

MIKROBIOLOGI DASAR

Penulis :
Ade Irawan
Nisa Hakimah
Budi Rianto Wahidi
Rina Hidayati Pratiwi



MIKROBIOLOGI DASAR

**Ade Irawan
Nisa Hakimah
Budi Rianto Wahidi
Rina Hidayati Pratiwi**



GETPRESS INDONESIA

MIKROBIOLOGI DASAR

Penulis : Ade Irawan
Nisa Hakimah
Budi Rianto Wahidi
Rina Hidayati Pratiwi

ISBN : 978-623-125-459-7

Editor : Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penerbit GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2024

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala karunia dan rahmat-Nya, sehingga buku yang berjudul "Mikrobiologi Dasar" ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun sebagai referensi dasar bagi mahasiswa, peneliti, dan pembaca umum yang ingin memahami dunia mikroorganisme serta peranannya dalam berbagai aspek kehidupan.

Mikrobiologi adalah ilmu yang sangat dinamis dan terus berkembang seiring dengan penemuan-penemuan baru di bidang bioteknologi, kesehatan, lingkungan, serta industri. Melalui buku ini, kami berusaha menyajikan informasi yang komprehensif mulai dari sejarah perkembangan mikrobiologi, pertumbuhan mikroorganisme, genetika mikroorganisme, hingga aplikasinya dalam kesehatan dan lingkungan. Pembahasan dalam buku ini disusun secara sistematis, dimulai dari konsep dasar hingga topik yang lebih kompleks, dengan harapan dapat memudahkan pembaca dalam memahami materi yang disampaikan.

Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat bermanfaat dan memberikan wawasan baru bagi para pembaca dalam memahami lebih jauh tentang dunia mikrobiologi.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan buku ini. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang mikrobiologi.

Padang, September 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB 1 PENGANTAR DUNIA MIKROBIOLOGI	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Sejarah Perkembangan Mikrobiologi.....	2
1.2.1 Abiogeneis/ Generatio spontanea.....	3
1.2.2 Biogenesis	4
1.3 Peran Louis Pasteur dalam Pengembangan Fermentasi.....	7
1.4 Jasad Renik Penyebab Penyakit	9
1.4.1 Fracastoro (1483-1553).....	9
1.4.2 von Plenciz (1762).....	10
1.4.3 Oliver Wendell Holmes (1809-1849).....	11
1.4.4 Robert Koch (1843-1910)	11
1.5 Biakan Murni.....	12
1.6 Kesimpulan	13
DAFTAR PUSTAKA	14
BAB 2 VIABILITAS DAN PERTUMBUHAN MIKROORGANISME	15
2.1 Pendahuluan	15
2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroba.....	16
2.2.1 Faktor intrinsik	16

2.2.2 Faktor ekstrinsik.....	21
2.3 Teknik Pertumbuhan dan Kultur Mikroorganisme	24
2.3.1 Media kultur	24
2.3.2 Pemilihan media kultur	25
2.3.3 Metode inokulasi	27
2.3.4 Kondisi inkubasi	29
2.3.5 Pengukuran pertumbuhan	30
2.4 Pengendalian Pertumbuhan Mikroba	31
DAFTAR PUSTAKA.....	34
BAB 3 GENETIKA MIKROORGANISME	41
3.1 Pendahuluan.....	41
3.2 Struktur Genom Mikroorganisme.....	42
3.2.1 Meiosis	46
3.2.2 Mutasi.....	50
3.3 Rekombinasi Genetik.....	52
3.4 Aplikasi Genetika dalam Studi Mikrobiologi	53
DAFTAR PUSTAKA.....	58
BAB 4 PERAN MIKROORGANISME DALAM KESEHATAN DAN LINGKUNGAN.....	65
4.1 Pendahuluan.....	65
4.2 Peran Mikroorganisme dalam Dunia Kesehatan	66
4.2.1 Mikrobiologi sebagai Landasan Penting dalam Kedokteran.....	66
4.2.2 Peran Mikrobiologi dalam Pengembangan Vaksin ...	68
4.2.3 Pengendalian Penyebaran Penyakit Menular	71

