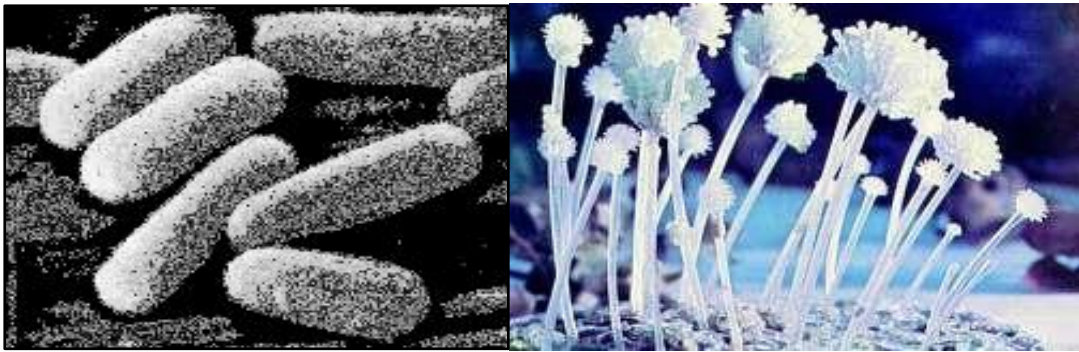


DIKTAT KULIAH

MIKROBIOLOGI DASAR



Disusun oleh:
PERMATA IKA
HIDAYATI

PEBRUARI
2016

DAFTAR ISI

	halaman
I. Pendahuluan	1
II. Sejarah Mikrobiologi	5
III. Sel Mikroba dan Strukturnya	12
IV. Bakteri dan Virus	22
V. Fungi	31
VI. Algae dan Protozoa	40
VII. Enzim Mikroba	53
VIII. Bioenergetik Mikroba	61
IX. Pertumbuhan Mikroba	70
X. Faktor Lingkungan Mikroba	76
XI. Nutrisi dan Medium Mikroba	85
XII. Peranan Mikroba di Bidang Kesuburan Tanah	92
XIII. Peranan Mikroba di Bidang Lingkungan	105
Daftar Pustaka	110

I. PENDAHULUAN

A. Pengertian Mikroba

Jasad hidup yang ukurannya kecil sering disebut sebagai mikroba atau mikroorganisme atau jasad renik. Jasad renik disebut sebagai mikroba bukan hanya karena ukurannya yang kecil, sehingga sukar dilihat dengan mata biasa, tetapi juga pengaturan kehidupannya yang lebih sederhana dibandingkan dengan jasad tingkat tinggi. Mata biasa tidak dapat melihat jasad yang ukurannya kurang dari 0,1 mm. Ukuran mikroba biasanya dinyatakan dalam mikron (μ), 1 mikron adalah 0,001 mm. Sel mikroba umumnya hanya dapat dilihat dengan alat pembesar atau mikroskop, walaupun demikian ada mikroba yang berukuran besar sehingga dapat dilihat tanpa alat pembesar.

B. Ruang lingkup Mikrobiologi Dasar

Mikrobiologi adalah ilmu yang mempelajari mikroba. Mikrobiologi adalah salah satu cabang ilmu dari biologi, dan memerlukan ilmu pendukung kimia, fisika, dan biokimia. Mikrobiologi sering disebut ilmu praktek dari biokimia. Dalam mikrobiologi dasar diberikan pengertian dasar tentang sejarah penemuan mikroba, macam-macam mikroba di alam, struktur sel mikroba dan fungsinya, metabolisme mikroba secara umum, pertumbuhan mikroba dan faktor lingkungan, mikrobiologi terapan di bidang lingkungan dan pertanian. Mikrobiologi lanjut telah berkembang menjadi bermacam-macam ilmu yaitu virologi, bakteriologi, mikologi, mikrobiologi pangan, mikrobiologi tanah, mikrobiologi industri, dan sebagainya yang mempelajari mikroba spesifik secara lebih rinci atau menurut kemanfaatannya.

C. Penggolongan mikroba diantara jasad hidup

Secara klasik jasad hidup digolongkan menjadi dunia tumbuhan (plantae) dan dunia binatang (animalia). Jasad hidup yang ukurannya besar dengan mudah dapat digolongkan ke dalam plantae atau animalia, tetapi mikroba yang ukurannya sangat kecil ini sulit untuk digolongkan ke dalam plantae atau animalia. Selain karena ukurannya, sulitnya penggolongan juga disebabkan adanya mikroba yang mempunyai sifat antara plantae dan animalia.

Menurut teori evolusi, setiap jasad akan berkembang menuju ke sifat plantae atau animalia. Hal ini digambarkan sebagai pengelompokan jasad berturut-turut oleh Haeckel, Whittaker, dan Woese. Berdasarkan perbedaan organisasi selnya, Haeckel membedakan dunia tumbuhan (plantae) dan dunia binatang (animalia), dengan protista. Protista untuk menampung jasad yang tidak dapat dimasukkan pada golongan plantae dan animalia. Protista terdiri dari algae atau ganggang, protozoa, jamur atau fungi, dan bakteri yang mempunyai sifat uniseluler, sonositik, atau multiseluler tanpa diferensiasi jaringan.

Whittaker membagi jasad hidup menjadi tiga tingkat perkembangan, yaitu: (1) Jasad prokariotik yaitu bakteri dan ganggang biru (Divisio Monera), (2) Jasad eukariotik uniseluler yaitu algae sel tunggal, khamir dan protozoa (Divisio Protista), dan (3) Jasad eukariotik multiseluler dan multinukleat yaitu Divisio Fungi, Divisio Plantae, dan Divisio Animalia. Sedangkan Woese menggolongkan jasad hidup terutama berdasarkan susunan kimia makromolekul yang terdapat di dalam sel. Pembagiannya yaitu terdiri Arkhaebacteria, Eukaryota (Protozoa, Fungi, Tumbuhan dan Binatang), dan Eubacteria.

D. Ciri umum mikroba

Mikroba di alam secara umum berperanan sebagai produsen, konsumen, maupun redusen. Jasad produsen menghasilkan bahan organik dari bahan anorganik dengan energi sinar matahari. Mikroba yang berperanan sebagai produsen adalah algae dan bakteri fotosintetik. Jasad konsumen menggunakan bahan organik yang dihasilkan oleh produsen. Contoh mikroba konsumen adalah protozoa. Jasad redusen menguraikan bahan organik dan sisa-sisa jasad hidup yang mati menjadi unsur-unsur kimia (mineralisasi bahan organik), sehingga di alam terjadi siklus unsur-unsur kimia. Contoh mikroba redusen adalah bakteri dan jamur (fungi).

Sel mikroba yang ukurannya sangat kecil ini merupakan satuan struktur biologi. Banyak mikroba yang terdiri dari satu sel saja (uniseluler), sehingga semua tugas kehidupannya dibebankan pada sel itu. Mikroba ada yang mempunyai banyak sel (multiseluler). Pada jasad multiseluler umumnya sudah terdapat pembagian tugas diantara sel atau kelompok selnya, walaupun organisasi selnya belum sempurna.

Setelah ditemukan mikroskop elektron, dapat dilihat struktur halus di dalam sel hidup, sehingga diketahui menurut perkembangan selnya terdapat dua tipe jasad, yaitu:

1. Prokariota (jasad prokariotik/ primitif), yaitu jasad yang perkembangan selnya belum sempurna.
2. Eukariota (jasad eukariotik), yaitu jasad yang perkembangan selnya telah sempurna.

Selain yang bersifat seluler, ada mikroba yang bersifat nonseluler, yaitu virus. Virus adalah jasad hidup yang bersifat parasit obligat, berukuran super kecil atau submikroskopik. Virus hanya dapat dilihat dengan mikroskop elektron. Struktur virus terutama terdiri dari bahan genetik. Virus bukan berbentuk sel dan tidak dapat membentuk energi sendiri serta tidak dapat berbiak tanpa menggunakan jasad hidup lain.

Perbedaan sifat antara virus dengan jasad bersel adalah sebagai berikut:

Struktur	Virus	Jasad bersel
Satuan struktur	Partikel (virion)	sel
Susunan: <ul style="list-style-type: none"> - Asam inti - Protein - Lipida - Polisakarida - ATP / energi 	DNA / RNA ada (selubung) tidak ada / ada tidak ada / ada tidak ada	DNA dan RNA ada, lengkap ada ada ada
Sifat pertumbuhan: <ul style="list-style-type: none"> - Terbentuk dari bahan genetik saja - Bagian-bagian disintesis sendiri - Terbentuk langsung dari elemen struktur sejenis yang ada sebelumnya 	Ya Ya Tidak	Tidak Tidak Ya

Selain virus ada jasad hidup yang disebut viroid, yaitu bahan genetik RNA yang bersifat infeksius (dapat menginfeksi) sel inang. Viroid membawa sifat genetiknya sendiri yang dapat diekspresikan di dalam sel inang. Jasad yang lebih sederhana dari virus adalah prion, yang terdiri suatu molekul protein yang infeksius. Adanya kenyataan ini merupakan perkecualian sistem biologi, sebab prion menyimpan sifat genetiknya di dalam rantai polipeptida, bukan di dalam RNA atau DNA. Prion dapat menggandakan diri di dalam sel inang dengan mekanisme yang belum diketahui dengan jelas.

II. SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI

A. PENEMUAN ANIMALCULUS

Awal terungkapnya dunia mikroba adalah dengan ditemukannya mikroskop oleh Leeuwenhoek (1633-1723). Mikroskop temuan tersebut masih sangat sederhana, dilengkapi satu lensa dengan jarak fokus yang sangat pendek, tetapi dapat menghasilkan bayangan jelas yang perbesarannya antara 50-300 kali.

Leeuwenhoek melakukan pengamatan tentang struktur mikroskopis biji, jaringan tumbuhan dan invertebrata kecil, tetapi penemuan yang terbesar adalah diketahuinya dunia mikroba yang disebut sebagai "animalculus" atau hewan kecil. Animalculus adalah jenis-jenis mikroba yang sekarang diketahui sebagai protozoa, algae, khamir, dan bakteri.

B. TEORI ABIOGENESIS DAN BIOGENESIS

Penemuan animalculus di alam, menimbulkan rasa ingin tahu mengenai asal usulnya. Menurut teori abiogenesis, animalculus timbul dengan sendirinya dari bahan-bahan mati. Doktrin abiogenesis dianut sampai jaman Renaissance, seiring dengan kemajuan pengetahuan mengenai mikroba, semakin lama doktrin tersebut menjadi tidak terbukti.

Sebagian ahli menganut teori biogenesis, dengan pendapat bahwa animalculus terbentuk dari "benih" animalculus yang selalu berada di udara. Untuk mempertahankan pendapat tersebut maka penganut teori ini mencoba membuktikan dengan berbagai percobaan.

Fransisco Redi (1665), memperoleh hasil dari percobaannya bahwa ulat yang berkembang biak di dalam daging busuk, tidak akan terjadi apabila daging tersebut disimpan di dalam suatu tempat tertutup yang tidak dapat disentuh oleh lalat. Jadi dapat disimpulkan bahwa ulat tidak secara spontan berkembang dari daging. Percobaan lain yang dilakukan oleh Lazzaro Spalanzani memberi bukti yang menguatkan bahwa mikroba tidak muncul dengan sendirinya, pada percobaan menggunakan kaldu ternyata pemanasan dapat menyebabkan animalculus tidak tumbuh. Percobaan ini juga dapat menunjukkan bahwa perkembangan mikrobial di dalam suatu bahan, dalam arti terbatas menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi pada bahan tersebut.

Percobaan yang dilakukan oleh Louis Pasteur juga banyak membuktikan bahwa teori abiogenesis tidak mungkin, tetapi tetap tidak dapat menjawab asal usul animalculus. Penemuan Louis Pasteur yang penting adalah (1) Udara mengandung mikrobia yang pembagiannya tidak merata, (2) Cara pembebasan cairan dan bahan-bahan dari mikrobia, yang sekarang dikenal sebagai pasteurisasi dan sterilisasi. Pasteurisasi adalah cara untuk mematikan beberapa jenis mikroba tertentu dengan menggunakan uap air panas, suhunya kurang lebih 62°C. Sterilisasi adalah cara untuk mematikan mikroba dengan pemanasan dan tekanan tinggi, cara ini merupakan penemuan bersama ahli yang lain.

C. PENEMUAN BAKTERI BERSPORA

John Tyndall (1820-1893), dalam suatu percobaannya juga mendukung pendapat Pasteur. Cairan bahan organik yang sudah dipanaskan dalam air garam yang mendidih selama 5 menit dan diletakkan di dalam ruangan bebas debu, ternyata tidak akan membusuk walaupun disimpan dalam waktu berbulan-bulan, tetapi apabila tanpa pemanasan maka akan terjadi pembusukan. Dari percobaan Tyndall ditemukan adanya fase termolabil (tidak tahan pemanasan, saat bakteri melakukan pertumbuhan) dan termoresisten pada bakteri (sangat tahan terhadap panas). Dari penyelidikan ahli botani Jerman yang bernama Ferdinand Cohn, dapat diketahui secara mikroskopis bahwa pada fase termoresisten, bakteri dapat membentuk endospora.

Dengan penemuan tersebut, maka dicari cara untuk sterilisasi bahan yang mengandung bakteri pembentuk spora, yaitu dengan pemanasan yang terputus dan diulang beberapa kali atau dikenal sebagai Tyndallisasi. Pemanasan dilakukan pada suhu 100°C selama 30 menit, kemudian dibiarkan pada suhu kamar selama 24 jam, cara ini diulang sebanyak 3 kali. Saat dibiarkan pada suhu kamar, bakteri berspora yang masih hidup akan berkecambah membentuk fase pertumbuhan / termolabil, sehingga dapat dimatikan pada pemanasan berikutnya.

D. PERAN MIKROBA DALAM TRANSFORMASI BAHAN ORGANIK

Suatu bahan yang ditumbuhi oleh mikroba akan mengalami perubahan susunan kimianya. Perubahan kimia yang terjadi ada yang dikenal sebagai fermentasi

(pengkhamiran) dan pembusukan (putrefaction). Fermentasi merupakan proses yang menghasilkan alkohol atau asam organik, misalnya terjadi pada bahan yang mengandung karbohidrat. Pembusukan merupakan proses peruraian yang menghasilkan bau busuk, seperti pada peruraian bahan yang mengandung protein.

Pada tahun 1837, C. Latour, Th. Schwann, dan F. Kützing secara terpisah menemukan bahwa zat gula yang mengalami fermentasi alkohol selalu dijumpai adanya khamir. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan gula menjadi alkohol dan CO₂ merupakan fungsi fisiologis dari sel khamir tersebut. Teori biologis ini ditentang oleh J. Berzelius, J. Liebig, dan F. Wöhler. Mereka berpendapat bahwa fermentasi dan pembusukan merupakan reaksi kimia biasa. Hal ini dapat dibuktikan pada tahun 1812 telah berhasil disintesa senyawa organik urea dari senyawa anorganik.

Pasteur banyak meneliti tentang proses fermentasi (1875-1876). Suatu saat perusahaan pembuat anggur dari gula bit, menghasilkan anggur yang masam. Berdasarkan pengamatannya secara mikroskopis, sebagian dari sel khamir diganti kedudukannya oleh sel lain yang berbentuk bulat dan batang dengan ukuran sel lebih kecil. Adanya sel-sel yang lebih kecil ini ternyata mengakibatkan sebagian besar proses fermentasi alkohol tersebut didesak oleh proses fermentasi lain, yaitu fermentasi asam laktat. Dari kenyataan ini, selanjutnya dibuktikan bahwa setiap proses fermentasi tertentu disebabkan oleh aktivitas mikroba tertentu pula, yang spesifik untuk proses fermentasi tersebut. Sebagai contoh fermentasi alkohol oleh khamir, fermentasi asam laktat oleh bakteri *Lactobacillus*, dan fermentasi asam sitrat oleh jamur *Aspergillus*.

E. PENEMUAN KEHIDUPAN ANAEROB

Selama meneliti fermentasi asam butirat, Pasteur menemukan adanya proses kehidupan yang tidak membutuhkan udara. Pasteur menunjukkan bahwa jika udara dihembuskan ke dalam bejana fermentasi butirat, proses fermentasi menjadi terhambat, bahkan dapat terhenti sama sekali. Dari hal ini kemudian dibuat 2 istilah, (1) kehidupan anaerob, untuk mikroba yang tidak memerlukan Oksigen, dan (2) kehidupan aerob, untuk mikroba yang memerlukan Oksigen.

Secara fisiologis adanya fermentasi dapat digunakan untuk mengetahui beberapa hal. Oksigen umumnya diperlukan mikroba sebagai agensia untuk mengoksidasi senyawa organik menjadi CO₂. Reaksi oksidasi tersebut dikenal sebagai

“respirasi aerob”, yang menghasilkan tenaga untuk kehidupan jasad dan pertumbuhannya. Mikroba lain dapat memperoleh tenaga dengan jalan memecahkan senyawa organik secara fermentasi anaerob, tanpa memerlukan Oksigen. Beberapa jenis mikroba bersifat obligat anaerob atau anaerob sempurna. Jenis lain bersifat fakultatif anaerob, yaitu mempunyai dua mekanisme untuk mendapatkan energi. Apabila ada Oksigen, energi diperoleh secara respirasi aerob, apabila tidak ada Oksigen energi diperoleh secara fermentasi anaerob. Pasteur mendapatkan bahwa respirasi aerob adalah proses yang efisien untuk menghasilkan energi.

F. PENEMUAN ENZIM

Menurut Pasteur, proses fermentasi merupakan proses vital untuk kehidupan. Pendapat tersebut ditentang oleh Bernard (1875), bahwa khamir dapat memecah gula menjadi alkohol dan CO₂ karena mengandung katalisator biologis dalam selnya. Katalisator biologis tersebut dapat diekstrak sebagai larutan yang tetap dapat menunjukkan kemampuan fermentasi, sehingga fermentasi dapat dibuat sebagai proses yang tidak vital lagi (tanpa sel).

Pada tahun 1897, Buchner dapat membuktikan gagasan Bernard, yaitu pada saat menggerus sel khamir dengan pasir dan ditambahkan sejumlah besar gula, terlihat dari campuran tersebut dibebaskan CO₂ dan sedikit alkohol. Penemuan ini membuka jalan ke perkembangan biokimia modern. Akhirnya dapat diketahui bahwa pembentukan alkohol dari gula oleh khamir, merupakan hasil urutan beberapa reaksi kimia, yang masing-masing dikatalisir oleh biokatalisator yang spesifik atau dikenal sebagai enzim.

G. MIKROBA PENYEBAB PENYAKIT

Pasteur menggunakan istilah khusus untuk mengatakan kerusakan pada minuman anggur oleh mikrobial, yaitu disebut penyakit Bir. Ia juga mempunyai dugaan kuat tentang adanya peran mikroba dalam menyebabkan timbulnya penyakit pada jasad tingkat tinggi. Bukti-buktinya adalah dengan ditemukannya jamur penyebab penyakit pada tanaman gandum (1813), tanaman kentang (1845), dan penyakit pada ulat sutera serta kulit manusia.

Pada tahun 1850 diketahui bahwa dalam darah hewan yang sakit antraks, terdapat bakteri berbentuk batang. Davaine (1863-1868) membuktikan bahwa bakteri

tersebut hanya terdapat pada hewan yang sakit, dan penularan buatan menggunakan darah hewan yang sakit pada hewan yang sehat dapat menimbulkan penyakit yang sama. Pembuktian bahwa antraks disebabkan oleh bakteri dilakukan oleh Robert Koch (1876), sehingga ditemukan “postulat Koch” yang merupakan langkah-langkah untuk membuktikan bahwa suatu mikroba adalah penyebab penyakit.

Postulat Koch dalam bentuk umum adalah sebagai berikut:

1. Suatu mikroba yang diduga sebagai penyebab penyakit harus ada pada setiap tingkatan penyakit.
2. Mikroba tersebut dapat diisolasi dari jasad sakit dan ditumbuhkan dalam bentuk biakan murni.
3. Apabila biakan murni tersebut disuntikkan pada hewan yang sehat dan peka, dapat menimbulkan penyakit yang sama.
4. Mikrobia dapat diisolasi kembali dari jasad yang telah dijadikan sakit tersebut.

H. PENEMUAN VIRUS

Iwanowsky menemukan bahwa filtrat bebas bakteri -(cairan yang telah disaring dengan saringan bakteri)- dari ekstrak tanaman tembakau yang terkena penyakit mozaik, ternyata masih tetap dapat menimbulkan infeksi pada tanaman tembakau yang sehat. Dari kenyataan ini kemudian diketahui adanya jasad hidup yang mempunyai ukuran jauh lebih kecil dari bakteri (submikroskopik) karena dapat melalui saringan bakteri, yaitu dikenal sebagai virus.

Untuk membuktikan penyakit yang disebabkan oleh virus, dapat digunakan postulat River (1937), yaitu:

1. Virus harus berada di dalam sel inang.
2. Filtrat bahan yang terinfeksi tidak mengandung bakteri atau mikroba lain yang dapat ditumbuhkan di dalam media buatan.
3. Filtrat dapat menimbulkan penyakit pada jasad yang peka.
4. Filtrat yang sama yang berasal dari hospes peka tersebut harus dapat menimbulkan kembali penyakit yang sama.

I. MIKROBIOLOGI TANAH

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa mikrobia berperan atas perubahan kimiawi yang terjadi di dalam tanah. Peranan mikrobia dalam beberapa siklus unsur hara yang penting, seperti siklus Karbon, Nitrogen, Sulfur, ditunjukkan oleh Winogradsky dan Beijerinck.

Winogradsky menemukan bakteri yang mempunyai fisiologis khusus, yang disebut bakteri autotrof. Bakteri ini dapat tumbuh pada lingkungan yang seluruhnya anorganik. Energi diperoleh dari hasil oksidasi senyawa anorganik tereduksi, dan menggunakan CO_2 sebagai sumber Karbon. Bakteri autotrof dapat dicirikan dari kemampuannya menggunakan sumber anorganik tertentu. Sebagai contoh, bakteri Belerang dapat mengoksidasi senyawa Belerang anorganik. Penemuan lain bersama Beijerinck adalah adanya bakteri penambat Nitrogen nonsimbiotik dan simbiotik, yang dapat memanfaatkan Nitrogen dalam bentuk gas N_2 .

J. GENERATIO SPONTANEA (ABIOGENESIS) MENURUT PANDANGAN BARU

Bukti-bukti baru mendukung bahwa kehidupan terjadi dari berbagai unsur kimia, dengan rangkaian reaksi yang mirip dengan reaksi yang terjadi di alam. Menurut pendapat Oparin (1938) dan Haldane (1932), bumi pada jaman prebiotik mempunyai atmosfer yang bersifat anaerob. Atmosfer bumi saat itu mengandung sejumlah besar Nitrogen, Hidrogen, CO_2 , uap air, sejumlah ammonia, CO, dan H_2S .

Di atmosfer Oksigen hampir tidak ada, dan lapisan ozon sangat tipis, sehingga sinar ultra violet banyak mengenai bumi. Radiasi uv, suhu tinggi dan loncatan bunga api listrik, menyebabkan sejumlah bahan anorganik yang ada berubah menjadi bahan organik, serta terjadinya evolusi pada bahan-bahan organik menjadi lebih kompleks, atau mulai terbentuk makromolekul. Diduga makromolekul akan saling bergabung membentuk semacam membran, yang kemudian mengelilingi suatu cairan, dan akhirnya terbentuk suatu organisme seluler. Selanjutnya untuk mengevolusikan jasad bersel tunggal menjadi bersel majemuk memerlukan waktu kurang lebih 2,5 milyar tahun. Untuk mengevolusikan jasad bersel majemuk menjadi reptil sampai binatang menyusui memerlukan waktu milyaran tahun lagi.

Teori asal mula kehidupan diatas didukung oleh penemuan S. Miller (1957) dan H. Urey (1954). Bejana Miller diisi dengan gas CH_4 , NH_3 , H_2O , dan H_2 . Gas-gas tersebut

dibiarkan bersirkulasi terus-menerus melalui loncatan bunga api listrik, kondensor, dan air mendidih. Seminggu kemudian ternyata menunjukkan terbentuknya senyawa organik seperti asam amino glisin dan alanin, serta asam organik seperti asam suksinat. Dengan merubah bahan dasar dan energi yang diberikan dalam aparat Miller, maka dapat disintesa senyawa-senyawa lain seperti polipeptida, purin, dan ATP. Makromolekul inilah yang diduga sebagai awal terbentuknya kehidupan.

K. PENGGUNAAN MIKROBA

1. Penggunaan mikroba untuk proses-proses klasik, seperti khamir untuk membuat anggur dan roti, bakteri asam laktat untuk yogurt dan kefir, bakteri asam asetat untuk vinegar, jamur *Aspergillus* sp. untuk kecap, dan jamur *Rhizopus* sp. untuk tempe.
2. Penggunaan mikroba untuk produksi antibiotik, antara lain penisilin oleh jamur *Penicillium* sp., streptomisin oleh actinomycetes *Streptomyces* sp.
3. Penggunaan mikroba untuk proses-proses baru, misalnya karotenoid dan steroid oleh jamur, asam glutamat oleh mutan *Corynebacterium glutamicum*, pembuatan enzim amilase, proteinase, pektinase, dan lain-lain.
4. Penggunaan mikroba dalam teknik genetika modern, seperti untuk pemindahan gen dari manusia, binatang, atau tumbuhan ke dalam sel mikrobia, penghasilan hormon, antigen, antibodi, dan senyawa lain misalnya insulin, interferon, dan lain-lain.
5. Penggunaan mikroba di bidang pertanian, misalnya untuk pupuk hayati (biofertilizer), biopestisida, pengomposan, dan sebagainya.
6. Penggunaan mikroba di bidang pertambangan, seperti untuk proses leaching di tambang emas, desulfurisasi batubara, maupun untuk proses penambangan minyak bumi.
7. Penggunaan mikroba di bidang lingkungan, misalnya untuk mengatasi pencemaran limbah organik maupun anorganik termasuk logam berat dan senyawa xenobiotik

III. SEL DAN STRUKTURNYA

A. PENDAHULUAN

Unit fisik terkecil dari organisme hidup adalah sel. Komposisi material sel pada semua organisme adalah sama yaitu: DNA, RNA, protein, lemak dan fosfolipid, yang merupakan komponen dasar semua jenis sel. Namun demikian pengamatan lebih teliti menunjukkan adanya perbedaan sangat mendasar antara sel bakteri dan sianobakteria di satu pihak dengan sel hewan dan tumbuhan di lain pihak.

Ada dua tipe sel yaitu: sel prokariotik dan sel eukariotik. Sel prokariotik merupakan tipe sel pada bakteri dan sianobakteria / alga biru (disebut jasad prokariot). Sel eukariotik merupakan tipe sel pada jasad yang tingkatnya lebih tinggi dari bakteri (disebut jasad eukariot) yaitu khamir, jamur (fungi), alga selain alga biru, protozoa dan tanaman serta hewan.

Perbedaan kedua tipe jasad itu adalah sebagai berikut:

Struktur	Prokariot	Eukariot
Macam mikroba	Bakteri dan Sianobakteria (Algae hijau-biru)	Algae umumnya, Fungi, Protozoa, Plantae, animalia
Ukuran sel	<1-2 x 1-4 μ (mikron)	> 5 μ (mikron)
Struktur genetik: - Membran inti - Jumlah kromosom - Mitosis - DNA inti - DNA organel - % G+C DNA	Tidak ada 1 (siklis) tidak ada tidak terikat histon tidak ada 28-73	ada > 1 ada terikat histon ada \pm 40
Struktur dalam sitoplasma: - Mitokondria - Kloroplas - Ribosom plasma - Ribosom organel - Retikulum endoplasmik - Aparat golgi - Fagositosis - Pinositosis	Tidak ada Tidak ada 70 S*) tidak ada tidak ada tidak ada tidak ada tidak ada tidak ada	Ada Ada / tidak ada 80 S*) ada (70 S*) ada ada ada / tidak ada ada / tidak ada

Keterangan: *) S : konstante pengendapan Svedberg = 1×10^{-13} detik/dyne/gram

B. SEL PROKARIOTIK

Tipe sel prokariotik mempunyai ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan sel eukariotik. Beberapa sel bakteri *Pseudomonas* hanya berukuran $0,4-0,7\mu$ diameternya dan panjangnya $2-3\mu$. Sel ini tidak mempunyai organela seperti mitokondria, kloroplas dan aparat golgi.

Inti sel prokariotik tidak mempunyai membran. Bahan genetis terdapat di dalam sitoplasma, berupa untaian ganda (double helix) DNA berbentuk lingkaran yang tertutup. "Kromosom" bakteri pada umumnya hanya satu, tetapi juga mempunyai satu atau lebih molekul DNA yang melingkar (sirkuler) yang disebut plasmid. Sel prokariotik tidak mengandung organel yang dikelilingi oleh membran. Ribosom yang dimiliki sel prokariot lebih kecil yaitu berukuran 70S.

Ukuran genom sel prokariot berbeda dengan sel eukariot. Jumlah DNA penyusun pada sel prokariot berkisar antara $0,8-8.10^6$ pasangan basa (pb) DNA. DNA pada sel eukariot mempunyai pasangan basa lebih tinggi, sebagai contoh: *Neurospora* 19.10^6 ; *Aspergillus niger* 40.10^6 ; Jagung 7.10^9 ; dan manusia 29.10^9 . Sel prokariotik tidak seluruhnya membutuhkan oksigen, misalnya pada bakteri anaerob.

C. SEL EUKARIOTIK

Sel eukariotik mempunyai inti sejati yang diselimuti membran inti. Inti sel mengandung bahan genetis berupa genome/ DNA. Seluruh bahan genetis tersebut tersusun dalam suatu kromosom. Di dalam kromosom terdapat DNA yang berasosiasi dengan suatu protein yang disebut histon. Kromosom dapat mengalami pembelahan melalui proses yang dikenal sebagai mitosis.

Sel eukariotik juga mengandung organel-organel seperti mitokondria dan kloroplas yang mengandung sedikit DNA. Bentuk DNA dalam ke dua organel tersebut adalah sirkuler tertutup (seperti DNA prokariot). Ribosom pada sel eukariotik lebih besar dibandingkan prokariotik, berukuran 80S. Di dalam sel ini juga dijumpai organel lain yang bermembran, yaitu aparatus golgi. Pada tanaman organela ini mirip dengan diktiosom. Kedua organel tersebut berperan dalam proses sekresi.

D. STRUKTUR SEL

1. Inti Sel

Inti sel eukariotik pada interfase dikelilingi oleh suatu membran. Membran terdiri atas 2 lapisan lemak (lipid bilayers). DNA pada inti tersebar dalam suatu struktur yang disebut kromosom. Pembelahan inti dari satu menjadi dua anak inti dikenal sebagai mitosis. Pada tanaman dan hewan tingkat tinggi dikenal adanya reproduksi secara seksual. Pada saat pembuahan, ke dua inti dari sel jantan dan sel betina (gamet) melebur membentuk sigot. Masing-masing jenis gamet menyumbang sejumlah (n) kromosom. Dengan demikian sigot mengandung dua set kromosom ($2n$). Apabila gamet bersifat haploid, maka sigot bersifat diploid. Semua sel somatik bersifat diploid (mengandung 2 set kromosom). Pada saat generasi seksual berikutnya, kromosom normal ($2n$) mengalami segregasi menjadi haploid. Proses pengurangan separo kromosom dari $2n$ menjadi n kromosom disebut meiosis.

2. Membran Sel Prokariotik

Permukaan luar lipid bilayers membran sel bersifat hidrofil, sedangkan permukaan dalamnya bersifat hidrofob. Stabilitas membran sel disebabkan oleh kekuatan hidrofobik antara residu asam lemak dan kekuatan elektrostatis antara ujung-ujung hidrofilik. Pada bilayer terdapat protein yang letaknya tenggelam (di dalam) bilayer atau terdapat pada permukaannya.

Pada beberapa bakteri, membran mengelilingi sitoplasma tanpa menunjukkan adanya lipatan. Membran pada bakteri lain mengalami pelipatan ke dalam yang disebut mesosom. Pada bakteri fotosintetik, klorofil tidak terdapat dalam suatu kloroplas, melainkan terdapat dalam membran yang sangat berlipat-lipat di dalam sel, yang disebut membran tilakoid. Sistem fotosintetik pada bakteri disamping menggunakan klorofil, juga karotenoid. Keduanya mengandung sistem transport elektron yang menghasilkan ATP pada proses fotosintesis.

3. Dinding Sel

Dinding sel bakteri bersifat agak elastis. Dinding sel tidak bersifat permeabel terhadap garam dan senyawa tertentu dengan berat molekul rendah. Secara normal konsentrasi garam dan gula yang menentukan tekanan osmotik di dalam sel lebih tinggi daripada di luar sel. Apabila tekanan osmose di luar sel naik, air sel akan mengalir ke

luar, protoplasma mengalami pengkerutan, dan membran akan terlepas dari dinding sel. Proses ini disebut dengan plasmolisis.

Rangka dasar dinding sel bakteri: Rangka dasar dinding sel bakteri adalah murein peptidoglikan. Murein tersusun dari N-asetil glukosamin dan N-asetil asam muramat, yang terikat melalui ikatan 1,4- β -glikosida. Pada N-asetil asam muramat terdapat rantai pendek asam amino: alanin, glutamat, diaminopimelat, atau lisin dan alanin, yang terikat melalui ikatan peptida. Peranan ikatan peptida ini sangat penting dalam menghubungkan antara rantai satu dengan rantai yang lain. Komponen dan struktur dinding sel prokariot ini sangat unik, dan tidak dijumpai pada sel eukariotik.

