* yang berasosiasi dengan tanaman hutan. Sementara itu, *Endomikorisa* seperti genus *Glomus* berasosiasi dengan tanaman pertanian seperti jagung, kedelai, dan lainnya.

5.3.4 Ganggang (*Algae*)

Ganggang tanah tumbuh dengan baik jika kelembaban dan cahaya mencukupi. Ganggang ini membentuk lapisan berwarna hijau di permukaan tanah dan termasuk dalam kingdom Protista. Ganggang terbagi menjadi beberapa divisio, yaitu *Chlorophyta*, *Rhodophyta*, *Cyanophyta*, dan *Phaeophyta*. Karena memiliki klorofil, ganggang bersifat *fotototrof*. Contoh ganggang hijau antara lain *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, dan lainnya.

Ganggang biru memiliki pigmen yang disebut *fikosianin* selain klorofil. Contoh ganggang yang termasuk dalam kelompok *Cyanophyta* adalah *Aphanocapsa*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Nostoc*, dan lainnya. Beberapa ganggang biru memiliki sel khusus yang disebut *heterosis*, yang berfungsi dalam penambatan nitrogen. Tanah sawah merupakan lingkungan yang ideal untuk pertumbuhan jenis ganggang biru tertentu yang berperan dalam proses penambatan nitrogen.

5.3.5 Protozoa

Protozoa berflagella termasuk dalam kelas *Flagellata* atau *Mastigophora*, yang dominan di dalam tanah. Beberapa genus penting di antaranya adalah *Bodo*, *Carcobodo*, dan *Tetramitus*. Protozoa dari kelas *Sarcodina*, seperti *Biomyxa*, *Naigleria*, dan *Englypha*, serta dari kelas *Ciliata*, seperti *Colpoda*, *Balantiophorus*, dan *Uroleptus*, juga terdapat di dalam tanah. Protozoa tanah memakan bakteri dari genus seperti *Aerobacter*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Escherichia coli*, *Micrococcus*, dan *Pseudomonas* dengan mencernanya di dalam protoplasmanya, meskipun hanya bakteri tertentu yang rentan. Protozoa banyak ditemukan di permukaan

tanah, dan jumlahnya dipengaruhi oleh populasi bakteri serta kandungan bahan organik tanah.

5.3.6 Virus

Salah satu kelompok bakteriofaga yang penting dalam pertanian adalah yang menyebabkan lisis bakteri *Rhizobium* pada bintil akar di tanah. *Bakteriofaga* spesifik lainnya yang terdapat di tanah termasuk bakteriofaga untuk *Aerobacter*, *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Streptomyces*, *Azotobacter*, dan *Nocardia*. Selain itu, ada juga kelompok virus tertentu yang dapat menyerang jamur (*mycovirus*), seperti yang ditemukan pada *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus*, *Periconia*, dan *Ustilago*.

5.4 Peranan Mikrorganisme Tanah

Mikroba tanah memiliki peran penting dalam berbagai bidang, seperti ilmu tanah, pertanian, dan bidang lainnya, terutama dalam siklus mineral. Siklus mineral ini meliputi siklus nitrogen, siklus fosfor, siklus sulfur, dan siklus karbon.

Secara rinci, berikut ini adalah beberapa peran mikroorganisme tanah:

1. Degradasi Bahan Organik: Mikroba seperti bakteri dan jamur membantu menguraikan sisa-sisa tanaman, hewan, dan bahan organik lainnya. Proses ini menghasilkan humus, yang meningkatkan struktur dan kesuburan tanah.
2. Siklus Nutrisi:
 - a. Nitrogen: Mikroba tertentu, seperti bakteri pengikat nitrogen (misalnya, *Rhizobium*) dan *actinomycetes*, mengubah nitrogen dari atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.
 - b. Fosfor: Mikroba seperti fungi *mycorrhizae* membantu melepaskan fosfor yang terikat dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman.
 - c. Siklus Karbon: Mikroba juga berperan dalam siklus karbon dengan mengubah bahan organik menjadi karbon dioksida dan senyawa lainnya.
3. Pembentukan Struktur Tanah: Mikroba seperti fungi dan bakteri berkontribusi pada pembentukan agregat tanah

- melalui produksi bahan pengikat, yang membantu meningkatkan aerasi dan kapasitas retensi air tanah.
4. Pengendalian Hama dan Penyakit: Beberapa mikroba bersaing dengan patogen tanaman, mengeluarkan senyawa antimikroba, atau bahkan memparasit patogen, membantu menjaga kesehatan tanaman.
 5. Ketersediaan Nutrisi: Mikroba tanah membantu melarutkan mineral dan nutrisi lain yang tidak tersedia bagi tanaman dalam bentuk yang dapat diserap. Misalnya, fungi *mycorrhizae* meningkatkan kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi dengan memperluas jaringan akar.
 6. Bioremediasi: Mikroba dapat digunakan untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi oleh bahan kimia berbahaya. Mereka dapat menguraikan atau memodifikasi zat-zat beracun menjadi bentuk yang kurang berbahaya.
 7. Stabilitas Ekosistem: Keberagaman mikroba tanah membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah dengan memastikan bahwa berbagai proses biologis dapat berlangsung secara optimal. Ini juga mendukung ketahanan tanah terhadap gangguan dan perubahan lingkungan.

Secara keseluruhan, mikroorganisme tanah memainkan peran penting dalam kesehatan tanah dan produktivitas pertanian, serta dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

5.5 Dampak Pengelolaan Tanah Terhadap Biologi Tanah

Pengelolaan tanah memiliki dampak signifikan terhadap biologi tanah, yang meliputi berbagai organisme seperti mikroba, cacing tanah, dan jamur. Berikut beberapa dampak utama:

1. Kesehatan Tanah : Praktik pengelolaan tanah yang baik, seperti rotasi tanaman dan penggunaan kompos, dapat meningkatkan kesehatan tanah dengan mendukung keberagaman dan aktivitas mikroba. Sebaliknya, pengelolaan yang buruk, seperti penggunaan pestisida dan pupuk kimia berlebihan, dapat merusak keseimbangan biologis tanah.

2. **Kandungan Organik:** Penggunaan bahan organik, seperti kompos dan mulsa, dapat meningkatkan kandungan bahan organik di dalam tanah, yang mendukung kehidupan mikroba dan cacing tanah. Bahan organik ini juga membantu dalam pembentukan struktur tanah yang lebih baik.
3. **Kualitas Tanah:** Pengelolaan tanah yang buruk, seperti pengolahan tanah yang berlebihan atau penggundulan hutan, dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah, termasuk penurunan jumlah dan aktivitas mikroba tanah yang berperan dalam proses dekomposisi dan siklus nutrisi.
4. **Erosi dan Pengendalian Hama:** Pengelolaan yang buruk dapat menyebabkan erosi tanah yang meningkatkan kehilangan lapisan atas tanah yang kaya akan bahan organik dan mikroba. Selain itu, penggunaan pestisida dapat membunuh mikroba tanah yang bermanfaat dan mengganggu ekosistem tanah.
5. **Keseimbangan Nutrisi:** Pengelolaan tanah yang baik dapat membantu menjaga keseimbangan nutrisi di tanah, yang penting untuk kesehatan tanaman dan aktivitas mikroba. Penggunaan pupuk organik dan analisis tanah yang tepat dapat membantu mengatur suplai nutrisi dengan cara yang lebih berkelanjutan.

Dengan demikian, pengelolaan tanah yang efektif dan berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keseimbangan biologis dan kesehatan tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi produktivitas tanaman dan ekosistem secara keseluruhan.

Praktik pengelolaan tanah dapat mempengaruhi mikrobiologi tanah dengan menambah atau mengurangi populasi nutrisi, yang merupakan sumber makanan utama bagi mikroba tanah. Contohnya, penggunaan metode pemupukan organik seperti pengomposan, pupuk hijau, dan tanaman penutup dapat meningkatkan aktivitas mikroba dengan menyediakan lebih banyak nutrisi bagi mikroba di dalam tanah. Hal serupa juga terjadi pada sistem tanpa olah tanah, yang mengurangi gangguan terhadap mikroba dan sumber makanannya. Oleh karena itu, mikrobiologi

tanah modern kini menjadi pusat dalam menyempurnakan pengelolaan kesuburan tanah untuk pertanian berkelanjutan, serta membantu memulihkan tanah yang terkontaminasi atau dipupuk secara kimia kembali ke kondisi yang sehat dan produktif.

Ruang topik tanaman penutup tanah adalah titik awal yang baik untuk mempelajari lebih dalam tentang mikrobiologi tanah dan bagaimana tanaman penutup tanah mempengaruhi kesuburan dan pengelolaan tanah. membangun tanah untuk tanaman yang lebih baik adalah sumber utama yang memberikan pemahaman dasar tentang struktur tanah, kesuburan, mikrobiologi, dan pengelolaannya. rotasi tanaman pada pertanian organik: manual perencanaan adalah sumber informasi bagi petani yang ingin menerapkan rotasi tanaman dalam kegiatan mereka untuk meningkatkan bahan organik dan mikrobiologi tanah.

5.6 Mengukur Aktivitas Mikorganisme Tanah

Analisis tanah dengan pendekatan mikrobiologi tanah bertujuan untuk memeriksa dan mengidentifikasi semua mikroorganisme yang ada dalam bahan organik tanah, serta menilai aktivitas mikroba atau interaksi mikroorganisme di dalam tanah. Berbagai metode pengujian diterapkan, termasuk pengukuran respirasi tanah dan tingkat konsumsi nutrisi. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai struktur, kualitas, dan kesehatan tanah secara keseluruhan, memastikan kondisi tanah yang tepat untuk pengolahan, serta meningkatkan keberlanjutan dan konservasi tanah di berbagai iklim dan penggunaan lahan. Mikrobiologi tanah paling efektif bila dikombinasikan dengan analisis kimia dan fisika tanah.

Mengukur aktivitas mikroorganisme tanah melibatkan beberapa metode yang dapat memberikan informasi tentang keberadaan dan fungsi mikroba di tanah. Berikut adalah beberapa cara umum yang digunakan:

1. Hitung Jumlah Koloni Mikroba (*Plate Count Method*):
 - a. Metode: Ambil sampel tanah dan suspensikan dalam larutan steril. Inkubasi suspensi tersebut pada media pertumbuhan di bawah kondisi tertentu (suhu, pH).

Setelah inkubasi, hitung jumlah koloni mikroba yang tumbuh pada media.

- b. Kegunaan: Mengukur jumlah total koloni bakteri atau jamur.

2. Uji Aktivitas Respirasi Tanah:

- a. Metode: Ukur produksi karbon dioksida (CO_2) dari tanah dengan metode seperti respirometer atau alat pengukur CO_2 . Aktivitas respirasi menunjukkan tingkat metabolisme mikroba di tanah.
- b. Kegunaan: Menilai aktivitas mikroba secara keseluruhan dan aktivitas dekomposisi bahan organik.

3. Pengukuran Aktivitas Enzimatik:

- a. Metode: Mengukur aktivitas enzim tertentu yang diproduksi oleh mikroba tanah, seperti *dehidrogenase*, *urease*, atau *fosfatase*. Aktivitas enzim ini bisa diukur dengan menggunakan substrat spesifik yang diubah oleh enzim.
- b. Kegunaan: Memberikan indikasi tentang aktivitas metabolik spesifik dan kemampuan mikroba dalam menguraikan bahan organik atau memanfaatkan nutrisi.

4. Metode DNA/RNA:

- a. Metode: Menggunakan teknik molekuler seperti PCR (*Polymerase Chain Reaction*) untuk mendeteksi dan mengkuantifikasi DNA atau RNA mikroba. Ini dapat mencakup teknik seperti qPCR (*quantitative PCR*) untuk mengukur jumlah mikroba spesifik atau metagenomik untuk menganalisis keseluruhan komunitas mikroba.
- b. Kegunaan: Memberikan informasi tentang keberadaan spesies mikroba tertentu dan struktur komunitas mikroba.