4.2.4 Pengembangan Antibiotik dan Pengobatan Antiinfeksi	74
4.2.5 Kemajuan dalam Pengobatan Kanker	78
4.2.6 Studi Mikrobiom Manusia	83
4.2.7 Mendukung Kesehatan Masa Depan	89
4.3 Peran Mikroorganisme dalam Lingkungan	95
4.3.1 Penggunaan Bakteri untuk Mengatasi Limbah Minyak Bumi	95
4.3.2 Penggunaan Bakteri untuk Mengatasi Limbah Logam Berat	98
4.3.3 Bakteri untuk Memproses Limbah Tertentu untuk Menghasilkan Produk Bernilai Lebih Tinggi...	106
4.4 Kesimpulan	111
DAFTAR PUSTAKA	112
INDEKS	115
GLOSARIUM	116
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Metode Pour Plate dan Spread Plate	28
Gambar 2. 2. Tahap goresan metode Steak Plate	29
Gambar 2. 3. Metode Steak Plate (a) Kotinyu; (b) Kuadran; (c) Streak T.....	29

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Perbedaan Genom Prokariota dan Eukariota.....	43
Tabel 3. 2. Perbandingan Meiosis pada Mikroorganisme dengan Eukariota Multiseluler	49

BAB 1

PENGANTAR DUNIA MIKROBIOLOGI

Oleh Ade Irawan

1.1 Pendahuluan

Mikroorganisme yang ada di dunia ini terdiri dari bakteri, jamur, virus, protozoa, alga mikroskopis dan arkhea yang rata-rata mempunyai ukuran diameter kurang dari 0,1 mm. Jasad renik di atas dipelajari dalam bidang ilmu mikrobiologi (Sylvia T. Pratiwi, 2008).

Mikrobiologi merupakan suatu ilmu yang mempelajari makhluk hidup yang berukuran sangat kecil yang bersifat tidak kasat mata apabila dilihat tanpa menggunakan alat khusus (mikroskop). Mikrobiologi terdiri dari berbagai disiplin ilmu diantaranya parasitologi, imunologi, virologi, bakteriologi serta virologi. Pada perkembangannya ilmu-ilmu ini telah berkembang pesat sehingga menjadi disiplin ilmu yang terpisah dan berdiri sendiri (Staf Pengajar Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, 2010).

Mikroorganisme tersebar luas di alam dalam populasi yang beragam dan merupakan bentuk kehidupan yang paling banyak terdapat di bumi. Apabila dihitung jumlah mikroba yang ada di bumi melebihi jumlah mikroba yang ada di tempat lainnya. Dalam setiap genggam tanah di bumi terdapat mikroba yang jumlahnya jutaan dan bahkan milyaran. Mikroorganisme tersebar merata di hampir semua tempat di dunia ini bahkan di badan kita sendiri terdapat

berbagai mikroba yang menguntungkan yang bermanfaat untuk menjaga flora normal tubuh kita agar tetap berfungsi dengan baik (Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S., 2008).

Mikroorganisme patogen dapat menyebabkan berbagai macam penyakit seperti misalnya diare, kolera, difteri, tetanus gatal-gatal, influenza dan sebagainya. Dengan berbagai penemuan-penemuan dalam bidang mikrobiologi dan kedokteran, berbagai penyakit yang disebabkan oleh mikroorganisme patogen dapat diatasi. Kematian akibat penyakit infeksi yang disebabkan oleh berbagai jenis mikroorganisme patogen berkurang dengan adanya penemuan-penemuan obat antimikroba baru.

Bidang ilmu mikrobiologi mengungkap rahasia mengenai jasad renik yang disebut protista yang memiliki kekerabatan dengan organisme lainnya, serta mempelajari bagaimana cara pengendaliannya dan peranannya dalam kehidupan manusia. Sebagian mikroorganisme bersifat menguntungkan dan sebagian lagi bersifat patogen yang dapat menyebabkan berbagai macam penyakit. Sementara mikroorganisme yang bersifat menguntungkan bisa dimanfaatkan untuk membantu terjadinya proses fermentasi pada proses pembuatan produk tertentu misalnya nata de coco, keju, yoghurt serta dapat dimanfaatkan untuk membantu pengolahan limbah (Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S., 2008).