Dinding sel bakteri gram positif: Dinding sel bakteri gram positif terdiri 40 lapis rangka dasar murein, meliputi 30-70 % berat kering dinding sel bakteri. Senyawa lain penyusun dinding sel gram positif adalah polisakarida yang terikat secara kovalen, dan asam teikoat yang sangat spesifik.

Dinding sel bakteri gram negatif: Dinding sel bakteri gram negatif hanya terdiri atas satu lapis rangka dasar murein, dan hanya meliputi \pm 10% dari berat kering dinding sel. Murein hanya mengandung diaminopemelat, dan tidak mengandung lisin. Di luar rangka murein tersebut terdapat sejumlah besar lipoprotein, lipopolisakarida, dan lipida jenis lain. Senyawa-senyawa ini merupakan 80 % penyusun dinding sel. Asam teikoat tidak terdapat dalam dinding sel ini.

Peranan lisosim dan penisilin: Lisosim adalah enzim antibakteri yang terdapat dalam putih telur dan air mata, dan dapat dihasilkan oleh beberapa bakteri. Lisosim akan merusak ikatan antar N-asetilglukosamin dan N-asetil asam muramat dalam murein, sehingga lisosim dapat merombak murein. dalam dinding sel. Dinding sel yang rusak akan menghasilkan sel tanpa dinding sel yang disebut spheroplas. Spheroplas sangat rentan terhadap tekanan osmotik.

Penisilin akan bekerja aktif terhadap dinding sel gram positif yang sedang membelah. Senyawa ini mengakibatkan sel tumbuh tidak beraturan. Dalam hal ini penisilin menghambat pembentukan dinding sel.

4. Flagel dan Pili

Flagel merupakan salah satu alat gerak bakteri. Letak flagel dapat polar, bipolar, peritrik, maupun politrik. Flagel mengakibatkan bakteri dapat bergerak berputar. Penyusun flagel adalah sub unit protein yang disebut flagelin, yang mempunyai berat

molekul rendah. Ukuran flagel berdiameter 12-18 nm dan panjangnya lebih dari 20 nm. Pada beberapa bakteri, permukaan selnya dikelilingi oleh puluhan sampai ratusan pili, dengan panjang 12 nm. Pili disebut juga sebagai fimbriae. Sex-pili berperan pada konjugasi sel. Pada bakteri *Escherichia coli* strain K-12 hanya dijumpai 2 buah pili.

5. Kapsul dan Lendir

Beberapa bakteri mengakumulasi senyawa-senyawa yang kaya akan air, sehingga membentuk suatu lapisan di permukaan luar selnya yang disebut sebagai kapsul atau selubung berlendir. Fungsinya untuk kehidupan bakteri tidak begitu esensial, namun menyebabkan timbulnya sifat virulen terhadap inangnya. Dalam pembentukan agregasi tanah, senyawa yang terkandung dalam kapsul atau lendir inilah yang sangat berperan. Keberadaan kapsul mudah diketahui dengan metode pengecatan negatif menggunakan tinta china atau nigrosin. Kapsul akan tampak transparan diantara latar belakang yang gelap. Pada umumnya penyusun utama kapsul adalah polisakarida yang terdiri atas glukosa, gula amino, rhamnosa, serta asam organik seperti asam piruvat dan asam asetat. Ada pula yang mengandung peptida, seperti kapsul pada bakteri *Bacillus* sp. Lendir merupakan kapsul yang lebih encer. Adakalanya kapsul bakteri dapat dipisahkan dengan metode penggojokan kemudian diekstrak untuk menghasilkan lendir.

PERBEDAAN SEL TANAMAN, HEWAN, DAN BAKTERI

SEL TANAMAN	SEL HEWAN	SEL BAKTERI
Dinding sel dan Membran sel		
Dinding sel Dinding sel tanaman sangat kuat dan kasar. Banyak mengandung	Tidak mempunyai dinding sel	Dinding sel terdiri atas rantai polisakarida dan rantai peptida pendek.

<p>selulosa yang terikat pada polisakarida dan protein. Fungsinya melindungi membran dari kerusakan mekanis atau tekanan osmosa, dan menyebabkan bentuk sel tetap</p>		<p>Permukaannya dilapisi lipopolisakarida. Tidak semua bakteri mempunyai pili. Pili dapat berfungsi sebagai jalan pemindahan DNA pada saat konjugasi. Dinding sel melindungi sel bakteri dari lingkungan hipotonis. Dinding sel mempunyai pori yang dapat dilewati molekul kecil.</p>
<p>Membran sel Membran sel tanaman tebalnya $\pm 9\text{nm}$ dan mengandung lipida dan protein dalam jumlah yang sama. Lipida tersusun dalam 2 lapisan. Jenis lipida lebih bervariasi daripada lipida penyusun membran sel bakteri. Membran sel tanaman bersifat selektif permeabel, mengandung protein/ensim yang berperan pada pemindahan nutrien dan ion anorganik</p>	<p>Membran sel hewan mirip dengan membran sel tanaman, tetapi komposisi lipidanya beda. Membran bersifat fleksibel dan lengket. Permukaan sel yang lengket penting dalam pembentukan jaringan. Membran sangat selektif permeabel. Mengandung protein ensim yang berperan dalam pengangkutan ion K^+ dan Na^+, glukosa, asam amino, dll</p>	<p>Membran sel bakteri mengandung $\pm 45\%$ lipida dan 55% protein. Lipida menyelu-bungi secara kontinyu dan non-polar. Pada beberapa tempat, membran mengalami pelipatan ke dalam sel yang disebut dengan mesosome. Membran bersifat selektif permeabel. Air, beberapa nutrien dan ion logam dapat bebas melewatinya. Beberapa ensim yang berperan menghasilkan ATP terdapat dalam membran sel bakteri.</p>
<p>Inti</p> <p>Inti sel, anak inti sel serta membran inti sel tanaman mempunyai struktur, komposisi dan fungsi seperti pada sel hewan.</p>	<p>Diameter inti sel hewan $\pm 4-6\mu$. Dilapisi oleh selaput/membran berpori sebagai tempat keluar-masuknya bahan ke dalam inti. DNA di dalam inti berasosiasi dengan protein histon dan terorganisir</p>	<p>Bakteri tidak mempunyai bentuk inti seperti pada sel tanaman dan hewan. Bahan genetik hanya berupa satu untaian ganda DNA yang tersusun secara heliks. Panjang DNA mencapai $1,2\text{ mm}$, tetapi terlipat menjadi</p>

	<p>menjadi kromosom. Di dalam inti terdapat anak inti/ nukleolus yang kaya RNA, berbentuk bulat, gelap, tetapi tidak dilingkupi oleh membran. Anak inti merupakan tempat terbentuknya RNA. Setiap inti ada 1-4 anak inti. Selama mitosis DNA kromosom mengalami replikasi, kemudian memisah menjadi kromosom anak.</p>	<p>diameter 2nm. Selama pembelahan sel masing-masing untai DNA bereplikasi menghasilkan dua molekul untai DNA kembali. DNA akan ditranskripsi menjadi bentuk messenger (m) RNA. Bakteri juga mempunyai plasmid, yaitu untai ganda DNA di luar kromosom berbentuk sirkuler. Plasmid dapat bereplikasi secara mandiri tidak tergantung pada replikasi kromosom sel.</p>
<p>Mitokondria</p>		
<p>Mitokondria berbentuk lonjong, dijumpai pada semua sel tanaman. Strukturnya mirip dengan mitokondria sel hewan. Mitokondria mengandung DNA yang tipenya khusus. Di dalam mitokondria, banyak mengandung enzim yang berperan dalam oksidasi nutrisi dan perubahan energi menjadi ATP.</p>	<p>Jumlah mitokondria dalam sel dapat mencapai 800. Jumlahnya semakin banyak pada sel yang aktif. Membran dalam mitokondria berlipat-lipat. Matriks di dalamnya banyak mengandung enzim yang berperan dalam oksidasi karbohidrat, lipid, asam amino menjadi CO₂ dan H₂O. Hasil oksidasi adalah ATP untuk sumber energi.</p>	<p>Sel bakteri tidak mempunyai mitokondria. Oksidasi nutrisi dilakukan oleh enzim oksidase yang terdapat dalam membran atau mesosome.</p>
<p>Endoplasmik retikulum (ER) dan ribosome</p>		

<p>ER pada sel tanaman mempunyai struktur yang mirip dengan ER pada sel hewan.</p>	<p>ER merupakan membran inti yang melipat-lipat menyerupai lorong. Permukaannya kasar karena ada ribosom yang menempel. ER dari inti menembus sitoplasma menuju luar sel. Ribosome merupakan tempat terbentuknya protein. Ribosom juga tersebar bebas dalam sitoplasma.</p>	<p>Sel bakteri tidak mempunyai ER. Ribosome tersebar dalam sitoplasma. Ribosome sebagai tempat sintesis protein. Setiap sel bakteri E. coli mengandung 15.000 ribosome. Setiap ribosome terdiri atas 2 subunit: subunit besar dan subunit kecil. Setiap subunit terdiri atas 65% RNA dan 35% protein. mRNA terikat pada lekukan diantara 2 subunit RNA saat terjadi sintesis asam amino. Jenis asam amino yang dibentuk sesuai dengan susunan bahan genetik di mRNA</p>
<p>Khloroplas</p> <p>Sel tanaman mempunyai plastida yang disebut kloroplas, di dalamnya terdapat khlorofil. Khloroplas dikelilingi oleh membran yang mengandung DNA. Bentuk khloroplas bermacam-macam, jumlahnya dapat lebih dari satu per sel. Fungsi khlorofil untuk menerima energi matahari, yang diubah menjadi ATP untuk pembentukan gula dari CO₂ dan H₂O dalam proses fotosintesis</p>	<p>Sel hewan tidak mempunyai khloroplas</p>	<p>Bakteri fotosintetik mempunyai khlorofil yang tidak berada dalam khloroplast, tetapi ada dalam membran yang sangat melipat-lipat ke dalam sel, yang disebut membran fotosintetik (tilakoid). Pada alga biru Anabaena azollae tilakoid tersebar di seluruh sel.</p>
<p>Vakuola</p>		

Vakuola merupakan ciri khusus sel tanaman. Ukuran vakuola bertambah dengan bertambahnya umur sel. Vakuola mengandung gula, garam dari asam organik, protein terlarut, garam mineral, pigmen, oksigen dan CO₂, yang merupakan bahan sisa maupun cadangan makanan. Bahan tersebut selalu dihasilkan selama sel melakukan aktivitas, sehingga ukuran vakuola semakin lama semakin besar.

Bakteri akuatik mempunyai vakuola yang berisi gas (vakuola gas). Fungsinya agar sel dapat mengapung di lingkungan air, sehingga dapat bergerak naik turun (bouyanci). Vakuola tidak untuk menyimpan cadangan makanan. Cadangan makanan disimpan di suatu bulatan atau granula, berupa polisakarida, lipida, polifosfat, metafosfat, sulfur, dan poli beta hidroksi asam butirat (PHB). Cadangan makanan dimanfaatkan saat kondisi lingkungan miskin, atau saat spora berkecambah.

IV. BAKTERI DAN VIRUS

A. BAKTERI

Bakteri merupakan mikrobia prokariotik uniselular, termasuk klas Schizomycetes, berkembang biak secara aseksual dengan pembelahan sel. Bakteri tidak berklorofil kecuali beberapa yang bersifat fotosintetik.

Cara hidup bakteri ada yang dapat hidup bebas, parasitik, saprofitik, patogen pada manusia, hewan dan tumbuhan. Habitatnya tersebar luas di alam, dalam tanah, atmosfer (sampai \pm 10 km diatas bumi), di dalam lumpur, dan di laut.

Bakteri mempunyai bentuk dasar bulat, batang, dan lengkung. Bentuk bakteri juga dapat dipengaruhi oleh umur dan syarat pertumbuhan tertentu. Bakteri dapat mengalami involusi, yaitu perubahan bentuk yang disebabkan faktor makanan, suhu, dan lingkungan yang kurang menguntungkan bagi bakteri. Selain itu dapat mengalami pleomorfi, yaitu bentuk yang bermacam-macam dan teratur walaupun ditumbuhkan pada syarat pertumbuhan yang sesuai. Umumnya bakteri berukuran 0,5-10 μ .

Berdasarkan klasifikasi artifisial yang dimuat dalam buku "Bergey's manual of determinative bacteriology" tahun 1974, bakteri diklasifikasikan berdasarkan deskripsi sifat morfologi dan fisiologi. Dalam buku ini juga terdapat kunci determinasi untuk mengklasifikasikan isolat bakteri yang baru ditemukan. Menurut Bergey's manual, bakteri dibagi menjadi 1 kelompok (grup), dengan Cyanobacteria pada grup 20. Pembagian ini berdasarkan bentuk, sifat gram, kebutuhan oksigen, dan apabila tidak dapat dibedakan menurut ketiganya maka dimasukkan ke dalam kelompok khusus.

KLASIFIKASI BAKTERI

I. Bakteri berbentuk kokus (bulat)

a. Bakteri kokus gram positif (grup 14)

Aerobik: Micrococcus, Staphylococcus, Streptococcus, Leuconostoc

Anaerobik: Methanosarcina, Thiosarcina, Sarcina, Ruminococcus

b. Bakteri kokus gram negatif

Aerobik: Neisseria, Moraxella, Acinetobacter, Paracoccus (grup 10)

Anaerobik: Veillonella, Acidaminococcus, Megasphaera (grup 11)

II. Bakteri berbentuk batang

a. Bakteri gram positif

1. Bakteri gram positif tidak membentuk spora (grup 16)

Aerobik: *Lactobacillus*, *Listeria*, *Erysipelothrix*, *Caryophanon*.

2. Bakteri Coryneform dan actinomycetes (grup 17)

Aerobik Coryneform: *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Brevibacterium*,
Cellulomonas, *Propionibacterium*, *Eubacterium*,
Bifidobacterium.

Aerobik Actinomycetes: *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Actinomyces*, *Frankia*,
Actinoplanes, *Dermatophilus*, *Micromonospora*,
Microbispora, *Streptomyces*, *Streptosporangium*.

Actinomycete dapat membentuk miselium yang sangat halus dan bercabang-cabang. Miselium vegetatif tumbuh di dalam medium, dan miselium udara ada di permukaan medium. Bakteri ini dapat berkembang biak dengan spora, secara fragmentasi dan segmentasi, dengan chlamydospora, serta dengan bertunas. Bakteri ini umumnya mempunyai habitat pada lingkungan dengan pH yang tinggi. Cara hidupnya ada yang bersifat saprofit, simbiosis dan beberapa sebagai parasit. *Frankia* adalah actinomycetes yang mampu menambat nitrogen dan dapat bersimbiosis dengan tanaman.

3. Bakteri pembentuk endospora (grup 15)

Aerobik: *Bacillus*, *Sporolactobacillus*, *Sporosarcina*, *Thermoactinomyces*

Anaerobik: *Clostridium*, *Desulfotomaculum*, *Oscillospira*

b. Bakteri gram negatif

1. Bakteri gram negatif aerobik (grup 7)

Aerobik: *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Zoogloea*, *Gluconobacter*, *Acetobacter*,
Azotobacter, *Azomonas*, *Beijerinckia*, *Derxia*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*,
Alcaligenes, *Brucella*, *Legionella*, *Thermus*. Bakteri *Azotobacter*, *Beijerinckia*,
Derxia, *Rhizobium* termasuk diazotroph yang dapat menambat nitrogen dari udara. *Azotobacter*, *Beijerinckia*, dan *Derxia* cara hidupnya bebas tidak bersimbiosis, *Rhizobium* hidupnya dapat bersimbiosis dengan akar tanaman leguminosa dengan membentuk bintil akar.

2. Bakteri gram negatif aerobik khemolitotrofik (grup12)

Aerobik: Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosococcus, Nitrosolobus. Bakteri bakteri tersebut umumnya berperan dalam proses nitrifikasi di dalam tanah. Thiobacillus, Sulfolobus, Thiobacterium, Thiovolum, yang merupakan bakteri yang berperan dalam proses oksidasi sulfur di alam.

3. Bakteri berselubung (grup 3)

Aerobik: Sphaerotilus, Leptothrix, Cladothrix, Crenothrix. Bakteri Sphaerotilus biasanya hidup di saluran-saluran air. Leptothrix,dan Cladothrix merupakan bakteri yang mampu mengoksidasi besi atau penyebab korosi.

4. Bakteri gram negatif fakultatif anaerobik (grup 8)

Fakultatif anaerobik: Escherichia coli, Klebsiella, Enterobacter, Salmonella, Shigella, Proteus, Serratia, Erwinia, Yersinia, Vibrio, Aeromonas, Photobacterium.

5. Bakteri gram negatif anaerobik (grup 9)

Sangat Anaerobik: Bacteroides, Fusobacterium, Leptotrichia

6. Bakteri Methanogens dan arkaebakteria (grup 13)

Sangat Anaerobik: Methanobacterium, Methanothermus, Methanosarcina, Methanothrix, Methanococcus. Bakteri ini merupakan pembentuk metan (CH₄) dari hasil perombakan bahan organik secara anaerobik.

Aerobik: Halobacterium, Halococcus, Thermoplasma. Bakteri ini ada yang tahan hidup pada kadar garam tinggi dan dan ada yang tahan pada suhu tinggi.

Anaerobik: Thermoproteus, Pyrodictium, Desulfurococcus.

III. Bakteri berbentuk lengkung

a. Bakteri gram negatif spiril dan lengkung (grup 6)

Aerobik: Spirillum, Aquaspirillum, Azospirillum, Oceanospirillum, Campylobacter, Bdellovibrio, Microcyclus, Pelosigma. Bakteri Azospirillum termasuk bakteri penambat nitrogen yang dapat berasosiasi dengan tanaman gramineae termasuk tanaman padi. Bakteri Bdellovibrio adalah bakteri yang dapat hidup sebagai parasit pada sel bakteri lain (parasit bakteri).

b. Bakteri gram negatif lengkung anaerobik (grup 9)

Anaerobik: Desulfovibrio, Succinivibrio, Butyrivibrio, Selenomonas. Bakteri Desulfovibrio merupakan salah satu bakteri yang mampu mereduksi sulfat.

c. Spirochaeta (grup 5)

Aerobik dan anaerobik: Spirochaeta, Cristispira, Treponema, Borrelia, Leptospira. Bakteri ini berbentuk benang tipis dan terulir. Dinding sel tipis dan lentur. Bakteri ini dapat bergerak dengan cara kontraksi sel menurut garis sumbu selnya. Selnya berukuran $0,1-3 \mu \times 4-8 \mu$.

IV. Bakteri yang termasuk kelompok khusus

a. Bakteri yang merayap (meluncur) (grup 2)

Bakteri ini dapat merayap walaupun tidak berflagela. Bakteri ini selalu bersifat gram negatif. Dalam kelompok ini termasuk beberapa ganggang biru, beberapa bakteri khemoorganotrof dan beberapa bakteri belerang (sulfur).

Kelompok bakteri yang menjadi anggota bakteri merayap (meluncur) adalah sbb:

1. Bakteri yang mengandung sulfur intraselular, berbentuk benang. Contoh: Beggiatoa, Thiobacillus, Achromatium.
2. Bakteri bebas sulfur, membentuk trikoma (bulu). Contoh: Vitreoscilla, Leucothrix, Saprospira.
3. Bakteri uniselular, bentuk batang pendek. Contoh: Cytophaga, Flexibacter, Myxobacteria.
4. Bakteri fototrof yang bergerak merayap. Contoh: Chloroflexus

5. Cyanobacteria yang bergerak merayap. Contoh: Oscillatoria.

Myxobacteria. Bakteri yang termasuk myxobacteria mempunyai dinding sel sangat tipis dan lentur. Bakteri ini bersifat gram negatif, dan dapat bergerak meluncur. Bentuk sel umumnya memanjang (spoel) dengan ujung runcing. Dalam siklus hidupnya dapat membentuk badan buah, yang merupakan kumpulan sel yang berdiferensiasi. Ukuran badan buah kurang dari 1 mm. Contoh: Chondromyces, Myxococcus.

b. Bakteri bertangkai atau bertunas (grup 4)

Bakteri ini mempunyai struktur mirip tangkai atau tunas yang merupakan tonjolan dari sel, atau hasil pengeluaran lendir. Contoh: Hypomicrobium, Caulobacter, Prosthecomicrobium, Ancalomicrobium, Gallionella, Nevskia.

c. Bakteri parasit obligat: Rickettsiae dan Chlamydiae (grup 18)

Merupakan bakteri yang berukuran paling kecil, tetapi lebih besar dari virus, yaitu $0,3 \times 2 \mu$. Bentuk sel pleomorfik, dapat berupa batang, kokus, atau filamen. Bakteri ini cara hidupnya sebagai parasit sejati (parasit obligat) di dalam sel jasad lain dan bersifat patogen. Hidupnya intraselular di dalam sitoplasma dan inti sel binatang dan manusia. Oleh karena itu bakteri kelompok ini merupakan penyebab penyakit, yang biasanya ditularkan oleh vektor serangga. Contoh: Rickettsia prowazekii, Chlamydia trachomatis, Coxiella burnetii.

d. Mycoplasma (klas Mollicutes) (grup 19)

Mycoplasma disebut juga PPLO (Pleuropneumonia Like Organisms). Cirinya yaitu tidak mempunyai dinding sel, atau merupakan bentuk L dari bakteri sejati (Eubakteria) atau bentuk speroplas sel eubakteria, sehingga sifatnya mirip bakteri sejati. Mycoplasma berukuran $0,001-7 \mu$. Umumnya lebih besar dari Rickettsiae dan dapat dicat dengan cat anilin. Ukuran koloni mencapai $10-600 \mu$ NOSelnya berbentuk kokus, filamen, roset, dan sangat pleomorfik. Selnya dapat memperbanyak diri dengan pembelahan biner, fragmentasi, dan perkecambahan. Cara hidupnya sebagai saprofit atau patogen. Contoh: Mycoplasma mycoides, M. homonia, M. orale, Acholeplasma, Spiroplasma.

Bakteri bentuk L atau bakteri dalam bentuk protoplas, tidak ber dinding sel. Hal ini dapat terjadi karena mutasi atau dibuat. Contohnya (a) *Mycobacterium tuberculosis* dalam medium dengan tegangan muka rendah dan ditambah lisosim serta EDTA, (b) Strain mutan *Staphylococcus aureus* dalam medium dengan penisilin G.

e. Bakteri anaerobik anoksigenik fototrofik (grup 1)

Bakteri ini mempunyai ciri berpigmen fotosintetik. Ada yang berbentuk kokus, batang, dan lengkung. Berdasarkan sifat fisiologinya dapat dibagi menjadi:

1. Familia Thiorhodaceae (bakteri sulfur ungu). Contoh: *Thiospirillum* sp., *Chromatium* sp.
2. Familia Athiorhodaceae/Rhodospirillaceae (bakteri sulfur non-ungu). Contoh: *Rhodospirillum*, *Rhodopseudomonas*.
3. Familia Chlorobiaceae (bakteri sulfur hijau). Contoh: *Chlorobium*, *Chloropseudomonas*, *Chlorochromatium*.

f. Bakteri aerobik oksigenik fototrofik: Cyanobacteria (grup 20)

Bakteri ini termasuk Myxophyceae atau Cyanophyceae. Sifatnya yang mirip bakteri adalah dinding selnya terdiri mukokompleks, tidak ber dinding inti, tidak ada mitokondria dan kloroplas. Sifatnya yang berbeda adalah dapat berfotosintesa mirip tumbuhan tingkat tinggi, dan menghasilkan O₂.

Bakteri ini mempunyai klorofil a dan fikobilin (fikosianin dan fikoeritrin). Bentuk selnya tunggal (uniselular), koloni, dan benang-benang (filamen). Selnya dapat bergerak meluncur tetapi sangat lambat (250 μ per menit), meskipun tidak berflagela. Cara hidupnya bebas, dan berasosiasi simbiosis. Umumnya dapat menambat nitrogen dari udara, dan bersifat fotoautotrof obligat. Contoh: *Gloeobacter*, *Gloeocapsa*, *Dermocarpa*, *Spirulina*, *Nostoc*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Calothrix*, *Cylindrospermum*. *Anabaena azollae* dapat bersimbiosis dengan tanaman paku air *Azolla* sp. dan *Nostoc* bersimbiosis dengan jamur membentuk Lichenes.

B. VIRUS

Virus ukurannya sangat kecil dan dapat melalui saringan (filter) bakteri. Ukuran

virus umumnya 0,01-0,1 μ . Virus tidak dapat diendapkan dengan sentrifugasi biasa. Untuk melihat virus diperlukan mikroskop elektron.

Sifat-sifat virus yang penting antara lain:

1. Virus hanya mempunyai 1 macam asam nuklein (RNA atau DNA)
2. Untuk reproduksinya hanya memerlukan asam nuklein saja.
3. Virus tidak dapat tumbuh atau membelah diri seperti mikrobia lainnya

Virus memiliki sifat-sifat khas dan tidak merupakan jasad yang dapat berdiri sendiri. Virus memperbanyak diri dalam sel jasad inang (parasit obligat) dan menyebabkan sel-sel itu mati. Sel inang adalah sel manusia, hewan, tumbuhan, atau pada jasad renik yang lain. Sel jasad yang ditumpangi virus dan mati itu akan mempengaruhi sel-sel sehat yang ada didekatnya, dan karenanya dapat mengganggu seluruh kompleks sel (becak-becak daun, becak-becak nekrotik dan sebagainya).

1. VIRUS TUMBUHAN

Virus tumbuhan pada umumnya masuk ke dalam sel melalui luka, jadi tidak dapat menerobos secara aktif. Sebagai tanda penyerangannya ialah adanya becak-becak nekrotik di sekitar luka primer. Dalam alam virus tumbuhan disebarkan dengan pertolongan hewan serangga vektor atau dengan cara lain, misalnya tanaman *Cuscuta* dengan haustoriannya juga memindahkan virus melalui sistem jaringan angkutannya (buluh-buluh pengangkutan).

Banyak jenis virus yang memperbanyak diri terlebih dahulu di dalam tractus digestivus hewan-hewan vektornya. Setelah masa inkubasi tertentu dapat menyebabkan infeksi pada tumbuh-tumbuhan lagi. Virus semacam itu dikenal sebagai virus yang persisten. Virus yang nonpersisten dapat segera ditularkan dengan gigitan (sengatan) serangga (hewan).

Virus tumbuhan yang telah banyak dipelajari adalah TMV (Tobacco Mozaic Virus = Virus Mozaik Tembakau). Bahan genetik virus ini ialah RNA.

2. BENTUK VIRUS

Suatu virion terdiri atas bahan genetik (RNA atau DNA) yang diselubungi oleh selubung protein. Selubung protein ini disebut kapsid. Asam nuklein yang diselubungi kapsid

disebut nukleokapsid. Nukleokapsid dapat telanjang misalnya pada TMV (Tobacco Mozaik Virus yang menyebabkan penyakit becak daun), Adenovirus dan virus kutil (Warzervirus); atau diselubungi oleh suatu membran pembungkus misalnya pada virus influenza, virus herpes. Kapsid terdiri atas bagian-bagian yang disebut kapsomer (misalnya pada TMV dapat terdiri atas hanya satu rantai polipeptida, juga dapat terdiri atas protein monomer-protein monomer yang identik yang masing-masing terdiri atas rantai polipeptida). Pada dasarnya kapsid terdiri atas banyak satuan-satuan dasar yang identik. Pada umumnya kapsid tersusun simetris. Pada TMV (suatu virus yang berbentuk batang) kapsomernya tersusun dalam bentuk anak tangga uliran spiral. Bentuk dasar virus adalah yang bulat, silindris, kubus, polihedral, seperti huruf T, dan lain-lain.

Gambar . Skema komponen-komponen virion (partikel virus yang lengkap)

Gambar . Skema TMV

3. BAKTERIOPHAGE (VIRUS YANG MENYERANG BAKTERI)

Virus pada bakteri coli (T-phage) terdiri atas dua bagian, yaitu bagian kepala yang berbentuk heksagonal dan bagian ekornya. Bentuk demikian itu hanya dapat

dilihat pada pengamatan dengan mikroskop elektron. Bagian kepala terdiri atas bagian utama yang bagian pusatnya terdiri atas DNA; sedang bagian luarnya merupakan selubung protein yang berfungsi sebagai pelindung. Bagian ekornya berupa tubus yang mempunyai sumbat, selain itu dilengkapi pula dengan serabut ekor. Bakteri yang terserang bakteriofag akan lisis.

Untuk mendapatkan gambaran tentang siklus hidup bakteriofag, perlu ditinjau tingkatan-tingkatan yang terjadi pada waktu phage menyerang bakteri:

- a. Pada permulaannya phage melekat dengan bagian ekornya pada bagian tertentu dari sel (fase adsorpsi phage pada sel) .
- b. DNA phage dimasukkan ke dalam sel melalui tubus ekornya, DNA phage merusak DNA bakteri sehingga proses di dalam sel dikendalikan oleh DNA phage, kemudian akan terbentuk protein (selubung) phage dan DNA phage yang baru (fase perkembangan phage).
- c. Fase yang terakhir ialah keluarnya partikel-partikel virus (bakteriophage) dari sel. Sel bakteri mengalami lisis (bakteriolisis/ fase pembebasan phage).

Gambar . Skema bakteriofag.

Gambar . Siklus perkembangan bakteriofag.

Tabel . Kelompok virus yang penting.

Ukuran (milimikron)	Kelompok Virus	Virus atau gejalanya
Virus DNA		
300 X 250	Virus cacar	Variola
100 - 150	Herpes virus	Herpes simplex, Varicella/Zoster
20 - 60	Arbovirus	Yellow fever, pappataci
130	virus serangga	
60 - 75	Reovirus	Reovirus
70 - 85	Adenovirus	Adenovirus
Virus RNA		
80 - 200	Myxovirus	Vaccinia, Moliuscum parainfluenza - influenza campak
17 - 30	Picornavirus	Polyomyolitis radang mulut dan kuku
40 - 55	Papovavirus	Papillom (kutil) Polyoma (tumor)
25 - 45	Bacteriovirus	Phage berbentuk kubik
40 - 80	virus serangga	
25 X 200	Bacterivirus	T-phage
18 X 300	Virus tumbuhan	Mozaik tembakau

Ada beberapa virus yang ukurannya sangat kecil, dan hanya tersusun dari beberapa asam nukleat saja. Virus yang sangat sederhana ini disebut viroid. Sekarang telah ditemukan juga jasad hidup yang susunan kimianya hanya terdiri dari beberapa molekul protein, jasad ini disebut prion.

V. FUNGI (JAMUR)

Di dalam dunia mikrobial, jamur termasuk divisio Mycota (fungi). Mycota berasal dari kata mykes (bahasa Yunani), disebut juga fungi (bahasa Latin). Ada beberapa istilah yang dikenal untuk menyebut jamur, (a) mushroom yaitu jamur yang dapat menghasilkan badan buah besar, termasuk jamur yang dapat dimakan, (b) mold yaitu jamur yang berbentuk seperti benang-benang, dan (c) khamir yaitu jamur bersel satu.

Jamur merupakan jasad eukariot, yang berbentuk benang atau sel tunggal, multiseluler atau uniseluler. Sel-sel jamur tidak berklorofil, dinding sel tersusun dari kitin, dan belum ada diferensiasi jaringan. Jamur bersifat kemoorganoheterotrof karena memperoleh energi dari oksidasi senyawa organik. Jamur memerlukan oksigen untuk hidupnya (bersifat aerobik).

Habitat (tempat hidup) jamur terdapat pada air dan tanah. Cara hidupnya bebas atau bersimbiosis, tumbuh sebagai saprofit atau parasit pada tanaman, hewan dan manusia.

A. Morfologi Jamur Benang

Jamur benang terdiri atas massa benang yang bercabang-cabang yang disebut miselium. Miselium tersusun dari hifa (filamen) yang merupakan benang-benang tunggal. Badan vegetatif jamur yang tersusun dari filamen-filamen disebut thallus. Berdasarkan fungsinya dibedakan dua macam hifa, yaitu hifa fertil dan hifa vegetatif. Hifa fertil adalah hifa yang dapat membentuk sel-sel reproduksi atau spora-spora. Apabila hifa tersebut arah pertumbuhannya keluar dari media disebut hifa udara. Hifa vegetatif adalah hifa yang berfungsi untuk menyerap makanan dari substrat.

Berdasarkan bentuknya dibedakan pula menjadi dua macam hifa, yaitu hifa tidak bersepta dan hifa bersepta. Hifa yang tidak bersepta merupakan ciri jamur yang termasuk Phycomycetes (Jamur tingkat rendah). Hifa ini merupakan sel yang memanjang, bercabang-cabang, terdiri atas sitoplasma dengan banyak inti (soenositik). Hifa yang bersepta merupakan ciri dari jamur tingkat tinggi, atau yang termasuk Eumycetes.

B. Perkembangbiakan jamur

Jamur dapat berkembang biak secara vegetatif (aseksual) dan generatif (seksual). Perkembang biakan aseksual dapat dilakukan dengan fragmentasi miselium (thalus) dan pembentukan spora aseksual. Ada 4 cara perkembang biakan dengan fragmentasi thalus yaitu, (a) dengan pembentukan tunas, misalnya pada khamir, (b) dengan blastospora, yaitu tunas yang tumbuh menjadi spora, misalnya pada *Candida* sp., (c) dengan arthrospora (oidium), yaitu terjadinya segmentasi pada ujung-ujung hifa, kemudian sel-sel membulat dan akhirnya lepas menjadi spora, misalnya pada *Geotrichum* sp., dan (d) dengan chlamydospora, yaitu pembulatan dan penebalan dinding sel pada hifa vegetatif, misalnya pada *Geotrichum* sp.