5. Uji Mikroskopis:

- a. Metode: Menggunakan mikroskop untuk menghitung jumlah dan jenis mikroba dalam sampel tanah. Ini dapat mencakup pewarnaan khusus untuk mengidentifikasi kelompok mikroba tertentu.
- b. Kegunaan : Menilai keberadaan dan keberagaman mikroba secara visual.

6. Uji Biologis Tanah:

- a. Metode: Mengukur parameter biologis tanah seperti biomassa mikroba total dengan metode fumigasi-ekstraksi atau menghitung rasio mikroba terhadap bahan organik tanah.
- b. Kegunaan: Menilai total massa mikroba dan aktivitas biologis tanah.

Penggunaan beberapa metode secara bersamaan sering kali memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang aktivitas mikroorganisme tanah dan kesehatan tanah secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anne M, Martha M.P, Charles S.W. (2014). Plant Nutrients and Soil Fertility. University of Nebraska– Lincoln. Lincoln and the United States Department of Agriculture
- Brady NC, Weil RR (2008). The Nature and Properties of Soils. Revised 14th ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA; 2008.
- Edmundo B (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* :269 – 285.
- Endriyati, V., (2019). Fungsi Tanah Secara Fisik, Biologi Dan Kimia Juga Horison Tanah.
<http://cybex.pertanian.go.id/mobile/artikel/77232/Fungsi-Tanah-Secara-Fisikbiologi-Dan-KimiaJuga-Horison-Tanah>. Diunduh 12 Juli 2024
- Mishra RR (2010). Soil microorganisms and organic matter decomposition. In. *Soil Microbiology*. 4th ed. Published by Satish Kumar Jain., 2010; 83-104
- Sastrapradja, S.D. dan E.A. Widjaja, (2010). *Kanekaragaman Hayati Pertanian menjamin Kedaulatan Pangan*. LIPI Press, Jakarta.
- Sulaimon, A.M dan Badmus, H.A. (2021). Micro and Macro (Organism) and Their Contribution to Soil Fertility. *Frontiers in Environmental Microbiology*. Vol. 7, No. 2
- Von Uexkuell HR (1988). Nutrient cycling in soil management and smallholder development in the Pacific Islands. In: *IBSRAM (International Board for Soil Research and Management) Proceedings*. Bangkok, p. 21.

BAB 6

BIOINDIKATOR LINGKUNGAN

Oleh Alianto

6.1 Pendahuluan

Perkembangan pembangunan beberapa dekade terakhir yang sebagian besar tertumpu di wilayah pesisir menjadi penyebab timbulnya berbagai permasalahan lingkungan sekitarnya. Perairan laut meliputi muara sungai, pantai dan sekitarnya merupakan salah satu lingkungan yang paling banyak mendapat dampak dari kegiatan pembangunan. Dampak negatif yang terjadi di perairan muara sungai, pantai dan sekitarnya akan menimbulkan kerugian yang besar baik secara ekologi maupun ekonomi. Kerugian secara ekologi sebagai respon dari terganggunya stabilitas lingkungan perairan. Kerugian secara ekonomi sebagai respon dari kematian berbagai jenis biota terutama biota yang mempunyai nilai ekonomi tinggi.

Dampak negatif berupa kerugian secara ekologi dan ekonomi di perairan dapat diantisipasi dengan berbagai upaya yang telah diterapkan secara global. Salah satu upaya yang digunakan dengan penerapan beberapa parameter fisika dan kimia perairan sebagai indikator awal untuk menduga terjadinya gangguan perairan. Seiring dengan berkembangnya waktu, pendugaan dan penilaian terjadinya gangguan perairan dengan parameter fisika dan kimia dianggap belum efektif dalam memberikan perlindungan dan pengendalian kerusakan perairan. Faktor penyebabnya beberapa komponen parameter fisika dan kimia hanya menggambarkan kondisi perairan saat pengambilan contoh air dan tidak menggambarkan kondisi perairan yang sebenarnya.

Oleh karena itu, untuk meminimalisir atau mengurangi terjadinya gangguan perairan diperlukan indikator lain yang lebih menggambarkan secara efektif dan akurat kondisi perairan yang sebenarnya. Salah satu indikator yang digunakan

sebagai parameter adalah mikroorganisme. Plankton yang terdiri dari fitoplankton dan zooplankton merupakan satu satu mikroorganisme yang sering digunakan sebagai bioindikator untuk menduga gangguan perairan khususnya kualitas air di lingkungan perairan.

6.2 Definisi

Bioindikator adalah jenis, populasi atau komunitas organisme termasuk mikroorganisme yang saling berhubungan serta keberadaan sangat berhubungan dengan kondisi kualitas air tertentu sehingga dapat digunakan sebagai suatu petunjuk kesehatan perairan. Mikroorganisme adalah organisme berukuran kecil yang tidak dapat dilihat dengan mata secara langsung (visual) melainkan dengan bantuan alat yang namanya mikroskop. Fitoplankton adalah plankton tumbuhan yang mengapung dan melayang-layang di kolom air serta keberadaannya sangat tergantung pada pergerakan aliran air dan arus laut. Zooplankton adalah salah satu mikroorganisme dari plankton hewani yang dapat bermigrasi secara vertikal dengan kemampuan berenang yang sangat kecil bila dibandingkan dengan pergerakan arus itu sendiri. Fitoplankton dan zooplankton yang terdapat di perairan baik perairan tawar maupun perairan laut menjadi bioindikator kesehatan perairan yang baik.

6.3 Fitoplankton

Fitoplankton memiliki beberapa keuntungan bila digunakan sebagai bioindikator keberlanjutan perairan diantaranya sebagai penghasil makanan utama di perairan, tersebar pada seluruh kolom air yang masih mendapatkan cahaya, memiliki pertumbuhan seperti waktu doubling dan pembelahan sel yang sangat cepat, dapat memanfaatkan nutrisi yang ada disekelilingnya dengan baik dan cepat, dapat merespon dan beradaptasi dengan cepat pada perubahan lingkungan perairan, keberadaannya di perairan 100% masuk dalam rantai makanan. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator di perairan berhubungan dengan penentuan status kualitas air, kesuburan perairan, dan stabilitas perairan.

6.3.1 Bioindikator Kualitas Air

Alasan penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator kualitas air karena fitoplankton tersebar pada seluruh kolom air yang masih mendapatkan cahaya, dapat memanfaatkan nutrisi disekelilingnya dengan baik dan cepat dan pertumbuhannya sangat cepat. Berdasarkan ini menyebabkan fitoplankton sebagai salah satu bioindikator kualitas air yang digunakan untuk menjaga kesehatan perairan khususnya perairan Indonesia. Salah satu upaya yang dilakukan pemerintah untuk menjaga kualitas air agar kesehatan perairan selalu berada pada kondisi baik adalah dengan mengeluarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Tahun 2004 (Kepmen NLH Tahun 2004) tentang baku mutu air laut untuk biota laut. Kelimpahan fitoplankton yang diperbolehkan di perairan berdasarkan Kepmen NLH Tahun 2004 tersebut adalah berada pada kategori tidak *bloom*. *Bloom* yang sering disebut juga dengan *blooming* merupakan suatu fenomena meningkatnya kelimpahan fitoplankton secara tiba-tiba sebagai respon atas perubahan lingkungan perairan.

Perairan yang mengalami *blooming* ditunjukkan kelimpahan fitoplankton sama dengan atau di atas 1.000.000 sel/L (Livingston, 2000). Kelimpahan fitoplankton seperti ini termasuk dalam kategori sangat tinggi. Kepmen NLH Tahun 2004 tentang baku mutu air laut untuk biota laut menunjukkan kelimpahan fitoplankton yang diperbolehkan di bawah 1.000.000 sel/L. Hal ini menunjukkan kategori kelimpahan fitoplankton yang diperbolehkan Kepmen NLH Tahun 2004 tersebut adalah kategori rendah sampai kategori tinggi. Kelimpahan fitoplankton dengan kategori rendah bila berada di bawah 100.000 sel/L dan tinggi bila sama dengan atau di atas 100.000 sel/L (Livingston, 2000). Beberapa perairan yang menggunakan kelimpahan fitoplankton sebagai bioindikator kesehatan perairan disajikan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator kualitas air di perairan Indonesia

No.	Lokasi Perairan	Kelimpahan (Sel/L)	Kategori	Keterangan
1.	Muara Sungai di Teluk Kendari	269 – 2733	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
2.	Pantai Klui, Lombok Utara	246 – 420	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
3.	Media Pemeliharaan Ikan Nila (<i>Oreochromis niloticus</i>)	5003 – 9752	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
4.	Pantai Jeranjang, Lombok Barat	2050	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
5.	Muara Sungai di Teluk Banten	33620 - 2373382	Rendah – Sangat tinggi	Sesuai sampai tidak sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
6.	Bagian Tengah Teluk Banten	1495 – 26262	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004
7.	Bagian Luar Teluk Banten	4012 - 31389	Rendah	Sesuai Kepmen NLH Tahun 2004

Sumber: 1 = Said et al. (2024); 2 = Hadi et al. (2023); 3 = Akmal et al. (2021); 4 = Imran (2016); 5, 6 dan 7 = Alianto et al. (2008)

6.3.2 Bioindikator Kesuburan Perairan

Beberapa alasan penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator kesuburan perairan diantaranya sebagai penghasil makanan utama di perairan, tersebar pada seluruh kolom air yang masih mendapatkan cahaya, memiliki pertumbuhan yang sangat

cepat, dapat memanfaatkan nutrisi yang ada disekelilingnya dengan baik dan cepat, keberadaannya di perairan 100% masuk dalam rantai makanan. Fitoplankton dapat digunakan sebagai bioindikator terutama untuk menentukan tingkat kesuburan perairan. Kesuburan perairan ditunjukkan ketersediaan fitoplankton dalam menunjang proses biologi di perairan. Fitoplankton yang digunakan untuk menentukan kesuburan perairan berdasarkan kelimpahan fitoplankton, klorofil-a, produktivitas primer fitoplankton, dan pertumbuhan fitoplankton. Penggunaan kelimpahan fitoplankton, klorofil-a, produktivitas primer fitoplankton dan pertumbuhan fitoplankton untuk menentukan kesuburan perairan dapat digunakan secara tunggal atau secara ganda atau lebih.

Penggunaan kelimpahan fitoplankton sebagai bioindikator kesuburan perairan tingkat keakuratannya lebih tinggi. Hal ini disebabkan pengambilan contoh air dilakukan secara *in situ* menggunakan plankton net dan identifikasinya secara *eks situ* dengan bantuan mikroskop. Penggunaan klorofil-a, produktivitas primer dan pertumbuhan fitoplankton keakuratannya kurang sampai tinggi. Hal ini disebabkan klorofil-a di perairan bukan hanya klorofil-a fitoplankton tapi berasal pula dari bakteri dan detritus. Hal yang sama dengan pengukuran produktivitas primer fitoplankton seperti bakteri yang menempel pada dinding botol terang dan botol gelap menjadi faktor yang mempengaruhi. Hal ini akan berpengaruh pada pengukuran pertumbuhan fitoplankton. Tingkat akuratan fitoplankton sebagai bioindikator kesuburan perairan disajikan pada Tabel 6.2. Walaupun demikian, penggunaan dua atau lebih komponen fitoplankton secara bersamaan tentu lebih baik dibandingkan satu komponen fitoplankton dalam menentukan kesuburan perairan.