1.2 Sejarah Perkembangan Mikrobiologi

Perkembangan mikrobiologi tidak bisa dilepaskan dari sosok ilmuwan berkebangsaan Belanda yaitu Antony van Leeuwenhoek (1632-1723). Profesi sebenarnya adalah seorang wine tester di kota Delf Belanda tetapi mempunyai

kegemaran mengamati benda atau makhluk yang tidak terlihat dengan menggunakan lensa yang ia ciptakan sendiri. Dengan menggunakan lensa sederhana Leeuwenhoek mengamati air sungai, saliva, feses dan juga air hujan. Dalam pengamatan nya ia melihat adanya benda-benda yang bergerak sendiri dan tak kasat mata. Karena sebelumnya belum ada yang menemukan benda-benda tersebut maka ia beri nama “animalcules“. Dalam perkembangannya Leeuwenhoek membuat 250 mikroskop sederhana yang mampu memperbesar penglihatan hingga 200-300 kali.

Di kalangan para ilmuwan pada saat itu, penemuan Antony van Leeuwenhoek “animalcule“ menjadi perdebatan darimana asal makhluk-mahluk tersebut. Ada dua pendapat yang muncul pada saat itu yaitu generatio spontanea/abiogenesis yang menyatakan bahwa animalcule berasal dari proses pembusukan hewan atau tanaman melalui proses fermentasi. Pendapat kedua menyatakan bahwa animalcules berasal dari animalcules sebelumnya. Teori yang kedua ini menyatakan bahwa makhluk hidup yang ada sekarang berasal dari makhluk hidup sebelumnya, teori ini di sebut biogenesis. Pertentangan antara kedua teori ini tidak terselesaikan hampir seratus tahun lamanya hingga dilakukannya percobaan sederhana yang akhirnya dapat mengungkapkan kebenaran kedua teori tersebut (N. Minasari, 2008).

1.2.1 Abiogeneis/ Generatio spontanea

Teori ini diungkapkan oleh seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris Jhon Tuberville Needham yang lahir di London pada tanggal 10 September 1713. Jhon T Needham melakukan percobaan dengan memasak sepotong daging untuk mensterilkan mikroorganisme yang ada dalam

daging tersebut kemudian ditempatkan dalam wadah yang terbuka lalu didiamkan hingga beberapa lama. Setelah itu daging membusuk dan muncul adanya kehidupan yang berupa koloni mikroorganisme dalam daging tersebut. Dari percobaan sederhana yang dilakukannya ia berkesimpulan bahwa mikroorganisme yang ada terjadi secara spontan yang berasal dari daging tersebut.

1.2.2 Biogenesis

Berikut ini merupakan ilmuan yang mendukung teori biogenesis yang bertentangan dengan teori abiogenesis yang diungkapkan oleh John T Needham.

a. Francesco Redi (1626-1697)

Francesco Redi merupakan seorang ilmuan yang berasal dari negara Italia. Ia menyatakan bahwa organisme yang ada dalam daging busuk itu adalah larva yang berasal dari lalat yang bertelur di situ bukan secara spontan ada di situ (*generatio spontanea*). Sedangkan mikroorganisme tak kasat mata yang ada dalam daging tersebut masih belum diketahui asalnya dari mana.

b. Lazzaro Spalanzani (1729-1799)

Lazzaro Spalanzani merupakan seorang ilmuan yang berasal dari Italia. Ia melakukan percobaan dengan merebus daging selama satu jam kemudian menempatkannya pada wadah tertutup rapat kemudian didiamkan selama beberapa hari kemudian diamati tidak ditemukannya mikroorganisme dalam daging tersebut. Percobaan ini mendapatkan sanggahan dari Needham yang menyatakan bahwa sumber mikroorganisme berasal dari udara dimana

pada percobaan Spalanzani tidak ada udara yang bisa masuk ke dalam wadah tersebut.

c. Theodor Schwann (1837)