Spora aseksual terbentuk melalui 2 cara. Pada jamur tingkat rendah, spora aseksual terbentuk sebagai hasil pembelahan inti berulang-ulang. Misalnya spora yang terbentuk di dalam sporangium. Spora ini disebut sporangiospora. Pada jamur tingkat tinggi, terbentuk spora yang disebut konidia. Konidi terbentuk pada ujung konidiofor, terbentuk dari ujung hifa atau dari konidi yang telah terbentuk sebelumnya.

Perkembang biakan secara seksual, dilakukan dengan pembentukan spora seksual dan peleburan gamet (sel seksual). Ada dua tipe kelamin (mating type) dari sel seksual, yaitu tipe kelamin + (jantan) dan tipe kelamin – (betina). Peleburan gamet terjadi antara 2 tipe kelamin yang berbeda. Proses reproduksi secara seksual dibagi menjadi 3 tingkatan, yaitu: (a) plasmogami yaitu meleburnya 2 plasma sel, (b) kariogami yaitu meleburnya 2 inti haploid yang menghasilkan satu inti diploid, dan (c) meiosis yaitu pembelahan reduksi yang menghasilkan inti haploid.

Bentuk dan cara reproduksi jamur sangat beraneka ragam, dan dapat digunakan sebagai dasar untuk mengklasifikasikan jamur tersebut.

C. Klasifikasi jamur

Ada beberapa klasifikasi jamur, yaitu Acrasiomycetes (Jamur lendir selular), Myxomycetes (Jamur lendir sejati), Phycomycetes (Jamur tingkat rendah), dan Eumycetes (Jamur tingkat tinggi). Eumycetes terdiri atas 3 klasifikasi yaitu Ascomycetes, Basidiomycetes, dan Deuteromycetes (Fungi imperfecti).

Sistem tata nama jamur menggunakan nama binomial, yang terdiri nama genus dan nama spesifik / spesies. Nama famili dengan akhiran –aceae, nama order dengan akhiran –ales, dan nama kelas dengan akhiran –mycetes.

1. ACRASIOMYCETES

Jamur ini merupakan kelompok jamur lendir selular, yang hidup bebas di dalam tanah, biasanya diisolasi dari tanah humus. Bentuk vegetatifnya berupa sel berinti satu yang amoeboid, seperti protozoa uniselular atau merupakan amoeba haploid, dan disebut juga pseudoplasmodium.

Ciri-ciri sel jamur ini adalah dapat bergerak diatas media padat (pseudopodia), makan dengan cara fagositosis, misalnya dengan memakan bakteri. Sifatnya yang mirip fungi adalah adanya stadium badan buah, dan terbentuknya spora. Struktur spora seperti bentuk kista dari amoeba.

Perkembang biakan jamur ini dimulai dari berkecambahnya spora, kemudian sel memperbanyak diri membentuk pseudoplasmodium, selanjutnya sel-sel beragregasi dan akan membentuk badan buah, akhirnya terbentuk sporokarp yang menghasilkan spora kembali. Contoh jamur ini adalah *Dictyostelium mucoroides* dan *D. discoideum*.

2. MYXOMYCETES

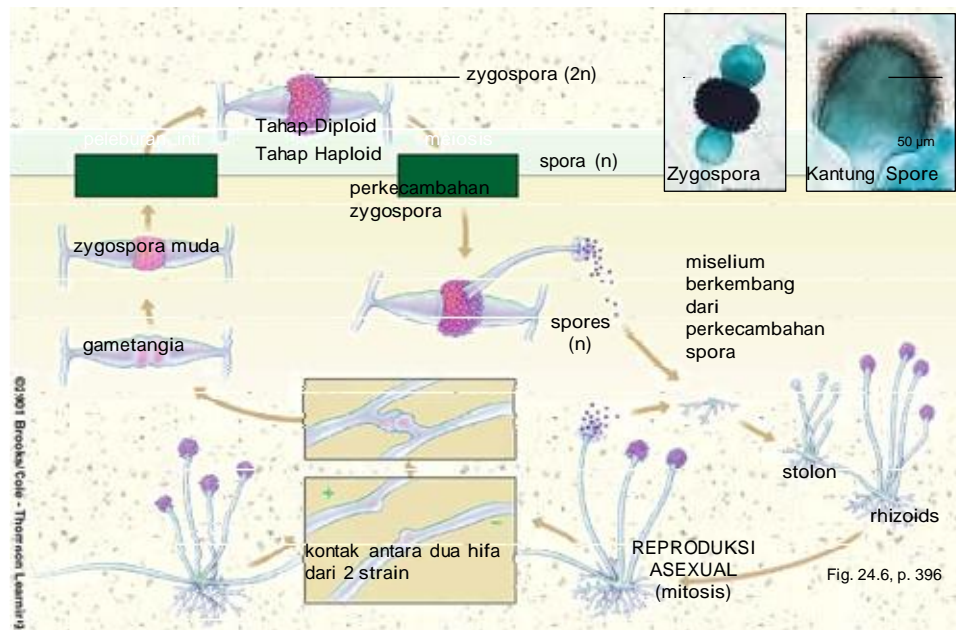
Jamur ini merupakan jamur lendir sejati. Jamur ini dapat ditemukan pada kayu terombak, guguran daun, kulit kayu, dan kayu. Bentuk vegetatifnya disebut plasmodium. Plasmodium merupakan masa sitoplasma berinti banyak dan tidak dibatasi oleh dinding sel yang kuat. Sel-selnya mempunyai gerakan amoeboid diatas substrat. Cara makan dengan fagositosis. Apabila plasmodium merayap ke tempat yang kering, akan terbentuk badan buah. Badan buah menghasilkan spora berinti satu yang diselubungi dinding sel. Spora berasal dari inti-inti plasmodium. Struktur pada semua stadium sama, yaitu seperti sel soenositik dengan adanya aliran sitoplasma.

Perkembang biakan jamur ini dimulai dari sel vegetatif haploid hasil perkecambahan spora. Sel tersebut setelah menggandakan diri akan mengadakan plasmogami dan kariogami yang menghasilkan sel diploid. Sel diploid yang berkembang menjadi plasmodium yang selnya multinukleat tetapi uniselular, selanjutnya membentuk badan buah yang berbentuk sporangium. Sporangium tersebut menghasilkan spora

haploid. Contoh jamur ini adalah *Lycogala epidendron*, *Cribraria rufa*, dan *Fuligo septica*.

3. PHYCOMYCETES

Jamur ini termasuk jamur benang yang mempunyai hifa tidak bersepta, sel vegetatif multinukleat, atau disebut thalus soenositik. Secara vegetatif dapat memperbanyak diri dengan potongan-potongan hifa, dan menghasilkan spora aseksual dalam sporangium (sporangiospora). Perkembang biakan secara generatif dengan membentuk spora seksual. Berdasarkan cara terbentuknya spora dibagi menjadi 2 macam, (a) Oospora, hasil peleburan antara gamet-gamet yang tidak sama besarnya, dan (b) Zygospora, hasil peleburan gamet-gamet yang sama besarnya. Berdasarkan tipe sporanya maka jamur ini juga dapat dikelompokkan dalam Oomycetes dan Zygomycetes.



Contoh jamur yang termasuk klas Oomycetes adalah *Saprolegnia* sp. (jamur air). dan jamur patogen seperti *Phytophthora infestans* (penyebab penyakit potato blight), *Plasmopora viticola* (penyebab penyakit embun tepung pada tanaman). Jamur yang termasuk Zygomycetes ada 3 order, yaitu Mucorales, Entomophthorales, dan

Zoopagales. Jamur yang penting dari kelompok Mucorales adalah *Mucor* sp. dan *Rhizopus* sp. *Rhizopus nigricans* adalah jamur roti, *R. oryzae*, *R. oligosporus*, dan *R. stolonifer* adalah jamur yang biasa digunakan pada fermentasi tempe.

4. ASCOMYCETES

Ciri jamur ini mempunyai hifa bersepta, dan dapat membentuk konidiofor. Secara vegetatif dapat berkembang biak dengan potongan hifa, dan pada beberapa jenis dapat menghasilkan konidia secara aseksual. Fase konidi jamur ini disebut juga fase imperfect. Fungi yang hanya dalam bentuk fase imperfect disebut fungi imperfecti (*Deuteromycetes*). Secara generatif dapat membentuk badan buah yang disebut askokarp, yang di dalamnya terdapat askus (kantong) yang menghasilkan askospora. Askospora merupakan hasil kariogami dan meiosis.

Pembentukan askospora ada 4 cara, yaitu:

1. Konyugasi langsung seperti pada khamir.
2. Pembelahan sel miselium.
3. Peleburan sel-sel kelamin kemudian oogonium menjadi askus.
4. Dari hife askogen timbul organ-organ tertentu yang mengandung inti rangkap.

Berdasarkan bentuknya dapat dibedakan 3 macam askus, yaitu:

- (a) *Cleistothecium*, bentuknya bulat, kasar dan tidak mempunyai lubang khusus untuk jalan keluarnya spora.
- (b) *Perithecium*, bentuk bulat seperti labu, mempunyai ostiol untuk jalan keluarnya spora.
- (c) *Apothecium*, bentuk seperti cawan atau mangkuk, bagian permukaan terdiri atas himenium yang mengandung askus-askus dalam lapisan palisade, dari lapisan tersebut dapat dilepaskan askospora.

Contoh jamur ini yang penting adalah genus *Aspergillus* dan *Penicillium*. Jamur ini umumnya dapat menghasilkan pigmen hitam, coklat, merah, dan hijau. Pigmen tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis-jenis jamur tersebut. Jamur ini umumnya dapat merombak bahan organik seperti kayu, buah, kulit, dan sisa-sisa tanaman. Spesies seperti *P. roqueforti* dan *P. camemberti* dapat digunakan untuk flavour (aroma). *Penicillium notatum* dan *Penicillium chrysogenum* untuk produksi

antibiotik penisilin. Jamur *Aspergillus niger* untuk fermentasi asam sitrat, *Aspergillus oryzae* dan *Aspergillus wentii* untuk fermentasi kecap.

5. BASIDIOMYCETES

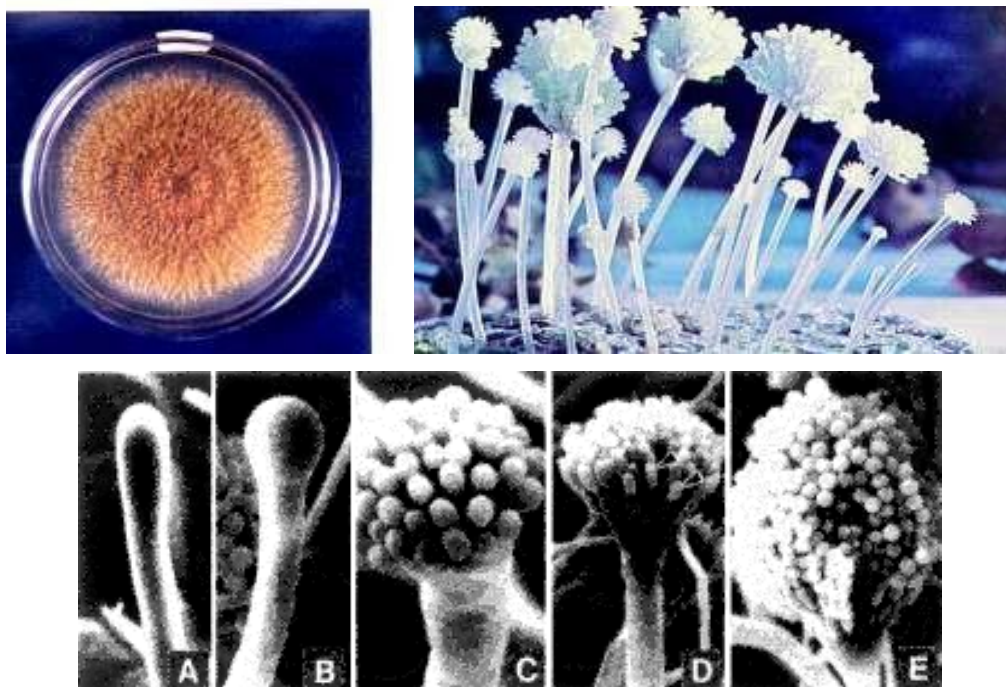
Ciri khusus jamur ini yaitu mempunyai basidium yang berbentuk seperti gada, tidak bersekat, dan mengandung 4 basidiospora di ujungnya. Pada jamur tertentu mempunyai hymenium atau lapisan-lapisan dalam badan buah. Hymenium terdapat pada mushroom, maka disebut juga Hymenomycetes.





6. DEUTEROMYCETES (FUNGI IMPERFECTI)

Semua jamur yang tidak mempunyai bentuk (fase) seksual dimasukkan ke dalam kelas Deuteromycetes. Jamur ini merupakan bentuk konidial dari klas Ascomycetes, dengan askus tidak bertutup atau hilang karena evolusi. Jamur ini juga tidak lengkap secara seksual, atau disebut paraseksual. Proses plasmogami, kariogami dan meiosis ada tetapi tidak terjadi pada lokasi tertentu dari badan vegetatif, atau tidak terjadi pada fase perkembangan tertentu. Miseliumnya bersifat homokariotik. Contoh jamur ini adalah beberapa spesies *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Monilia*.



Aspergillus sp.

D. IDENTIFIKASI JAMUR BENANG

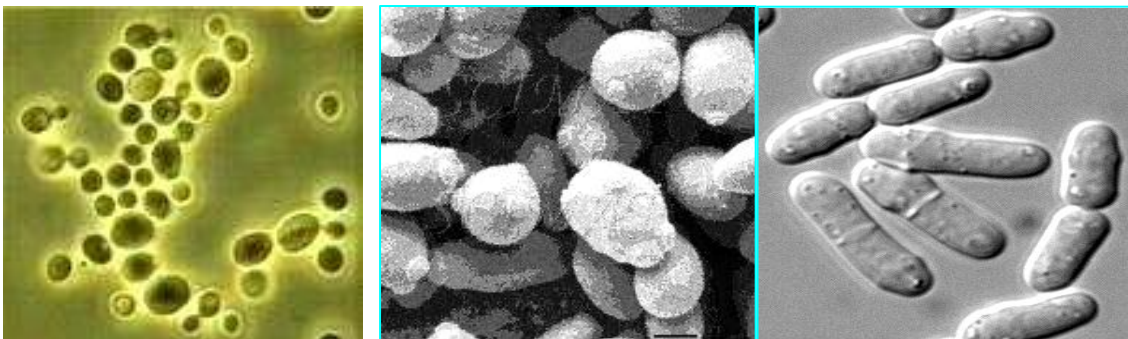
Untuk mengidentifikasi jamur benang lebih diutamakan pengujian sifat-sifat morfologinya, tetapi perlu juga pengujian sifat-sifat fisiologi. Hal-hal yang perlu diperhatikan pada pengamatan morfologi jamur benang adalah:

1. Tipe hifa, bersepta atau tidak, jernih atau keruh, dan berwarna atau tidak.
2. Tipe spora, seksual (oospora, zygospora, askospora, atau basidiospora), aseksual (sporangiospora, konidia, atau oidia)
3. Tipe badan buah, bentuk, ukuran, warna, letak spora atau konidi. Bentuk sporangiofor / konidiofor, kolumela / vesikula.
4. Bentuk khusus, misalnya adanya stolon, rhizoid, sel kaki, apofisa, klamidospora, sklerosia, dan lain-lain.

E. KHAMIR

Khamir atau disebut yeast, merupakan jamur bersel satu yang mikroskopik, tidak berflagela. Beberapa genera membentuk filamen (pseudomiselium). Cara hidupnya sebagai saprofit dan parasit. Hidup di dalam tanah atau debu di udara, tanah, daun-daun, nektar bunga, permukaan buah-buahan, di tubuh serangga, dan cairan yang mengandung gula seperti sirup, madu dan lain-lain.

Khamir berbentuk bulat (sferoid), elips, batang atau silindris, seperti buah jeruk, sosis, dan lain-lain. Bentuknya yang tetap dapat digunakan untuk identifikasi. Khamir dapat dimasukkan ke dalam klas Ascomycetes, Basidiomycetes dan Deuteromycetes.



Sel khamir

1. Perkembang biakan sel khamir

Perkembang biakan sel khamir dapat terjadi secara vegetatif maupun secara generatif (seksual). Secara vegetatif (aseksual), (a) dengan cara bertunas (*Candida* sp., dan khamir pada umumnya), (b) pembelahan sel (*Schizosaccharomyces* sp.), dan (c) membentuk spora aseksual (klas *Ascomycetes*). Secara generatif dengan carakonyugasi (reproduksi seksual). Konyugasi khamir ada 3 macam, yaitu (a) konyugasi isogami (*Schizosaccharomyces octosporus*), (b) konyugasi heterogami (*Zygosaccharomyces priorianus*), dan konyugasi askospora pada *Zygosaccharomyces* sp. dan *Schizosaccharomyces* sp. (sel vegetatif haploid), serta pada *Saccharomyces* sp., dan *Saccharomyces* sp. (sel vegetatif diploid).

2. Identifikasi khamir

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam mengidentifikasi khamir adalah:

1. Ada tidaknya askospora, kalau ada bagaimana pembentukannya (konyugasi isogami, heterogami, atau konyugasi askospora), bentuk, warna, ukuran, dan jumlah spora.
2. Bentuk, warna, dan ukuran sel vegetatifnya.
3. Cara reproduksi aseksual (bertunas, membelah, dsb)
4. Ada tidaknya filamen atau pseudomiselium.
5. Pertumbuhan dalam medium dan warna koloninya.
6. Sifat-sifat fisiologi, misalnya sumber karbon (C) dan nitrogen (N), kebutuhan vitamin, bersifat oksidatif atau fermentatif, atau keduanya, lipolitik, uji pembentukan asam, penggunaan pati, dan lain-lain.

VI. ALGAE DAN PROTOZOA

A. ALGAE

Di dunia mikrobial, algae termasuk eukariotik, umumnya bersifat fotosintetik dengan pigmen fotosintetik hijau (klorofil), coklat (fikosantin), biru kehijauan (fikobilin), dan merah (fikoeritrin). Morfologi algae ada yang berbentuk uniseluler, ada pula yang multiseluler tetapi belum ada pembagian tugas pada sel-sel komponennya. Algae dibedakan dari tumbuhan hanya karena hal tersebut.

1. Habitat algae

Habitat algae dapat berada di permukaan atau dalam perairan (aquatik) maupun daratan (terrestrial) yang terkena sinar matahari, tetapi kebanyakan di perairan.

Algae terrestrial dapat hidup di permukaan tanah, batang kayu, dan lain-lain. Algae darat dapat bersimbiose dengan jamur dan membentuk lumut kerak (Lichenes). Pada lichenes algae bertindak sebagai fikobion, sedangkan jamur sebagai mikobion. Algae yang dapat membentuk Lichenes adalah anggota dari Chlorophyta, Xanthophyta, dan algae hijau biru (Cyanobacteria) yang termasuk bakteri. Fikobion memanfaatkan sinar matahari untuk fotosintesa, sehingga dihasilkan bahan organik yang dapat dimanfaatkan oleh mikobion. Mikobion memberikan perlindungan dan berfungsi untuk menyerap mineral bagi fikobion. Pada beberapa kasus mikobion dapat menghasilkan faktor tumbuh yang dapat dimanfaatkan oleh fikobion. Lichenes sangat lambat pertumbuhannya, tetapi dapat hidup pada tempat ekstrem yang tidak bisa digunakan untuk tempat tumbuh jasad hidup lain. Sebagai contoh Lichenes dapat tumbuh pada batuan dengan keadaan yang sangat kering, panas dan miskin unsur hara atau bahan organik. Lichenes menghasilkan asam-asam organik yang dapat melarutkan mineral batuan.

Algae laut mempunyai peranan yang sangat penting di dalam siklus unsur-unsur di bumi, mengingat jumlah massanya yang sangat banyak yang kemungkinan lebih besar dari jumlah tumbuhan di daratan. Beberapa algae laut bersel satu bersimbiosa dengan hewan invertebrata tertentu yang hidup di laut, misalnya spon, koral, cacing laut. Kandungan beberapa pigmen fotosintetik pada algae memberikan warna yang spesifik.

Beberapa divisi algae dinamakan berdasarkan warna tersebut, misalnya algae hijau, algae merah dan algae coklat.

2. Morfologi algae

Algae uniseluler (mikroskopik) dapat betul-betul berupa sel tunggal, atau tumbuh dalam bentuk rantai atau filamen. Ada beberapa jenis algae yang sel-selnya membentuk koloni, misalnya pada *Volvox*, koloni terbentuk dari 500-60.000 sel. Koloni-koloni inilah yang dapat dilihat dengan mata biasa.

Algae multiseluler (makroskopik) mempunyai ukuran besar, sehingga dapat dilihat dengan mata biasa. Pada algae makroskopik biasanya mempunyai berbagai macam struktur khusus. Beberapa jenis algae mempunyai struktur yang disebut hold fast, yang mirip dengan sistem perakaran pada tanaman, yang berfungsi untuk menempelnya algae pada batuan atau substrat tertentu, tetapi tidak dapat digunakan untuk menyerap air atau nutrisi. Algae tidak memerlukan sistem transport nutrisi dan air, karena nutrisi dan air dapat dipenuhi dari seluruh sel algae. Struktur khusus yang lain adalah bladder atau pengapung, yang berguna untuk menempatkan algae pada posisi tepat untuk mendapatkan cahaya maksimum. Tangkai atau batang pada algae disebut stipe, yang berguna untuk mendukung blade, yaitu bagian utama algae yang berfungsi mengabsorpsi nutrisi dan cahaya.

3. Perkembangbiakan algae

Perkembangbiakan secara aseksual terjadi melalui proses yang disebut mitosis. Kebanyakan algae bersel tunggal berkembang biak dengan membelah diri, seperti pada bakteri (prokariot). Perbedaannya, pada pembelahan sel prokariot terjadi replikasi DNA, dan masing-masing sel hasil pembelahan mempunyai setengah DNA awal dan setengah DNA hasil replikasi. Sedangkan pada algae eukariot, terjadi penggandaan kromosom dengan proses yang lebih kompleks yang disebut mitosis. Masing-masing sel hasil pembelahan mempunyai kromosom turunannya.

Algae lain, khususnya yang berbentuk multiseluler, berkembang biak dengan berbagai cara. Beberapa jenis algae dapat mengadakan fragmentasi, yaitu pemotongan bagian filamen yang kemudian dapat tumbuh menjadi individu baru. Algae yang lain berkembang biak dengan menghasilkan spora. Spora algae mempunyai struktur yang

berbeda dengan endospora pada bakteri. Spora ada yang dapat bergerak aktif, yang disebut zoospora, dan ada yang tidak dapat bergerak aktif (nonmotil) disebut autospora.

Perkembangbiakan secara aseksual pada algae seperti pada jasad eukariotik lain, yaitu dengan terbentuknya dua jenis sel khusus yang disebut gamet yang bersifat haploid. Dua sel gamet tersebut melebur dan menghasilkan zygot yang bersifat diploid. Zygot mempunyai dua turunan masing-masing kromosom (2^n). Gamet hanya mempunyai satu turunan kromosom (1^n). Proses reduksi jumlah kromosom ini disebut meiosis.

Meiosis terjadi dalam masa-masa yang berbeda pada berbagai siklus hidup algae. Beberapa jenis algae selama siklus hidupnya terutama berada pada fase diploid, tetapi algae lain mempunyai fase zygot sampai meiosis yang sangat singkat, sehingga dalam siklus hidupnya terutama berada pada fase haploid. Pada algae yang berukuran besar (makroskopik) ada yang mempunyai 2 macam struktur reproduktif yang berbeda, yaitu gametofit (haploid) dan sporofit (diploid). Sebagai contoh adalah pada *Ulva* yang termasuk algae hijau.

4. Fisiologi algae

Pada umumnya algae bersifat fotosintetik, menggunakan H_2O sebagai donor elektron, pada keadaan tertentu beberapa algae dapat menggunakan H_2 untuk proses fotosintesa tanpa menghasilkan O_2 . Sifat fotosintetik pada algae dapat bersifat mutlak (obligat fototrof), jadi algae ini tumbuh di tempat-tempat yang terkena cahaya matahari. Beberapa algae bersifat kemoorganotrof, sehingga dapat mengkatabolisme gula-gula sederhana atau asam organik pada keadaan gelap. Senyawa organik yang banyak digunakan algae adalah asetat, yang dapat digunakan sebagai sumber C dan sumber energi. Algae tertentu dapat mengasimilasi senyawa organik sederhana dengan menggunakan sumber energi cahaya (fotoheterotrof). Pada algae tertentu dapat tidak terjadi proses fotosintesa sama sekali, dalam hal ini pemenuhan kebutuhan nutrisi didapatkan secara heterotrof.

Pada umumnya algae yang dapat melakukan fotosintesa normal, dapat tumbuh baik dengan cepat dalam keadaan gelap, dengan menghabiskan berbagai senyawa organik hasil fotosintesa. Pada keadaan gelap, proses fotosintesa berubah menjadi proses respirasi. Pada algae heterotrof, pemenuhan kebutuhan energi berasal dari

bahan organik yang ada di sekitarnya. Algae yang tidak ber dinding sel dapat memakan bakteri secara fagotrofik.

Algae leukofitik adalah algae yang kehilangan kloroplas. Hilangnya kloroplas tersebut bersifat tetap, atau tidak dapat kembali seperti semula. Hal ini banyak terjadi pada algae bersel tunggal seperti diatomeae, flagelata, dan algae hijau nonmotil. Algae leukofitik dapat dibuat, misalnya Euglena yang diperlakukan dengan streptomisin atau sinar ultra violet.

5. Pengelompokan algae

Berdasarkan tipe pigmen fotosintetik yang dihasilkan, bahan cadangan makanan di dalam sel, dan sifat morfologi sel, maka algae dikelompokkan menjadi 7 divisio utama, yaitu Chlorophyta, Euglenophyta, Chrysophyta, Pyrrophyta, Rhodophyta, Phaeophyta, dan Cryptophyta.

a. Divisio Chlorophyta

Ciri-ciri algae ini adalah berwarna hijau, mempunyai pigmen fotosintetik yang terdiri dari klorofil a dan b seperti pada tumbuhan, karoten, dan beberapa xantofil. Cadangan makanan berupa pati, dinding sel terdiri dari selulosa, xylan, manan, beberapa tidak ber dinding sel, dan mempunyai flagela 1 sampai 8 buah.

Algae hijau ini banyak terdapat di ekosistem perairan, dan diduga merupakan asal dari tumbuhan. Organisasi selnya dapat berbentuk uniseluler, multiseluler yang berbentuk koloni, dan multiseluler yang berbentuk filamen. Contoh algae hijau uniseluler yaitu order Volvocales, genera Chlamydomonas dan Volvox, yang bersifat motil karena berflagela, sedangkan algae yang berbentuk filamen adalah genera Ulothrix, Spirogyra dan Ulva. Bentuk Spirogyra sangat khusus karena kloroplasnya yang berbentuk spiral. Anggota algae ini yang sering ditanam sebagai rumput laut yaitu Scenedesmus, dan yang sering digunakan sebagai makanan kesehatan adalah Chlorella.

Pada siklus hidup Chlamydomonas, algae ini mengadakan reproduksi secara seksual dengan peleburan sel yang menghasilkan zygot. Setelah periode dorman akan terjadi meiosis sehingga terbentuk 4 sel yang kemudian memperbanyak diri dengan pembelahan mitosis. Pada perkembangbiakan secara aseksual, sel akan kehilangan flagela dan kemudian terjadi pembelahan secara mitosis menjadi 4, 8 atau 16 sel. Masing-masing sel keluar dari dinding sel dan kemudian tumbuh flagela.

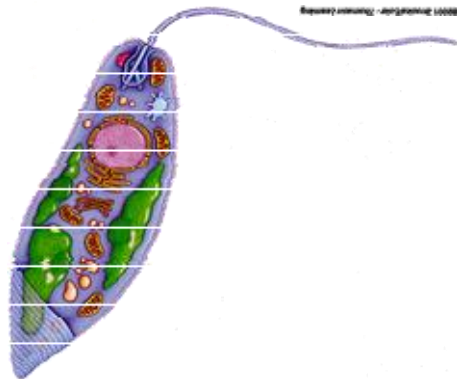


Perkembangbiakan algae yang berbentuk filamen terutama secara aseksual, yaitu dengan cara fragmentasi. Pada Spirogyra dapat berkembang secara seksual dengan membentuk tabung konjugasi, setelah isi sel melebur akan terbentuk zygot dan berkembang menjadi zygospora, dan pembelahan meiosis terjadi setelah zygospora berkecambah.

b. Divisio Euglenophyta

Algae ini berbentuk euglenoid, mempunyai pigmen fotosintetik yang terdiri klorofil a dan b sehingga tampak berwarna hijau dan mempunyai karoten serta xantofil. Perbedaan dengan algae hijau adalah cadangan makanannya yang berupa paramylon, yaitu polimer glukosa dengan ikatan B1,3. Semua anggota algae ini uniseluler, mempunyai 1-3 flagela dengan letak apical atau subapical, dan mempunyai membran plasma dengan struktur fleksibel yang disebut pelikel. Euglenophyta kebanyakan hidup di perairan atau tanah. Perkembangbiakannya dengan membelah diri, dan tidak dapat berkembangbiak secara seksual.

Algae *Euglena gracilis* mempunyai 2 flagela yang tidak sama panjang, dan bintik mata yang berwarna merah karena berisi karotenoid. Bintik mata berfungsi sebagai penerima cahaya untuk mengatur gerak aktif, sebagai respon sel terhadap arah dan intensitas cahaya. Algae ini tidak berdinding sel sehingga lentur.



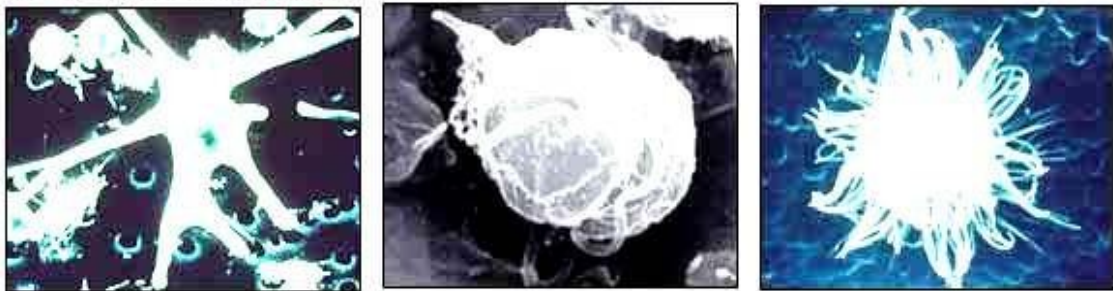
Euglena

c. Divisio Pyrrophyta

Anggota algae ini juga sering disebut dinoflagelata, mempunyai pigmen fotosintetik berupa klorofil a dan c, karoten dan beberapa jenis mengandung xantofil. Cadangan makanan terdiri atas pati atau minyak, dinding sel tersusun dari selulosa dan ada yang sangat keras disebut teka, tetapi ada yang tidak berdinding sel. Algae ini umumnya mempunyai alat gerak yang berupa 2 flagela.

Pyrrophyta umumnya berwarna merah atau coklat, karena adanya pigmen xantofil dan selnya berbentuk uniseluler. Algae ini terutama hidup di laut, beberapa anggotanya dapat mengeluarkan cahaya bioluminesen, maka sering disebut fire algae. Contoh algae ini Gonyaulax polyedra, yang menghasilkan toksin berwarna merah atau merah coklat yang dapat mematikan hewan-hewan laut.

© 2000 Brooks/Cole - Thomson Learning



Dinoflagelata

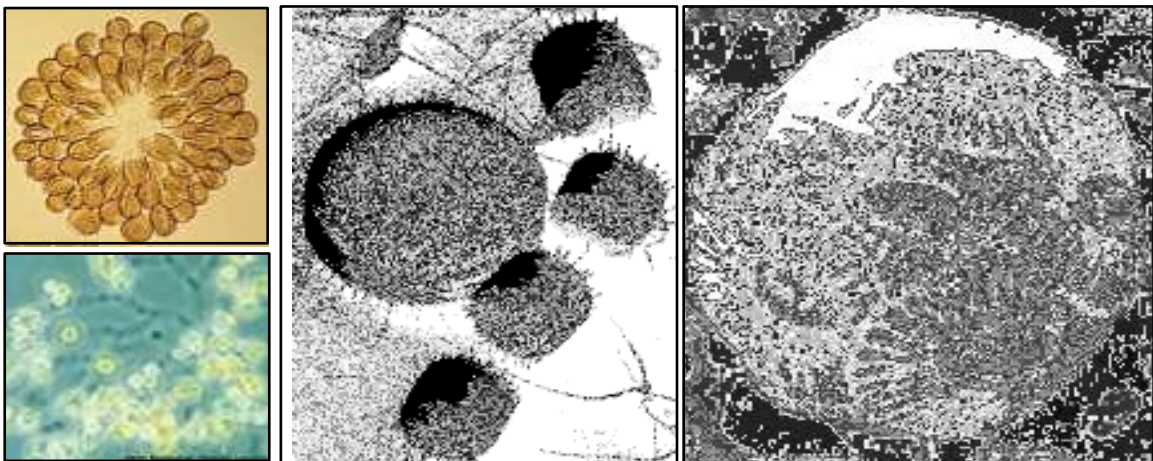
Dinoflagelata tertentu dapat tumbuh dengan memakan bakteri dan spesies algae lain. Beberapa spesies algae ini tidak mempunyai klorofil, dan bersifat heterotrof. Anggota algae ini ada yang bersifat miksotrofik, selain mampu mengadakan metabolisme sebagai heterotrof juga bersifat sebagai fotoautotrof.

d. Divisio Chrysophyta

Algae ini mempunyai pigmen yang berbeda-beda sehingga ada yang disebut algae kuning hijau (Xanthophyceae), dan algae keemasan (Chrysophyceae). Diatomae yang termasuk Bacillariophyceae juga termasuk anggota algae ini.