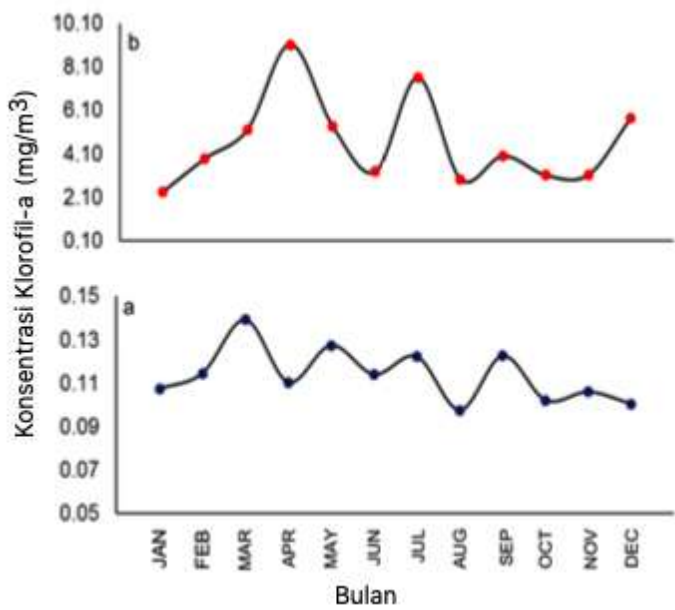
Tabel 6.2. Tingkat keakuratan fitoplankton sebagai bioindikator kesuburan perairan

No.	Komponen	Tingkat Keakuratan
1.	Kelimpahan	Tinggi
2.	Klorofil-a	Kurang sampai Tinggi
3.	Produktivitas primer	Kurang sampai Tinggi
4.	Pertumbuhan	Kurang sampai Tinggi

Tingkat kesuburan perairan ditentukan berdasarkan tinggi rendahnya kelimpahan fitoplankton. Kesuburan perairan disebut sangat tinggi bila kelimpahan fitoplankton berada pada kategori sangat tinggi yang ditunjukkan kelimpahannya sama dengan atau di atas 1.000.000 sel/L. Kesuburan perairan disebut tinggi bila kelimpahan fitoplankton berada pada kategori tinggi yang ditunjukkan kelimpahannya berkisar dari 100.000 sel/L sampai di bawah 1.000.000 sel/L. Kesuburan perairan disebut rendah sampai sedang bila kelimpahan fitoplankton berada pada kategori rendah yang ditunjukkan kelimpahannya di bawah 100.000 sel/L. Berdasarkan ini, kelimpahan fitoplankton di perairan luar teluk Wondama berada dalam kategori sangat tinggi dari bulan Juli sampai September (Alianto et al., 2018) dan pantai Dosa berada pada kategori rendah (Putri et al., 2023).

Selain kelimpahan fitoplankton, klorofil-a digunakan pula sebagai petunjuk kesuburan perairan. Kesuburan perairan disebut rendah bila konsentrasi klorofil-a di bawah 0,5 mg/m³ atau 0,5 µ/L. Kesuburan perairan disebut tinggi bila konsentrasi klorofil-a berkisar dari 0,5 mg/m³ atau 0,5 µ/L sampai di bawah 1 mg/m³ atau 1 µ/L. Kesuburan perairan disebut sangat tinggi bila konsentrasi klorofil-a sama dengan atau di atas 1 mg/m³ atau 1 µ/L. Konsentrasi klorofil-a umumnya tinggi di muara sungai dan rendah di perairan laut yang semakin jauh dari muara sungai atau laut lepas. Konsentrasi klorofil-a yang sama dengan perairan pesisir teluk Cenderawasih (Alianto dan Hamuna, 2020) dan teluk Doreri (Alianto et al., 2020). Berdasarkan sebaran konsentrasi klorofil-a dari bulan Maret sampai Mei terdapat 37 lokasi potensi ikan dan terdapat 9 lokasi

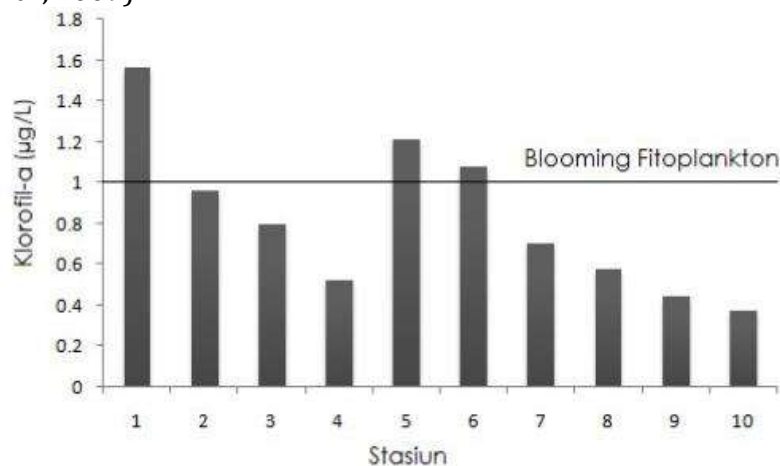
penangkapan ikan pelagis (Alianto, 2023). Sebaran konsentrasi klorofil-a di perairan pesisir teluk Cenderawasih dan teluk Doreri secara berturut-turut disajikan pada Gambar 6.1 dan 6.2.



Gambar 6.1. Sebaran temporal konsentrasi klorofil-a terendah (a) dan tertinggi (b) di perairan teluk Cenderawasih (Sumber: Alianto dan Hamuna, 2020)

Produktivitas primer dan pertumbuhan fitoplankton merupakan komponen fitoplankton yang dapat digunakan untuk menentukan kesuburan perairan. Hal ini disebabkan produktivitas primer dan pertumbuhan fitoplankton sebagai petunjuk kesinambungan ketersediaan fitoplankton baru dan lama waktu yang diperlukan munculnya fitoplankton baru secara alami di perairan. Produktivitas primer dan pertumbuhan fitoplankton lebih tinggi dan cepat di perairan pantai dan muara sungai serta rendah dan kurang kearah laut lepas. Hal ini ditunjukkan produktivitas primer fitoplankton di bagian tengah perairan teluk Banten berkisar dari 13.56 – 29.59 mg C/m³/jam (Alianto et al., 2008). Nilai produktivitas primer fitoplankton tersebut menyebabkan suplai fitoplankton baru di bagian tengah teluk menyokong kegiatan

penangkapan ikan pelagis di perairan teluk Banten (Alianto dan Damar, 2009).



Gambar 6.2. Sebaran spasial konsentrasi klorofil-a di perairan teluk Doreri (Sumber: Alianto et al., 2020)

6.3.3 Bioindikator Stabilitas Perairan

Beberapa alasan penggunaan fitoplankton sebagai biondikator stabilitas perairan diantaranya tersebar pada seluruh kolom air yang masih mendapatkan cahaya, dapat memanfaatkan nutrien yang ada disekelilingnya dengan baik dan cepat, dapat merespon dan beradaptasi dengan cepat pada perubahan lingkungan perairan. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator untuk menentukan stabilitas perairan berdasarkan indeks ekologi atau struktur komunitas dan kelimpahan. Struktur komunitas fitoplankton di perairan terdiri dari indeks keanekaragaman, indeks keseragaman, dan indeks dominansi. Beberapa perairan Indonesia yang menggunakan struktur komunitas dan kelimpahan fitoplankton sebagai bioindikator stabilitas perairan disajikan pada Tabel 6.3.

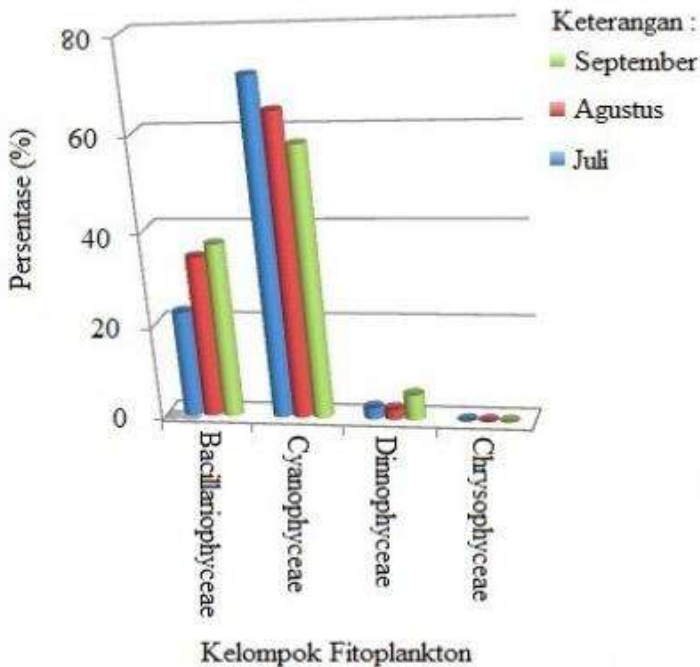
Tabel 6.3. Penggunaan fitoplankton sebagai bioindikator stabilitas perairan

No.	Lokasi	Fitoplankton				Sumber
		a	b	c	d	
1.	Muara Sungai di teluk Kendari	+			+	Said et al. (2024)
2.	Pantai Klui, Lombok Utara	+	+			Hadi et al. (2023)
3.	Media Pemeliharaan Ikan Nila (<i>Oreochromis niloticus</i>)	+	+	+	+	Akmal et al. (2021)
4.	Luar teluk Wondama	+				Alianto et al. (2018)
5.	Pantai Jeranjang, Lombok Barat		+	+	+	Imran (2016)
6.	Muara sungai, bagian tengah dan luar teluk Banten	+				Alianto et al. (2008)

Keterangan : a = kelimpahan fitoplankton, b = keanekaragaman, c = kereseragaman, d = dominansi, dan + = penggunaan

Perairan disebut stabil atau baik bila secara berturut-turut indeks keanekaragamannya tinggi, keseragaman tinggi, dan dominansi rendah. Sebaliknya, perairan disebut tidak stabil atau terganggu bila secara berturut-turut indeks keanekaragamannya rendah, keseragaman rendah, dan dominansi tinggi. Walaupun demikian, bila indeks dominansi yang tinggi disebabkan oleh jenis dari kelompok fitoplankton beracun seperti Dinophyceae dengan kelimpahan yang sangat tinggi sebagai petunjuk perairan tidak stabil. Sebaliknya, indeks dominansi yang tinggi disebabkan oleh jenis dari kelompok fitoplankton tidak beracun atau baik seperti Cyanophyceae khususnya di laut lepas atau bebas dengan kelimpahan yang sangat tinggi sebagai petunjuk perairan stabil. Fenomena seperti ini dijumpai perairan luar teluk Wondama.

Kelimpahan fitoplankton di perairan luar teluk Wondama sangat tinggi berkisar dari 70.520.000 – 462.951.000 sel/L (Alianto et al., 2018). Cyanophyceae merupakan kelompok dominan dari bulan Juli, Agustus dan September secara berturut-turut sebesar 71,41%, 64,32% dan 57,57% seperti disajikan pada Gambar 8.3 (Alianto et al., 2018). Sebaliknya, bila Cyanophyceae dominan di perairan teluk yang dangkal dengan kelimpahan sangat tinggi sebagai petunjuk perairan tidak stabil atau terganggu. Jenis fitoplankton dari kelompok Cyanophyceae yang dominan adalah berbeda antara perairan laut lepas atau laut terbuka yang dalam dengan perairan teluk yang dangkal maupun perairan tawar seperti danau, waduk, rawa, sungai dan kolam.