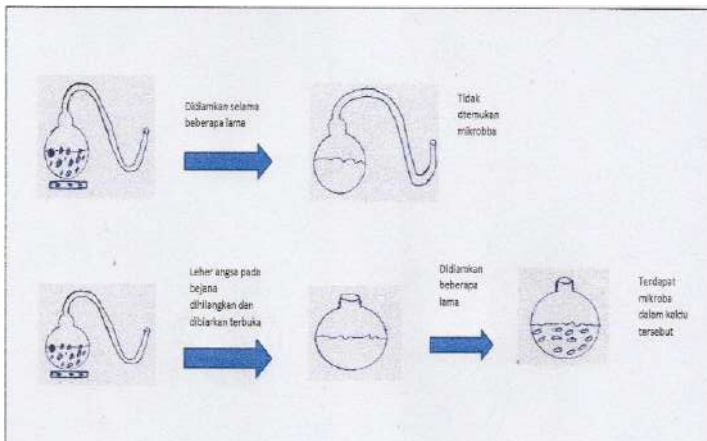
Theodor Schwann merupakan seorang ilmuwan yang berasal dari Jerman. Ia melakukan serangkaian percobaan dengan mengalirkan udara panas yang dialirkan melalui pipa ke dalam tabung tertutup yang berisi kaldu. Setelah dibiarkan beberapa hari tidak ditemukan adanya mikroba yang hidup dalam kaldu tersebut. Percobaan ini juga disanggah oleh pendukung generatio spontanea bahwa adanya zat asam dan pemanasan akan mengubah sifat udara sehingga tidak mendukung pertumbuhan mikroba.

d. Louis Pasteur (1822–1895)

Louis Pasteur merupakan seorang ilmuwan pendukung teori biogenesis yang berasal dari Perancis. Ia merupakan seorang ahli kimia yang mempunyai ketertarikan terhadap penelitian terkait peran mikroorganisme dalam industri anggur pada pembuatan alkohol. Louis Pasteur melakukan serangkaian eksperimen dengan menggunakan bejana dengan leher panjang yang dibengkokkan sedemikian rupa sehingga menyerupai leher angsa, udara dengan bebas bias masuk ke dalam bejana tersebut. Bejana ini kemudian diisi dengan kaldu kemudian dipanaskan dengan bagian lubang pada leher angsa dibiarkan terbuka. Setelah dipanaskan kemudian dibiarkan selama beberapa hari setelah

diamati ternyata didalamnya tidak terdapat adanya mikroorganisme. Ekperimen berikutnya Luis Pasteur menggunakan bejana yang sama, hanya saja bejana tersebut dibiarkan terbuka kemudian diisi dengan kaldu yang dipanaskan kemudian didiamkan dan didalamnya banyak ditumbuhi mikroorganisme.

Dari eksperimen Louis Pasteur di atas dapat disimpulkan bahwa mikroorganisme yang ada dalam bejana yang terbuka berasal dari mikroba yang ada di udara. Udara hanya sebagai pembawa saja dan bukan merupakan asal usul dari mikroba tersebut. Hal ini semakin menguatkan teori biogenesis yang memandang bahwa makhluk hidup yang ada berasal dari makhluk hidup sebelumnya.



Gambar 1 Eksperimen Louis Pasteur
(Sumber : (Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S., 2008))

Dari gambar eksperimen Louis Pasteur di atas dapat disimpulkan bahwa udara hanya sebagai pembawa mikroba saja tetapi bukan menjadi asal usul dari mikroba tersebut. Mikroba tersebut terperangkap dalam leher angsa tersebut sehingga tidak bisa masuk ke dalam kaldu tersebut. Louis Pasteur mengetahui bahwa di dalam udara yang ada di sekitar kita terdapat mikroba atau kuman yang melayang layang bersama sama dengan partikel debu. Mikroba-mikroba inilah yang menyebabkan pembusukan makanan dan minuman. (Anonymous, 2008).