Pigmen fotosintetik terdiri atas klorofil a dan c, karoten, fukoxantin, dan beberapa xantofil. Bahan cadangan makanan algae ini berupa krisolaminarin, yaitu polimer glukosa dengan ikatan β . Dinding selnya tersusun dari selulosa, silika, dan kalsium karbonat. Pada beberapa jenis algae ini mempunyai 1 atau 2 flagela.

Dinding sel diatomae yang keras disebut frustule. Ada 2 macam bentuk frustule, yaitu centric dan pennate. Diatomae dengan bentuk pennate yang tidak berflagela, ada yang dapat bergerak diatas substrat padat karena adanya raphe. Raphe adalah celah memanjang dan sempit pada dinding sel sebagai tempat keluarnya sitoplasma. Gerakan timbul karena adanya arus protoplasma tersebut.



Diatomae

Dinding sel diatomae merupakan dua bagian yang saling menutupi. Dinding sel yang keras ini menjadi masalah saat mengadakan perkembangbiakan secara asexual, yaitu dengan cara membelah diri secara longitudinal. Sel baru hasil pembelahan terdiri setengah bagian sel sebelum pembelahan yang ditutup dengan setengah bagian sel yang baru terbentuk. Akibatnya setelah beberapa kali membelah, maka sel hasil pembelahan semakin mengecil ukurannya, kurang lebih 30 % lebih kecil dibandingkan dengan sel hasil perkembangbiakan secara seksual.

e. Divisio Phaeophyta

Phaeophyta disebut juga algae coklat, warna ini disebabkan xantofil yang dihasilkan melebihi karoten dan klorofil. Algae ini mempunyai pigmen fotosintetik yang terdiri atas klorofil a dan c, karoten, fukoxantin dan xantofil. Cadangan makanan di dalam selnya berupa laminarin dan manitol, dengan dinding sel tersusun dari selulosa, asam alginat, dan mukopolisakarida sulfat. Algae ini berflagela dua yang tidak sama, dengan letak lateral.

Anggota kelompok ini terdiri lebih dari 200 genera dan 1500 spesies, terutama hidup di permukaan laut yang dingin. Organisasi selnya multiseluler, dan dapat membentuk morfologi yang sangat besar dan kompleks seperti tumbuhan. Terdapat struktur seperti akar (hold fast), seperti daun (blade), seperti batang (stipe), dan pengapung (bladder), tetapi tidak ada sistem transport nutrisi dan cadangan makanan. Di tengah stipe terdapat sel-sel memanjang seperti jaringan vaskuler pada tumbuhan. Sel-sel tersebut berfungsi untuk membantu memindahkan karbohidrat hasil fotosintesa, dari blade ke tempat sel-sel yang kurang aktif fotosintesisnya seperti stipe dan hold fast.



Anggota algae ini yang banyak hidup di laut adalah genera *Sargassum*, *Macrocystis*, *Nereocystis*, dan *Laminaria*. Algae coklat ini dapat tumbuh dengan sangat cepat, misalnya *Nereocystis* dapat mencapai panjang 40 meter dalam satu musim. Kebanyakan cara perkembangbiakan algae coklat sama dengan algae hijau *Ulva*. Genera *Fucus* umumnya tumbuh di batu-batuan, dan dapat melapukkan batuan tersebut.

Jenis tertentu algae ini dapat digunakan untuk biosorpsi, atau penyerapan logam berat oleh biomassa. Hal ini disebabkan karena kandungan polisakarida pada dinding selnya dapat bersifat sebagai resin penukar ion (ion exchange). Algae ini juga dapat digunakan sebagai indikator adanya pencemaran logam berat seperti Cadmium, Cu, dan Pb, misalnya algae *Fucus vesiculosus*. Beberapa jenis algae coklat seperti *Macrocystis*, banyak mengandung bahan algin pada dinding selnya. Bahan algin ini mempunyai nilai ekonomis untuk bahan pembuat stabiliser dan emulsifier pada cat, tekstil, kertas, bahan makanan, dan bahan lain.

f. Divisio Rhodophyta

Sering disebut sebagai algae merah, karena pigmen fotosintetik didominasi oleh fikoeritrin. Pigmen lain terdiri atas klorofil a, dan pada beberapa jenis mempunyai klorofil d, fikosianin, karoten, dan beberapa xantofil. Bahan cadangan makanan di dalam selnya berupa pati floridean, yaitu polisakarida yang mirip amilopektin. Algae ini mempunyai dinding sel berupa selulosa, xylan, dan galaktan. Alat gerak yang berupa flagela tidak ada.

Umumnya algae merah hidup di lautan, terutama di daerah tropis, beberapa spesies hidup di daerah dingin. Adanya klorofil a, fikoeritrin dan fikosianin atau fikobilin merah, menyebabkan algae ini dapat mengabsorpsi dengan baik sinar hijau, violet dan biru yang dapat menembus air dalam. Jadi algae merahpun dapat tumbuh sampai kedalaman lebih dari 175 meter di perairan. Algae merah kebanyakan tumbuh menempel pada batuan dan substrat lain atau lagae lain, tetapi ada juga yang hidup mengapung dengan bebas. Anggota dari algae ini yang sering ditanam sebagai rumput laut adalah *Navicula*.



Dinding selnya terdiri dua lapis, lapisan bagian dalam kasar (rigid) dan menyerupai mikrofibril, sedangkan bagian luar berbentuk lapisan mucilaginous. Pada dinding selnya terdapat berbagai macam bahan selain selulosa, yaitu polisakarida sulfat, agar dan karagenin. Pada algae pembentuk koral, dapat mengumpulkan CaCO_3 di dalam dinding selnya, oleh karenanya jenis algae ini berperan penting dalam proses pembentukan karang.

g. Divisio Cryptophyta

Algae ini mempunyai pigmen fotosintetik klorofil a dan c, karoten, fikobilin dan xantofil yang terdiri dari aloxantin, krokokxantin, dan monadoxantin. Cadangan makanan terdiri pati, dinding selnya tidak mengandung selulosa, dan berflagela dua yang tidak sama dengan letak subapikal. Algae ini hidup di laut, dan anggotanya sangat sedikit apabila dibandingkan dengan algae lain. Cryptophyta berkembang biak secara aseksual, yaitu dengan pembelahan sel secara longitudinal.

B. PROTOZOA

Seperti algae, protozoa merupakan kelompok lain yang termasuk protista eukariotik. Walaupun kadang-kadang antara algae dan protozoa kurang jelas perbedaannya. Beberapa organisme mempunyai sifat antara algae dan protozoa. Sebagai contoh algae hijau Euglenophyta, selnya berflagela dan merupakan sel tunggal yang berklorofil, tetapi dapat mengalami kehilangan klorofil dan kemampuan untuk berfotosintesa. Semua spesies Euglenophyta yang mampu hidup pada nutrien kompleks tanpa adanya cahaya, beberapa ilmuwan memasukkannya ke dalam filum protozoa. Misalnya strain mutan algae genus *Chlamydomonas* yang tidak berklorofil, dapat dikelaskan sebagai protozoa genus *Polytoma*. Hal ini sebagai contoh bagaimana sulitnya membedakan dengan tegas antara algae dan protozoa.

Protozoa dibedakan dari prokariot karena ukurannya yang lebih besar, dan selnya eukariotik. Protozoa dibedakan dari algae karena tidak berklorofil, dibedakan dari jamur karena dapat bergerak aktif dan tidak berdinding sel, serta dibedakan dari jamur lendir karena tidak dapat membentuk badan buah.

1. Habitat Protozoa

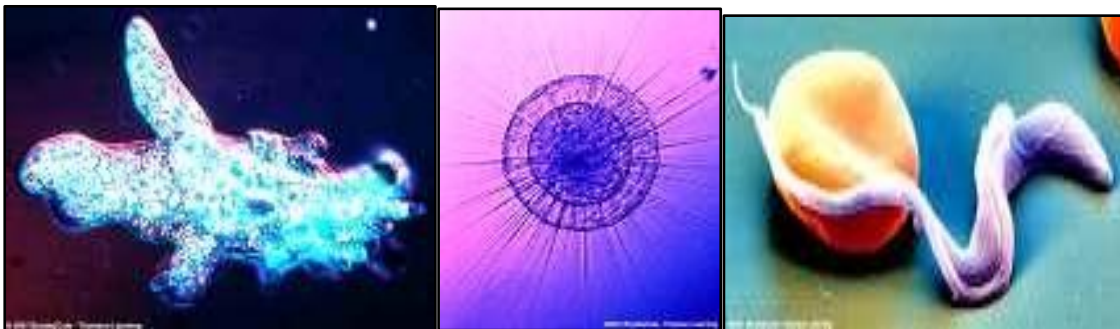
Protozoa umumnya hidup bebas dan terdapat di lautan, lingkungan air tawar, atau daratan. Beberapa spesies bersifat parasitik, hidup pada organisme inang. Inang

protozoa yang bersifat parasit dapat berupa organisme sederhana seperti algae, sampai vertebrata yang kompleks, termasuk manusia. Beberapa spesies dapat tumbuh di dalam tanah atau pada permukaan tumbuh-tumbuhan. Semua protozoa memerlukan kelembaban yang tinggi pada habitat apapun.

Beberapa jenis protozoa laut merupakan bagian dari zooplankton. Protozoa laut yang lain hidup di dasar laut. Spesies yang hidup di air tawar dapat berada di danau, sungai, kolam, atau genangan air. Ada pula protozoa yang tidak bersifat parasit yang hidup di dalam usus termit atau di dalam rumen hewan ruminansia.

2. Morfologi Protozoa

Protozoa tidak mempunyai dinding sel, dan tidak mengandung selulosa atau khitin seperti pada jamur dan algae. Kebanyakan protozoa mempunyai bentuk spesifik, yang ditandai dengan fleksibilitas ektoplasma yang ada dalam membran sel. Beberapa jenis protozoa seperti Foraminifera mempunyai kerangka luar sangat keras yang tersusun dari Si dan Ca. Beberapa protozoa seperti Diffugia, dapat mengikat partikel mineral untuk membentuk kerangka luar yang keras. Radiolarian dan Heliozoan dapat menghasilkan skeleton. Kerangka luar yang keras ini sering ditemukan dalam bentuk fosil. Kerangka luar Foraminifera tersusun dari CaO_2 sehingga koloninya dalam waktu jutaan tahun dapat membentuk batuan kapur.



Semua protozoa mempunyai vakuola kontraktil. Vakuola dapat berperan sebagai pompa untuk mengeluarkan kelebihan air dari sel, atau untuk mengatur tekanan osmosa. Jumlah dan letak vakuola kontraktil berbeda pada setiap spesies.

Protozoa dapat berada dalam bentuk vegetatif (trophozoite), atau bentuk istirahat yang disebut kista. Protozoa pada keadaan yang tidak menguntungkan dapat membentuk kista untuk mempertahankan hidupnya. Saat kista berada pada keadaan yang menguntungkan, maka akan berkecambah menjadi sel vegetatifnya. Protozoa

merupakan sel tunggal, yang dapat bergerak secara khas menggunakan pseudopodia (kaki palsu), flagela atau silia, namun ada yang tidak dapat bergerak aktif. Berdasarkan alat gerak yang dipunyai dan mekanisme gerakan inilah protozoa dikelompokkan ke dalam 4 kelas. Protozoa yang bergerak secara amoeboid dikelompokkan ke dalam Sarcodina, yang bergerak dengan flagela dimasukkan ke dalam Mastigophora, yang bergerak dengan silia dikelompokkan ke dalam Ciliophora, dan yang tidak dapat bergerak seras merupakan parasit hewan maupun manusia dikelompokkan ke dalam Sporozoa.

Mulai tahun 1980, oleh Committee on Systematics and Evolution of the Society of Protozoologist, mengklasifikasikan protozoa menjadi 7 kelas baru, yaitu Sarcomastigophora, Ciliophora, Acetospora, Apicomplexa, Microspora, Myxospora, dan Labyrinthomorpha. Pada klasifikasi yang baru ini, Sarcodina dan Mastigophora digabung menjadi satu kelompok Sarcomastigophora, dan Sporozoa karena anggotanya sangat beragam, maka dipecah menjadi lima kelas.

Contoh protozoa yang termasuk Sarcomastigophora adalah genera Monosiga, Bodo, Leishmania, Trypanosoma, Giardia, Opalina, Amoeba, Entamoeba, dan Diffugia. Anggota kelompok Ciliophora antara lain genera Didinium, Tetrahymena, Paramecium, dan Stentor. Contoh protozoa kelompok Acetospora adalah genera Paramyxa. Apicomplexa beranggotakan genera Eimeria, Toxoplasma, Babesia, Theileria. Genera Metchnikovella termasuk kelompok Microspora. Genera Myxidium dan Kudoa adalah contoh anggota kelompok Myxospora.

3. Fisiologi Protozoa

Protozoa umumnya bersifat aerobik nonfotosintetik, tetapi beberapa protozoa dapat hidup pada lingkungan anaerobik (misal pada saluran pencernaan manusia atau ruminansia). Protozoa aerobik mempunyai mitokondria yang mengandung enzim untuk metabolisme aerobik, dan untuk menghasilkan ATP melalui proses transfer elektron dan atom hidrogen ke oksigen.

Protozoa umumnya mendapatkan makanan dengan memangsa organisme lain (bakteri) atau partikel organik, baik secara fagositosis maupun pinositosis. Protozoa yang hidup di lingkungan air, maka oksidogen dan air maupun molekul-molekul kecil dapat berdifusi melalui membran sel. Senyawa makromolekul yang tidak dapat berdifusi melalui membran, dapat masuk sel secara pinositosis. Tetapan cairan masuk melalui

saluran pada membran sel, saat saluran penuh kemudian masuk ke dalam membran yang berikatan dengan vakuola. Vakuola kecil terbentuk, kemudian dibawa ke bagian dalam sel, selanjutnya molekul dalam vakuola dipindahkan ke sitoplasma.

Partikel makanan yang lebih besar dimakan secara fagositosis oleh sel yang bersifat amoeboid dan anggota lain dari kelompok Sarcodina. Partikel dikelilingi oleh bagian membran sel yang fleksibel untuk ditangkap kemudian dimasukkan ke dalam sel oleh vakuola besar (vakuola makanan). Ukuran vakuola mengecil kemudian mengalami pengasaman. Lisosom memberikan enzim ke dalam vakuola makanan tersebut untuk mencernakan makanan, kemudian vakuola membesar kembali. Hasil pencernaan makanan didispersikan ke dalam sitoplasma secara pinositosis, dan sisa yang tidak tercerna dikeluarkan dari sel. Cara inilah yang digunakan protozoa untuk memangsa bakteri.

Pada kelompok Ciliata, ada organ mirip mulut di permukaan sel yang disebut sitosom. Sitosom dapat digunakan menangkap makanan dengan dibantu silia. Setelah makanan masuk ke dalam vakuola makanan kemudian dicernakan, sisanya dikeluarkan dari sel melalui sitopig yang terletak disamping sitosom.

4. Perkembangbiakan Protozoa

Protozoa dapat berkembang biak secara seksual dan aseksual. Secara aseksual protozoa dapat mengadakan pembelahan diri menjadi 2 anak sel (biner), tetapi pada Flagelata pembelahan terjadi secara longitudinal dan pada Ciliata secara transversal. Beberapa jenis protozoa membelah diri menjadi banyak sel (schizogony). Pada pembelahan schizogony, inti membelah beberapa kali kemudian diikuti pembelahan sel menjadi banyak sel anakan. Perkembangbiakan secara seksual dapat melalui cara konjugasi, autogami, dan sitogami.

Protozoa yang mempunyai habitat atau inang lebih dari satu dapat mempunyai beberapa cara perkembangbiakan. Sebagai contoh spesies Plasmodium dapat melakukan schizogony secara aseksual di dalam sel inang manusia, tetapi dalam sel inang nyamuk dapat terjadi perkembangbiakan secara seksual. Protozoa umumnya berada dalam bentuk diploid.

Protozoa umumnya mempunyai kemampuan untuk memperbaiki selnya yang rusak atau terpotong. Beberapa Ciliata dapat memperbaiki selnya yang tinggal 10 % dari volume sel asli asalkan inti selnya tetap ada.

VII. ENZIM MIKROBA

Enzim adalah katalisator organik (biokatalisator) yang dihasilkan oleh sel. Enzim berfungsi seperti katalisator anorganik, yaitu untuk mempercepat reaksi kimia. Setelah reaksi berlangsung, enzim tidak mengalami perubahan jumlah, sehingga jumlah enzim sebelum dan setelah reaksi adalah tetap. Enzim mempunyai selektivitas dan spesifitas yang tinggi terhadap reaktan yang direaksikan dan jenis reaksi yang dikatalisasi.

A. MEKANISME BEKERJANYA ENZIM

Enzim meningkatkan kecepatan reaksi dengan cara menurunkan energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi yang diperlukan untuk mengaktifkan suatu reaktan sehingga dapat bereaksi untuk membentuk senyawa lain. Energi potensial hasil reaksi menjadi lebih rendah dari pada pereaksi, sehingga kesetimbangan reaksi menuju ke hasil reaksi. Adanya enzim menyebabkan energi aktivasi menjadi lebih rendah, tetapi enzim tidak mempengaruhi letak kesetimbangan reaksi.

Saat berlangsungnya reaksi enzimatik terjadi ikatan sementara antara enzim dengan substratnya (reaktan). Ikatan sementara ini bersifat labil dan hanya untuk waktu yang singkat saja. Selanjutnya ikatan enzim-substrat akan pecah menjadi enzim dan hasil akhir. Enzim yang terlepas kembali setelah reaksi dapat berfungsi lagi sebagai biokatalisator untuk reaksi yang sama.



Keterangan: E : Enzim, S: Substrat (reaktan), ES: ikatan sementara, P: Hasil reaksi

Sistem enzim-substrat untuk tiap-tiap reaksi enzimatik bersifat khusus. Kestabilan ikatan enzim-substrat ditentukan oleh konstanta Michaelis (K_m).

B. STRUKTUR ENZIM

Pada umumnya enzim tersusun dari protein. Protein penyusun enzim dapat berupa protein sederhana atau protein yang terikat pada gugusan non-protein. Banyak enzim yang hanya terdiri protein saja, misal tripsin.

Dialisis enzim dapat memisahkan bagian-bagian protein, yaitu bagian protein yang disebut apoenzim dan bagian nonprotein yang berupa koenzim, gugus prostetis dan kofaktor ion logam. Masing-masing bagian tersebut apabila terpisah menjadi tidak aktif. Apoenzim apabila bergabung dengan bagian nonprotein disebut holoenzim yang bersifat aktif sebagai biokatalisator.

Koenzim dan gugus prostetik berfungsi sama. Koenzim adalah bagian yang terikat secara lemah pada apoenzim (protein). Gugus prostetik adalah bagian yang terikat dengan kuat pada apoenzim. Koenzim berfungsi menentukan jenis reaksi kimia yang dikatalisis enzim. Ion logam merupakan komponen yang sangat penting, diperlukan untuk memantapkan struktur protein dengan adanya interaksi antar muatan.

C. PENGGOLONGAN ENZIM

Enzim dapat digolongkan berdasarkan tempat bekerjanya, substrat yang dikatalisis, daya katalisisnya, dan cara terbentuknya. Umumnya pemberian nama enzim didasarkan atas nama substrat yang dikatalisis atau daya katalisisnya dengan penambahan kata -ase. Misal proteinase adalah enzim yang dapat mengkatalisis pemecahan protein.

1. Penggolongan enzim berdasarkan tempat bekerjanya

a. Endoenzim

Endoenzim disebut juga enzim intraseluler, yaitu enzim yang bekerjanya di dalam sel. Umumnya merupakan enzim yang digunakan untuk proses sintesis di dalam sel dan untuk pembentukan energi (ATP) yang berguna untuk proses kehidupan sel, misal dalam proses respirasi.

b. Eksoenzim

Eksoenzim disebut juga enzim ekstraseluler, yaitu enzim yang bekerjanya di luar sel. Umumnya berfungsi untuk “mencernakan” substrat secara hidrolisis, untuk dijadikan molekul yang lebih sederhana dengan BM lebih rendah sehingga dapat masuk melewati membran sel. Energi yang dibebaskan pada reaksi pemecahan substrat di luar sel tidak digunakan dalam proses kehidupan sel.

2. Penggolongan enzim berdasarkan daya katalisis

a. Oksidoreduktase

Enzim ini mengkatalisis reaksi oksidasi-reduksi, yang merupakan pemindahan elektron, hidrogen atau oksigen. Sebagai contoh adalah enzim elektron transfer oksidase dan hidrogen peroksidase (katalase). Ada beberapa macam enzim elektron transfer oksidase, yaitu enzim oksidase, oksigenase, hidroksilase dan dehidrogenase. Enzim-enzim tersebut mengkatalisis reaksi-reaksi sebagai berikut:

- Oksidase mengkatalisis 2 macam reaksi:
$$\text{O}_2 + (4\text{e}^- + 4\text{H}^+) \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$$
$$\text{O}_2 + (2\text{e}^- + 4\text{H}^+) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$$
- Oksigenase (transferase oksigen): $\text{O}_2 + 2 \text{ substrat} \longrightarrow 2 \text{ substrat-O}$
- Hidroksilase : $\text{substrat} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{substrat-O}$
$$2 \text{ koenzim-H} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{ koenzim} + \text{H}_2\text{O}$$
- Dehidrogenase: $\text{NaNO}_3 + (\text{e}^- + \text{H}^+) \longrightarrow \text{NaNO}_2$
$$\text{Na}_2\text{SO}_4 + (\text{e}^- + \text{H}^+) \longrightarrow \text{H}_2\text{S}$$
$$\text{Na}_2\text{CO}_3 + (\text{e}^- + \text{H}^+) \longrightarrow \text{CH}_4$$
- Hidrogen peroksidase: $2 \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

b. Transferase

Transferase mengkatalisis pemindahan gugusan molekul dari suatu molekul ke molekul yang lain. Sebagai contoh adalah beberapa enzim sebagai berikut:

- Transaminase adalah transferase yang memindahkan gugusan amina.
- Transfosforilase adalah transferase yang memindahkan gugusan fosfat.
- Transasilase adalah transferase yang memindahkan gugusan asil.

c. Hidrolase

Enzim ini mengkatalisis reaksi-reaksi hidrolisis, dengan contoh enzim adalah:

- Karboksilesterase adalah hidrolase yang menghidrolisis gugusan ester karboksil.
- Lipase adalah hidrolase yang menghidrolisis lemak (ester lipida).
- Peptidase adalah hidrolase yang menghidrolisis protein dan polipeptida.

d. Liase

Enzim ini berfungsi untuk mengkatalisis pengambilan atau penambahan gugusan dari suatu molekul tanpa melalui proses hidrolisis, sebagai contoh adalah:

- L malat hidrolase (fumarase) yaitu enzim yang mengkatalisis reaksi pengambilan air dari malat sehingga dihasilkan fumarat.
- Dekarboksilase (dekarboksilase) yaitu enzim yang mengkatalisis reaksi pengambilan gugus karboksil.

e. Isomerase

Isomerase meliputi enzim-enzim yang mengkatalisis reaksi isomerisasi, yaitu:

- Rasemase, merubah l-alanin \rightleftharpoons D-alanin
- Epimerase, merubah D-ribulosa-5-fosfat \rightleftharpoons D-xylulosa-5-fosfat
- Cis-trans isomerase, merubah transmetinal \rightleftharpoons cisrentolal
- Intramolekul ketol isomerase, merubah D-gliseraldehid-3-fosfat \rightleftharpoons dihidroksi aseton fosfat
- Intramolekul transferase atau mutase, merubah metilmalonil-CoA \rightleftharpoons suksinil-CoA

f. Ligase

Enzim ini mengkatalisis reaksi penggabungan 2 molekul dengan dibebaskannya molekul pirofosfat dari nukleosida trifosfat, sebagai contoh adalah enzim asetat=CoA-SH ligase yang mengkatalisis reaksi sebagai berikut:



g. Enzim lain dengan tatanama berbeda

Ada beberapa enzim yang penamaannya tidak menurut cara di atas, misalnya enzim pepsin, tripsin, dan sebagainya serta enzim yang termasuk enzim permease. Permease adalah enzim yang berperan dalam menentukan sifat selektif permeabel dari membran sel.

3. Penggolongan enzim berdasar cara terbentuknya

a. Enzim konstitutif

Di dalam sel terdapat enzim yang merupakan bagian dari susunan sel normal, sehingga enzim tersebut selalu ada umumnya dalam jumlah tetap pada sel hidup. Walaupun demikian ada enzim yang jumlahnya dipengaruhi kadar substratnya, misalnya

enzim amilase. Sedangkan enzim-enzim yang berperan dalam proses respirasi jumlahnya tidak dipengaruhi oleh kadar substratnya.

b. Enzim adaptif

Perubahan lingkungan mikroba dapat menginduksi terbentuknya enzim tertentu. Induksi menyebabkan kecepatan sintesis suatu enzim dapat dirangsang sampai beberapa ribu kali. Enzim adaptif adalah enzim yang pembentukannya dirangsang oleh adanya substrat. Sebagai contoh adalah enzim beta galaktosidase yang dihasilkan oleh bakteri E.coli yang ditumbuhkan di dalam medium yang mengandung laktosa. Mula-mula E. coli tidak dapat menggunakan laktosa sehingga awalnya tidak nampak adanya pertumbuhan (fase lag/fase adaptasi panjang) setelah beberapa waktu baru menampakkan pertumbuhan. Selama fase lag tersebut E. coli membentuk enzim beta galaktosidase yang digunakan untuk merombak laktosa.

D. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI REAKSI ENZIMATIK

Protein adalah bagian utama enzim yang dihasilkan sel, maka semua hal yang dapat mempengaruhi protein dan sel akan berpengaruh terhadap reaksi enzimatik.

1. Substrat (reaktan)

Kecepatan reaksi enzimatik umumnya dipengaruhi kadar substrat. Penambahan kadar substrat sampai jumlah tertentu dengan jumlah enzim yang tetap, akan mempercepat reaksi enzimatik sampai mencapai maksimum. Penambahan substrat selanjutnya tidak akan menambah kecepatan reaksi.

Kecepatan reaksi enzimatik juga dipengaruhi kadar enzim, jumlah enzim yang terikat substrat (ES) dan konstanta Michaelis (K_m). K_m menggambarkan mesetimbangan disosiasi kompleks ES menjadi enzim dan substrat. Nilai K_m kecil berarti enzim mempunyai afinitas tinggi terhadap substrat maka kompleks ES sangat mantap, sehingga kesetimbangan reaksi kearah kompleks ES. Apabila nilai K_m besar berarti enzim mempunyai afinitas rendah terhadap substrat, sehingga kesetimbangan reaksi kearah E + S.

2. Suhu

Seperti reaksi kimia pada umumnya, maka reaksi enzimatik dipengaruhi oleh suhu. Kenaikan suhu sampai optimum akan diikuti pula oleh kenaikan kecepatan reaksi enzimatik. Kepekaan enzim terhadap suhu pada keadaan suhu melebihi optimum

disebabkan terjadinya perubahan fisikokimia protein penyusun enzim. Umumnya enzim mengalami kerusakan (denaturasi) pada suhu diatas 50°C. Walaupun demikian ada beberapa enzim yang tahan terhadap suhu tinggi, misalnya taka-diastase dan tripsin.

3. Kemasaman (pH)

pH dapat mempengaruhi aktivitas enzim. Daya katalisis enzim menjadi rendah pada pH rendah maupun tinggi, karena terjadinya denaturasi protein enzim. Enzim mempunyai gugus aktif yang bermuatan positif (+) dan negatif (-). Aktivitas enzim akan optimum kalau terdapat keseimbangan antara kedua muatannya. Pada keadaan masam muatannya cenderung positif, dan pada keadaan basis muatannya cenderung negatif sehingga aktivitas enzimnya menjadi berkurang atau bahkan menjadi tidak aktif. pH optimum untuk masing-masing enzim tidak selalu sama. Sebagai contoh amilase jamur mempunyai pH optimum 5,0, arginase mempunyai pH optimum 10.

4. Penghambat enzim (inhibitor)

Inhibitor enzim adalah zat atau senyawa yang dapat menghambat enzim dengan beberapa cara penghambatan sebagai berikut:

a. Penghambat bersaing (kompetitif)

Penghambatan disebabkan oleh senyawa tertentu yang mempunyai struktur mirip dengan substrat saat reaksi enzimatik akan terjadi. Misalnya asam malonat dapat menghambat enzim dehidrogenase suksinat pada pembentukan asam fumarat dari suksinat. Struktur asam suksinat mirip dengan asam malonat. Dalam reaksi ini asam malonat bersaing dengan asam suksinat (substrat) untuk dapat bergabung dengan bagian aktif protein enzim dehidrogenase. Penghambatan oleh inhibitor dapat dikurangi dengan menambah jumlah substrat sampai berlebihan. Daya penghambatannya dipengaruhi oleh kadar penghambat, kadar substrat dan aktivitas relatif antara penghambat dan substrat.

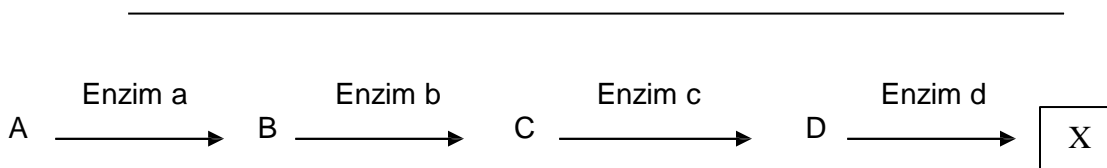
b. Penghambat tidak bersaing (non-kompetitif)

Zat-zat kimia tertentu mempunyai afinitas yang tinggi terhadap ion logam penyusun enzim. Senyawa-senyawa seperti sianida, sulfida, natrium azida, dan karbon monoksida adalah senyawa penghambat untuk enzim yang mengandung Fe, yaitu dengan terjadinya reaksi antara senyawa-senyawa tersebut dengan ion Fe yang menyebabkan enzim menjadi tidak aktif. Merkuri (Hg) dan perak (Ag) merupakan penghambat enzim yang mengandung gugusan sulfhidril (-SH).

Pada penghambatan nonkompetitif tidak terjadi persaingan antara zat penghambat dengan substrat. Misalnya enzim sitokrom oksidase dihambat oleh CO (karbon monooksida) dengan mengikat Fe yang merupakan gugusan aktif enzim tersebut. Penghambatan nonkompetitif tidak dapat dikurangi dengan penambahan jumlah substrat, oleh karena daya penghambatannya dipengaruhi oleh kadar penghambat dan afinitas penghambat terhadap enzim.

c. Penghambat umpan balik (feed back inhibitor)

Penghambatan umpan balik disebabkan oleh hasil akhir suatu rangkaian reaksi enzimatik yang menghambat aktifitas enzim pada reaksi pertama. Hasil akhir reaksi juga mempengaruhi pembentukan enzim, yang dapat digambarkan sebagai berikut:

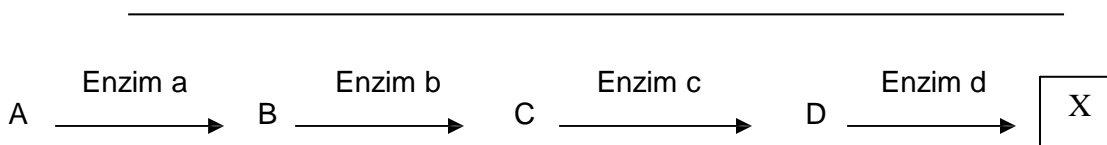


Keterangan: A,B,C,D: substrat enzim a,b,c,d.

X: hasil akhir reaksi enzimatik yang menghambat sintesis enzim a.

d. Penghambat represor

Represor adalah hasil akhir suatu rangkaian reaksi enzimatik yang dapat mempengaruhi atau mengatur pembentukan enzim-enzim pada reaksi sebelumnya. Gambaran skematik reaksinya adalah sebagai berikut:



Keterangan: A,B,C,D: substrat enzim a,b,c,d.