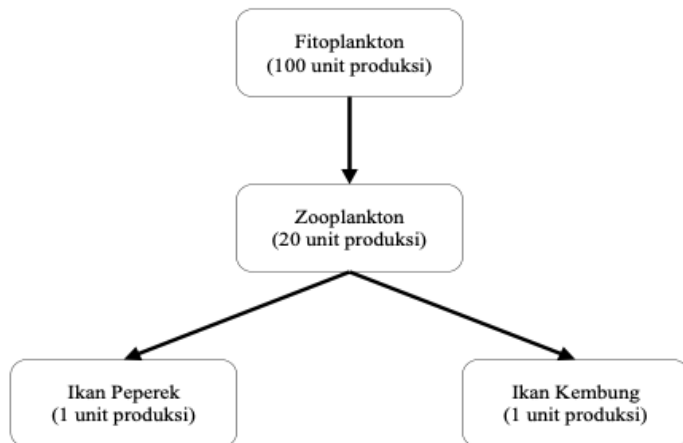


Gambar 6.3. Kelompok fitoplankton di perairan luar teluk Wondama (Sumber: Alianto et al., 2018)

6.4 Zooplankton

Kelebihan dan keuntungan penggunaan zooplankton sebagai bioindikator dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Zooplankton sebagai pemanfaat atau pemakan pertama produsen primer atau fitoplankton di perairan. Hal ini sebagai petunjuk zooplankton berperan sebagai penjaga kualitas air atau kesehatan perairan. Keberadaan zooplankton menyebabkan fitoplankton tidak *blooming* karena di makan atau di *grazing* oleh zooplankton.
2. Zooplankton sebagai perantara atau penghubung dari fitoplankton ke ikan pemakan plankton. Hal ini menunjukkan keberadaan zooplankton karena ada fitoplankton yang akan menjadi makanannya dan ikan yang akan memakan zooplankton. Grazing zooplankton pada fitoplankton di perairan laut tropis dan perairan teluk diperkirakan sekitar 75% (Ornolfsdottir et al., 2004). Contoh fitoplankton di makan zooplankton dan zooplankton di makan ikan disajikan pada Gambar 6.4.



Gambar 6.4. Rantai makanan di perairan teluk Banten
(Sumber: Alianto et al., 2009)

- c. Zooplankton memiliki siklus hidupnya yang pendek dan pertumbuhannya cepat. Hal ini sebagai petunjuk bila kelimpahan rendah berarti zooplankton di makan oleh ikan

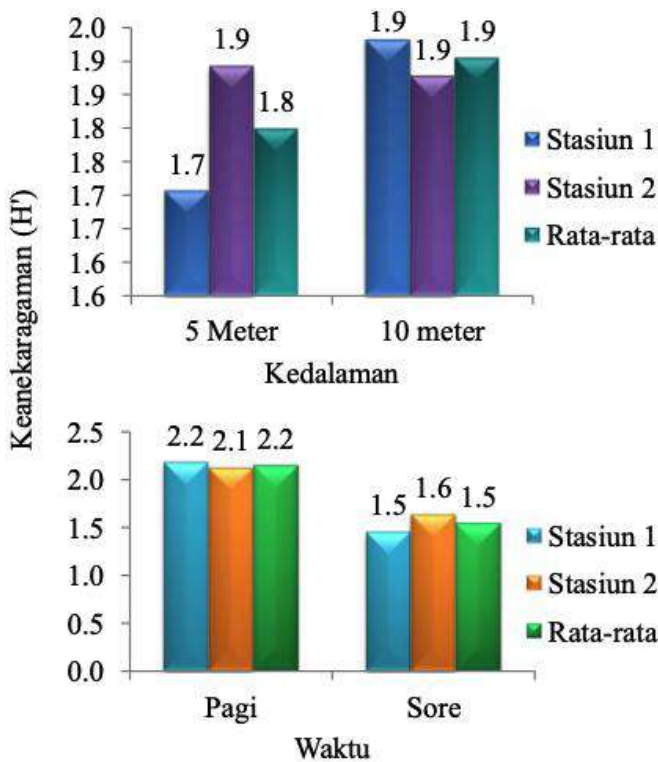
terutama ikan pelagis. Contoh kelimpahannya zooplankton di perairan daerah penangkapan pelagis termasuk dalam kategori rendah seperti disajikan pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Kelimpahan zooplanton di perairan teluk Doreri

Stasiun	Kedalaman (m)	Minggu	Waktu	
			Pagi	Sore
1	5	1	28	12
		2	104	48
		3	32	40
	10	1	32	32
		2	28	32
		3	40	24
	5	1	96	48
		2	40	76
		3	48	76
2	10	1	52	40
		2	96	44
	5	3	96	112

Sumber: Marani et al. (2022)

3. Zooplankton memiliki respon atau reaksi yang cepat pada perubahan lingkungan perairan yang ditunjukkan dari kelimpahan dan keanekaragamannya. Hal ini sebagai petunjuk kelimpahan zooplankton seperti disajikan pada Tabel 6.4 diikuti perubahan keanekaragaman seperti disajikan pada Gambar 6.5. Berdasarkan Gambar 6.5 menunjukkan keanekaragaman zooplankton pada setiap kedalaman dan waktu tergolong sedang. Hal ini sebagai petunjuk air limbah yang bersumber dari aktifitas daratan sekitarnya yang masuk melalui aliran sungai dan run off belum mengganggu stabilitas zooplankton.



Gambar 6.5. Keanekaragaman zooplankton di perairan teluk Doreri (Sumber: Marani et al., 2023)

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwilaga, E. M., Damar, A., & Harris, E. Study of the dynamic of phytoplankton growth and its relation to variability of solar radiation intensity and dissolved inorganic nutrient in Banten Bay.
- Akmal, Y., Humairani, R., Muliari, Hanum, dan Zulfahmi, I. 2021. Komunitas fitoplankton sebagai bioindikator pada media pemeliharaan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang dipapar limbah deterjen dan pestisida. *Akuatikisile: Jurnal Akuakultur, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil*, 5(1), 7-14.
- Alianto, A., Hendri, H. and Suhaemi, S., 2023. Desain dan Cara Nelayan Membuat Rumpon: Studi Kasus Di Pulau Buaya, Distrik Sorong Kepulauan, Kota Sorong, Provinsi Papua Barat Daya. *Marine Kreatif*, 7(2), pp.85-96.
- Alianto, A., Henri, H., & Suhaemi, S. (2018). Kelimpahan dan kelompok fitoplankton di perairan luar Teluk Wondama, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(3), 683-697.
- Alianto, A., Kambanussy, Y., Sembel, L. and Hamuna, B., 2020. Akumulasi biomasa fitoplankton yang diukur sebagai klorofil-a di Perairan Teluk Doreri, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Kelautan Tropis*, 23(2), pp.247-254.
- Alianto, A.E. and Damar, A., 2008. Produktivitas primer fitoplankton dan keterkaitannya dengan unsur hara dan cahaya di perairan Teluk Banten. *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, 15(1), pp.21-26.
- Alianto, E. M., & Adiwilaga, A. D. E. Harris. 2009. Estimasi potensi ikan pelagis kecil berbasis produktivitas primer fitoplankton di perairan laut. In *Prosiding Seminar Nasional Tahunan VI Hasil-Hasil Penelitian Perikanan dan Kelautan*(pp. 1-10).
- Alianto, O. Bab 3 Peranan plankton bagi kehidupan dan lingkungan. *planktonologi*, 23.
- Alianto, Saleh, F. I. E., Hendri, Suhaemi, Gaite, T., Awak, N. V., & Rumbewas, H. S. R. (2016). Sebaran Klorofil-a di Daerah

- Fishing Ground Ikan Pelagis Besar Perairan Kepala Burung Pulau Papua. In *Prosiding Seminar Nasional Tahunan XIII Hasil Penelitian Perikanan dan Kelautan: Universitas Gadjah Mada* (pp. PI-11).
- Alianto. 2023. Menyediakan informasi prakiraan lokasi potensi Alianto. 2024. Peranan plankton bagi kehidupan dan lingkungan. In *Planktonologi*. Darsiani, A.P., Alianto., Lestari, A.B.C.D.,
- Alianto., & Damar, A. 2016. Kelimpahan fitoplankton pada zona dengan karakteristik massa air yang berbeda di perairan Teluk Banten. In *Prosiding Seminar Nasional Tahunan XIII Hasil Penelitian Perikanan dan Kelautan*(pp. MS-02). Azril, I.Y.M.M., Nur, Insivitawati, E., Wulan, W.O.S (eds.). Get Press Indonesia. pp 23-39. Dan penangkapan ikan selama musim barat di perairan teluk cenderawasih. *Nusantara hasana journal*, 3(2), 96-106.
- Hadi, Y.S., Japa, L., dan Zulkifli, L. 2023. Bacillariophyceae diversity as bioindicator of pollution in the coastal waters of Klui beach, North Lombok. *Jurnal Biologi Tropis*, 23 (1): 73 - 79 <https://kumparan.com/pengertian-dan-istilah/arti-kata-bioindikator-dan-contohnya-20vMryhVHcX/full>. (2023). Arti kata bioindikator dan contohnya. Diundu tanggal 26 Agustus 2024.
- Imran, A. 2016. Struktur komunitas plankton sebagai bioindikator pencemaran di perairan pantai jeranjang lombok barat. *Jurnal Ilmiah Mandala Education*, 2(1), 1-8.
- Kaswinarni, F., Aristiyana, F.N., dan Dzakiy, M.A. 2023. Kualitas air berdasarkan bioindikator fitoplankton di Sungai Tayu, Kecamatan Tayu, Kabupaten Pati, Jawa Tengah, Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*, 9(2), 10-15.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup. 2004. Keputusan Menteri Negara Hidup Nomor 31 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut. Kementerian Negara Lingkungan Hidup, Jakarta.
- Marani, A.R., Alianto, A., Sabariah, V., Manaf, M., Tururaja, T.S. and Dody, S., 2022. Zooplankton di Perairan Teluk Doreri,

- Kabupaten Manokwari, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 15(2), pp.189-196.
- Marani, A.R., Sabariah, V., Tururaja, T.S., Manaf, M. and Dody, S., 2023. Zooplankton Sebagai Bioindikator Lingkungan Perairan: Studi Kasus Perairan Teluk Doreri Manokwari, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1), pp.83-90.
- Ornolfsdottir, E.B., S.E. Lumsden, and J.L. Pinckney. 2004. Phytoplankton community growth-rate response to nutrient pulses in a shallow turbid estuary, Galveston Bay, Texas. *J. Plankton Res.* 26: 325-339.
- Permana, A. 2019.
- Putri, S.W. and Musyeri, P., 2023. Jenis dan Kelimpahan Plankton di Pantai Dosa, Kabupaten Manokwari, Provinsi Papua Barat. *Nusantara Hasana Journal*, 2(12), pp.1-12.
- Rumbewas, H. S. Sebaran klorofil-a di daerah fishing ground ikan pelagis besar perairan kepala burung pulau papua.
- Said, M.D.F.A., Kasim, M., dan Salfiah. 2024. Study of phytoplankton as bioindicators of organic matter pollution levels in the estuary of kendari bay waters. *Jurnal Ilmu Kelautan SPERMONDE*, 10(1), 10-17.

BAB 7

MIKROBIOLOGI DAN PERTANIAN BERKELANJUTAN

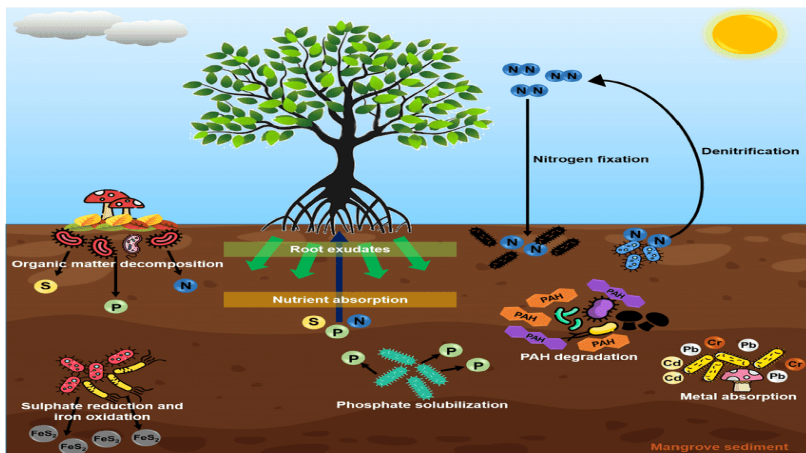
Oleh Rita Kurnia Apindiati

7.1 Pendahuluan

Di tengah upaya kita memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus bertambah, kita diingatkan akan kekuatan luar biasa yang tersembunyi dalam setiap butir tanah-mikroorganisme. Mikroorganisme, meski tak kasat mata, memainkan peran vital dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian kita. Mereka adalah mitra setia petani dalam menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan mampu memberi makan generasi mendatang. Mikrobiologi telah menjadi bidang yang sangat penting dalam pertanian, karena memainkan peran penting dalam kesehatan tanah, pertumbuhan tanaman, dan pengelolaan hama. Dengan memahami peran mikroba, maka praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dapat lebih mudah diterapkan. Mikrobiologi pertanian adalah cabang ilmu yang mempelajari mikroorganisme di tanah dan lingkungan pertanian serta peran mereka dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme tersebut meliputi bakteri, fungi, virus, dan mikroba lainnya yang berperan dalam ekosistem tanah.