Kebenaran teori Pasteur ini banyak dibuktikan oleh para ilmuwan yang lain salah satunya adalah seorang dokter yang bernama Lister yang selalu melakukan tindakan pembedahan secara aseptik untuk menghindari adanya infeksi yang terjadi. Selain itu ia juga menggunakan desinfektan untuk mengkondisikan udara di sekitar ruangan operasi agar tetap steril terhindar dari mikroba yang ternyata meningkatkan keberhasilan operasi yang ia lakukan (Staf Pengajar Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, 2010).

1.3 Peran Louis Pasteur dalam Pengembangan Fermentasi

Fermentasi sudah sejak lama dilakukan dalam pembuatan beberapa produk makanan dan minuman. Pembuatan minuman angggur di Yunani telah lama memanfaatkan fermentasi dalam proses pembuatannya bahkan bangsa Mesopotamia sekitar tahun 500 sebelum masehi telah memanfaatkan fermentasi dalam proses

pembuatan bir. Di China bir telah dibuat sejak tahun 2300 sebelum masehi sedangkan di Jepang kecap telah dibuat dengan teknologi fermentasi selama berabad-abad lamanya, bahkan masyarakat negara Balkan telah melakukan pembuatan susu fermentasi (yoghurt) selama beratus-ratus tahun yang lalu.

Pada zaman tersebut proses pembuatan produk fermentasi belum mengintegrasikan dengan hasil penelitian sehingga mutu produk yang dihasilkan kurang maksimal karena belum banyaknya ilmuwan yang tertarik meneliti terkait pengembangbiakan bakteri fermentasi. Baru setelah Louis Pasteur melakukan telaah dan penelitian terkait peranan mikroorganisme dalam pembuatan produk fermentasi, barulah dimengerti peranan mikroorganisme dalam proses fermentasi tersebut sehingga proses fermentasi menjadi lebih efisien.

Setelah membuktikan ketidakbenaran teori generatio spontanea Louis Pasteur memastikan bahwa penyebab terjadinya fermentasi adalah adanya mikroorganisme yang membantu proses fermentasi. Louis Pasteur melakukan seleksi terhadap mikroorganisme menggunakan wadah berukuran khusus yang digunakan untuk membuat produk minuman anggur. Ia menemukan berbagai jenis mikroba dengan peranan yang berbeda beda dalam proses fermentasi pembuatan anggur tersebut. Ada bakteri yang menonjol dan ada bakteri yang tidak menonjol pada proses fermentasi tersebut.

Dari serangkaian eksperimen yang dilakukan Pasteur maka dapat dipilih mikroorganisme yang lebih efektif membantu fermentasi dalam proses pembuatan minuman anggur. Untuk menghilangkan bakteri yang tidak diperlukan dalam proses fermentasi Pasteur menyarankan agar

melakukan pemanasan hingga 62,8 °C selama 30 menit (pasteurisasi) dan menambahkan biakan bakteri yang bermanfaat yang dapat membantu proses fermentasi tersebut (Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S., 2008).

Sekitar tahun 1880 Pasteur mengisolasi bakteri dari ayam yang menjadi penyebab utama terjadinya penyakit kolera kemudian menumbuhkannya pada media yang berisi nutrisi bakteri. Kemudian ia melakukan percobaan dengan menyuntik ayam terinfeksi kolera yang sebelumnya telah disuntik dengan biakan murni bakteri. Setelah dibiarkan beberapa lama ayam tersebut tidak menampilkan gejala kolera. Bakteri yang sebelumnya telah disuntikkan pada ayam tersebut ternyata memicu terbentuknya *antibodi* sehingga ketika disuntikkan jenis bakteri yang sama, infeksi tidak terjadi. Pasteur melakukan diatenuasi yaitu melemahkan bakteri sehingga hal ini bisa memicu produksi antibodi oleh sistem imun.

Dengan keberhasilan nya tersebut Pasteur melanjutkan eksperimen nya dengan membuat vaksin rabies yaitu suatu penyakit yang ditularkan oleh hewan anjing kepada manusia dan hal tersebut berhasil ia lakukan.