X: hasil akhir reaksi enzimatik yang menghambat sintesis enzim a,b,c,d.

e. Penghambat alosterik

Penghambat alosterik adalah penghambat yang dapat mempengaruhi enzim alosterik. Enzim alosterik adalah enzim yang mempunyai dua bagian aktif, yaitu bagian aktif yang menangkap substrat dan bagian yang menangkap penghambat. Apabila ada

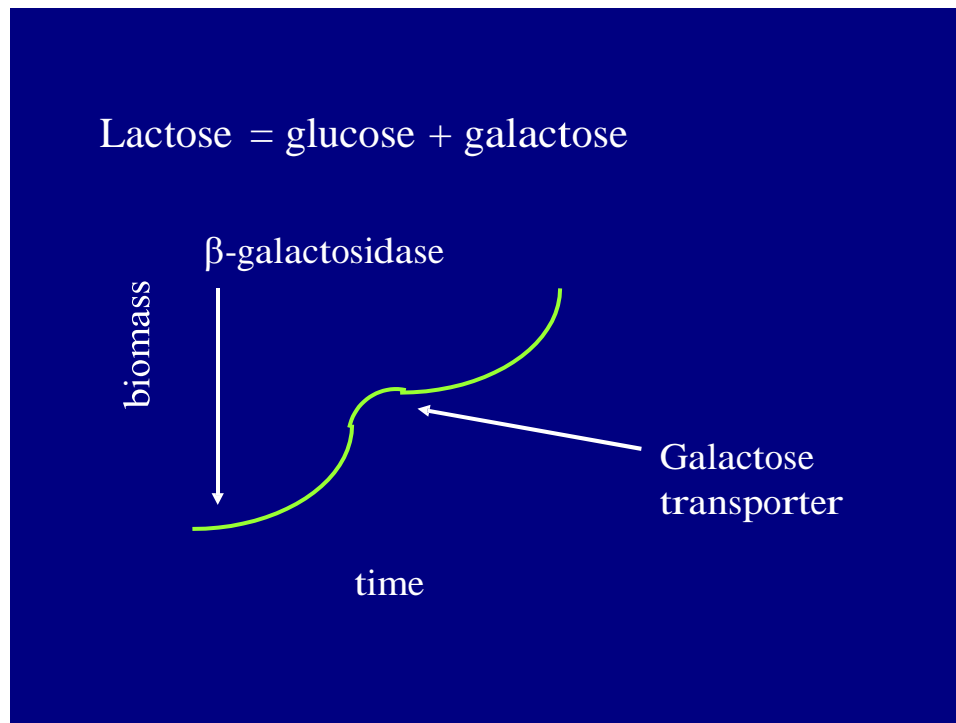
senyawa yang dapat memasuki bagian yang menangkap penghambat maka enzim menjadi tidak aktif, senyawa penghambat tersebut merupakan penghambat alosterik. Struktur senyawa penghambat alosterik tidak mirip dengan struktur substrat. Pengikatan penghambat alosterik pada enzim menyebabkan enzim tidak aktif, sehingga substrat tidak dapat dikatalisis dan tidak menghasilkan produk. Apabila enzim menangkap substrat maka penghambat tidak dapat terikat pada enzim, sehingga enzim dapat aktif mereaksikan substrat menjadi produk.

5. Aktivator (penggiat) atau kofaktor

Aktivator atau kofaktor adalah suatu zat yang dapat mengaktifkan enzim yang semula belum aktif. Enzim yang belum aktif disebut pre-enzim atau zymogen (simogen). Kofaktor dapat berbentuk ion-ion dari unsur H, Fe, Cu, Mg, Mo, Zn, Co, atau berupa koenzim, vitamin, dan enzim lain.

7. Penginduksi (induktor)

Induktor adalah suatu substrat yang dapat merangsang pembentukan enzim. Sebagai contoh adalah laktosa dapat menginduksi pembentukan enzim beta galaktosidase.



VIII. BIOENERGETIK MIKROBA

Bioenergetik mikroba mempelajari penghasilan dan penggunaan energi oleh mikroba. Mikroba melakukan proses metabolisme yang merupakan serangkaian reaksi kimia yang luar biasa banyaknya. Proses ini terdiri atas katabolisme yang merupakan proses perombakan bahan disertai pembebasan energi (reaksi eksergonik), dan anabolisme yaitu merupakan proses biosintesis yang memerlukan energi (reaksi endergonik).

A. BIOOKSIDASI DAN PEMINDAHAN ENERGI

Energi yang berasal dari cahaya harus diubah menjadi energi kimia sebelum digunakan dalam reaksi endergonik. Dalam sel, energi kimia terdapat dalam bentuk gugus organik berenergi tinggi. Gugus ini mengandung S atau P.

Adenosin trifosfat (ATP) salah satu gugus berenergi tinggi yang terpenting. Bila kedua gugus fosfatnya dihidrolisis masing-masing menghasilkan 12000 kal/fosfat, sedang fosfat yang ketiga hanya menghasilkan 1500 kal. Energi yang dibebaskan ATP tergantung pada keadaan hidrolisisnya, terutama pH dan kadar reaktan.

Meskipun ATP mengandung 2 fosfat berenergi tinggi, dalam reaksi umumnya hanya satu fosfat berenergi tinggi digunakan untuk aktivasi.

Oksidasi dalam sel dikatalisis oleh enzim yang mempunyai kofaktor atau gugus prostetis penerima proton atau elektron dari substrat dan memberikannya kepada asektor lewat perantara yang mempunyai potensial redoks (E_o') lebih tinggi dari pada donornya. Pembawa elektron yang terpenting adalah NAD, FMN, dan sitokrom.

1. Nikotinamid adenin dinukleotid (NAD)

NAD berfungsi menerima hidrogen dari substrat yang direduksi

2. Flavin adenin mononukleotida (FMN) dan flavin adenin dinukleotida (FAD)

Senyawa ini menerima hidrogen dari $NADH_2$ atau langsung dari substrat.

3. Sitokrom (Cyt a, b, c)

Setiap sitokrom mempunyai E_o' yang berbeda-beda, tetapi semuanya mengandung haem sebagai gugus prostetisnya dengan Fe sebagai aseptor elektron. Oksigen bereaksi dengan elektron menjadi ion O^- dan dengan ion H^+ membentuk H_2O .

Gambar berikut menunjukkan reaksi oksidasi substrat lewat sistem transpor elektron, dengan nilai E_o' masing-masing pembawa dan tempat reaksi pembentukan ATP.

Hubungan antara perubahan energi bebas dengan perubahan perbedaan energi potensial yang terjadi bila elektron lewat suatu sistem sbb:

$$F_o = -nF\Delta E_o$$

F_o = perubahan energi bebas (kal/mol) pada keadaan standar

n = jumlah elektron yang lewat

E_o = perbedaan potensial (volt)

F = konstanta Farady (23.063 kal/volt ekuvalen)

Untuk sistem biologi, n biasanya 2 dan F_o diganti F' karena tidak pada keadaan standar, sehingga:

$$F' = -46.126 \times \Delta E_o'$$

Bila beda potensial suatu sistem sebelum dan sesudah oksidasi diketahui, dari persamaan diatas dapat dihitung jumlah energi yang dibebaskan selama oksidasi. Misalnya bila elektron lewat $NADH_2$ ke O_2 , $\Delta E_o' = 1,14$ volt, maka $\Delta F' = -52.000$ kal. Teoritis reaksi ini menghasilkan 4 fosfat berenergi tinggi. Bila reaksi ini dipelajari dengan mitokondria yang diisolasi dari mamalia, khamir dan jamur, ternyata oksidasi tersebut hanya menghasilkan 3 ATP dari setiap atom oksigen yang digunakan. Jadi efisiensinya hanya 70%.

Tabel 3.1 menunjukkan E_o beberapa sistem oksidasi reduksi biologi yang terpenting. Disini ditunjukkan energi terhitung yang dibebaskan bila elektron dari substrat pada E_o' dari ketoglutarat lewat NAD dan sistem sitokrom ke oksigen. Ditunjukkan pula jumlah P yang dibentuk dalam mitokondria selama oksidasi. Terlihat

bahwa tidak semua energi yang dibebaskan diubah menjadi gugus fosfat berenergi tinggi. Sebagian energi diubah menjadi panas.

Tidak semua mikrobia mempunyai enzim transpor elektron lengkap. *Lactobacillus* dan *Clostridium* tidak mempunyai sitokrom meskipun mempunyai enzim dengan piridin nukleotida dan gugus prostetis flavo protein. *Lactobacillus* mempunyai flavoprotein-oksidasen yang dapat menggunakan O_2 sebagai aseptor elektron terakhir; tetapi dengan adanya O_2 , dibentuk H_2O_2 bukan H_2O . Beberapa spesies *Streptococcus*, *Acetobacter*, dan khamir mempunyai enzim peroksidase (katalase) yang mereksidasi substrat tereduksi (misalnya Cyt C tereduksi, atau NAD tereduksi) dengan adanya peroksidase dan ion H^+ . Hasil reaksinya substrat yang teroksidasi dan air.

Suatu reaksi oksidasi-reduksi disebut fermentasi (respirasi anaerob) apabila sebagai aseptor elektron yang terakhir bukan oksigen, dan disebut respirasi (respirasi aerob) apabila aseptor elektron terakhirnya oksigen. Pada respirasi anaerob sebagai aseptor elektronnya dapat digunakan zat anorganik seperti NO_3^- yang direduksi menjadi NO_2^- , N_2O , N_2 ; $SO_4^{=}$ menjadi H_2S ; CO_2 menjadi CH_4 . Sebagai aseptor dapat pula digunakan zat organik, seperti asam fumarat yang direduksi menjadi asam suksinat.

Jasad anaerob dan anaerob fakultatif yang ditumbuhkan secara anaerob mempunyai cara lain mereksidasi pembawa hidrogen yang tereduksi. Hal ini sering dilakukan dengan mengimbangi reaksi oksidasi substrat dengan reaksi reduksi lain, sehingga terakumulasi hasil akhir yang tereduksi. Misalnya *Lactobacillus* dalam glikolisis mereduksi asam piruvat menjadi asam laktat (lihat gambar). Beberapa *Clostridium* secara anaerob memfermentasi glukosa mereksidasi pembawa hidrogen yang tereduksi dengan reduksi aseto-asetat (sebagai kompleks koensim A) menjadi asam butirat dan butanol. Khamir mereduksi asetaldehid menjadi alkohol. Beberapa bakteri enterik mereduksi asam dikarboksilat, oksalat, malat, dan fumarat menjadi suksinat; sedang aseton direduksi menjadi 2,3 butylene-glycol agar dapat mengoksidasi flavin dan nikotinamid yang tereduksi. Beberapa spesies *Pseudomonas* dan *Thiobacillus* dapat menggunakan nitrat sebagai aseptor elektron; mereduksi nitrat menjadi gas N_2 . Banyak spesies bakteri dan jamur dapat mereduksi nitrat menjadi nitrit. Beberapa bakteri dapat mereduksi sulfat menjadi sulfit sebagai sarana untuk mereksidasi pembawa hidrogen.

Jadi mikrobial terutama bakteri dapat mereoksidasi pembawa hidrogen tanpa adanya oksigen. Beberapa diantaranya telah dimanfaatkan secara komersial, misalnya untuk fermentasi asam laktat dan alkohol.

Pembentukan ATP pada reaksi fosforilasi terhadap ADP pada prinsipnya ada tiga tingkat, yaitu: (1) fosforilasi pada tingkat substrat (fermentatif), (2) fosforilasi tingkat transpor elektron (oksidatif pada respirasi), dan (3) fosforilasi fotosintetik.

B. FERMENTASI

Glukosa dapat dimetabolisme oleh hampir semua jasad untuk sumber karbon dan energi. Fermentasi merupakan bagian perombakan gula secara anaerob. Banyak jasad yang dapat melakukan fermentasi lewat (jalur) rangkaian reaksi kimia tertentu.

1. Jalur Emden-Meyerhof-Parnas (EMP)

Reaksi ini disebut glikolisis, pemecahan gula secara anaerob sampai asam piruvat yang dilakukan oleh kebanyakan jasad dari tingkat tinggi hingga tingkat rendah. Reaksi glikolisis terjadi dalam sitoplasma dan tidak menggunakan oksigen sebagai aseptor elektronnya, melainkan zat lain. Asam piruvat mempunyai kedudukan yang penting karena merupakan titik pusat dari berbagai reaksi pemecahan maupun pembentukan. Jasad yang fakultatif anaerob misalnya *Saccharomyces cerevisiae* melakukan fermentasi gula secara anaerob menjadi alkohol dan CO_2 . *Lactobacillus* spp. yang homo fermentatif merombak gula secara anaerob menjadi asam laktat. Jasad yang obligat anaerob seperti *Clostridium* spp. memecah gula menjadi aseton, butanol, butirrat, dsb. Jasad aerob melakukan proses glikolisis sebagai bagian pertama dari pemecahan karbohidrat secara anaerob, yang akan diteruskan pada bagian kedua yang aerob. Pada otot manusia dan binatang yang kurang gerak akan tertimbun asam laktat, sebab glikolisis tidak diteruskan ke tingkat aerob melainkan ke asam laktat.

Jasad yang melakukan fermentasi lewat glikolisis hanya menghasilkan 2 mol ATP dari setiap glukosa yang dimetabolisme.

2. Jalur Entner-Doudoroff (ED)

Reaksi ini dilakukan oleh beberapa jasad antara lain *Pseudomonas* spp. yang dapat membentuk alkohol dari gula lewat bagan ini. Pada setiap pemecahan 1 mol glukosa dihasilkan juga 1 ATP, 1 NADH_2 dan 1 NADPH_2 . Pada *P. lindneri* 2 asam piruvat dipecah menjadi 2 etanol dan 2 CO_2 ; sedang pada *Pseudomonas* yang lain 2 asam piruvat diubah menjadi 1 etanol, 1 asam laktat dan 1 CO_2 .

3. Jalur Heksosa Mono Fosfat (HMP)

Selain lewat EMP banyak jasad yang dapat merombak gula lewat HMP. Reaksi ini berguna untuk membentuk gula pentosa dll, untuk keperluan biosintesis. Reaksi berlangsung lewat gula C₅, ribulosa 5-fosfat, yang merupakan prekursor gula ribosa, deoksiribosa, komponen asam nukleat, asam amino aromatik, enzim, ATP, NAD, FAD dan sebagainya. HMP tidak langsung menghasilkan energi, tetapi terutama membentuk NADPH₂.

4. Jalur Heterofermentatif bakteri asam laktat

Kelompok bakteri asam laktat selain menghasilkan asam laktat secara homofermentatif (misalnya *Lactobacillus* spp.), juga secara heterofermentatif (misalnya *Leuconostoc* spp., *Streptococcus* spp., dsb). Pada fermentasi secara heterofermentatif selain asam laktat dihasilkan pula asam asetat, etanol dan CO₂.

5. Jalur Metabolisme asam piruvat secara anaerob

Banyak jasad anaerob yang mempunyai enzim berbeda-beda yang digunakan dalam perombakan asam piruvat. *Clostridium* tergantung spesiesnya, dapat merubah asam piruvat menjadi asam butirat, asam asetat, aseton, butanol, etanol, CO₂, dan H₂. Bakteri enterik seperti *Escherichia coli* dan *Aerobacter aerogenes* dapat merubah asam piruvat menjadi asam suksinat, asetat, laktat, etanol, CO₂, dan H₂ (atau format). *A. aerogenes* juga menghasilkan 2,3-butilen-glikol. *Salmonella* sp. mempunyai pola metabolisme yang sama dengan *E. coli*, tetapi lebih banyak menghasilkan asam format, dari pada H₂ dan CO₂ seperti pada *E. coli*.

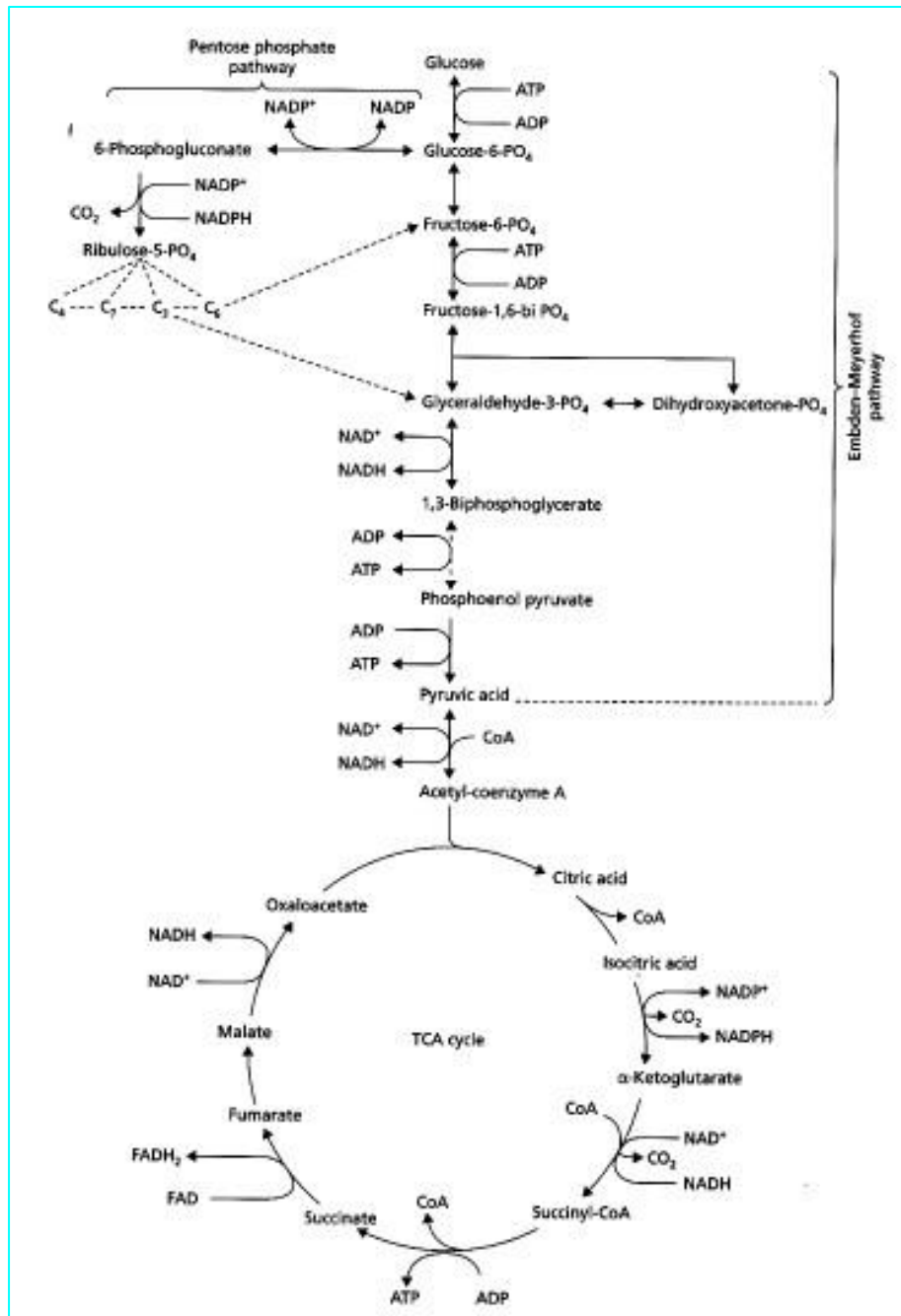
C. RESPIRASI

Respirasi adalah proses oksidasi biologis dengan O₂ sebagai aseptor elektronnya yang terakhir. Pada jasad eukariotik proses ini terjadi di dalam mitokondria, sedang pada jasad prokariotik terjadi di bawah membran plasma atau pada mesosome. Proses ini adalah fase kedua yang aerob dari perombakan gula fase pertama yang anaerob (glikolisis). Pada respirasi dihasilkan banyak energi yang dapat digunakan untuk proses biosintesis. Reaksi ini lewat bagan terutama siklus Krebs, meskipun ada yang lewat terobosan asam gliksilat.

1. Siklus Krebs (Siklus TCA)

Reaksi ini selain penting untuk pembentukan energi juga penting untuk biosintesis, sebab dapat menyediakan kerangka karbon untuk berbagai senyawa

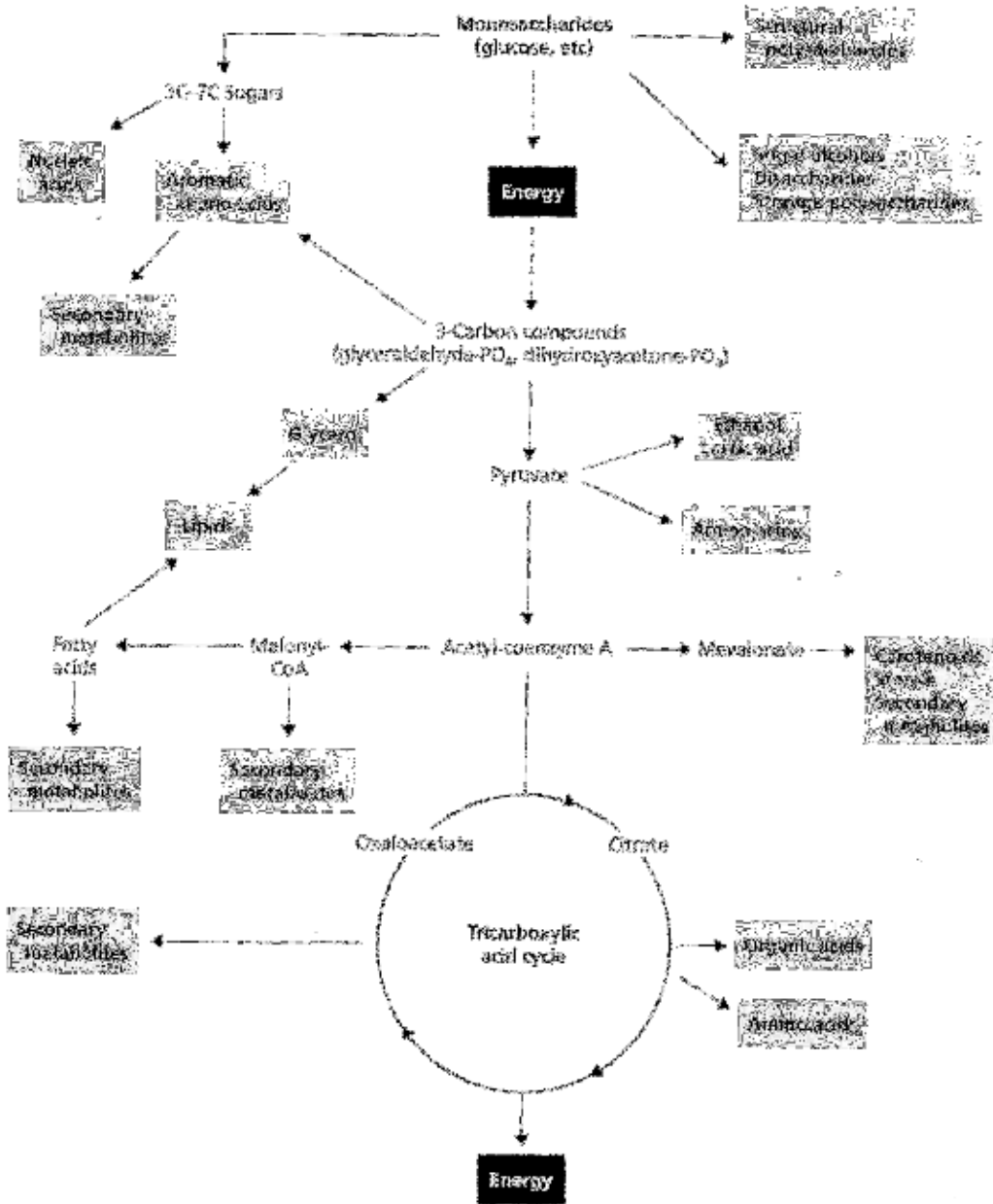
penting dalam sel. Pada kebanyakan bakteri, asam glutamat adalah asam amino kunci yang dibentuk dari sumber amonia dan karbon. Banyak pula bakteri yang dapat mereaksikan amonia dengan asam fumarat membentuk aspartat. Dengan transaminasi asam amino ini berfungsi sebagai donor amino terhadap asam alfa-keto seperti asam piruvat, oksalat, alfa-keto-isovalerat untuk membentuk asam amino. Titik penting lainnya ialah suksinil-ScoA yang bereaksi dengan asam pirol, membentuk cincin pirol. Siklus Krebs sering pula disebut siklus asam tribakboksilat (siklus TCA), atau siklus asam sitrat.



Jalur metabolisme utama

Pada siklus Krebs satu molekul asam piruvat yang dioksidasi sempurna menjadi CO₂ dan H₂O menghasilkan 15 ATP. Satu molekul glukosa yang dimetabolisme lewat glikolisis dan siklus Krebs secara sempurna menjadi CO₂ dan H₂O menghasilkan 38 ATP (lihat perhitungan).

2. Siklus asam gliksilat



Penggunaan hasil antara untuk biosintesis

Bakteri dan jamur tertentu dapat menggunakan substrat karbon C_2 . Jasad ini mempunyai enzim lengkap dari siklus Krebs dengan tambahan enzim isositrase yang dapat memecah isositrat menjadi suksinat dan gliksilat, dan enzim malat sintetase

yang menyebabkan kondensasi asam glioksilat dengan Ace-CoA menjadi malat. Dengan kedua siklus ini sel dapat membentuk alfa-ketoglutarat yang diperlukan untuk biosintesis. Dan jika asam malat mengalami dekarboksilasi menjadi fosfo-enol-piruvat, dengan reaksi balik glikolisis dan HMP dapat dibentuk heksosa dan pentosa.

D. FOTOSINTESIS

Fosforilasi pada fotosintesis menggunakan cahaya sebagai sumber energi. Proses ini menggunakan pigmen klorofil untuk mengabsorpsi energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia. Berdasarkan absorpsi spektrumnya dibedakan klorofil a, b, c, d, e, dan klorofil bakteri. Disamping itu ada pigmen tambahan untuk menangkap energi dan melindungi klorofil, seperti karotinoid, biliprotein, fikoeritrin, dan fikobilin.

Energi foton cahaya:

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda}$$

h = konstanta Plank = $6,555 \times 10^{-23}$

v = frekuensi cahaya

c = kecepatan cahaya

λ = panjang gelombang cahaya

jadi energi cahaya sebanding dengan frekuensinya dan berbanding terbalik dengan panjang gelombang. Energi macam-macam cahaya dapat dilihat pada tabel.

Jika klorofil terkena cahaya, akan mengabsorpsi sebesar h sehingga terangsang dan membebaskan elektron; klorofil menjadi bermuatan positif:



Elektron yang lepas akan bergerak lewat sistem transpor elektron dan kembali ke pusat reaksi klorofil. Dalam perjalanannya elektron mengalami penurunan energi, yang diubah menjadi energi kimia, yaitu untuk fosforilasi ADP dan reduksi NADP.

Pada bakteri fotofosforilasi terjadi secara siklis. Artinya tidak menggunakan elektron dari sumber lain. Cahaya yang digunakan adalah merah atau infra merah (lihat bagan).

Pada tumbuhan dan ganggang fotofosforilasi terjadi secara non-siklis. Disini ada 2 pusat reaksi dan 2 sistem transpor elektron. Pusat reaksi 1 menggunakan cahaya infra merah dan pusat reaksi 2 cahaya biru.

E. PENGGUNAAN ENERGI OLEH JASAD

Energi digunakan dalam setiap reaksi endergonik, dan juga reaksi eksergonik. Untuk memulai reaksi diperlukan energi aktivasi. Dalam setiap reaksi enzim mempunyai peranan penting. Proses yang memerlukan energi antara lain proses biosintesis molekul kecil dan molekul makro, yang akhirnya menuju ke pertumbuhan dan pembiakan; penyerapan unsur makanan, gerak, dan sebagainya.

F. KATABOLISME MAKROMOLEKUL

1. Peruraian karbohidrat

Karbohidrat adalah polisakarida, suatu polimer dari sedehana (glukosa, galaktosa, fruktosa, dsb). Contoh perombakan karbohidrat dapat dilihat pada tabel. Enzim pemecah polisakarida dibedakan menjadi eksohidrolase yang memutus rangkaian gula secara teratur dari ujung, dan endohidrolase yang memutus rangkaian gula secara random di tengah. Sebagai contoh misalnya alfa-amilase (eksohidrolase) memutus rangkaian glukosa dari amilum dua-dua mulai dari ujung non reduksi, sedang beta-amilase memutus rangkaian glukosa di sembarang tempat di tengah-tengah. Kedua enzim ini memutus ikatan alfa-1,4-glikosida dari amilum. Enzim yang memutus rantai cabang glukosa dari amilo-pektin, komponen amilum yang bercabang, ialah gluko-amilase yang memecah alfa-1,6-glikosida.

2. Peruraian lemak

Lemak adalah ester dari gliserol dan asam lemak (trigliserida). Lemak kadang-kadang mengandung zat lain seperti fosfat, protein, karbohidrat sebagai pengganti salah satu asam lemaknya. Enzim lipase memecah lemak menjadi gliserol dan asam lemak. Gliserol dirombak lebih lanjut lewat glikolisis (EMP). Asam lemak mengalami beta-oksidasi menjadi asam asetat, sebagai Ace-CoA dimetabolisme lebih lanjut lewat siklus Krebs. Bagan beta-oksidasi dapat dilihat pada gambar.

3. Peruraian protein

Protein adalah poli-peptida dengan struktur tertentu, suatu hetero-polimer dari asam amino. Enzim protease (poli-peptidase, oligo-peptidase, di-peptidase) merombak protein menjadi peptida yang lebih sederhana atau asam amino. Selanjutnya asam amino mengalami transaminasi, deaminasi, dekarboksilasi, atau dehidrogenasi menjadi zat lain yang lebih sederhana yang selanjutnya dapat dimetabolisme antara lain lewat siklus Krebs.

4. Peruraian asam nukleat

Asam nukleat (DNA dan RNA) adalah heteropolimer dari nukleotida. Enzim nuklease, nukleotidase, nukleosida fosforilase, dan nukleosida hidrolase akan memecah asam nukleat menjadi oligo, di, atau mono nukleotida; dan selanjutnya menjadi gula ribosa atau deoksi-ribosa, asam fosfat, base purin dan base pirimidin.

IX. PERTUMBUHAN MIKROBIA

Pertumbuhan adalah penambahan secara teratur semua komponen sel suatu jasad. Pembelahan sel adalah hasil dari pembelahan sel. Pada jasad bersel tunggal (uniseluler), pembelahan atau perbanyakan sel merupakan penambahan jumlah individu. Misalnya pembelahan sel pada bakteri akan menghasilkan penambahan jumlah sel bakteri itu sendiri. Pada jasad bersel banyak (multiseluler), pembelahan sel tidak menghasilkan penambahan jumlah individunya, tetapi hanya merupakan pembentukan jaringan atau bertambah besar jasadnya. Dalam membahas pertumbuhan mikrobia harus dibedakan antara pertumbuhan masing-masing individu sel dan pertumbuhan kelompok sel atau pertumbuhan populasi.

A. Pertumbuhan Populasi

Pertumbuhan dapat diamati dari meningkatnya jumlah sel atau massa sel (berat kering sel). Pada umumnya bakteri dapat memperbanyak diri dengan pembelahan biner, yaitu dari satu sel membelah menjadi 2 sel baru, maka pertumbuhan dapat diukur dari bertambahnya jumlah sel. Waktu yang diperlukan untuk membelah diri dari satu sel menjadi dua sel sempurna disebut waktu generasi. Waktu yang diperlukan oleh sejumlah sel atau massa sel menjadi dua kali jumlah/massa sel semula disebut doubling time atau waktu penggandaan. Waktu penggandaan tidak sama antara berbagai mikrobia, dari beberapa menit, beberapa jam sampai beberapa hari tergantung kecepatan pertumbuhannya. Kecepatan pertumbuhan merupakan perubahan jumlah atau massa sel per unit waktu.

B. Penghitungan Waktu Generasi

Dari hasil pembelahan sel secara biner:

1 sel menjadi 2 sel

2 sel menjadi 4 sel → 2^1 menjadi 2^2 atau 2×2

4 sel menjadi 8 sel → 2^2 menjadi 2^3 atau $2 \times 2 \times 2$

Dari hal tersebut dapat dirumuskan menjadi:

$$N = N_0 2^n$$

N: jumlah sel akhir, N_0 : jumlah sel awal, n: jumlah generasi

Waktu generasi = t / n , t : waktu pertumbuhan eksponensial, n : jumlah generasi

Dalam bentuk logaritma, rumus $N = N_0 2^n$ menjadi:

$$\log N = \log N_0 + n \log 2$$

$$\log N - \log N_0 = n \log 2$$

$$n = \frac{\log N - \log N_0}{\log 2} = \frac{\log N - \log N_0}{0,301}$$

Contoh:

$$N = 10^8, N_0 = 5 \times 10^7, t = 2$$

Dengan rumus dalam bentuk logaritma:

$$n = \frac{\log 10^8 - \log(5 \times 10^7)}{0,301} = \frac{8 - 7,6}{0,301} = 1$$

$$\text{Jadi waktu generasi} = t/n = 2/1 = 2 \text{ jam}$$

Waktu generasi juga dapat dihitung dari slope garis dalam plot semilogaritma kurva pertumbuhan eksponensial, yaitu dengan rumus, slope = 0,301/ waktu generasi. Dari grafik pertumbuhan tersebut diketahui bahwa slope = 0,15, sehingga juga diperoleh waktu generasi = 2 jam

C. Pengukuran Pertumbuhan

Pertumbuhan diukur dari perubahan jumlah sel atau berat kering massa sel. Jumlah sel dapat dihitung dari jumlah sel total yang tidak membedakan jumlah sel hidup atau mati, dan jumlah sel hidup (viable count). Jumlah total sel mikrobial dapat ditetapkan secara langsung dengan pengamatan mikroskopis, dalam bentuk sampel kering yang diletakkan di permukaan gelas benda (slide) dan dalam sampel cairan yang diamati menggunakan metode counting chamber, misalnya dengan alat Petroff-Hausser Bacteria Counter (PHBC) untuk menghitung bakteri atau dengan alat haemocytometer untuk menghitung khamir, spora, atau sel-sel yang ukurannya relatif lebih besar dari bakteri.