Mikroorganisme mengajarkan kita tentang harmoni alam dan pentingnya kerjasama. Seperti halnya komunitas manusia yang kuat dibangun dari hubungan saling menguntungkan antar individu, demikian pula ekosistem tanah yang sehat terbentuk dari interaksi kompleks antara beragam mikroorganisme. Keberadaan mikroorganisme, sebagai pengurai bahan organik, penyedia nutrisi bagi tanaman, dan penjaga struktur tanah dan semua demi kelangsungan kehidupan di Bumi. Pemahaman dan pemanfaatan kearifan alam yang terkandung dalam mikroorganisme tanah, menjadi pembuka jalan menuju pertanian yang lebih berkelanjutan.

Pendekatan ini tidak hanya menjanjikan hasil panen yang melimpah, tetapi juga menghormati bumi yang telah lama menjadi sumber kehidupan kita.



Gambar 7.1. Jenis dan peran mikroorganisme dalam bidang pertanian
(sumber : google.doc)

Mikroorganisme tanah berperan vital dalam mengurai bahan organik menjadi nutrisi yang dapat diserap tanaman seperti ditunjukkan dalam gambar 7.1. Bakteri dan fungi memecah sisa-sisa tanaman dan hewan, melepaskan unsur-unsur penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium kembali ke dalam tanah. Proses ini mengurangi kebutuhan pupuk kimia, menjaga kesuburan tanah secara alami. Beberapa mikroorganisme menghasilkan senyawa yang membantu mengikat partikel tanah, menciptakan struktur yang lebih stabil. Hal ini meningkatkan aerasi tanah, kapasitas menahan air, dan resistensi terhadap erosi, yang sangat penting untuk pertanian berkelanjutan. Banyak mikroorganisme bersifat antagonis terhadap patogen tanaman sehingga dapat menekan pertumbuhan jamur dan bakteri berbahaya, serta menghasilkan senyawa yang meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan hama. Hal ini membantu mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia. Untuk bakteri tertentu, seperti *Rhizobium* yang bersimbiosis dengan tanaman legum, memiliki kemampuan

mengikat nitrogen dari udara dan mengubahnya menjadi bentuk yang dapat digunakan tanaman. Proses ini sangat penting untuk meningkatkan kesuburan tanah secara alami (Sembiring *et al.*, 2013).

Mikroorganisme yang hidup tanah dapat membantu meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air dan meningkatkan efisiensi penggunaannya oleh tanaman, sehingga penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan kelangkaan air. Pada lingkungan tanah yang tercemar, beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan untuk mengurai polutan organik dalam tanah, termasuk residu pestisida. Ini membantu dalam pemulihan lahan yang terkontaminasi dan menjaga kesehatan ekosistem tanah. Beberapa hormon pertumbuhan tanaman yang esensial seperti auksin, giberelin, dan sitokinin dapat dihasilkan dari proses metabolisme bakteri. Hormon-hormon tersebut berperan dalam membantu merangsang pertumbuhan akar, meningkatkan perkecambahan biji, dan mempercepat perkembangan tanaman. Dengan memahami dan memanfaatkan peran-peran ini, petani dapat menerapkan praktik-praktik seperti penggunaan pupuk hayati, kompos, dan teknik pengelolaan tanah yang mendukung kehidupan mikroorganisme. Hal ini tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem tanah dalam jangka panjang.

7.2 Pembentukan Struktur Tanah

Mikroorganisme memiliki peran penting dalam pembentukan dan pemeliharaan struktur tanah. Struktur tanah mengacu pada bagaimana partikel tanah seperti pasir, debu, dan lempung bergabung bersama dalam agregat atau gumpalan. Struktur tanah yang baik meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan air dan udara, memfasilitasi pertumbuhan tanaman, dan mengurangi erosi.



Gambar 7.2. Mikroorganisme dan fauna pada topsoil (sumber : google.doc)

1. Pembentukan agregat tanah

Agregat tanah adalah gumpalan partikel tanah yang menyatu dan mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, dan alga, memainkan peran utama dalam pembentukan dan stabilisasi agregat tanah (Kaviya *et al.*, 2019). Beberapa mekanisme yang mungkin terjadi dalam pembentukan agregat tersebut.

- a. Produksi polisakarida dan senyawa lendir di mana bakteri tanah menghasilkan polisakarida ekstraseluler dan senyawa lendir lainnya yang berfungsi sebagai lem untuk mengikat partikel tanah bersama-sama. Senyawa ini menciptakan agregat yang lebih stabil dan tahan lama, yang meningkatkan struktur tanah (.).
- b. Jamur tanah, seperti jamur mikoriza, memiliki struktur seperti benang yang disebut hifa. Hifa ini dapat meluas di dalam tanah, mengikat partikel tanah bersama-sama dan membentuk agregat mikro. Jamur juga menghasilkan zat seperti glomalin, protein lengket yang membantu mengikat partikel tanah dan meningkatkan stabilitas agregat.
- c. Aktivitas enzimatik mikroorganisme tanah melalui pelepasan enzim yang memecah bahan organik menjadi komponen yang lebih sederhana. Proses dekomposisi ini

tidak hanya menyediakan nutrisi bagi tanaman dan mikroorganisme lain, tetapi juga membantu membentuk agregat dengan mengubah bahan organik menjadi zat pengikat.

2. Siklus nutrisi

Mikroorganisme terlibat dalam siklus nutrisi tanah, termasuk siklus karbon, nitrogen, fosfor, dan sulfur dengan mengubah bahan organik dan anorganik menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman dan organisme lain. Mikroorganisme membantu membangun dan mempertahankan struktur tanah melalui berbagai macam mekanisme (Jacoby et al., 2017).

- a. Dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme, seperti daun, kayu, dan sisa-sisa tanaman lainnya menjadi humus. Humus adalah komponen penting dari tanah karena meningkatkan struktur tanah dengan menambah bahan organik, yang meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan air dan nutrisi.
- b. Selain dekomposisi, mikroorganisme juga berperan dalam pembentukan humus yang stabil, yang lebih lanjut mengikat partikel tanah dan memperkuat agregat. Humus yang kaya akan karbon ini meningkatkan porositas tanah dan kemampuan retensi air.

3. Meningkatkan stabilitas agregat

Stabilitas agregat tanah adalah kemampuan agregat untuk tetap utuh ketika terkena tekanan seperti air hujan atau pembajakan. Mikroorganisme mempengaruhi stabilitas agregat tanah melalui glomalin dan pengikatan fisik oleh hyfa jamur. Glomalin yang dihasilkan oleh jamur mikoriza berperan penting dalam menjaga stabilitas agregat. Glomalin ini berfungsi sebagai perekat yang sangat efektif dalam mengikat partikel tanah bersama-sama, menciptakan agregat yang lebih tahan terhadap erosi dan kerusakan mekanis, sedangkan hifa jamur secara fisik mengikat partikel tanah, memperkuat agregat dan melindungi mereka dari gangguan fisik. Hifa ini membentuk jaringan yang

dapat menahan tekanan mekanis dan mengurangi perpecahan agregat selama pembajakan atau hujan deras (Santi *et al*, 2008).

4. Interaksi dengan mikroorganisme lain dan bagian tanaman

Mikroorganisme juga berinteraksi dengan tanaman dan mikroorganisme lain dalam tanah untuk membentuk struktur tanah, seperti simbiosis dengan akar dan efek aktivitas fauna tanah seperti pada gambar 2. Jamur mikoriza akan membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman. Jamur ini memperluas zona perakaran tanaman dan meningkatkan penyerapan air dan nutrisi. Sebagai imbalannya, tanaman menyediakan karbohidrat untuk jamur. Hubungan ini memperkuat agregat tanah di sekitar akar, yang disebut sebagai zona rhizosfer. Di sisi lain, mikroorganisme dapat berinteraksi dengan fauna tanah seperti cacing tanah dan serangga. Aktivitas penggalian mereka mencampur tanah dan bahan organik, memperbaiki aerasi dan struktur tanah, serta mendorong pembentukan agregat baru, sehingga menambah kesuburan tanah (gambar 7.3).



Gambar 7.3. Simbiosis mikroorganisme dengan cacing tanah meningkatkan agregasi tanah (sumber : google.doc)

5. Pembentukan biofilm dan crust mikroba

Biofilm adalah lapisan mikroorganisme yang tumbuh di permukaan, sedangkan crust mikroba adalah lapisan agregat tanah yang stabil yang dibentuk oleh mikroorganisme pada permukaan tanah. Bakteri dan alga dapat membentuk biofilm di permukaan partikel tanah, yang mengikat partikel bersama-sama dan meningkatkan struktur tanah. Biofilm ini dapat meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan air dan mengurangi erosi. Di lingkungan tertentu, mikroorganisme seperti cyanobacteria dan alga dapat membentuk crust mikroba di permukaan tanah. Crust ini meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi erosi oleh angin dan air.

Mikroorganisme berperan penting dalam pembentukan dan pemeliharaan struktur tanah melalui produksi senyawa pengikat, dekomposisi bahan organik, interaksi dengan tanaman, dan pembentukan biofilm. Aktivitas mikroba ini tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah tetapi juga memperkuat struktur tanah, membuatnya lebih tahan terhadap erosi dan gangguan mekanis. Upaya untuk mempertahankan atau meningkatkan aktivitas mikroba dalam tanah, seperti penambahan bahan organik dan pengelolaan tanah yang bijaksana, dapat menghasilkan struktur tanah yang lebih baik dan tanah yang lebih sehat secara keseluruhan.

7.3 Probiotik Tanaman

Mikroorganisme sebagai probiotik tanaman, sering disebut juga sebagai probiotik tanaman atau biofertilizer, adalah mikroorganisme bermanfaat yang digunakan untuk meningkatkan kesehatan tanaman dan kesuburan tanah. Probiotik tanaman ini terdiri dari berbagai jenis bakteri, jamur, dan mikroorganisme lainnya yang berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme, seperti meningkatkan ketersediaan nutrisi, mengendalikan patogen, dan memperbaiki struktur tanah. Kandungan unsur hara dalam probiotik tidak terlalu banyak ada kecenderungan meningkatkan hasil yang diperoleh pada beberapa parameter yang diamati pada pemberian probiotik untuk tanaman timun suri (Iswita *et al.*, 2019). Probiotik bukan pupuk tetapi

merupakan bahan yang mengandung mikroorganisme efektif dan aktif membantu mendekomposisi bahan yang ada didalam tanah, selain juga dapat digunakan sebagai menghambat pertumbuhan hama dan penyakit tanaman dalam tanah (Suhesy, S., dan Andriani).

1. Bakteri Pelarut Fosfat (*Phosphate Solubilizing Bacteria* - PSB)

Bakteri ini mampu melarutkan fosfat yang tidak larut di dalam tanah sehingga menjadi tersedia bagi tanaman. Fosfat adalah salah satu nutrisi penting yang seringkali terikat dalam bentuk yang tidak dapat digunakan oleh tanaman. Beberapa bakteri yang memiliki kemampuan ini adalah *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizobium*.

2. Bakteri Pengikat Nitrogen (*Nitrogen-Fixing Bacteria*)

Mikroorganisme ini mampu mengikat nitrogen bebas dari atmosfer dan mengubahnya menjadi amonia yang dapat digunakan oleh tanaman. Mereka sering ditemukan dalam simbiosis dengan tanaman legum di akar, membentuk bintil akar, seperti bakteri *Rhizobium* (simbiosis dengan tanaman legum), *Azotobacter*, *Azospirillum* (bebas hidup di tanah) (Larasati *et al.* 2018).