Jumlah sel hidup dapat ditetapkan dengan metode plate count atau colony count, dengan cara ditaburkan pada medium agar sehingga satu sel hidup akan tumbuh membentuk satu koloni, jadi jumlah koloni dianggap setara dengan jumlah sel. Cara ini ada dua macam, yaitu metode taburan permukaan (spread plate method) dan metode taburan (pour plate method). Cara lain untuk menghitung jumlah sel hidup adalah

dengan filter membran dan MPN (Most Probable Number) yang menggunakan medium cair. Sampel mikrobial yang dihitung biasanya dibuat seri pengenceran.

Pertumbuhan sel dapat diukur dari massa sel dan secara tidak langsung dengan mengukur turbiditas cairan medium tumbuh. Massa sel dapat dipisahkan dari cairan mediumnya menggunakan alat sentrifus (pemusing) sehingga dapat diukur volume massa selnya atau diukur berat keringnya (dikeringkan dahulu dengan pemanasan pada suhu 90-110°C semalam). Umumnya berat kering bakteri adalah 10-20 % dari berat basah.

Turbiditas dapat diukur menggunakan alat photometer (penerusan cahaya), semakin pekat atau semakin banyak populasi mikrobial maka cahaya yang diteruskan semakin sedikit. Turbiditas juga dapat diukur menggunakan spektrofotometer (optical density/ OD), yang sebelumnya dibuat kurva standart berdasarkan pengukuran jumlah sel baik secara total maupun yang hidup saja atau berdasarkan berat kering sel. Unit photometer atau OD proporsional dengan massa sel dan juga jumlah sel, sehingga cara ini dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah atau massa sel secara tidak langsung.

D. Pertumbuhan Populasi Mikroba

Suatu bakteri yang dimasukkan ke dalam medium baru yang sesuai akan tumbuh memperbanyak diri. Jika pada waktu-waktu tertentu jumlah bakteri dihitung dan dibuat grafik hubungan antara jumlah bakteri dengan waktu maka akan diperoleh suatu grafik atau kurva pertumbuhan. Pertumbuhan populasi mikrobial dibedakan menjadi dua yaitu biakan sistem tertutup (batch culture) dan biakan sistem terbuka (continuous culture).

Pada biakan sistem tertutup, pengamatan jumlah sel dalam waktu yang cukup lama akan memberikan gambaran berdasarkan kurva pertumbuhan bahwa terdapat fase-fase pertumbuhan. Fase pertumbuhan dimulai pada fase permulaan, fase pertumbuhan yang dipercepat, fase pertumbuhan logaritma (eksponensial), fase pertumbuhan yang mulai dihambat, fase stasioner maksimum, fase kematian dipercepat, dan fase kematian logaritma.

Pada fase permulaan, bakteri baru menyesuaikan diri dengan lingkungan yang baru, sehingga sel belum membelah diri. Sel mikrobial mulai membelah diri pada fase pertumbuhan yang dipercepat, tetapi waktu generasinya masih panjang. Fase

permulaan sampai fase pertumbuhan dipercepat sering disebut lag phase. Kecepatan sel membelah diri paling cepat terdapat pada fase pertumbuhan logaritma atau pertumbuhan eksponensial, dengan waktu generasi pendek dan konstan. Selama fase logaritma, metabolisme sel paling aktif, sintesis bahan sel sangat cepat dengan jumlah konstan sampai nutrisi habis atau terjadinya penimbunan hasil metabolisme yang menyebabkan terhambatnya pertumbuhan. Selanjutnya pada fase pertumbuhan yang mulai terhambat, kecepatan pembelahan sel berkurang dan jumlah sel yang mati mulai bertambah. Pada fase stasioner maksimum jumlah sel yang mati semakin meningkat sampai terjadi jumlah sel hidup hasil pembelahan sama dengan jumlah sel yang mati, sehingga jumlah sel hidup konstan, seolah-olah tidak terjadi pertumbuhan (pertumbuhan nol). Pada fase kematian yang dipercepat kecepatan kematian sel terus meningkat sedang kecepatan pembelahan sel nol, sampai pada fase kematian logaritma maka kecepatan kematian sel mencapai maksimal, sehingga jumlah sel hidup menurun dengan cepat seperti deret ukur. Walaupun demikian penurunan jumlah sel hidup tidak mencapai nol, dalam jumlah minimum tertentu sel mikrobial akan tetap bertahan sangat lama dalam medium tersebut.

E. Analisis Pertumbuhan Eksponensial

Untuk menganalisis pertumbuhan eksponensial dapat menggunakan grafik pertumbuhan atau dengan perhitungan secara matematis.

Rumus matematika pertumbuhan menggunakan persamaan diferensial:

$$dX / dt = \mu X \quad (1)$$

X: jumlah sel / komponen sel spesifik (protein)

μ : konstanta kecepatan pertumbuhan

Dalam bentuk logaritma dengan bilangan dasar e, rumus yang menggambarkan aktivitas populasi mikrobial dalam biakan sistem tertutup adalah:

$$\ln X = \ln X_0 + \mu(t) \quad (2)$$

X_0 : jumlah sel pada waktu nol, X: jumlah sel pada waktu t, t: waktu pertumbuhan diamati.

Dalam bentuk antilogaritma menjadi:

$$X = X_0 e^{\mu t} \quad (3)$$

Untuk memperkirakan kerapatan populasi pada waktu yang akan datang dengan μ sebagai konstante pertumbuhan yang berlaku. Parameter penting untuk konstante pertumbuhan populasi secara eksponensial adalah waktu generasi (waktu penggandaan). Penggandaan populasi terjadi saat $X / X_0 = 2$, sehingga rumus (3) menjadi:

$$2 = e^{\mu} (t \text{ generasi}) \quad (4)$$

Dalam bentuk logaritma dengan bilangan dasar e:

$$\mu = \ln 2 / t \text{ generasi} = 0,693 / t \text{ generasi} \quad (5)$$

Waktu generasi (t generasi) dapat digunakan untuk mengetahui parameter lain, seperti k (konstante kecepatan pertumbuhan) sebagai berikut:

$$k = 1 / t \text{ generasi} \quad (6)$$

Untuk biakan sistem tertutup, kombinasi persamaan 5 dan 6 menunjukkan bahwa 2 konstante kecepatan pertumbuhan μ dan k saling berhubungan:

$$\mu = 0,693 k \quad (7)$$

μ dan k, keduanya menggambarkan proses pertumbuhan yang sama dari peningkatan populasi secara eksponensial. Perbedaan diantaranya adalah, μ merupakan konstante kecepatan pertumbuhan yang berlaku, yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan pertumbuhan populasi dari masing-masing aktivitas sel individual dan dapat digunakan untuk mengetahui dinamika pertumbuhan secara teoritis, sedang k adalah nilai rata-rata populasi pada periode waktu terbatas, yang menggambarkan asumsi rata-rata pertumbuhan populasi.

Contoh perhitungan k

Bilangan dasar yang digunakan untuk kerapatan populasi sel adalah 10, sehingga persamaan (3) apabila dirubah menjadi bentuk logaritma berdasarkan bilangan 10 (\log_{10}) dan k disubstitusi dengan μ , rumusnya menjadi:

$$k = \frac{\log_{10} X_t - X_0}{0,301 t}$$

Contoh 1: $X_0 = 1000 = 10^3$, \log_{10} dari 1000 = 3

$X_t = 100.000 = 10^5$, \log_{10} dari 100.000 = 5

t = 4 jam

$k = (5-3) / (0,301 \times 4) = 2/1,204 = 1,66$ generasi / jam

waktu generasi (t generasi) = 0,60 jam = 36 menit

Contoh 2: $X_0 = 1000 = 10^3$, \log_{10} dari 1000 = 3

$X_t = 100.000.000 = 10^8$, \log_{10} dari 100.000.000 = 8

t = 120 jam

$k = (8-3) / (0,301 \times 120) = 5/36,12 = 0,138$ generasi / jam

waktu generasi (t generasi) = 7,2 jam = 430 menit

F. Biakan Sistem Terbuka (Continuous culture) dalam Khemostat

Di dalam sistem ini, sel dapat dipertahankan terus menerus pada fase pertumbuhan eksponensial / fase pertumbuhan logaritma. Continuous culture mempunyai ciri ukuran populasi dan kecepatan pertumbuhan dapat diatur pada nilai konstan menggunakan khemostat. Untuk mengatur proses di dalam khemostat, diatur kecepatan aliran medium dan kadar substrat (nutrien pembatas). Sebagai nutrien pembatas dapat menggunakan sumber C (karbon), sumber N atau faktor tumbuh.

Pada sistem ini, ada aliran keluar untuk mempertahankan volume biakan dalam khemostat sehingga tetap konstan (misal V ml). Jika aliran masuk ke dalam tabung biakan adalah W ml/jam, maka kecepatan pengenceran kultur adalah $D = W/V$ per jam. D disebut sebagai kecepatan pengenceran (dilution rate). Populasi sel dalam tabung biakan dipengaruhi oleh peningkatan populasi sebagai hasil pertumbuhan dan pengenceran kadar sel sebagai akibat penambahan medium baru dan pelimpahan aliran keluar tabung biakan. Kecepatan pertumbuhannya dirumuskan sebagai berikut:

$$dX/dt = \mu X - DX = (\mu - D) X.$$

Pada keadaan mantap (steady state), maka $\mu = D$, sehingga $dX/dt = 0$.

Dengan sistem ini sel seolah-olah dibuat dalam keadaan setengah kelaparan, dengan nutreian pembatas. Kadar nutrien yang rendah menyebabkan kecepatan pertumbuhan berbandng lurus dengan kadar nutrien atau substrat tersebut, sehingga kecepatan pertumbuhan adalah sebagai fungsi konsentrasi nutrien, dengan persamaan:

$$\mu = \mu_{\max} S / (K_s + S)$$

μ_{\max} : kecepatan pertumbuhan pada keadaan nutrien berlebihan

S : konstante nutrien

K_s : konstante pada konsentrasi nutrien saat $\mu = \frac{1}{2} \mu_{\max}$.

X. FAKTOR LINGKUNGAN UNTUK PERTUMBUHAN MIKROBA

Aktivitas mikroba dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungannya. Perubahan lingkungan dapat mengakibatkan perubahan sifat morfologi dan fisiologi mikroba. Beberapa kelompok mikroba sangat resisten terhadap perubahan faktor lingkungan. Mikroba tersebut dapat dengan cepat menyesuaikan diri dengan kondisi baru tersebut. Faktor lingkungan meliputi faktor-faktor abiotik (fisika dan kimia), dan faktor biotik.

A. FAKTOR ABIOTIK

1. Suhu

a. Suhu pertumbuhan mikroba

Pertumbuhan mikroba memerlukan kisaran suhu tertentu. Kisaran suhu pertumbuhan dibagi menjadi suhu minimum, suhu optimum, dan suhu maksimum. Suhu minimum adalah suhu terendah tetapi mikroba masih dapat hidup. Suhu optimum adalah suhu paling baik untuk pertumbuhan mikroba. Suhu maksimum adalah suhu tertinggi untuk kehidupan mikroba.

Berdasarkan kisaran suhu pertumbuhannya, mikroba dapat dikelompokkan menjadi mikroba psikrofil (kriofil), mesofil, dan termofil. Psikrofil adalah kelompok mikroba yang dapat tumbuh pada suhu 0-30⁰C dengan suhu optimum sekitar 15⁰C. Mesofil adalah kelompok mikroba pada umumnya, mempunyai suhu minimum 15⁰C suhu optimum 25-37⁰C dan suhu maksimum 45-55⁰C.

Mikroba yang tahan hidup pada suhu tinggi dikelompokkan dalam mikroba termofil. Mikroba ini mempunyai membran sel yang mengandung lipida jenuh, sehingga titik didihnya tinggi. Selain itu dapat memproduksi protein termasuk enzim yang tidak terdenaturasi pada suhu tinggi. Di dalam DNA-nya mengandung guanin dan sitosin dalam jumlah yang relatif besar, sehingga molekul DNA tetap stabil pada suhu tinggi. Kelompok ini mempunyai suhu minimum 40⁰C, optimum pada suhu 55-60⁰C dan suhu maksimum untuk pertumbuhannya 75⁰C. Untuk mikroba yang tidak tumbuh dibawah suhu 30⁰C dan mempunyai suhu pertumbuhan optimum pada 60⁰C, dikelompokkan kedalam mikroba termofil obligat. Untuk mikroba termofil yang dapat tumbuh dibawah suhu 30⁰C, dimasukkan kelompok mikroba termofil fakultatif.

Bakteri yang hidup di dalam tanah dan air, umumnya bersifat mesofil, tetapi ada juga yang dapat hidup diatas 50⁰C (termotoleran). Contoh bakteri termotoleran adalah

Methylococcus capsulatus. Contoh bakteri termofil adalah Bacillus, Clostridium, Sulfolobus, dan bakteri pereduksi sulfat/sulfur. Bakteri yang hidup di laut (fototrof) dan bakteri besi (Gallionella) termasuk bakteri psikrofil.

b. Suhu tinggi

Apabila mikroba dihadapkan pada suhu tinggi diatas suhu maksimum, akan memberikan beberapa macam reaksi. (1) Titik kematian thermal, adalah suhu yang dapat memetikan spesies mikroba dalam waktu 10 menit pada kondisi tertentu. (2) Waktu kematian thermal, adalah waktu yang diperlukan untuk membunuh suatu spesies mikroba pada suatu suhu yang tetap. Faktor-faktor yang mempengaruhi titik kematian thermal ialah waktu, suhu, kelembaban, spora, umur mikroba, pH dan komposisi medium. Contoh waktu kematian thermal (TDT/ thermal death time) untuk beberapa jenis bakteri adalah sebagai berikut :

Nama mikrobia	Waktu (menit)	Suhu (⁰ C)
Escherichia coli	20-30	57
Staphylococcus aureus	19	60
Spora Bacillus subtilis	20-50	100
Spora Clostridium botulinum	100-330	100

c. Suhu rendah

Apabila mikroba dihadapkan pada suhu rendah dapat menyebabkan gangguan metabolisme. Skibat-akibatnya adalah (1) Cold shock, adalah penurunan suhu yang tiba-tiba menyebabkan kematian bakteri, terutama pada bakteri muda atau pada fase logaritmik, (2) Pembekuan (freezing), adalah rusaknya sel dengan adanya kristal es di dalam air intraseluler, (3) Lyofilisasi, adalah proses pendinginan dibawah titik beku dalam keadaan vakum secara bertingkat. Proses ini dapat digunakan untuk mengawetkan mikroba karena air protoplasma langsung diuapkan tanpa melalui fase cair (sublimasi).

2. Kandungan air (pengeringan)

Setiap mikroba memerlukan kandungan air bebas tertentu untuk hidupnya, biasanya diukur dengan parameter a_w (water activity) atau kelembaban relatif. Mikroba umumnya dapat tumbuh pada a_w 0,998-0,6. bakteri umumnya memerlukan a_w 0,90-0,999. Mikroba yang osmotoleran dapat hidup pada a_w terendah (0,6) misalnya khamir Saccharomyces rouxii. Aspergillus glaucus dan jamur benang lain dapat tumbuh pada a_w 0,8. Bakteri umumnya memerlukan a_w atau kelembaban tinggi lebih dari 0,98, tetapi bakteri halofil hanya memerlukan a_w 0,75. Mikroba yang tahan kekeringan adalah yang dapat

membentuk spora, konidia atau dapat membentuk kista. Tabel berikut ini memuat daftar a_w yang diperlukan oleh beberapa jenis bakteri dan jamur :

Nilai a_w	Bakteri	Jamur
1,00	Caulobacter	
	Spirillum	
0,90	Lactobacilus	Fusarium
	Bacillus	Mucor
0,85	Staphylococcus	Debaromyces
0,80		Penicillium
0,75	Halobacterium	Aspergillus
0,60		Xeromyces

3. Tekanan osmose

Tekanan osmose sebenarnya sangat erat hubungannya dengan kandungan air. Apabila mikroba diletakkan pada larutan hipertonis, maka selnya akan mengalami plasmolisis, yaitu terkelupasnya membran sitoplasma dari dinding sel akibat mengkerutnya sitoplasma. Apabila diletakkan pada larutan hipotonis, maka sel mikroba akan mengalami plasmoptisa, yaitu pecahnya sel karena cairan masuk ke dalam sel, sel membengkak dan akhirnya pecah.

Berdasarkan tekanan osmose yang diperlukan dapat dikelompokkan menjadi (1) mikroba osmofil, adalah mikroba yang dapat tumbuh pada kadar gula tinggi, (2) mikroba halofil, adalah mikroba yang dapat tumbuh pada kadar garam halogen yang tinggi, (3) mikroba halodurik, adalah kelompok mikroba yang dapat tahan (tidak mati) tetapi tidak dapat tumbuh pada kadar garam tinggi, kadar garamnya dapat mencapai 30 %.

Contoh mikroba osmofil adalah beberapa jenis khamir. Khamir osmofil mampu tumbuh pada larutan gula dengan konsentrasi lebih dari 65 % wt/wt ($a_w = 0,94$). Contoh mikroba halofil adalah bakteri yang termasuk Archaeobacterium, misalnya Halobacterium. Bakteri yang tahan pada kadar garam tinggi, umumnya mempunyai kandungan KCl yang tinggi dalam selnya. Selain itu bakteri ini memerlukan konsentrasi Kalium yang tinggi untuk stabilitas ribosomnya. Bakteri halofil ada yang mempunyai membran purple bilayer, dinding selnya terdiri dari murein, sehingga tahan terhadap ion Natrium.

4. Ion-ion dan listrik

a. Kadar ion hidrogen (pH)

Mikroba umumnya menyukai pH netral (pH 7). Beberapa bakteri dapat hidup pada pH tinggi (medium alkalin). Contohnya adalah bakteri nitrat, rhizobia, actinomycetes, dan bakteri pengguna urea. Hanya beberapa bakteri yang bersifat toleran terhadap kemasaman, misalnya Lactobacilli, Acetobacter, dan Sarcina ventriculi. Bakteri yang bersifat asidofil misalnya

Thiobacillus. Jamur umumnya dapat hidup pada kisaran pH rendah. Apabila mikroba ditanam pada media dengan pH 5 maka pertumbuhan didominasi oleh jamur, tetapi apabila pH media 8 maka pertumbuhan didominasi oleh bakteri.

Berdasarkan pH-nya mikroba dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu (a) mikroba asidofil, adalah kelompok mikroba yang dapat hidup pada pH 2,0-5,0, (b) mikroba mesofil (neutrofil), adalah kelompok mikroba yang dapat hidup pada pH 5,5-8,0, dan (c) mikroba alkalifil, adalah kelompok mikroba yang dapat hidup pada pH 8,4-9,5. Contoh pH minimum, optimum, dan maksimum untuk beberapa jenis bakteri adalah sebagai berikut :

Nama mikroba	pH		
	minimum	optimum	maksimum
Escherichia coli	4,4	6,0-7,0	9,0
Proteus vulgaris	4,4	6,0-7,0	8,4
Enterobacter	4,4	6,0-7,0	9,0
aerogenes	5,6	6,6-7,0	8,0
Pseudomonas	5,0-5,8	6,0-7,6	8,5-9,0
aeruginosa	7,0-7,6	8,0-8,8	9,4
Clostridium	6,6	7,6-8,6	10,0
sporogenes	1,0	2,0-2,8	4,0-6,0
Nitrosomonas spp	4,0-4,6	5,8-6,6	6,8
Nitrobacter spp			
Thiobacillus			
Thiooxidans			
Lactobacillus			
acidophilus			

b. Buffer

Untuk menumbuhkan mikroba pada media memerlukan pH yang konstan, terutama pada mikroba yang dapat menghasilkan asam. Misalnya Enterobacteriaceae dan beberapa Pseudomonadaceae. Oleh karenanya ke dalam medium diberi tambahan buffer untuk menjaga agar pH nya konstan. Buffer merupakan campuran garam mono dan dibasik, maupun senyawa-senyawa organik amfoter. Sebagai contoh adalah buffer fosfat anorganik dapat mempertahankan pH diatas 7,2. Cara kerja buffe adalah garam dibasik akan mengadsorbsi ion H^+ dan garam monobasik akan bereaksi dengan ion OH^-

c. Ion-ion lain

Logam berat seperti Hg, Ag, Cu, Au, dan Pb pada kadar rendah dapat bersifat meracun (toksis). Logam berat mempunyai daya oligodinamik, yaitu daya bunuh logam berat pada kadar rendah. Selain logam berat, ada ion-ion lain yang dapat mempengaruhi kegiatan fisiologi mikroba, yaitu ion sulfat, tartrat, klorida, nitrat, dan benzoat. Ion-ion tersebut dapat mengurangi

pertumbuhan mikroba tertentu. Oleh karena itu sering digunakan untuk mengawetkan suatu bahan, misalnya digunakan dalam pengawetan makanan. Ada senyawa lain yang juga mempengaruhi fisiologi mikroba, misalnya asam benzoat, asam asetat, dan asam sorbat.

d. Listrik

Listrik dapat mengakibatkan terjadinya elektrolisis bahan penyusun medium pertumbuhan. Selain itu arus listrik dapat menghasilkan panas yang dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroba. Sel mikroba dalam suspensi akan mengalami elektroforesis apabila dilalui arus listrik. Arus listrik tegangan tinggi yang melalui suatu cairan akan menyebabkan terjadinya shock karena tekanan hidrolik listrik. Kematian mikroba akibat shock terutama disebabkan oleh oksidasi. Adanya radikal ion dari ionisasi radiasi dan terbentuknya ion logam dari elektroda juga menyebabkan kematian mikroba.

e. Radiasi

Radiasi menyebabkan ionisasi molekul-molekul di dalam protoplasma. Cahaya umumnya dapat merusak mikroba yang tidak mempunyai pigmen fotosintesis. Cahaya mempunyai pengaruh germisida, terutama cahaya bergelombang pendek dan bergelombang panjang. Pengaruh germisida dari sinar bergelombang panjang disebabkan oleh panas yang ditimbulkannya, misalnya sinar inframerah. Sinar x ($0,005-1,0 \text{ \AA}$), sinar ultra violet ($4000-2950 \text{ \AA}$), dan sinar radiasi lain dapat membunuh mikroba. Apabila tingkat iradiasi yang diterima sel mikroba rendah, maka dapat menyebabkan terjadinya mutasi pada mikroba.

f. Tegangan muka

Tegangan muka mempengaruhi cairan sehingga permukaan cairan tersebut menyerupai membran yang elastis. Seperti telah diketahui protoplasma mikroba terdapat di dalam sel yang dilindungi dinding sel, maka apabila ada perubahan tegangan muka dinding sel akan mempengaruhi pula permukaan protoplasma. Akibat selanjutnya dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroba dan bentuk morfologinya. Zat-zat seperti sabun, deterjen, dan zat-zat pembasah (surfaktan) seperti Tween₈₀ dan Triton A₂₀ dapat mengurangi tegangan muka cairan/larutan. Umumnya mikroba cocok pada tegangan muka yang relatif tinggi.

g. Tekanan hidrostatik

Tekanan hidrostatik mempengaruhi metabolisme dan pertumbuhan mikroba. Umumnya tekanan 1-400 atm tidak mempengaruhi atau hanya sedikit mempengaruhi metabolisme dan pertumbuhan mikroba. Tekanan hidrostatik yang lebih tinggi lagi dapat menghambat atau menghentikan pertumbuhan, oleh karena tekanan hidrostatik tinggi dapat menghambat sintesis

RNA, DNA, dan protein, serta mengganggu fungsi transport membran sel maupun mengurangi aktivitas berbagai macam enzim. Tekanan di atas 100.000 pound/inchi² menyebabkan denaturasi protein. Akan tetapi ada mikroba yang tahan hidup pada tekanan tinggi (mikroba barotoleran), dan ada mikroba yang tumbuh optimal pada tekanan tinggi sampai 16.000 pound/inchi² (barofil). Mikroba yang hidup di laut dalam umumnya adalah barofilik atau barotoleran. Sebagai contoh adalah bakteri *Spirillum*.

h. Getaran

Getaran mekanik dapat merusakkan dinding sel dan membran sel mikroba. Oleh karena itu getaran mekanik banyak dipakai untuk memperoleh ekstrak sel mikroba. Isi sel dapat diperoleh dengan cara menggerus sel-sel dengan menggunakan abrasif atau dengan cara pembekuan kemudian dicairkan berulang kali. Getaran suara 100-10.000 x/ detik juga dapat digunakan untuk memecah sel.

B. FAKTOR BIOTIK

Di alam jarang sekali ditemukan mikroba yang hidup sebagai biakan murni, tetapi selalu berada dalam asosiasi dengan jasad-jasad lain. Antar jasad dalam satu populasi atau antar populasi jasad yang satu dengan yang lain saling berinteraksi.

1. Interaksi dalam satu populasi mikroba

Interaksi antar jasad dalam satu populasi yang sama ada dua macam, yaitu interaksi positif maupun negatif. Interaksi positif menyebabkan meningkatnya kecepatan pertumbuhan sebagai efek sampingnya. Meningkatnya kepadatan populasi, secara teoritis meningkatkan kecepatan pertumbuhan. Interaksi positif disebut juga kooperasi. Sebagai contoh adalah pertumbuhan satu sel mikroba menjadi koloni atau pertumbuhan pada fase lag (fase adaptasi).

Interaksi negatif menyebabkan turunnya kecepatan pertumbuhan dengan meningkatnya kepadatan populasi. Misalnya populasi mikroba yang ditumbuhkan dalam substrat terbatas, atau adanya produk metabolik yang meracun. Interaksi negatif disebut juga kompetisi. Sebagai contoh jamur *Fusarium* dan *Verticillium* pada tanah sawah, dapat menghasilkan asam lemak dan H₂S yang bersifat meracun.

2. Interaksi antar berbagai macam populasi mikroba

Apabila dua populasi yang berbeda berasosiasi, maka akan timbul berbagai macam interaksi. Interaksi tersebut menimbulkan pengaruh positif, negatif, ataupun tidak ada pengaruh

antar populasi mikroba yang satu dengan yang lain. Nama masing-masing interaksi adalah sebagai berikut:

Nama Interaksi	Pengaruh interaksi	
	Populasi A	Populasi B
Netralisme	0	0
Komensalisme	0	+
Sinergisme (protokooperasi)	+	+
Mutualisme (simbiosis)	+	+
Kompetisi	-	-
Amensalisme (antagonisme)	+	-
Predasi	+	-
Parasitisme	+	-

Keterangan: 0: tidak berpengaruh, +: pengaruh positif, -: pengaruh negatif

a. Netralisme

Netralisme adalah hubungan antara dua populasi yang tidak saling mempengaruhi. Hal ini dapat terjadi pada kepadatan populasi yang sangat rendah atau secara fisik dipisahkan dalam mikrohabitat, serta populasi yang keluar dari habitat alamiahnya. Sebagai contoh interaksi antara mikroba allocthonous (nonindigenous) dengan mikroba autochthonous (indigenous), dan antar mikroba nonindigenous di atmosfer yang kepadatan populasinya sangat rendah. Netralisme juga terjadi pada keadaan mikroba tidak aktif, misal dalam keadaan kering beku, atau fase istirahat (spora, kista).

b. Komensalisme

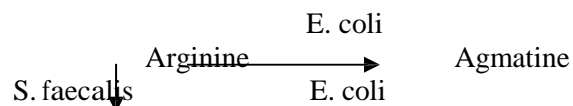
Hubungan komensalisme antara dua populasi terjadi apabila satu populasi diuntungkan tetapi populasi lain tidak terpengaruh. Contohnya adalah:

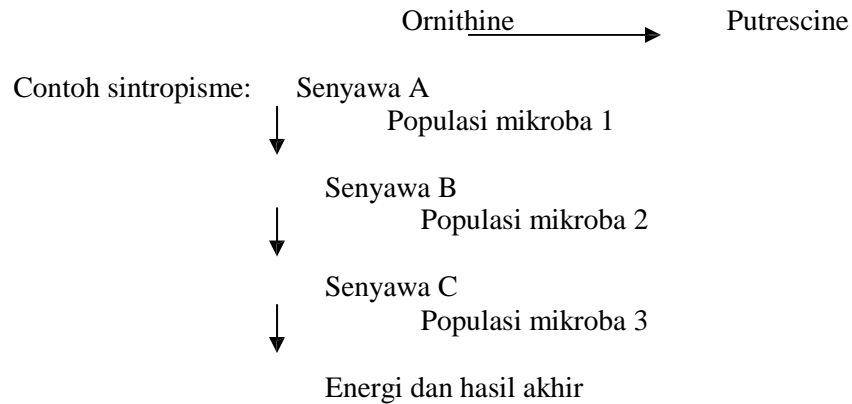
- Bakteri *Flavobacterium brevis* dapat menghasilkan ekskresi sistein. Sistein dapat digunakan oleh *Legionella pneumophila*.
- *Desulfovibrio mensuplai* asetat dan H_2 untuk respirasi anaerobik *Methanobacterium*.

c. Sinergisme

Suatu bentuk asosiasi yang menyebabkan terjadinya suatu kemampuan untuk dapat melakukan perubahan kimia tertentu di dalam substrat. Apabila asosiasi melibatkan 2 populasi atau lebih dalam keperluan nutrisi bersama, maka disebut sintropisme. Sintropisme sangat penting dalam peruraian bahan organik tanah, atau proses pembersihan air secara alami.

Contoh sinergisme: *Streptococcus faecalis* dan *Escherichia coli*





d. Mutualisme (Simbiosis)

Mutualisme adalah asosiasi antara dua populasi mikroba yang keduanya saling tergantung dan sama-sama mendapat keuntungan. Mutualisme sering disebut juga simbiosis. Simbiosis bersifat sangat spesifik (khusus) dan salah satu populasi anggota simbiosis tidak dapat digantikan tempatnya oleh spesies lain yang mirip. Contohnya adalah Bakteri *Rhizobium* sp. yang hidup pada bintil akar tanaman kacang-kacangan. Contoh lain adalah Lichenes (Lichens), yang merupakan simbiosis antara algae sianobakteria dengan fungi. Algae (phycobiont) sebagai produser yang dapat menggunakan energi cahaya untuk menghasilkan senyawa organik. Senyawa organik dapat digunakan oleh fungi (mycobiont), dan fungi memberikan bentuk perlindungan (selubung) dan transport nutrisi / mineral serta membentuk faktor tumbuh untuk algae.



Lichenes

e. Kompetisi

Hubungan negatif antara 2 populasi mikroba yang keduanya mengalami kerugian. Peristiwa ini ditandai dengan menurunnya sel hidup dan pertumbuhannya. Kompetisi terjadi pada 2 populasi mikroba yang menggunakan nutrisi / makanan yang sama, atau dalam keadaan nutrisi terbatas. Contohnya adalah antara protozoa *Paramecium caudatum* dengan *Paramecium aurelia*.

f. Amensalisme (Antagonisme)

Satu bentuk asosiasi antar spesies mikroba yang menyebabkan salah satu pihak dirugikan, pihak lain diuntungkan atau tidak terpengaruh apapun. Umumnya merupakan cara untuk melindungi diri terhadap populasi mikroba lain. Misalnya dengan menghasilkan senyawa asam, toksin, atau antibiotika. Contohnya adalah bakteri *Acetobacter* yang mengubah etanol menjadi asam asetat. *Thiobacillus thiooxidans* menghasilkan asam sulfat. Asam-asam tersebut dapat menghambat pertumbuhan bakteri lain. Bakteri amonifikasi menghasilkan ammonium yang dapat menghambat populasi *Nitrobacter*.

g. Parasitisme

Parasitisme terjadi antara dua populasi, populasi satu diuntungkan (parasit) dan populasi lain dirugikan (host / inang). Umumnya parasitisme terjadi karena keperluan nutrisi dan bersifat spesifik. Ukuran parasit biasanya lebih kecil dari inangnya. Terjadinya parasitisme memerlukan kontak secara fisik maupun metabolik serta waktu kontak yang relatif lama. Contohnya adalah bakteri *Bdellovibrio* yang memparasit bakteri *E. coli*. Jamur *Trichoderma* sp. memparasit jamur *Agaricus* sp.

h. Predasi

Hubungan predasi terjadi apabila satu organisme predator memangsa atau memakan dan mencerna organisme lain (prey). Umumnya predator berukuran lebih besar dibandingkan prey, dan peristiwanya berlangsung cepat. Contohnya adalah Protozoa (predator) dengan bakteri (prey). Protozoa *Didinium nasutum* (predator) dengan *Paramecium caudatum* (prey).

XI. NUTRISI DAN MEDIUM MIKROBA

Medium pertumbuhan (disingkat medium) adalah tempat untuk menumbuhkan mikroba. Mikroba memerlukan nutrisi untuk memenuhi kebutuhan energi dan untuk bahan pembangun sel, untuk sintesa protoplasma dan bagian-bagian sel lain. Setiap mikroba mempunyai sifat fisiologi tertentu, sehingga memerlukan nutrisi tertentu pula.

Susunan kimia sel mikroba relatif tetap, baik unsur kimia maupun senyawa yang terkandung di dalam sel. Dari hasil analisis kimia diketahui bahwa penyusun utama sel adalah unsur kimia C, H, O, N, dan P, yang jumlahnya $\pm 95\%$ dari berat kering sel, sedangkan sisanya tersusun dari unsur-unsur lain (Tabel). Apabila dilihat susunan senyawanya, maka air merupakan bagian terbesar dari sel, sebanyak 80-90 %, dan bagian lain sebanyak 10-20 % terdiri dari protoplasma, dinding sel, lipida untuk cadangan makanan, polisakarida, polifosfat, dan senyawa lain.

Tabel 11.1. Susunan unsur-unsur penyusun sel bakteri *E. coli*

Unsur-unsur kimia	Persentase berat kering
Carbon (C)	50
Oksigen (O)	20
Nitrogen (N)	14
Hidrogen (H)	8
Fosfor (P)	3
Belerang (S)	1
Kalium (K)	1
Natrium (Na)	1
Kalsium (Ca)	0,5
Magnesium (Mg)	0,5
Klor (Cl)	0,5
Besi (Fe)	0,2
Lain-lain	0,3

A. FUNGSI NUTRISI UNTUK MIKROBA

Setiap unsur nutrisi mempunyai peran tersendiri dalam fisiologi sel. Unsur tersebut diberikan ke dalam medium sebagai kation garam anorganik yang jumlahnya berbeda-beda tergantung pada keperluannya. Beberapa golongan mikroba misalnya diatomae dan alga tertentu memerlukan silika (Si) yang biasanya diberikan dalam bentuk silikat untuk menyusun dinding sel. Fungsi dan kebutuhan natrium (Na) untuk

beberapa jasad belum diketahui jumlahnya. Natrium dalam kadar yang agak tinggi diperlukan oleh bakteri tertentu yang hidup di laut, algae hijau biru, dan bakteri fotosintetik. Natrium tersebut tidak dapat digantikan oleh kation monovalen yang lain.

Jasad hidup dapat menggunakan makanannya dalam bentuk padat maupun cair (larutan). Jasad yang dapat menggunakan makanan dalam bentuk padat tergolong tipe holozoik, sedangkan yang menggunakan makanan dalam bentuk cair tergolong tipe holofitik. Jasad holofitik dapat pula menggunakan makanan dalam bentuk padat, tetapi makanan tersebut harus dicernakan lebih dulu di luar sel dengan pertolongan enzim ekstraseluler. Pencernaan di luar sel ini dikenal sebagai extracorporeal digestion.

Bahan makanan yang digunakan oleh jasad hidup dapat berfungsi sebagai sumber energi, bahan pembangun sel, dan sebagai aseptor atau donor elektron. Dalam garis besarnya bahan makanan dibagi menjadi tujuh golongan yaitu air, sumber energi, sumber karbon, sumber aseptor elektron, sumber mineral, faktor tumbuh, dan sumber nitrogen.

1. Air

Air merupakan komponen utama sel mikroba dan medium. Fungsi air adalah sebagai sumber oksigen untuk bahan organik sel pada respirasi. Selain itu air berfungsi sebagai pelarut dan alat pengangkut dalam metabolisme.

2. Sumber energi

Ada beberapa sumber energi untuk mikroba yaitu senyawa organik atau anorganik yang dapat dioksidasi dan cahaya terutama cahaya matahari.

3. Sumber karbon

Sumber karbon untuk mikroba dapat berbentuk senyawa organik maupun anorganik. Senyawa organik meliputi karbohidrat, lemak, protein, asam amino, asam organik, garam asam organik, polialkohol, dan sebagainya. Senyawa anorganik misalnya karbonat dan gas CO_2 yang merupakan sumber karbon utama terutama untuk tumbuhan tingkat tinggi.

4. Sumber aseptor elektron

Proses oksidasi biologi merupakan proses pengambilan dan pemindahan elektron dari substrat. Karena elektron dalam sel tidak berada dalam bentuk bebas, maka harus ada suatu zat yang dapat menangkap elektron tersebut. Penangkap elektron ini disebut aseptor elektron. Aseptor elektron ialah agensia pengoksidasi. Pada

mikrobia yang dapat berfungsi sebagai aseptor elektron ialah O_2 , senyawa organik, NO_3^- , NO_2^- , N_2O , SO_4^{2-} , CO_2 , dan Fe^{3+} .

5. Sumber mineral

Mineral merupakan bagian dari sel. Unsur penyusun utama sel ialah C, O, N, H, dan P. unsur mineral lainnya yang diperlukan sel ialah K, Ca, Mg, Na, S, Cl. Unsur mineral yang digunakan dalam jumlah sangat sedikit ialah Fe, Mn, Co, Cu, Bo, Zn, Mo, Al, Ni, Va, Sc, Si, Tu, dan sebagainya yang tidak diperlukan jasad. Unsur yang digunakan dalam jumlah besar disebut unsur makro, dalam jumlah sedang unsur oligo, dan dalam jumlah sangat sedikit unsur mikro. Unsur mikro sering terdapat sebagai ikutan (impurities) pada garam unsur makro, dan dapat masuk ke dalam medium lewat kontaminasi gelas tempatnya atau lewat partikel debu.

Selain berfungsi sebagai penyusun sel, unsur mineral juga berfungsi untuk mengatur tekanan osmose, kadar ion H^+ (kemasaman, pH), dan potensial oksidasi-reduksi (redox potential) medium.

6. Faktor tumbuh

Faktor tumbuh ialah senyawa organik yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan (sebagai prekursor, atau penyusun bahan sel) dan senyawa ini tidak dapat disintesis dari sumber karbon yang sederhana. Faktor tumbuh sering juga disebut zat tumbuh dan hanya diperlukan dalam jumlah sangat sedikit.

Berdasarkan struktur dan fungsinya dalam metabolisme, faktor tumbuh digolongkan menjadi asam amino, sebagai penyusun protein; base purin dan pirimidin, sebagai penyusun asam nukleat; dan vitamin sebagai gugus prostetis atau bagian aktif dari enzim.

7. Sumber nitrogen

Mikroba dapat menggunakan nitrogen dalam bentuk amonium, nitrat, asam amino, protein, dan sebagainya. Jenis senyawa nitrogen yang digunakan tergantung pada jenis jasadnya. Beberapa mikroba dapat menggunakan nitrogen dalam bentuk gas N_2 (zat lemas) udara. Mikroba ini disebut mikrobia penambat nitrogen.

B. PENGGOLONGAN MIKROBA BERDASARKAN NUTRISI DAN OKSIGEN

1. Berdasarkan sumber karbon

Berdasarkan atas kebutuhan karbon jasad dibedakan menjadi jasad ototrof dan heterotrof. Jasad ototrof ialah jasad yang memerlukan sumber karbon dalam bentuk anorganik, misalnya CO_2 dan senyawa karbonat. Jasad heterotrof ialah jasad yang memerlukan sumber karbon dalam bentuk senyawa organik. Jasad heterotrof dibedakan lagi menjadi jasad saprofit dan parasit. Jasad saprofit ialah jasad yang dapat menggunakan bahan organik yang berasal dari sisa jasad hidup atau sisa jasad yang telah mati. Jasad parasit ialah jasad yang hidup di dalam jasad hidup lain dan menggunakan bahan dari jasad inang (hospes)-nya. Jasad parasit yang dapat menyebabkan penyakit pada inangnya disebut jasad patogen.

2. Berdasarkan sumber energi

Berdasarkan atas sumber energi jasad dibedakan menjadi jasad fototrof, jika menggunakan energi cahaya; dan khemotrof, jika menggunakan energi dari reaksi kimia. Jika didasarkan atas sumber energi dan karbonnya, maka dikenal jasad fotoototrof, fotoheterotrof, khemoototrof dan khemoheterotrof. Perbedaan dari keempat jasad tersebut sbb:

jasad	Sumber karbon	Sumber energi
Fotoototrof	Zat anorganik	Cahaya matahari
Fotoheterotrof	Zat organik	Cahaya matahari
Khemotrof	Zat anorganik	Oksidasi zat anorganik
khemoheterotrof	Zat organik	Oksidasi zat organik

3. Berdasarkan sumber donor elektron

Berdasarkan atas sumber donor elektron jasad digolongkan menjadi jasad litotrof dan organotrof. Jasad litotrof ialah jasad yang dapat menggunakan donor elektron dalam bentuk senyawa anorganik seperti H_2 , NH_3 , H_2S , dan S. jasad organotrof ialah jasad yang menggunakan donor elektron dalam bentuk senyawa organik.

4. Berdasarkan sumber energi dan donor elektron

Berdasarkan atas sumber energi dan sumber donor elektron jasad dapat digolongkan menjadi jasad fotolitotrof, fotoorganotrof, khemolitotrof, dan khemoorganotrof. Perbedaan keempat golongan jasad tersebut sbb:

jasad	Sumber energi	Sumber donor elektron	contoh
Fotolitotrof	Cahaya	Zat anorganik	Tumbuhan tingkat tinggi, alga
Fotoorganotrof	Cahaya	Zat organik	Bakteri belerang fotosintetik

Khemolitotrof	Oksidasi zat anorganik	Zat anorganik	Bakteri besi, bakteri hidrogen, bakteri nitrifikasi
Khemoorganotrof	Oksidasi zat organik	Zat organik	Jasad heterotrof

5. Berdasarkan kebutuhan oksigen

Berdasarkan akan kebutuhan oksigen, jasad dapat digolongkan dalam jasad aerob, anaerob, mikroaerob, anaerob fakultatif, dan kapnofil.

Jasad aerob ialah jasad yang menggunakan oksigen bebas (O_2) sebagai satu-satunya aseptor hidrogen yang terakhir dalam proses respirasinya. Jasad anaerob, sering disebut anaerob obligat atau anaerob 100% ialah jasad yang tidak dapat menggunakan oksigen bebas sebagai aseptor hidrogen terakhir dalam proses respirasinya. Jasad mikroaerob ialah jasad yang hanya memerlukan oksigen dalam jumlah yang sangat sedikit. Jasad aerob fakultatif ialah jasad yang dapat hidup dalam keadaan anaerob maupun aerob. Jasad ini juga bersifat anaerob toleran. Jasad kapnofil ialah jasad yang memerlukan kadar oksigen rendah dan kadar CO_2 tinggi.

C. INTERAKSI ANTAR JASAD DALAM MENGGUNAKAN NUTRIEN

Jika dua atau lebih jasad yang berbeda ditumbuhkan bersama-sama dalam suatu medium, maka aktivitas metabolismenya secara kualitatif maupun kuantitatif akan berbeda jika dibandingkan dengan jumlah aktivitas masing-masing jasad yang ditumbuhkan dalam medium yang sama tetapi terpisah.

Fenomena ini merupakan hasil interaksi metabolisme atau interaksi dalam penggunaan nutrisi yang dikenal sebagai sintropik atau sintropisme atau sinergistik. Sebagai contoh ialah bakteri penghasil metan yang anaerob obligat tidak dapat menggunakan glukosa sebagai substrat, tetapi bakteri tersebut akan segera tumbuh oleh adanya hasil metabolisme bakteri anaerob lain yang dapat menggunakan glukosa.

Contoh lain ialah biakan campuran yang terdiri atas dua jenis mikroba atau lebih sering tidak memerlukan faktor tumbuh untuk pertumbuhannya. Mikroba yang dapat mensintesis bahan selnya dari senyawa organik sederhana dalam medium, akan mengekskresikan berbagai vitamin atau asam amino yang sangat penting untuk mikroba lainnya. Adanya ekskresi tersebut memungkinkan tumbuhnya mikroba lain. Kenyataan ini dapat menimbulkan koloni satelit yang dapat dilihat pada medium padat. Koloni satelit

hanya dapat tumbuh kalau ada ekskresi dari mikroba lain yang menghasilkan faktor tumbuh esensiil bagi mikroba tersebut.

Bentuk interaksi lain adalah cross feeding yang merupakan bentuk sederhana dari simbiose mutualistik. Dalam interaksi ini pertumbuhan jasad yang satu tergantung pada pertumbuhan jasad lainnya, karena kedua jasad tersebut saling memerlukan faktor tumbuh esensiil yang diekskresikan oleh masing-masing jasad.

D. MEDIUM PERTUMBUHAN MIKROBA

Susunan dan kadar nutrisi suatu medium untuk pertumbuhan mikroba harus seimbang agar mikroba dapat tumbuh optimal. Hal ini perlu dikemukakan mengingat banyak senyawa yang menjadi zat penghambat atau racun bagi mikroba jika kadarnya terlalu tinggi (misalnya garam dari asam lemak, gula, dan sebagainya). Banyak alga yang sangat peka terhadap fosfat anorganik. Disamping itu dalam medium yang terlalu pekat aktivitas metabolisme dan pertumbuhan mikroba dapat berubah. Perubahan faktor lingkungan menyebabkan aktivitas fisiologi mikroba dapat terganggu, bahkan mikroba dapat mati.

Medium memerlukan kemasaman (pH) tertentu tergantung pada jenis jasad yang ditumbuhkan. Aktivitas metabolisme mikroba dapat mengubah pH, sehingga untuk mempertahankan pH medium ditambahkan bahan buffer. Beberapa komponen penyusun medium dapat juga berfungsi sebagai buffer.

E. MACAM MEDIUM PERTUMBUHAN

1. Medium dasar/ basal mineral

Medium dasar adalah medium yang mengandung campuran senyawa anorganik. Medium dasar ini selanjutnya ditambah zat lain apabila diperlukan, misalnya sumber karbon, sumber energi, sumber nitrogen, faktor tumbuh, dan faktor lingkungan yang penting seperti pH dan oksigen serta tekanan osmosis.

2. Medium sintetik

Medium sintetik adalah medium yang seluruh susunan kimia dan kadarnya telah diketahui dengan pasti. Sebagai contoh adalah medium dasar yang ditambah NH_4Cl (medium 1) dengan sumber karbon berupa gas CO_2 , apabila diinkubasikan dalam keadaan gelap dapat digunakan untuk menumbuhkan bakteri nitrifikasi khemoototrof,

misalnya bakteri Nitrosomonas. Bakteri ini memperoleh energi dari oksidasi amonium, selain itu amonium juga berfungsi sebagai sumber nitrogen.

Contoh lain adalah medium dengan susunan sama dengan medium 1 tetapi ditambah glukosa (medium 2). Dalam keadaan aerob merupakan medium untuk perbanyakkan jamur dan bakteri yang bersifat heterotrof. Glukosa berfungsi sebagai sumber karbon dan sumber energi. Dalam keadaan anaerob, medium ini dapat digunakan untuk menumbuhkan bakteri fakultatif anaerob maupun anaerob obligat. Energi diperoleh dari hasil fermentasi glukosa.

Untuk menumbuhkan mikroba yang memerlukan faktor tumbuh dapat menggunakan medium yang komposisinya sama dengan medium 2 tetapi ditambah asam nikotinat (vitamin) sebagai faktor tumbuh (medium 3).

3. Medium kompleks

Medium kompleks adalah medium yang susunan kimianya belum diketahui dengan pasti. Sebagai contoh medium ini adalah medium dasar yang ditambah glukosa dan ekstrak khamir (medium 4). Susunan kimia ekstrak khamir tidak diketahui secara pasti, tetapi mengandung berbagai faktor tumbuh yang sering diperlukan oleh mikroba. Medium ini dapat untuk menumbuhkan mikroba kemoheterotrof aerob maupun anaerob baik yang memerlukan maupun yang tidak memerlukan faktor tumbuh. Medium yang juga termasuk medium kompleks adalah yang mengandung ekstrak tanah.

Tabel 11.2. Contoh susunan medium dasar dan medium sintetik

Medium dasar	Bahan tambahan			
	Medium 1	Medium 2	Medium 3	Medium 4
Air, 1 liter K ₂ HPO ₄ , 1 gram MgSO ₄ .7H ₂ O, 0,2 gram FeSO ₄ .7H ₂ O, 0,01 gram CaCl ₂ , 0,01 gram Unsur mikro (garam anorganik	NH ₄ Cl, 1 gram	Glukosa, 5 gram NH ₄ Cl, 1 gram	Glukosa, 5 gram NH ₄ Cl, 1 gram Asam nikotinat, 0,1 gram	Glukosa, 5 gram Ekstrak khamir

Mn, Mo, Cu, Co, Zn), masing-masing 0,02-0,5 mg				
--	--	--	--	--

4. Medium diperkaya

Medium diperkaya adalah medium yang ditambah zat tertentu yang merupakan nutrisi spesifik untuk jenis mikroba tertentu. Medium ini digunakan untuk membuat kultur diperkaya (enrichment culture) dan untuk mengisolasi mikroba spesifik, dengan cara mengatur faktor lingkungan (suhu, pH, cahaya), kebutuhan nutrisi spesifik dan sifat fisiologinya. Dengan demikian dapat disusun medium diperkaya untuk bakteri yang bersifat khemoheterotrof, khemoototrof, fotosintetik, dan untuk mikroba lain yang bersifat spesifik.

XII. PERANAN MIKROBA DI BIDANG KESUBURAN TANAH

A. MIKROHABITAT DALAM TANAH

1. Mikrohabitat dalam struktur tanah

Di setiap tempat seperti dalam tanah, udara maupun air selalu dijumpai mikroba. Umumnya jumlah mikroba dalam tanah lebih banyak daripada dalam air ataupun udara. Umumnya bahan organik dan senyawa anorganik lebih tinggi dalam tanah sehingga cocok untuk pertumbuhan mikroba heterotrof maupun autotrof.

Keberadaan mikroba di dalam tanah terutama dipengaruhi oleh sifat kimia dan fisika tanah. Komponen penyusun tanah yang terdiri atas pasir, debu, lempung dan bahan organik maupun bahan penyemen lain akan membentuk struktur tanah. Struktur tanah akan menentukan keberadaan oksigen dan lengas dalam tanah. Dalam hal ini akan terbentuk lingkungan mikro dalam suatu struktur tanah. Mikroba akan membentuk mikrokoloni dalam struktur tanah tersebut, dengan tempat pertumbuhan yang sesuai dengan sifat mikroba dan lingkungan yang diperlukan. Dalam suatu struktur tanah dapat dijumpai berbagai mikrokoloni seperti mikroba heterotrof pengguna bahan organik maupun bakteri autotrof, dan bakteri aerob maupun anaerob. Untuk kehidupannya, setiap jenis mikroba mempunyai kemampuan untuk merubah satu senyawa menjadi senyawa lain dalam rangka mendapatkan energi dan nutrien. Dengan demikian adanya mikroba dalam tanah menyebabkan terjadinya daur unsur-unsur seperti karbon, nitrogen, fosfor dan unsur lain di alam.

2. Lingkungan rhizosfer

Akar tanaman merupakan habitat yang baik bagi pertumbuhan mikroba. Interaksi antara bakteri dan akar tanaman akan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi keduanya. Permukaan akar tanaman disebut rhizoplane. Sedangkan rhizosfer adalah selapis tanah yang menyelimuti permukaan akar tanaman yang masih dipengaruhi oleh aktivitas akar. Tebal tipisnya lapisan rhizosfer antar setiap tanaman berbeda.

Rhizosfer merupakan habitat yang sangat baik bagi pertumbuhan mikroba oleh karena akar tanaman menyediakan berbagai bahan organik yang umumnya menstimulasi pertumbuhan mikroba. Bahan organik yang dikeluarkan oleh akar dapat berupa:

1. Eksudat akar : bahan yang dikeluarkan dari aktivitas sel akar hidup seperti gula, asam amino, asam organik, asam lemak dan sterol, faktor tumbuh, nukleotida, flavonon, enzim, dan miscellaneous.
2. Sekresi akar : bahan yang dipompakan secara aktif keluar dari akar.
3. Lisat akar : bahan yang dikeluarkan secara pasif saat autolisis sel akar.
4. Musigel : bahan sekresi akar, sisa sel epidermis, sel tudung akar yang bercampur dengan sisa sel mikroba, produk metabolit, koloid organik dan koloid anorganik

Enzim utama yang dihasilkan oleh akar adalah oksidoreduktase, hidrolase, liase, dan transferase. Sedangkan enzim yang dihasilkan oleh mikroba di rhizosfer adalah selulase, dehidrogenase, urease, fosfatase dan sulfatase.

Dengan adanya berbagai senyawa yang menstimulasi pertumbuhan mikroba, menyebabkan jumlah mikroba di lingkungan rhizosfer sangat tinggi. Perbandingan jumlah mikroba dalam rhizosfer (R) dengan tanah bukan rhizosfer (S) yang disebut nisbah R/S, sering digunakan sebagai indeks kesuburan tanah. Semakin subur tanah, maka indeks R/S semakin kecil, yang menandakan nutrisi dalam tanah bukan rhizosfer juga tercukupi (subur). Sebaliknya semakin tidak subur tanah, maka indeks R/S semakin besar, yang menandakan nutrisi cukup hanya di lingkungan rhizosfer yang berasal dari bahan organik yang dikeluarkan akar, sedang di tanah non-rhizosfer nutrisi tidak mencukupi (tidak subur). Nilai R/S umumnya berkisar antara 5-20.

Mikroba rhizosfer dapat memberi keuntungan bagi tanaman, oleh karena:

Mikroba dapat melarutkan dan menyediakan mineral seperti N,P, Fe dan unsur lain.

2. Mikroba dapat menghasilkan vitamin, asam amino, auxin dan giberelin yang dapat menstimulir pertumbuhan tanaman.
3. Mikroba menguntungkan akan menghambat pertumbuhan bakteri lain yang patogenik dengan menghasilkan antibiotik.

Pseudomonadaceae merupakan kelompok bakteri rhizosfer (rhizobacteria) yang dapat menghasilkan senyawa yang dapat menstimulir pertumbuhan tanaman. Contoh spesies yang telah banyak diteliti dapat merangsang pertumbuhan tanaman adalah *Pseudomonas fluorescens*.

C. MIKROBA DAN NUTRISI TANAMAN

Berbagai kelompok mikroba di dalam tanah berperan penting dalam penyediaan unsur hara bagi tanaman. Dalam hal ini akan dibahas lebih lanjut menurut unsur hara yang disediakan untuk tanaman.

1. Transformasi nitrogen (N)

Unsur N adalah komponen utama protoplasma, terdapat dalam jumlah besar dalam bentuk teroksidasi. Bahan yang mengandung N dapat mengalami amonifikasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi, tergantung bentuk senyawa-N dan lingkungannya.

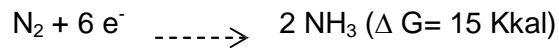
Beberapa reaksi redoks kunci dalam daur N di alam semuanya dilakukan oleh mikroba. Secara termodinamik N_2 gas adalah bentuk paling stabil dan seimbang. Jumlah N terbesar di udara sebagai gas N_2 yang merupakan sumber utama N. Untuk memecahkan ikatan rangkap 3 $N \equiv N$ diperlukan energi yang besar, berarti penggunaan N_2 adalah proses yang memerlukan energi besar. Hanya sejumlah kecil jasad yang dapat menggunakan N_2 dalam proses penambatan (fiksasi) N_2 , yang menyebabkan N lebih mudah digunakan yaitu dalam bentuk amonia dan nitrat. Oleh karena N_2 gas merupakan sumber utama N maka penambatan N_2 secara ekologis sangat penting.

Dalam daur N secara global terjadi pemindahan dari atmosfer ke dalam tanah. Sebagian gas N berupa oksida (N_2O), dan sebagian lain berbentuk gas NH_3 . Pemindahan antara tanah dan air terutama sebagai N-organik, ion ammonium, dan ion nitrat.

a. Penambatan Nitrogen (N_2) oleh Bakteri Tanah

Penambatan N_2 dapat terjadi secara simbiotik, nonsimbiotik, dan kimia. Nitrogenase adalah enzim utama dalam penambatan N_2 udara secara biologis. Enzim ini

mempunyai dua macam protein, yang satu mengandung Mo dan Fe dan yang lain mengandung Fe. Enzim ini sangat sensitif terhadap O₂ dan aktivitasnya memerlukan tekanan O₂ sangat rendah. Selain itu juga diperlukan ATP, feredoksin, pereduksi dan mungkin sitokrom dan koensim. Reaksinya adalah sebagai berikut:



Reaksi ini memerlukan energi karena G bernilai positif. Amonia yang dibebaskan diasimilasi menjadi asam amino yang selanjutnya disusun menjadi protein.

Dalam lingkungan tanah, penambatan N₂ terbesar dilakukan oleh bakteri Rhizobium (Bakteri yang bersimbiosis dalam perakaran legum). Jumlah N₂ yang ditambat oleh bakteri ini 2-3 kali lebih besar daripada oleh jasad nonsimbiotik. Bakteri Rhizobium yang bersimbiosis dengan akar tanaman kedelai atau alfalfa dapat menambat lebih dari 300 kg N/ha/th, sedang penambat N yang hidup bebas Azotobacter hanya mampu menambat 0.5-2.5 kg N/ha/th.

Selain Azotobacter, bakteri lain yang dapat menambat N₂ udara adalah spesies-spesies Beijerinckia, Chromatium, Rhodopseudomonas, Rhodospirillum, Rhodomicrobium, Chlorobium, Chloropseudomonas, Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Klebsiella, Bacillus, Clostridium, Azospirillum, Pseudomonas, Vibrio, Thiobacillus, dan Methanobacillus. Kecepatan penambatan N₂ udara oleh jasad non-simbiotik kecil, tetapi mikroba ini distribusinya dalam tanah tersebar luas, sehingga peranannya penting. Kecepatan penambatan N₂ udara oleh Azotobacter dan Azospirillum lebih tinggi di daerah rhizosfer daripada dalam tanah di luar daerah perakaran. Hal ini disebabkan karena adanya bahan organik dari eksudat akar.

Pada lingkungan tanah tergenang, sianobakteria seperti Anabaena dan Nostoc merupakan jasad yang paling penting dalam menambat N₂ udara. Sebagian sianobakteria membentuk heterosis yang memisahkan nitrogenase yang sensitif terhadap O₂ dari ekosistem yang menggunakan O₂ (lingkungan aerobik). Sianobakteria pada tanah sawah yang ditanami padi, dalam keadaan optimum dapat menambat 100-150 kg N/ha/tahun. Sianobakteria penambat nitrogen dapat hidup bersimbiosis dengan jasad lain, seperti dengan jamur pada lumut kerak (Lichenes), dengan tanaman air Azolla misalnya Anabaena azollae.

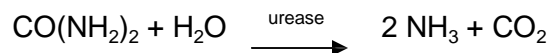
b. Amonifikasi

Berbagai tanaman, binatang, dan mikroba dapat melakukan proses amonifikasi. Amonifikasi adalah proses yang mengubah N-organik menjadi N-ammonia. Bentuk senyawa N dalam jasad hidup dan sisa-sisa organik sebagian besar terdapat dalam bentuk amino penyusun protein. Senyawa N organik yang lain adalah khitin, peptidoglikan, asam nukleat, selain itu juga terdapat senyawa N-organik yang banyak dibuat dan digunakan sebagai pupuk yaitu urea.

Proses amonifikasi dari senyawa N-organik pada prinsipnya merupakan reaksi peruraian protein oleh mikroba. Secara umum proses perombakan protein dimulai dari peran enzim protease yang dihasilkan mikroba sehingga dihasilkan asam amino. Selanjutnya tergantung macam asam aminonya dan jenis mikroba yang berperan maka asam-asam amino akan dapat terdeaminasi melalui berbagai reaksi dengan hasil akhirnya nitrogen dibebaskan sebagai ammonia. Reaksi umumnya adalah sebagai berikut:



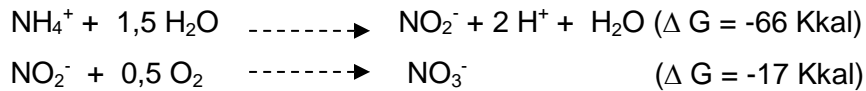
Urea yang mengalami proses amonifikasi akan terhidrolisis oleh adanya enzim urease yang dihasilkan oleh mikroba tanah. Urea yang dimasukkan ke dalam tanah akan mengalami proses amonifikasi sebagai berikut:



Dalam keadaan asam dan netral amonia berada sebagai ion amonium. Sebagian amonia hasil amonifikasi dibebaskan sebagai gas NH_3 ke atmosfer, sehingga lepas dari sistem tanah. Amonia dan bentuk nitrogen lain di eko-atmosfer dapat mengalami perubahan kimia dan fotokimia, sehingga dapat kembali ke litosfer dan hidrosfer bersama-sama air hujan. Ion amonium dapat diasimilasi tanaman dan mikroba, selanjutnya diubah menjadi asam amino atau senyawa N lain. Di dalam sel, ammonia direaksikan oleh glutamat atau glutamin sintase atau mengalami proses aminasi langsung dengan asam-ketokarboksilat sehingga berubah menjadi asam amino.

c. Nitrifikasi

Dalam proses nitrifikasi, ammonia (NH_3) atau ion NH_4^+ dioksidasi menjadi nitrit dan nitrat dengan reaksi sebagai berikut:



Proses ini dilakukan oleh mikroba khemoototrof, yang menggunakan energinya untuk asimilasi karbon dalam bentuk CO_2 . Kedua langkah reaksi yang menghasilkan energi ini dilakukan oleh jasad yang berbeda, tetapi reaksinya berlangsung bersamaan sehingga jarang terjadi akumulasi NO_2^- . Dalam reaksi tersebut dihasilkan ion H^+ , sehingga ada kemungkinan dapat menurunkan pH lingkungan.

Di dalam tanah, genus utama pengoksidasi ammonia menjadi nitrit adalah Nitrosomonas dan yang dominan menghasilkan nitrat adalah Nitrobacter. Mikroba lain yang mampu mengoksidasi ammonia menjadi nitrit adalah Nitrospira, Nitrosococcus, dan Nitrosolobus. Selain Nitrobacter, mikroba lain yang mampu mengubah nitrit menjadi nitrat adalah Nitrospira, dan Nitrococcus. Bakteri tanah yang mengoksidasi ammonium menjadi nitrit dan nitrat umumnya mempunyai sifat khemoautotrofik. Kelompok bakteri ini mampu menggunakan senyawa anorganik sebagai satu-satunya sumber energi dan menggunakan CO_2 sebagai sumber karbon. Selain itu terdapat mikroba heterotrof baik bakteri maupun jamur juga berperan dalam proses nitrifikasi.

d. Reduksi Nitrat (Denitrifikasi)

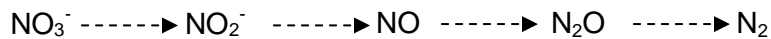
Ion nitrat dapat diubah menjadi bahan organik oleh mikroba melalui proses asimilasi reduksi nitrat. Sekelompok mikroba heterotrof termasuk bakteri, jamur dan algae dapat mereduksi nitrat. Proses ini menggunakan sistem enzim nitrat dan nitrit reduktase, membentuk ammonia yang kemudian disintesis menjadi protein.

Pada lingkungan tanpa oksigen, ion nitrit dapat berfungsi sebagai aseptor elektron terakhir, yang dikenal sebagai proses respirasi nitrat atau asimilasi nitrat. Dalam proses desimilasi reduksi nitrat, nitrat diubah menjadi bahan tereduksi sedang senyawa organik dioksidasi. Pada keadaan anaerob, reaksi ini lebih banyak menghasilkan energi dibandingkan energi yang dihasilkan oleh reaksi fermentasi.

Ada dua tipe desimilasi reduksi nitrat. Sekelompok mikroba fakultatif anaerob seperti Alcaligenes, Escherichia, Aeromonas, Enterobacter, Bacillus, Flavobacterium, Nocardia, Spirillum, Staphylococcus, dan Vibrio mampu mereduksi nitrat menjadi nitrit

dalam keadaan anaerob. Nitrit yang dihasilkan diekskresikan, sehingga mikroba dapat mereduksinya melalui hidroksilamin ke ammonium. Ensim yang bekerja pada reaksi tersebut melibatkan sistem ensim nitrat reduktase dan nitrit reduktase.

Mikroba pereduksi nitrat seperti *Paracoccus denitrificans*, *Thiobacillus denitrificans* dan beberapa *Pseudomonas* mempunyai tahap reaksi reduksi yang lebih lengkap sebagai berikut:



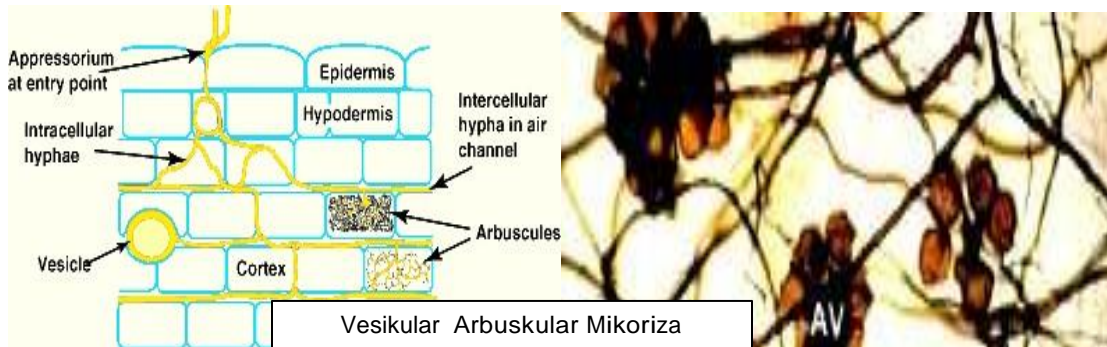
Reaksi denitrifikasi ini dapat terjadi dalam keadaan lingkungan anaerob pada tekanan oksigen yang sangat rendah (reduktif). Walaupun demikian denitrifikasi juga dapat terjadi dalam keadaan aerob apabila terdapat mikrohabitat anion. Mikroba denitrifikasi utama di dalam tanah ialah genera *Pseudomonas* dan *Alcaligenes*. Mikroba lain yang juga mampu mereduksi nitrat adalah *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas*, dan *Propionibacterium*.