3. Bakteri Pemacu Pertumbuhan Tanaman (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* - PGPR)

Bakteri PGPR ini meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan berbagai cara, termasuk produksi fitohormon (seperti auksin dan sitokinin), pengurangan etilen dalam tanaman, dan meningkatkan ketersediaan nutrisi. Di antaranya adalah dari spesies *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida*, *Bacillus amyloliquefaciens* (Utami *et al.*, 2018).

4. Mikoriza (*Mycorrhizal Fungi*)

Mikoriza adalah jamur yang membentuk hubungan simbiosis dengan akar tanaman. Mereka membantu tanaman menyerap air dan nutrisi, terutama fosfor, lebih efisien dari tanah. Mikoriza juga meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit tanah dan stres lingkungan. Mikoriza arbuskular seperti *Glomus intraradices*, mikoriza ektomikoriza seperti *Pisolithus tinctorius* (Hamdayanti *et al.*, 2022)

5. Bakteri Antagonis dan Jamur Antagonis

Mikroorganisme ini mengendalikan patogen tanaman melalui kompetisi, produksi senyawa antimikroba, dan mekanisme lainnya. Mereka berfungsi sebagai agen biokontrol alami terhadap penyakit tanaman. *Trichoderma spp.* (jamur antagonis yang mengendalikan patogen jamur), *Bacillus thuringiensis* (bakteri yang mengendalikan serangga hama).

Mekanisme kerja dari mikroorganisme probiotik tanaman dapat diuraikan sebagai berikut (Diaz *et al.*, 2019) :

1. Meningkatkan ketersediaan nutrisi seperti pada mikroorganisme PSB dan bakteri pengikat nitrogen, akan membantu mengubah nutrisi yang tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Misalnya, PSB melarutkan fosfat mineral di tanah, sementara bakteri pengikat nitrogen memfiksasi nitrogen atmosfer menjadi amonia.
2. Produksi fitohormon seperti auksin, giberelin, dan sitokinin dari beberapa mikroorganisme, yang merangsang pertumbuhan akar dan pucuk tanaman, meningkatkan penyerapan air dan nutrisi.
3. Menghasilkan efek antagonis di mana mikroorganisme dapat menghasilkan senyawa antimikroba, enzim, atau berkompetisi dengan patogen tanaman untuk ruang dan nutrisi, sehingga mencegah infeksi dan penyebaran penyakit.
4. Perbaikan struktur tanah oleh mikoriza dan bakteri probiotik lainnya melalui mekanisme perbaikan struktur tanah dengan menghasilkan polisakarida yang meningkatkan agregasi tanah, memperbaiki retensi air, dan memperkuat jaringan tanah di sekitar akar tanaman.
5. Mikroorganisme probiotik juga dapat membantu tanaman mengatasi stres abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem dengan memodifikasi respons tanaman terhadap stres dan memperbaiki kondisi fisik tanah.

Beberapa keuntungan dalam memanfaatkan mikroorganisme sebagai probiotik bagi tanaman antara lain adalah :

1. Ramah lingkungan, karena dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan pestisida yang dapat memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.
2. Meningkatkan produktivitas tanaman dengan memperbaiki kesehatan dan pertumbuhan tanaman, yang berujung pada peningkatan hasil panen dan kualitas tanaman.
3. Menghasilkan ketahanan terhadap penyakit dan stres atau kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan.
4. Memperbaiki kesuburan tanah melalui peningkatan aktivitas mikrobioma tanah dan ketersediaan nutrisi.
5. Menyediakan alternatif yang berkelanjutan dan lebih alami dalam praktik pertanian, mendukung ekosistem yang lebih seimbang.

Meskipun pemanfaatan mikroorganisme sebagai agen probiotik tanaman memberikan banyak keuntungan, tetap ada beberapa hal yang harus diperhitungkan antara lain adalah :

1. Kesesuaian dengan kondisi tanah dan tanaman, karena tidak semua mikroorganisme probiotik cocok untuk semua jenis tanaman atau kondisi tanah. Efektivitasnya dapat sangat bervariasi tergantung pada spesies tanaman, jenis tanah, iklim, dan kondisi lingkungan lainnya.
2. Interaksi antara probiotik dari berbagai jenis mikroorganisme ini masih memerlukan kajian tentang kesesuaian dengan tanaman yang akan dilindungi serta kondisi-kondisi yang memungkinkan aktivitas probiotiknya lebih optimal.
3. Mikroorganisme ini memerlukan kondisi penyimpanan dan aplikasi yang tepat untuk tetap hidup dan efektif, sehingga perlu melakukan teknik penyimpanan dan pengaplikasian yang tidak menurunkan potensi atau aktivitasnya.
4. Mikroorganisme probiotik yang diaplikasikan ke dalam tanah pada lahan pertanian boleh saja harus bersaing dengan mikroorganisme alami yang sudah ada, sehingga

akan mempengaruhi keberhasilan kolonisasi dan efektivitasnya sebagai peningkat kesuburan.

Beberapa probiotik dapat diaplikasikan kepada tanaman melalui beberapa teknik :

1. Inokulasi bakteri atau mikoriza dilakukan pada benih tanaman sebelum penanaman untuk memastikan koloni mikroorganisme yang bermanfaat dapat segera berkembang di zona akar.
2. Mikroorganisme probiotik juga dapat diinokulasikan atau diterapkan langsung ke dalam tanah sekitar perakaran, sebagai amandemen tanah atau melalui sistem irigasi untuk meningkatkan kesehatan tanah dan pertumbuhan tanaman.
3. Beberapa mikroorganisme dapat diaplikasikan sebagai semprotan daun untuk memberikan manfaat langsung pada tanaman, termasuk perlindungan terhadap patogen daun.

Mikroorganisme sebagai probiotik tanaman menawarkan banyak manfaat bagi pertanian modern yang berkelanjutan, termasuk peningkatan kesuburan tanah, produktivitas tanaman, dan ketahanan terhadap penyakit dan stres. Penggunaan mikroorganisme ini dapat membantu mengurangi ketergantungan pada input kimia, mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, serta mempromosikan kesehatan ekosistem secara keseluruhan.

7.4 Biopestisida

Mikroorganisme sebagai biopestisida adalah agen hayati yang menggunakan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, virus, dan protozoa untuk mengendalikan hama dan penyakit tanaman. Mikroorganisme ini dianggap sebagai biopestisida karena mereka dapat menyerang, menginfeksi, atau menghambat pertumbuhan organisme yang merugikan tanaman, seperti serangga, nematoda, dan patogen tanaman lainnya (Sumartini, 2016). Biopestisida mikrobial ini merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pestisida kimia, karena mereka lebih spesifik

terhadap target, lebih aman bagi manusia, hewan peliharaan, dan organisme non-target lainnya (Wallace, 2023).

1. Bakteri

Bakteri biopestisida adalah bakteri yang dapat menginfeksi atau menghasilkan senyawa yang membunuh atau menghambat hama. Pada umumnya, bakteri sebagai biopestisida bekerja dengan cara menginfeksi langsung hama atau dengan menghasilkan toksin yang mempengaruhi sistem pencernaan atau saraf serangga. *Bacillus thuringiensis* (Bt) adalah salah satu biopestisida mikroba yang paling umum digunakan. *B. thuringiensis* menghasilkan kristal protein (endotoksin) yang beracun bagi larva serangga seperti kupu-kupu, ngengat, dan beberapa kumbang. Setelah dimakan oleh larva, toksin ini menyebabkan kerusakan pada usus serangga, yang mengakibatkan kematian. Selain itu, spesies *Bacillus subtilis* juga dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur dan bakteri. Bakteri ini menghasilkan senyawa antibiotik dan enzim yang dapat menghambat pertumbuhan patogen (Tomar *et al.*, 2024).

2. Jamur

Jamur biopestisida adalah jamur yang dapat menginfeksi dan membunuh hama atau patogen tanaman. Mereka sering kali bekerja dengan cara menembus kutikula hama dan tumbuh di dalam tubuh inang, menghasilkan racun atau menyebabkan kekurangan nutrisi (Sinha *et al.*, 2016). *Beauveria bassiana* adalah salah satu jamur entomopatogen yang menginfeksi berbagai jenis serangga, termasuk kutu daun, belalang, dan hama tanaman lainnya (Bayu *et al.*, 2021). Jamur ini menembus kutikula serangga dan menghasilkan enzim serta senyawa toksik yang menyebabkan kematian inang. *Trichoderma* spp. Juga digunakan untuk mengendalikan penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur patogen tanah seperti *Fusarium* dan *Rhizoctonia*. *Trichoderma* berfungsi sebagai agen antagonis, bersaing dengan patogen untuk ruang dan nutrisi, serta menghasilkan enzim yang dapat menghancurkan sel patogen. *Metarhizium* Sp adalah salah satu biopestisida ramah lingkungan dan efektif untuk

mengendalikan hama *Oryctes rhinoceros* (Nurkomar & Aisyah, 2020).

3. Virus

Virus biopestisida adalah virus yang menginfeksi dan membunuh serangga hama. Mereka bekerja dengan memasuki sel inang dan mereplikasi diri, menyebabkan infeksi yang merusak jaringan dan organ serangga. Baculovirus adalah kelompok virus DNA yang secara khusus menginfeksi serangga, terutama serangga dari ordo Lepidoptera (kupu-kupu dan ngengat). Virus Granulosis (GV) dan Virus Polyhedrosis Nuklear (NPV) adalah dua tipe utama baculovirus yang digunakan dalam pengendalian hama. NPV sangat spesifik terhadap serangga inangnya, terutama *Spodoptera* spp. (ulat grayak) dan *Helicoverpa* spp. (ulat buah kapas). Virus ini masuk ke dalam sel inang, mereplikasi diri, dan menyebabkan inang mati karena infeksi. Selain baculovirus, ada virus lain yang dapat digunakan sebagai biopestisida, antara lain adalah Densovirus dan Iridovirus, yang juga menginfeksi serangga dan memiliki potensi untuk pengendalian hama tertentu. Sama halnya dengan NPV dan GV, virus lainnya juga dapat menyerang sel serangga dan menyebabkan kematian melalui replikasi virus (Gelaye & Negash, 2023).

4. Protozoa

Protozoa adalah organisme uniseluler yang dapat menjadi patogen bagi serangga dan hama lainnya. Mereka menginfeksi inang dengan memasuki saluran pencernaan atau sistem tubuh lainnya dan menyebabkan infeksi yang bisa mengurangi daya reproduksi atau menyebabkan kematian. *Nosema* spp. Adalah salah satu jenis protozoa yang menginfeksi serangga seperti ngengat dan belalang, menyebabkan penurunan kesehatan dan daya reproduksi, sehingga mengurangi populasi hama.

Mikroorganisme sebagai biopestisida dapat bekerja melalui beberapa mekanisme antara lain (Bamisile *et al.*, 2018) :

- a. Infeksi langsung dari mikroorganisme seperti virus dan jamur, menginfeksi hama dengan menembus kutikula atau memasuki tubuh melalui mulut atau saluran pernapasan. Setelah infeksi, mikroorganisme ini mereplikasi diri atau tumbuh di dalam tubuh inang,

mengeluarkan racun atau menyebabkan kekurangan nutrisi yang akhirnya membunuh hama.

- b. Beberapa bakteri dan jamur menghasilkan toksin yang bersifat mematikan atau menghambat pertumbuhan hama. Toksin ini bisa merusak sistem pencernaan, saraf, atau sistem lainnya, mengakibatkan kematian atau lemahnya hama.
- c. Mikroorganisme seperti *Trichoderma* spp. bersaing dengan patogen tanaman untuk mendapatkan nutrisi dan ruang di zona perakaran, mengurangi kemampuan patogen untuk tumbuh dan berkembang.
- d. Beberapa mikroorganisme dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen melalui pengaktifan mekanisme pertahanan tanaman. Misalnya, bakteri *Pseudomonas fluorescens* dapat memicu respons sistemik pada tanaman yang membuatnya lebih tahan terhadap infeksi patogen.

Beberapa keuntungan dari penggunaan mikroba sebagai biopestisida antara lain adalah (Sumartini, 2016) :

- a. Ramah lingkungan karena biopestisida berbasis mikroba tidak meninggalkan residu kimia yang berbahaya di lingkungan dan tidak mencemari air atau tanah, sehingga aman untuk organisme non-target, termasuk serangga yang bermanfaat, burung, ikan, dan manusia.
- b. Mikroba terutama virus memiliki spesivitas tinggi apalagi sebelumnya telah dirancang untuk menargetkan hanya spesies serangga hama tertentu, sehingga mengurangi risiko membahayakan organisme yang tidak diinginkan.
- c. Karena cara kerja mikroba bersifat unik dan kompleks, sehingga hama serangga jarang menimbulkan resistensi terhadap virus biopestisida dibandingkan dengan pestisida kimia tradisional.
- d. Mikroorganisme sebagai biopestisida dapat tetap aktif dalam lingkungan untuk jangka waktu yang lama, menyediakan kontrol hama jangka panjang dengan aplikasi yang lebih sedikit.

- e. Mikroorganisme ini mudah terurai di lingkungan, sehingga tidak menimbulkan polusi jangka panjang.

Yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan mikroorganisme sebagai pestisida antara lain adalah :

- a. Efek yang lebih lambat karena memerlukan waktu kerja yang lebih panjang dibandingkan dengan pestisida kimia, karena mikroorganisme membutuhkan waktu lebih lama untuk membunuh serangga hama, yaitu harus melalui proses infeksi dan replikasi sebelum menyebabkan kematian.
- b. Efektivitas biopestisida mikroba dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan sinar UV. Mikroorganisme ini mungkin tidak stabil di bawah kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan sehingga sangat mudah terdegradasi oleh sinar UV dari matahari, hujan, dan suhu ekstrem, yang dapat mengurangi efektivitasnya di lapangan.
- c. Produksi virus biopestisida dapat lebih mahal dan memerlukan fasilitas penyimpanan khusus. Aplikasi juga perlu dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan penyebaran yang efektif di area yang terinfeksi.
- d. Penggunaan biopestisida mikroba memerlukan pemahaman yang lebih baik oleh petani atau pengguna tentang cara aplikasi yang tepat, waktu aplikasi, dan kondisi lingkungan yang optimal untuk hasil yang maksimal.

Beberapa teknik untuk mengaplikasikan mikroorganisme sebagai biopestisida antara lain adalah :

- a. Mikroorganisme seperti *Trichoderma spp.* dan *Bacillus subtilis* sering diterapkan langsung pada tanah di sekitar perakaran tanaman, untuk mengendalikan penyakit akar dan meningkatkan kesehatan tanaman. , virus biopestisida menempel pada daun dan bagian tanaman lainnya. Serangga hama yang mengunyah atau bersentuhan dengan permukaan yang terkontaminasi

akan terinfeksi virus. Virus memasuki sel-sel serangga dan mereplikasi dirinya, menyebabkan infeksi yang akhirnya membunuh serangga.

- b. Setelah serangga yang terinfeksi mati, tubuh mereka dapat melepaskan partikel virus ke lingkungan. Serangga lain yang bersentuhan dengan tubuh ini atau memakan jaringan yang terinfeksi dapat tertular, menyebabkan penyebaran virus yang lebih luas di populasi hama.
- c. Produk seperti *Bacillus thuringiensis* (Bt) umumnya diaplikasikan sebagai semprotan daun untuk mengendalikan larva serangga pada tanaman, dan
- d. Beberapa biopestisida mikroba digunakan dengan teknik inokulasi langsung pada benih dengan tujuan untuk melapisi benih sebelum tanam untuk melindungi bibit dari penyakit dan meningkatkan kesehatan tanaman sejak dini.

Penggunaan mikroorganisme sebagai biopestisida adalah strategi pengendalian hama yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Meskipun menghadapi beberapa tantangan, kemajuan dalam teknologi biologi molekuler dan mikrobiologi telah meningkatkan potensi dan efisiensi virus dan mikroorganisme lainnya sebagai alat pengendalian hama dalam pertanian modern. Dengan pendekatan yang tepat, mikroorganisme biopestisida dapat menjadi bagian penting dari strategi pengendalian hama terpadu (*Integrated Pest Management/IPM*) untuk menjaga keseimbangan ekosistem pertanian dan mendukung produksi pangan yang berkelanjutan.

7.5 Bioremediasi

Mikroorganisme sebagai agen bioremediasi tanah adalah konsep yang mengacu pada penggunaan mikroorganisme untuk menghilangkan atau menguraikan polutan di dalam tanah, sehingga mengembalikan kualitas tanah tersebut ke kondisi yang lebih sehat dan aman untuk lingkungan dan makhluk hidup. Bioremediasi adalah proses pemulihan lingkungan yang menggunakan organisme hidup, terutama mikroorganisme

seperti bakteri, jamur, dan alga, untuk menguraikan atau menghilangkan polutan dari tanah, air, dan lingkungan lainnya. Bioremediasi tanah secara khusus berfokus pada penghilangan kontaminan dari tanah yang terkontaminasi. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam bioremediasi tanah karena kemampuan mereka untuk memetabolisme dan menguraikan berbagai polutan organik dan anorganik (Puspitasari & Khaeruddin, 2016). Beberapa mekanisme utama yang digunakan mikroorganisme dalam bioremediasi tanah meliputi :

1. Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, mampu menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui proses metabolisme mereka (biodegradasi). Contohnya, beberapa bakteri dapat memecah hidrokarbon seperti minyak bumi, pestisida, dan bahan kimia beracun lainnya menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Mikroorganisme juga dapat mengubah bentuk kimia polutan menjadi bentuk yang kurang beracun (transformasi biokimia), misalnya, beberapa bakteri dapat mereduksi ion logam berat yang lebih beracun menjadi bentuk yang kurang beracun melalui proses biotransformasi.
2. Proses bioaugmentasi yaitu penambahan mikroorganisme tertentu yang diketahui efektif dalam menguraikan polutan tertentu ke dalam tanah yang terkontaminasi. Mikroorganisme ini dapat berasal dari lingkungan yang tidak terkontaminasi atau dikultur secara khusus di laboratorium untuk meningkatkan degradasi polutan.
3. Biostimulasi, melibatkan penambahan nutrisi atau pengubah lingkungan lain yang merangsang pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme asli di tanah. Ini meningkatkan kemampuan mikroorganisme untuk mendegradasi polutan secara efektif.

Berbagai jenis mikroorganisme digunakan dalam bioremediasi tanah, tergantung pada jenis polutan dan kondisi lingkungan (Purnomo & Dhiningrum, 2023). Beberapa contoh mikroorganisme yang umum digunakan meliputi:

Golongan Bakteri :

1. *Pseudomonas*, dikenal karena kemampuannya mendegradasi berbagai senyawa organik, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) dan pestisida.
2. *Bacillus*, sering digunakan dalam bioremediasi karena mampu mendegradasi minyak bumi dan senyawa organik lainnya.
3. *Mycobacterium*, untuk spesies tertentu dapat memecah hidrokarbon dan senyawa organik kompleks lainnya.

Golongan Jamur :

1. *Trichoderma*, ini dapat mendegradasi berbagai senyawa organik dan dikenal untuk kemampuannya dalam memecah lignin, komponen utama dari bahan tanaman yang sulit terurai.
2. *Phanerochaete chrysosporium*, adalah jamur pelapuk putih yang sangat efektif dalam mendegradasi lignin dan polutan organik beracun lainnya, termasuk PCB (*Polychlorinated Biphenyls*) dan PAH.

Golongan Alga dan *Cyanobacteria*

Alga dan *Cyanobacteria* merupakan tumbuhan mikroskopis yang dapat berperan dalam bioremediasi dengan menyerap logam berat dan polutan anorganik lainnya dari tanah dan air. *Cyanobacteria* berfotosintesis dan membantu dalam bioremediasi dengan memetabolisme senyawa organik.

Beberapa faktor penting yang mempengaruhi keberhasilan bioremediasi tanah menggunakan mikroorganisme meliputi:

1. Jenis Polutan

Tidak semua mikroorganisme dapat menguraikan setiap jenis polutan. Polutan organik seperti hidrokarbon dan pestisida lebih mudah didegradasi oleh mikroorganisme dibandingkan dengan polutan anorganik seperti logam berat.

2. Kondisi Lingkungan

Temperatur, pH, kelembaban, dan ketersediaan oksigen sangat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam

bioremediasi. Mikroorganisme tertentu lebih aktif pada kondisi aerobik (dengan oksigen) atau anaerobik (tanpa oksigen).

3. Ketersediaan Nutrisi:

Mikroorganisme membutuhkan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan karbon untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mereka. Penambahan nutrisi tambahan dapat meningkatkan efisiensi bioremediasi.

4. Populasi Mikroorganisme

Ketersediaan mikroorganisme asli yang dapat mendegradasi polutan tertentu adalah faktor penting. Dalam beberapa kasus, bioaugmentasi diperlukan untuk meningkatkan populasi mikroorganisme yang efektif. Aplikasi bioremediasi tanah dapat ditunjukkan pada beberapa masalah tanah yang sering dijumpai, antara lain :

- a. Pembersihan tumpahan minyak. Bioremediasi telah digunakan secara luas untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Mikroorganisme seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* digunakan untuk menguraikan hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih aman.
- b. Pengolahan Limbah Industri. Industri yang menghasilkan limbah beracun seperti logam berat dan senyawa organik beracun sering menggunakan bioremediasi untuk mengolah tanah yang terkontaminasi sebelum dibuang atau digunakan kembali.
- c. Restorasi Lahan Tercemar. Bioremediasi juga digunakan untuk mengembalikan lahan yang terkontaminasi akibat aktivitas pertambangan atau kegiatan industri lainnya ke kondisi yang lebih alami dan aman untuk penggunaan manusia dan lingkungan.

Mikroorganisme sebagai agen bioremediasi tanah memainkan peran penting dalam pemulihan lingkungan yang terkontaminasi. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk menguraikan atau mengubah polutan,

bioremediasi menawarkan solusi yang ramah lingkungan dan efektif untuk mengatasi masalah polusi tanah. Namun, keberhasilan bioremediasi sangat bergantung pada pemahaman tentang jenis polutan, kondisi lingkungan, dan mikroorganisme yang digunakan (Fadhilah & Shovitri, 2014).

7.6 Penutup

Dalam upaya mencapai pertanian berkelanjutan, mikroorganisme telah muncul sebagai sekutu yang tak terduga namun sangat berharga, memberikan dampak yang luar biasa, mengungkapkan kekuatan tersembunyi dari alam. Setiap tetes air dan setiap butir tanah mengandung potensi besar untuk mendukung kehidupan dan keberlanjutan, berkat keberadaan entitas mikroskopis ini. Tantangan sektor pertanian untuk menyeimbangkan kebutuhan pangan global dengan pelestarian lingkungan semakin kompleks. Namun, dengan memanfaatkan pengetahuan tentang dunia mikrobiologi, kita dapat membuka jalan menuju solusi yang harmonis. Pertanian berkelanjutan tidak lagi hanya menjadi angan-angan, tetapi sebuah realitas yang dapat kita capai bersama. Melalui pemahaman dan penerapan prinsip-prinsip mikrobiologi dalam praktik pertanian, kita tidak hanya dapat menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas, tetapi juga menghormati dan melestarikan ekosistem yang telah lama menjadi penopang kehidupan. Kolaborasi antara manusia dan mikroorganisme ini membuktikan bahwa solusi untuk tantangan global dapat ditemukan dalam keselarasan dengan alam.