4. Transformasi fosfor oleh mikroba

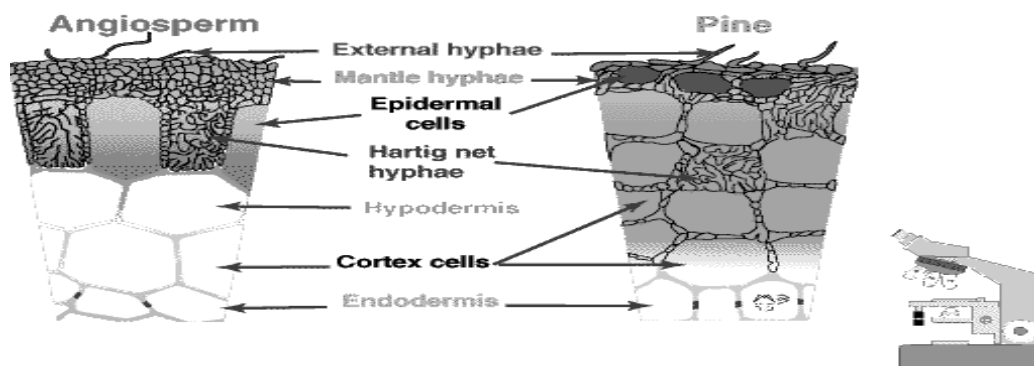
Mikroba tanah dapat berperan dalam proses penyediaan unsur hara untuk tanaman. Pada tanah-tanah kahat unsur hara tertentu yang perlu masukan tinggi untuk memanipulasi secara kimia agar ketersediaannya meningkat, maka penyediaan secara biologis dengan menggunakan mikroba menjadi sangat penting. Kenyataan di alam, pada rhizosfer (daerah sekitar perakaran) setiap tanaman merupakan habitat yang sangat baik untuk pertumbuhan mikroba. Oleh karenanya penggunaan mikroba yang hidup di rhizosfer yang dapat meningkatkan serapan unsur hara tanaman menjadi perhatian utama pada kajian ini. Mikroba yang berperan dalam transformasi P dalam tanah adalah mikoriza yang bersimbiosis dengan perakaran tanaman dan mikroba pelarut fosfat yang hidup bebas di daerah perakaran.

a. Vesikular Arbuskular Mikoriza

Pada keadaan tanah yang kurang menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman, telah ditemukan adanya simbiosis tanaman dengan sejenis jamur yang disebut mikoriza. Mikoriza terdiri atas beberapa macam spesies, simbion untuk tanaman pertanian pada umumnya adalah endomikoriza yang dikenal sebagai vesikular arbuskular mikoriza (VAM). Tanaman memerlukan mikoriza untuk pengambilan unsur hara terutama kemampuannya untuk meningkatkan serapan P, sehingga dapat membantu pertumbuhan tanaman terutama pada tanah-tanah kahat P.



Ektomikoriza



Perakaran tanaman yang terinfeksi mikoriza mempunyai daya serap yang lebih besar terhadap air dan unsur hara, khususnya P, apabila dibandingkan dengan tanaman tanpa mikoriza. Hal ini disebabkan adanya miselium jamur mikoriza yang tumbuh keluar dari akar sehingga daya jangkauan dan luas permukaan perakaran meningkat, akibatnya dapat memperbesar daya serap akar. Diduga bahwa hifa eksternal mikoriza menyerap ion secara intersepsi dan melalui pertukaran kontak langsung, sehingga penyerapan ion oleh tanaman dengan cara tersebut menjadi lebih besar, sedangkan penyerapan secara difusi dan aliran massa tetap berlangsung. Dengan demikian pada ketersediaan P yang sama, maka tanaman bermikoriza dapat menyerap P yang lebih besar apabila dibandingkan dengan tanaman tanpa mikoriza.

Tanaman bermikoriza mempunyai daya serap akar yang lebih besar sehingga mengakibatkan unsur hara yang dapat diserap oleh tanaman juga meningkat. Oleh karena sifat dan cara penyerapan unsur hara yang berbeda satu sama lain, maka jumlah unsur hara yang dapat diserap oleh adanya miselium jamur mikoriza ini kemungkinan juga berbeda, dan hal ini dapat menyebabkan respon mikoriza pada serapan unsur hara tertentu sangat besar tetapi untuk unsur hara yang lain tidak sama. Penyerapan unsur hara oleh tanaman dapat secara pasif dan aktif, ada yang

berpendapat bahwa pengaruh mikoriza lebih nyata pada unsur hara yang terutama diserap tanaman secara pasif dan sifat ionnya tidak lincah, seperti fosfor yang terutama diserap oleh akar secara difusi. Fosfor merupakan unsur penting penyusun ATP, dan ATP merupakan bentuk energi tinggi yang sangat berperanan dalam penyerapan unsur hara secara aktif, sehingga peningkatan serapan fosfor memungkinkan peningkatan serapan unsur hara lain yang diserap secara aktif oleh perakaran tanaman.

Mikoriza adalah suatu bentuk hubungan simbiosis mutualistik antara jamur (mykus) tanah kelompok tertentu dan perakaran (rhiza) tumbuhan tingkat tinggi. Berdasarkan struktur tubuhnya dan cara infeksi terhadap tanaman inang, mikoriza dapat dikelompokkan ke dalam 3 golongan besar yaitu Endomikoriza, Ektomikoriza, dan Ektendomikoriza. Endomikoriza lebih dikenal dengan Vesikular Arbuskular Mikoriza atau disingkat VAM, karena pada simbiosis dengan perakaran dapat membentuk arbuskul dan vesikula di dalam akar tanaman. Berdasarkan struktur arbuskul atau vesikula yang dibentuk, maka VAM dapat digolongkan ke dalam 2 sub ordo, yaitu Gigasporinae dan Glominae. Sub ordo Gigasporinae terdiri atas satu famili Gigasporaceae yang beranggotakan 2 genus yaitu *Gigaspora* sp. dan *Scutellospora* sp. Kedua genus ini tidak membentuk struktur vesikula tetapi hanya membentuk arbuskul apabila berasosiasi dengan akar tumbuhan. Salah satu anggota sub ordo Glominae adalah *Glomus* sp.

Vesikular Arbuskular Mikoriza merupakan simbiosis antara jamur tanah yang termasuk kelompok Endogonales dengan semua tanaman yang termasuk dalam Bryophyta, Pteridophyta, Gymnospermae dan Angiospermae, kecuali pada famili Cruciferae, Chenopodiaceae dan Cyperaceae yang belum diketahui adanya simbiosis dengan jamur tersebut. Simbiosis antara tanaman dengan mikoriza terjadi dengan adanya pemberian karbohidrat dari tanaman kepada jamur dan pemberian unsur hara terutama P dari jamur kepada tanaman. Oleh karena itu perkembangan mikoriza pada akar sangat tergantung pada tingkat fotosintesis tanaman inang. Jamur membutuhkan senyawa carbon yang dihasilkan oleh tanaman inang, sehingga kemampuan tanaman untuk mensuplai senyawa carbon dari hasil fotosintesis menentukan keberhasilan tanaman bersimbiosis dengan jamur. Akar tanaman dapat menghasilkan senyawa yang dapat merangsang pertumbuhan jamur VAM. Senyawa tersebut berupa flavonoid yang disebut eupalitin (3,5-dihidroksi-6,7-dimetoksi-4-hidroksi flavon) yang dapat merangsang

pertumbuhan hifa VAM, selain itu ada senyawa lain yang belum teridentifikasi yang dapat berfungsi sebagai molekul sinyal untuk terjadinya simbiosis tanaman-VAM.

Bagian penting dari VAM adalah adanya hifa eksternal yang dibentuk diluar akar tanaman. Hifa ini membantu memperluas daerah penyerapan akar tanaman. Jumlah miselium eksternal dapat mencapai 80 cm per cm panjang akar, yang perkembangannya dipengaruhi oleh keadaan tanah terutama aerasi. Dengan semakin luasnya daerah penyerapan akar maka semakin besar pula daya serap akarnya, sehingga adanya mikoriza pada perakaran tanaman akan dapat meningkatkan penyerapan unsur hara. Penyerapan air oleh akar juga menjadi lebih besar, sehingga tanaman lebih tahan terhadap kekeringan. Manfaat lain adanya mikoriza adalah dapat meningkatkan ketahanan terhadap serangan patogen akar, dan dapat memproduksi hormon dan zat pengatur tumbuh yang menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman.

Vesikular Arbuskular Mikoriza mempunyai struktur hifa eksternal dan hifa internal, hifa gulung, arbuskul dan vesikula. Hifa jamur mikoriza tidak bersekat, tumbuh diantara sel-sel korteks dan bercabang-cabang di dalam sel tersebut. Di dalam jaringan yang diinfeksi dibentuk hifa yang bergelung-gelung atau bercabang-cabang yang sering disebut arbuskul. Arbuskul merupakan cabang-cabang hifa dikotom, struktur ini akan tampak sebagai massa protoplasma yang berbutir-butir dan bercampur baur dengan protoplasma sel tanaman. Arbuskul mempunyai hifa bercabang halus yang dapat meningkatkan 2-3 kali luas permukaan plasmolema akar, dan diduga berperan sebagai pemindah unsur hara antara jamur dan tanaman inang. Arbuskul dapat dibentuk dua sampai tiga hari setelah infeksi jamur terjadi pada perakaran. Vesikula mengandung lipida, terutama berfungsi sebagai organ penyimpan. Apabila sel kortek rusak, vesikula dapat dibebaskan ke dalam tanah, dan selanjutnya dapat berkecambah dan merupakan propagul infeksi. Perakaran yang terinfeksi VAM tidak terjadi perubahan nyata secara fisik, sehingga hanya dapat dideteksi dengan teknik pewarnaan dan diamati dengan mikroskop. Di dalam tanah, mikoriza dapat membentuk spora yang tumbuh satu-satu atau berkelompok yang disebut sporokarp. Berdasarkan tipe sporanya, dibedakan yang dapat membentuk klamidospora, yaitu genera *Glomus*, *Sclerocystis*, dan *Complexipes*. Sedangkan yang membentuk asigospora adalah genera *Gigaspora*, *Acaulospora* dan *Entrophospora*.

Pengaruh yang menguntungkan dari mikoriza untuk pertumbuhan tanaman, yang menunjukkan bahwa tanaman yang bermikoriza mempunyai berat kering yang lebih besar dari tanaman yang tidak bermikoriza. Tanaman yang bermikoriza tumbuh normal sedangkan tanaman tanpa mikoriza menunjukkan gejala defisiensi P. Mikoriza memperbaiki pertumbuhan tanaman dengan jalan meningkatkan penyerapan unsur-unsur hara dari dalam tanah, terutama unsur P. Oleh karena P merupakan hara utama untuk pertumbuhan tanaman, maka pengaruh infeksi mikoriza sangat nyata. Dengan demikian respon pertumbuhan tanaman merupakan akibat langsung ataupun tidak langsung dari perbaikan penyerapan P. Selain itu juga didukung oleh peningkatan serapan unsur-unsur lain, seperti N, S, Zn dan Cu.

b. Mikroba Pelarut Fosfat

Bakteri yang diketahui dapat melarutkan fosfat adalah bermacam-macam spesies dari genera *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Streptomyces*, dan *Flavobacterium*. Spesies-spesies bakteri yang mempunyai daya tinggi untuk melarutkan fosfat adalah *Pseudomonas striata*, *P. rathonis*, *Bacillus polymyxa*, dan *Bacillus megaterium*. Semua bakteri tersebut mempunyai kemampuan yang stabil dalam melarutkan P tidak tersedia dalam tanah dan batu fosfat. Kebanyakan bakteri yang dapat melarutkan fosfat adalah bakteri pembentuk spora. Selain bakteri, berbagai jamur yang diketahui dapat melarutkan fosfat adalah bermacam-macam spesies dari genera *Aspergillus*, *Penicillium* dan khamir. Beberapa varitas dari spesies jamur *Aspergillus niger* mempunyai daya tinggi untuk melarutkan fosfat.

Mikroba pelarut fosfat heterotrof dapat menghasilkan asam-asam organik. Berbagai asam organik tersebut terutama asam-asam hidroksi dapat mengikat secara khelat dan membentuk kompleks yang relatif stabil dengan kation-kation Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , dan Al^{3+} , sehingga fosfat yang semula terikat oleh kation-kation tersebut menjadi terlarut. Beberapa bakteri disamping menghasilkan asam organik non-volatil juga dapat membentuk asam volatil. Asam organik yang dihasilkan oleh satu jenis bakteri dapat bermacam-macam, seperti asam glukonat.

Pembentukan asam organik seperti asam-asam karboksilat yang terjadi selama perombakan bahan organik oleh jamur dapat menyebabkan larutnya batu fosfat. Pelarutan batu fosfat dapat diketahui dengan meningkatnya Ca yang terlepas dari batu fosfat. Dari metode tersebut diketahui bahwa pelarutan batu fosfat meningkat terus

sampai hari ke 90. Peningkatan jumlah asam karboksilat dan total keasaman organik sebanding dengan peningkatan pelarutan batu fosfat.

Beberapa mikroba yang bersifat khemolitotrofik juga berperan dalam proses pelarutan fosfat tidak tersedia dalam tanah. Bakteri kelompok Nitrosomonas dan Thiobacillus berturut-turut dapat menghasilkan asam nitrat dan asam sulfat. Asam-asam tersebut merupakan asam kuat yang mampu melarutkan fosfat yang berbentuk tidak larut.

D. DEKOMPOSISI BAHAN ORGANIK DAN PROSES PENGOMPOSAN

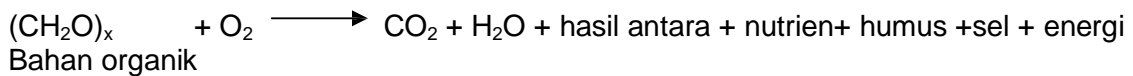
1. Dekomposisi bahan organik

Karbon didaur secara aktif antara CO₂ anorganik dan macam-macam bahan organik penyusun sel hidup. Metabolisme ototrof jasad fotosintetik dan khemolitotrof menghasilkan produksi primer dari perubahan CO₂ anorganik menjadi C-organik. Metabolisme respirasi dan fermentasi mikroba heterotrof mengembalikan CO₂ anorganik ke atmosfer. Proses perubahan dari C-organik menjadi anorganik pada dasarnya adalah upaya mikroba dan jasad lain untuk memperoleh energi.

Pada proses peruraian bahan organik dalam tanah ditemukan beberapa tahap proses. Hewan-hewan tanah termasuk cacing tanah memegang peranan penting pada penghancuran bahan organik pada tahap awal proses. Bahan organik yang masih segar akan dihancurkan secara fisik atau dipotong-potong sehingga ukurannya menjadi lebih kecil. Perubahan selanjutnya dikerjakan oleh mikroba. Enzim-enzim yang dihasilkan oleh mikroba merubah senyawa organik secara kimia, hal ini ditandai pada bahan organik yang sedang mengalami proses peruraian maka kandungan zat organik yang mudah terurai akan menurun dengan cepat.

Unsur karbon menyusun kurang lebih 45-50 persen dari bobot kering tanaman dan binatang. Apabila bahan tersebut dirombak oleh mikroba, O₂ akan digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik dan akan dibebaskan CO₂. Selama proses peruraian, mikroba akan mengasimilasi sebagian C, N, P, S, dan unsur lain untuk sintesis sel, jumlahnya berkisar antara 10-70 % tergantung kepada sifat-sifat tanah dan jenis-jenis mikroba yang aktif. Setiap 10 bagian C diperlukan 1 bagian N (nisbah C/N=10) untuk membentuk plasma sel. Dengan demikian C-organik yang dibebaskan dalam bentuk CO₂ dalam keadaan aerobik hanya 60-80 % dari seluruh kandungan karbon yang ada. Hasil perombakan mikroba proses aerobik meliputi CO₂,

NH_4 , NO_3 , SO_4 , H_2PO_4 . Pada proses anaerobik dihasilkan asam-asam organik, CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S , dan zat-zat lain yang berupa senyawa tidak teroksidasi sempurna, serta akan terbentuk biomassa tanah yang baru maupun humus sebagai hasil dekomposisi yang relatif stabil. Secara total, reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



2. Proses pengomposan

Kompos adalah bahan organik hasil proses dekomposisi dan mempunyai susunan yang relatif stabil. Kompos banyak digunakan untuk memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Secara alami kompos dapat terjadi dari peruraian sisa-sisa tumbuhan dan hewan. Pengomposan secara alami berlangsung dengan lambat, tetapi dengan berkembangnya bioteknologi maka proses pengomposan dapat dipercepat.

Pada proses pengomposan terjadi proses biokonversi bahan organik oleh berbagai kelompok mikroba heterotrof. Mikroba yang berperan dalam proses tersebut mulai dari bakteri, jamur aktinomisetes dan protozoa. Peranan mikroba yang bersifat selulolitik dan ligninolitik sangat besar pada proses dekomposisi sisa tanaman yang banyak mengandung lignoselulosa.

Selama pengomposan terjadi proses oksidasi C-organik menjadi CO_2 yang dapat membebaskan energi dalam bentuk panas. Dalam pengomposan tertutup, suhunya dapat mencapai $65\text{-}75^\circ\text{C}$. Pada suhu tersebut aktivitas mikroba pada umumnya turun, dan proses perombakannya dilanjutkan oleh mikroba termofil yang mulai berkembang apabila suhu meningkat sampai 50°C . Setelah suhu turun kembali akan ditumbuhi lagi oleh mikroba mesofil, dan merupakan pertanda bahwa kompos sudah mulai matang.

Dari uraian diatas maka banyak faktor yang mempengaruhi proses pengomposan, seperti nisbah C/N bahan yang akan dikomposkan, ukuran bahan, kelembaban dan aerasi, suhu, kemasaman, adanya mikroba, dan lain sebagainya.

Nisbah C/N yang ideal untuk pengomposan adalah 30-40, apabila nisbah terlalu rendah banyak nitrogen yang hilang (tidak efisien) dan apabila terlalu tinggi proses pengomposan lambat. Ukuran bahan yang lebih kecil akan memperbesar luas permukaan, sehingga memperbesar kontak dengan mikroba. Ukuran yang terlalu halus dan kandungan lengasnya terlalu tinggi menyebabkan keadaan anaerob, sehingga

sebaiknya dicampur dengan bahan kasar untuk menciptakan keadaan yang aerob. Kelembaban optimum yang baik antara 50-60 %. Pengomposan akan berjalan baik jika pH awal sedikit asam (pH 6), dan selama pengomposan pada keadaan netral, setelah pH meningkat pH sedikit alkalis (pH 7,5-8,5). Pengomposan dapat dipercepat dengan inokulasi mikroba seperti mikroba termofil, selulolitik, ligninolitik, dan sebagainya.

Tanda-tanda kompos yang telah matang adalah berwarna coklat sampai kehitaman, tidak larut dalam air dan sebagian dapat tersuspensi koloidal, ekstrak dalam larutan basa berwarna gelap (mengandung asam humat, fulvat, dan humin), nisbah C/N antara 15-20, KPK dan kapasitas adsorpsi air besar.

XIII. PERANAN MIKROBA DI BIDANG LINGKUNGAN

Akhir-akhir ini mikroba banyak dimanfaatkan di bidang lingkungan, terutama untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan, baik di lingkungan tanah maupun perairan. Bahan pencemar dapat bermacam-macam mulai dari bahan yang berasal dari sumber-sumber alami sampai bahan sintetik, dengan sifat yang mudah dirombak (biodegradable) sampai sangat sulit bahkan tidak bisa dirombak (rekalsitran/nonbiodegradable) maupun bersifat meracuni bagi jasad hidup dengan bahan aktif tidak rusak dalam waktu lama (persisten). Dalam hal ini akan dibahas beberapa pemanfaatan mikroba dalam proses peruraian bahan pencemar dan peran lainnya untuk mengatasi bahan pencemar.

A. PERURAIAN/BIODEGRADASI BAHAN PENCEMAR (POLUTAN)

1. Mikroba dalam pembersihan air

Banyak mikroba yang terdapat dalam air limbah meliputi mikroba aerob, anaerob, dan fakultatif anaerob yang umumnya bersifat heterotrof. Mikroba tersebut kebanyakan berasal dari tanah dan saluran pencernaan. Bakteri colon (coliforms) terutama *Escherichia coli* sering digunakan sebagai indeks pencemaran air. Bakteri tersebut berasal dari saluran pencernaan manusia dan hewan yang dapat hidup lama dalam air, sehingga air yang banyak mengandung bakteri tersebut dianggap tercemar. Untuk mengurangi mikroba pencemar dapat digunakan saringan pasir atau trickling filter yang segera membentuk lendir di permukaan bahan penyaring, sehingga dapat menyaring bakteri maupun bahan lain untuk penguraian. Penggunaan lumpur aktif juga dapat mempercepat perombakan bahan organik yang tersuspensi dalam air.

Secara kimia digunakan indeks BOD (biological oxygen demand) dan COD (chemical oxygen demand). Prinsip perombakan bahan dalam limbah adalah oksidasi, baik oksidasi biologis maupun oksidasi kimia. Semakin tinggi bahan organik dalam air menyebabkan kandungan oksigen terlarut semakin kecil, karena oksigen digunakan oleh mikroba untuk mengoksidasi bahan organik. Adanya bahan organik tinggi dalam air menyebabkan kebutuhan mikroba akan oksigen meningkat, yang diukur dari nilai BOD yang meningkat. Untuk mempercepat perombakan umumnya diberi aerasi untuk meningkatkan oksigen terlarut, misalnya dengan aerator yang disertai pengadukan.

Setelah terjadi perombakan bahan organik maka nilai BOD menurun sampai nilai tertentu yang menandakan bahwa air sudah bersih.

Dalam suasana aerob bahan-bahan dapat dirubah menjadi sulfat, fosfat, ammonium, nitrat, dan gas CO_2 yang menguap. Untuk menghilangkan sulfat, ammonium dan nitrat dari air dapat menggunakan berbagai cara. Dengan diberikan suasana yang anaerob maka sulfat direduksi menjadi gas H_2S , ammonium dan nitrat dirubah menjadi gas N_2O atau N_2 .

2. Alkil Benzil Sulfonat (ABS)

Alkil benzil sulfonat (ABS) adalah komponen detergen, yang merupakan zat aktif yang dapat menurunkan tegangan muka sehingga dapat digunakan sebagai pembersih. ABS mempunyai Na-sulfonat polar dan ujung alkil non-polar. Pada proses pencucian, ujung polar ini menghadap ke kotoran (lemak) dan ujung polarnya menghadap keluar (ke-air). Bagian alkil dari ABS ada yang linier dan non-linier (bercabang). Bagian yang bercabang ABS-nya lebih kuat dan berbusa, tetapi lebih sukar terurai sehingga menyebabkan badan air berbuih. Sulitnya peruraian ini disebabkan karena atom C tersier memblokir beta-oksidasi pada alkil. Hal ini dapat dihindari apabila ABS mempunyai alkil yang linier.

2. Plastik

Plastik banyak kegunaannya tetapi polimer sintetik plastik sangat sulit dirombak secara alamiah. Hal ini mengakibatkan limbah yang plastik semakin menumpuk dan dapat mencemari lingkungan. Akhir-akhir ini sudah mulai diproduksi plastik yang mudah terurai.

Plastik terdiri atas berbagai senyawa yang terdiri polietilen, polistiren, dan polivinil klorida. Bahan-bahan tersebut bersifat inert dan rekalsitran. Senyawa lain penyusun plastik yang disebut plasticizers terdiri: (a) ester asam lemak (oleat, risinoleat, adipat, azelat, dan sebakat serta turunan minyak tumbuhan), (b) ester asam phthalat, maleat, dan fosforat. Bahan tambahan untuk pembuatan plastik seperti Phthalic Acid Esters (PAE_s) dan Polychlorinated Biphenyls (PCB_s) sudah diketahui sebagai karsinogen yang berbahaya bagi lingkungan walaupun dalam konsentrasi rendah.

Dari alam telah ditemukan mikroba yang dapat merombak plastik, yaitu terdiri bakteri, aktinomycetes, jamur dan khamir yang umumnya dapat menggunakan plasticizers sebagai sumber C, tetapi hanya sedikit mikroba yang telah ditemukan

mampu merombak polimer plastiknya yaitu jamur *Aspergillus fischeri* dan *Paecilomyces* sp. Sedangkan mikroba yang mampu merombak dan menggunakan sumber C dari plasticizers yaitu jamur *Aspergillus niger*, *A. Versicolor*, *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp., *Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Verticillium* sp., dan khamir *Zygosaccharomyces drosophilae*, *Saccharomyces cerevisiae*, serta bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Brevibacterium* sp. dan aktinomisetes *Streptomyces rubrircetuli*.

Untuk dapat merombak plastik, mikroba harus dapat mengkontaminasi lapisan plastik melalui muatan elektrostatis dan mikroba harus mampu menggunakan komponen di dalam atau pada lapisan plastik sebagai nutrisi. Plasticizers yang membuat plastik bersifat fleksibel seperti adipat, oleat, risinoleat, sebakat, dan turunan asam lemak lain cenderung mudah digunakan, tetapi turunan asam phthalat dan fosforat sulit digunakan untuk nutrisi. Hilangnya plasticizers menyebabkan lapisan plastik menjadi rapuh, daya rentang meningkat dan daya ulur berkurang.

3. Minyak Bumi

Minyak bumi tersusun dari berbagai macam molekul hidrokarbon alifatik, alisiklik, dan aromatik. Mikroba berperan penting dalam menguraikan minyak bumi ini. Ketahanan minyak bumi terhadap peruraian oleh mikroba tergantung pada struktur dan berat molekulnya.

Fraksi alkana rantai C pendek, dengan atom C kurang dari 9 bersifat meracun terhadap mikroba dan mudah menguap menjadi gas. Fraksi n-alkana rantai C sedang dengan atom C 10-24 paling cepat terurai. Semakin panjang rangkaian karbon alkana menyebabkan makin sulit terurai. Adanya rangkaian C bercabang pada alkana akan mengurangi kecepatan peruraian, karena atom C tersier atau kuartier mengganggu mekanisme biodegradasi.

Apabila dibandingkan maka senyawa aromatik akan lebih lambat terurai daripada alkana linier. Sedangkan senyawa alisiklik sering tidak dapat digunakan sebagai sumber C untuk mikroba, kecuali mempunyai rantai samping alifatik yang cukup panjang. Senyawa ini dapat terurai karena kometabolisme beberapa strain mikroba dengan metabolisme saling melengkapi. Jadi walaupun senyawa hidrokarbon dapat diuraikan oleh mikroba, tetapi belum ditemukan mikroba yang berkemampuan enzimatik lengkap untuk penguraian hidrokarbon secara sempurna.

4. Pestisida / Herbisida

Macam pestisida kimia sintetik yang telah digunakan sampai sekarang jumlahnya mencapai ribuan. Pestisida yang digunakan untuk memberantas hama maupun herbisida yang digunakan untuk membersihkan gulma, sekarang sudah mengakibatkan banyak pencemaran. Hal ini disebabkan sifat pestisida yang sangat tahan terhadap peruraian secara alami (persisten). Contoh pestisida yang persistensinya sangat lama adalah DDT, Dieldrin, BHC, dan lain-lain. Walaupun sekarang telah banyak dikembangkan pestisida yang mudah terurai (biodegradable), tetapi kenyataannya masih banyak digunakan pestisida yang bersifat rekalsitran. Walaupun dalam dosis rendah, tetapi dengan terjadinya biomagnifikasi maka kandungan pestisida di lingkungan yang sangat rendah akan dapat terakumulasi melalui rantai makanan, sehingga dapat membahayakan kehidupan makhluk hidup termasuk manusia.

Untuk mengatasi pencemaran tersebut, sekarang banyak dipelajari biodegradasi pestisida/ herbisida. Proses biodegradasi pestisida dipengaruhi oleh struktur kimia pestisida, sebagai berikut:

- a. Semakin panjang rantai karbon alifatik, semakin mudah mengalami degradasi.
- b. Ketidak jenuhan dan percabangan rantai hidrokarbon akan mempermudah degradasi.
- c. Jumlah dan kedudukan atom-atom C_1 pada cincinan aromatik sangat mempengaruhi degradasi. Misal 2,4 D (2,4-diklorofenol asam asetat) lebih mudah dirombak di dalam tanah dibandingkan dengan 2,4,5-T (2,4,5-triklorofenoksi asam asetat)
- d. Posisi terikatnya rantai samping sangat menentukan kemudahan degradasi pestisida.

B. PERAN LAIN MIKROBA UNTUK MENGATASI MASALAH PENCEMARAN

1. Biopestisida

Pestisida mikroba termasuk biopestisida yang telah banyak digunakan untuk menggantikan pestisida kimia sintetik yang banyak mencemari lingkungan. Penggunaan pestisida mikroba merupakan bagian dari pengendalian hama secara hayati

menggunakan parasit, hiperparasit, dan predator. Salah satu keuntungan pestisida yang dikembangkan dari mikroba adalah (a) dapat berkembang biak secara cepat dalam jasad inangnya (hospes), (b) dapat bertahan hidup di luar hospes, (c) sangat mudah tersebar di alam. Namun mempunyai kelemahan tidak secara aktif mencari hospes atau hama sarannya.

Mikroba yang telah dikembangkan untuk biopestisida adalah berbagai macam mikroba sebagai berikut:

- a. Virus penyebab penyakit hama, seperti NPV (nuclear polyhidrosis virus), CPV (cytoplasmic polyhidrosis virus), dan GV (granulosis virus) untuk mengendalikan Lepidoptera. Baculovirus untuk mengendalikan Lepidoptera, Hymenoptera, dan diptera.
- b. Bakteri yang dapat mematikan serangga hama, yang terkenal adalah *Bacillus thuringiensis* (Bt). Bakteri ini dapat digunakan untuk mengendalikan Lepidoptera, Hymenoptera, diptera, dan coleoptera. Bakteri ini dapat menghasilkan kristal protein toksin yang dapat mematikan serangga hama. Selain itu ada bakteri lain seperti *Pseudomonas aeruginosa* dan *Proteus vulgaris* untuk mengendalikan belalang, *Pseudomonas septica* dan *Bacillus larvae* untuk hama kumbang, *Bacillus sphaericus* untuk mengendalikan nyamuk, dan *B. Moritai* untuk mengendalikan lalat.
- c. Jamur yang termasuk entomophagus dapat digunakan untuk mengendalikan hama. Sebagai contoh *Metarhizium anisopliae* dapat digunakan untuk mengendalikan kumbang *Rhinoceros* dan belalang coklat. *Beauveria bassiana* untuk mengendalikan kumbang kentang, *Nomurea rilevi* untuk mengendalikan lepidoptera, *Paecylomyces lilacinus* dan *Gliocladium roseum* dapat digunakan untuk mengendalikan nematoda.

2. Logam Berat

Limbah penambangan emas dan tembaga (tailing) yang banyak mengandung logam berat terutama air raksa (Hg), industri logam dan penyamakan kulit banyak menghasilkan limbah logam berat terutama cadmium (Cd), serta penggunaan pupuk (misalnya pupuk fosfat) yang mengandung logam berat seperti Hg, Pb, dan Cd, sekarang banyak menimbulkan masalah pencemaran logam berat. Logam berat dalam konsentrasi rendah dapat membahayakan kehidupan karena afinitasnya yang tinggi

dengan sistem enzim dalam sel, sehingga menyebabkan inaktivasi enzim dan berbagai gangguan fisiologi sel.

Bakteria dapat menghasilkan senyawa pengkhelat logam yang berupa ligan berberat molekul rendah yang disebut siderofor. Siderofor dapat membentuk kompleks dengan logam-logam termasuk logam berat. Umumnya pengkhelatan logam berat oleh bakteri adalah sebagai mekanisme bakteri untuk mempertahankan diri terhadap toksisitas logam. Bakteri yang tahan terhadap toksisitas logam berat mengalami perubahan sistem transport di membran selnya, sehingga terjadi penolakan atau pengurangan logam yang masuk ke dalam sitoplasma. Dengan demikian logam yang tidak dapat melewati membran sel akan terakumulasi dan diendapkan atau dijerap di permukaan sel.

Untuk mengambil logam berat yang sudah terakumulasi oleh bakteri, dapat dilakukan beberapa cara. Logam dari limbah cair dapat dipisahkan dengan memanen mikroba. Logam yang berada dalam tanah lebih sulit untuk dipisahkan, tetapi ada cara pengambilan logam menggunakan tanaman pengakumulasi logam berat. Tanaman yang termasuk sawi-sawian (misal *Brassica juncea*) dapat digunakan bersama-sama dengan rhizobacteria pengakumulasi logam (misal *Pseudomonas fluorescens*) untuk mengambil logam berat yang mencemari tanah. Selanjutnya logam yang telah terserap tanaman dapat dipanen dan dibakar untuk memisahkan logam beratnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Madigan et al., 1995. *Biology of microorganisms*, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
2. Schlegel, H.G., 1986. *General microbiology*, Cambridge University Press, Cambridge.
3. Stanier, R.Y., E.A. Adelberg, J.L.Ingraham, 1980. *The Microbial Word*, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
4. Metting, F.B. (1993). *Soil Microbial Ecology.Applications in Agriculture and Environment Management*.Marcel Dekker. Inc. NY