Sangat penting untuk disadari bahwa dalam setiap langkah menuju pertanian berkelanjutan, kita tidak melangkah sendirian. Jutaan mikroorganisme bekerja tanpa henti, mendukung upaya kita untuk menciptakan sistem pangan yang lebih baik. Dengan mengintegrasikan kearifan alam dan inovasi manusia, kita dapat membangun masa depan di mana keberlimpahan pangan berjalan seiring dengan kelestarian planet. Ini adalah warisan yang harus kita tinggalkan untuk generasi mendatang, sebuah dunia di mana pertanian tidak

hanya memberikan pangan, tetapi juga menyembuhkan dan melestarikan Bumi kita yang berharga.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrahari, R.K., Singh, P., Koyama, H., & Panda, S.K. 2023. Plant-microbe Interactions for Sustainable Agriculture in the Postgenomic Era,**Current Genomics*, 21, 168-178
- Bamisile, B.S., Dash, C.K., Akutse, K.S., Keppanan, R., Afolabi, O.G., Hussain, M.,....., Wang, L. (2018). Prospects of endophytic fungal entomopathogens as biocontrol and plant growth promoting agents: An insight on how artificial inoculation methods affect endophytic colonization of host plants. *Microbiological Research*, 217, 34-50.
- Bayu, M.S.Y.I., Prayogo, Y., & Indiaty, S.W. (2021). *Beauveria bassiana*: Biopestisida Ramah Lingkungan dan Efektif untuk Mengendalikan Hama dan Penyakit Tanaman. *Buletin Palawija*, 19 (1).
- Diaz, J.P., Ojeda, F.J.R., & Campos, M.G., & Gil, A., (2019). Mechanisms of Action of Probiotics. *Adv Nutr* 10, S49–S66.
- Fadhilah & Shovitri. (2014). Potensi Isolat Bakteri Bacillus dalam Mendegradasi Plastik dengan Metode Kolom Winogradsky. *Jurnal Teknik Lingkungan*.
- Gelaye, Y., & Negash, B. (2023). The role of baculoviruses in controlling insectpests: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 9.
- Hamdayanty., Asman., Sari, K.W., & Attahira, S.S. 2022. Pengaruh Pemberian Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Pgpr) Asal Akar Tanaman Bambu Terhadap Pertumbuhan Kecambah Padi. *Ecosolum*, 11 (1)
- Iswita., Susylowati., & Eliyani. (2019). Pengaruh Waktu Pemberian Dan Konsentrasi Probiotik Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Timun Suri (Cucumis melo L.var reticulatus Naudin), *Agrifor*, 18 (1).
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., and Kopriva, S. (2017) The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Front. Plant Sci.* 8:1617. doi: 10.3389/fpls.2017.01617

- Kaviya, N., Upadhayay, V.K., Singh, J., Khan, A., Panwar, M., & Singh, A.V. (2019). Role of Microorganisms in Soil Genesis and Functions, *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*.
- Larasati, E.D., Rukmi, M.G.I., Kusdiyantini, E., & Ginting, R.C.B. 2018. Isolasi dan Identifikasi Bakteri Pelarut Fosfat dari Tanah Gambut. *Bioma*, 20 (1).
- Nurkomar, I., & Aisyah, S.N. (2020). Pembuatan Pestisida Berbahan Dasar Jamur *Metarhizium* Sp. untuk Mengendalikan Hama Uret *Oryctes rhinoceros* Bersama Kelompok Tani Mandiri, Warungpring, Pemalang. PROSIDING SEMNAS PPM 2020: Inovasi Teknologi dan Pengembangan Teknologi Informasi dalam Pemberdayaan Masyarakat Pasca Covid-19.
- Purnomo, Y.S., & Dhiningrum, G.K. (2023). Bioremediasi Lahan Tercemar Pestisida dengan Cara Pengomposan di Perkebunan Apel Batu. *INSOLOGI Jurnal Sains dan Teknologi*, 2 (3).
- Puspitasari, D.J., & Khaeruddin. (2016). Kajian Bioremediasi Pada Tanah Tercemar Pestisida, *Kovalen*, 2 (3), 98-106.
- Santi, L.P., Dariah, A., & Goenadi, D.H. (2008). Peningkatan kemantapan agregat tanah mineral oleh bakteri penghasil eksopolisakarida. *Menara Perkebunan*, 76 (2).
- Sembiring, Y.R.V., Nugroho, P.A., & Istianto. (2013). Kajian Penggunaan Mikroorganisme Tanah Untuk Meningkatkan Efisiensi Pemupukan Pada Tanaman Karet. *Warta Perkaratan*, 32 (1), 7-15.
- Sinha, K. K., Choudhary, A. K., & Kumari, P., (2016). Entomopathogenic Fungi. In *Ecofriendly Pest Management for Food Security* (475-505). Academic Press
- Suhesy, S., dan Andriani. (2014). Pengaruh Probiotik dan Trichoderma terhadap Hara pupuk kandang ayam berasal dari fases sapi dan kambing, *Jurnal Ilmiah Ilmu Peternakan*.XVII:46- 47.
- Sumartini. (2016). Biopestisida untuk Pengendalian Hama dan Penyakit Tanaman Aneka Kacang dan Umbi. *Iptek Tanaman Pangan*, 11 (2).
- Tomar, p., Thakur, N., Jhamta, S., Chowdhury, S., Kapoor, M., ..., Yadav, A.N. (2024). Bacterial biopesticides: Biodiversity, role

in pest management and beneficial impact on agricultural and environmental sustainability. *Heliyon*, 10 (11)

Utami, A.P., Agustiyani, D., & Handayanto, E. (2018). Pengaruh Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), Kapur, Dan Kompos Pada Tanaman Kedelai Di Ultisol Cibinong, Bogor. *Jurnal Tanah dan Sumber Daya Lahan*, 5 (1).

Wallace, A.K. (2023). Treating the untreatable: precision microbes for crop protection. *Trend Biotechnol*, 41.

BIODATA PENULIS



Darwel, SKM, M.Epid

Dosen Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes Padang

Penulis lahir di Manganti Lima Puluh Kota Sumatera Barat. Penulis adalah dosen tetap sekaligus sebagai Kepala Pusat Penelitian dan Pengabmas Poltekkes Kemenkes Padang. Menyelesaikan pendidikan S2 Epidemiologi FKM UI tahun 2012 dan menekuni bidang Epidemiologi dan Kesehatan Lingkungan.

Pengalaman mengajar mata kuliah bidang epidemiologi, metodologi penelitian, statistik kesehatan, sanitasi rumah sakit, mikrobiologi lingkungan, manajemen data, penyakit berbasis lingkungan, dan lain-lain. Pengalaman menulis buku ajar Kesehatan Lingkungan Teori Dan Aplikasi, Manajemen Data Statistik Untuk Penelitian Kesehatan, Epidemiologi Lingkungan, Pengantar Statistik Kesehatan, Surveilans KLB, Kesehatan Global dan Sanitasi RS.

Penulis merupakan Bendahara Organisasi Profesi HAKLI Sumbar, juga sebagai Wakil Ketua OP PAEI Sumbar. Penghargaan yang pernah diperoleh penulis adalah sebagai Dosen Berprestasi Poltekkes Kemenkes Tingkat Nasional tahun 2020 dan prestasi publikasi Jurnal Internasional Terindek Scopus tahun 2021.

BIODATA PENULIS



Drs. Bambang Suhartawan, M.MT

Dosen Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP
Universitas Sains dan Teknologi Jayapura

Penulis lahir di Blitar Tahun 1964. Penulis adalah dosen tetap dengan status PNS-DPK pada Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Universitas Sains dan Teknologi Jayapura. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Kimia Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Cenderawasih Jayapura pada tahun 1989. Pendidikan Pasca Sarjana diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Manajemen Teknik Lingkungan pada tahun 2002. Beberapa buku yang telah ditulis terkait bidang lingkungan antara lain : Pengelolaan Sumber Daya Air; Penyehatan Udara; Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Indonesia; Ekotoksikologi, Pengelolaan Limbah Industri; Sistem Lingkungan Industri; Analisis Kualitas Lingkungan; Kesehatan Lingkungan Bancana; Manajemen Penyakit Tropis Berbasis Lingkungan; Pengelolaan Limbah Padat, Limbah Industri dan B3; Lingkungan : Pemahaman Masalah dan Solusi; Kesehatan Lingkungan : Memahami Dampak Lingkungan Terhadap Kesehatan; Kimia Ramah Lingkungan; Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim; Entomologi dalam Kesehatan Lingkungan; Pengelolaan Limbah Cair; Kimia Lingkungan; Kesehatan Lingkungan Global; Pengenalan Pembangunan Berkelanjutan dan Memahami Konsep dan Teori Ekologi Lingkungan;

BIODATA PENULIS



Prof.Dr.Wayan Budiarsa Suyasa

Penulis memiliki nama lengkap Prof.Dr.Wayan Budiarsa Suyasa, dilahirkan di Denpasar, Bali pada tanggal 03 Maret 1967. Riwayat pendidikan sarjana ditempuh selama 4 tahun di prodi Kimia Universitas Udayana, gelar Magister diraih tahun 1999 dan Doktor dibidang kimia lingkungan diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2002. Penulis memperoleh jabatan guru besar pada tahun 2010 dibidang kimia lingkungan di Universitas udayana yang menjadi tempatnya sebagai dosen. Berbagai mata kuliah dibidang kimia lingkungan diampu di prodi sarjana kimia, magister kimia, magister dan doktor ilmu lingkungan hingga sekarang . Penulis juga telah menulis beberapa buku dari hasil penelitian dan pengembangan pembelajaran. beberapa dengan topik terkait kimia lingkungan yaitu pengolahan air limbah, sampah, pengelolaan lingkungan, amdal baik secara mandiri maupun berkolaborasi.

BIODATA PENULIS



Niken Prawesti Listyaningrum, S.Pi, MP

Dosen Program Studi Teknik Pengolahan Produk Perikanan
Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo

Penulis lahir di Surakarta pada tahun 1981. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2005 dan melanjutkan pendidikan S2 di Universitas Brawijaya Malang. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengolahan Produk Perikanan di Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo sejak tahun 2006. Selain aktif mengajar, penulis juga menekuni bidang menulis karya ilmiah baik secara mandiri maupun kolaborasi dengan penulis atau peneliti lainnya, baik dalam bentuk jurnal, prosiding, makalah maupun buku.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Sariwahyuni, SP., M.Si

Dosen Program Studi Teknik Kimia Mineral
Politeknik ATI Makassar, Kementerian Peindustrian RI

Penulis lahir di Watampone tanggal 18 Juni 1975. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia Mineral Politeknik ATI Makassar. Menyelesaikan Pendidikan Strata 1 di Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin pada tahun 1997, Magister Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin pada tahun 2000 dan Doktoral bidang Sistem Pertanian di Universitas Hasanuddin tahun 2012.

BIODATA PENULIS



Dr. Alianto, S.Pi., M.Si.

Dosen Program Studi S2 Sumberdaya Akuatik
Pascasarjana Universitas Papua

Penulis lahir di Wanci pada tanggal 5 Maret 1970. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Sumberdaya Akuatik, Pascasarjana, Universitas Papua. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Pattimura dan S2 dan S3 pada Program Studi Ilmu Perairan, Institut Pertanian Bogor. Penulis mengajar mata kuliah Planktonologi, Pengendalian Pencemaran dan Eutrofikasi Perairan, Kuliatas Air, Produktivitas Perairan pada Program Studi S1 Manajemen Sumberdaya Perairan dan mata kuliah Produktivitas dan Eutrofikasi Perairan serta Konservasi Sumberdaya Perairan pada Program Studi S2 Sumberdaya Akuatik, Pascasarjana, Universitas Papua. Penulis aktif pula sebagai penulis buku yang diterbitkan oleh penerbit nasional dan artikel yang dipublikasikan pada jurnal nasional, nasional terakreditasi kemdikbud, internasional dan internasional bereputasi. Karya tulis penulis tersedia secara berturut-turut di website pada link berikut:

https://scholar.google.co.id/citations?user=k9_r9PMAAAAJ&hl=en
<https://www.researchgate.net/profile/Dr-Alianto-2>
<https://sinta.kemdikbud.go.id/authors/profile/6646035>