1.4 Jasad Renik Penyebab Penyakit

1.4.1 Fracastoro (1483-1553)

Fracastoro merupakan seorang ilmuwan yang berasal dari kota Verona Italy. Ia menyatakan bahwa penyakit disebabkan oleh mikroba atau jasad renik yang tidak bisa dilihat oleh panca indera. Ia juga menyatakan bahwa mikroba ini bisa berpindah dari tempat satu ke tempat yang lain yang dapat menularkan penyakit (N. Minasari, 2008)

1.4.2 von Plenciz (1762)

Merupakan seorang ilmuan yang berasal dari Vienna Asutria ia mengungkapkan bahwa penyebab berbagai macam penyakit adalah jasad renik. Jasad renik ini hidup parasit di dalam organisme lain dengan mengambil nutrisi yang dibutuhkan untuk bertahan (Anonymous, 2008).

1.4.3 Oliver Wendell Holmes (1809-1849)

Merupakan seorang dokter yang berasal dari Amerika Serikat. Wendell menyatakan bahwa demam yang terjadi pada perempuan pasca melahirkan boleh jadi disebabkan oleh mikroba yang dibawa oleh tenaga medis yang menanganinya (Lud Waluyo, 2019).

1.4.4 Robert Koch (1843-1910)

Merupakan seorang ilmuwan yang berasal dari negara Jerman. Koch merupakan seorang dokter yang mengisolasi bakteri antraks yang menyerang binatang peliharaan. Ia juga melakukan pembiakan bakteri tersebut dan menyuntikkannya kepada mencit untuk mengetahui apakah bakteri tersebut menimbulkan gejala antraks atau tidak. Setelah itu dilakukan isolasi terhadap bakteri tersebut untuk memastikan penyebab penyakit antraks.

Selain itu Koch juga melakukan serangkaian prosedur pengecatan pada bakteri untuk membantu memudahkan identifikasi dan mengembangkan teknik pembiakan bakteri untuk keperluan penelitian. Teknik yang digunakan adalah dengan menggunakan media atau substrat yang berisi nutrisi yang diperlukan bakteri untuk hidup dan membelah diri kemudian dilakukan penanaman atau inokulasi bakteri pada media tersebut lalu disimpan pada ruangan dengan suhu yang sesuai yang memungkinkan bakteri untuk berkembang biak secara optimal.

Dari penelitian Koch ditemukan bahwa jasad renik yang bersifat patogen bisa menjadi penyebab timbulnya penyakit. Hal tersebut yang menjadi dasar adanya postulat yang disampaikan oleh Robert Koch yaitu :

1. Mikroorganisme tertentu selalu dapat dijumpai berasosiasi dengan penyakit tertentu.
2. Mikroorganisme dapat diisolasi dan dilakukan pembiakan murni.
3. Biakan murni mikroorganisme tersebut akan menimbulkan penyakit bila disuntikkan pada hewan yang rentan.
4. Penggunaan prosedur laboratorium memungkinkan diperoleh kembali mikroorganisme yang disuntikkan dari hewan yang sengaja diinfeksi dalam percobaan (Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S., 2008)

1.5 Biakan Murni

Biakan murni merupakan media yang berisi nutrisi bagi bakteri yang berisi koloni mikroba yang sejenis. Mikroba diinokulasikan dalam petri disk yang sudah diberikan media agar yang berisi nutrisi yang spesifik sebagai sumber nutrisi bagi pertumbuhan bakteri. Setelah itu diinkubasi pada suhu optimal bagi pertumbuhan bakteri selama 18-24 jam. Penggunaan agar sebagai media pertumbuhan mikroba pertama kali diperkenalkan oleh Robert Koch pada awal tahun 1880-an dan tetap digunakan pada saat ini, hanya saja media agar yang digunakan pada saat ini lebih praktis karena sudah dalam bentuk campuran nutrisi yang hanya tinggal dilarutkan dalam air panas kemudian diaduk hingga homogen dan siap digunakan (Sylvia T. Pratiwi, 2008). Biakan murni mikroorganisme pada saat ini telah banyak diperjualbelikan dan digunakan untuk kepentingan penelitian dan pembuatan produk makanan dan minuman yang berbasis fermentasi.

1.6 Kesimpulan

Perkembangan mikrobiologi pada periode pertama dimulai dengan terungkapnya dunia "animalcule" oleh Antony van Leeuwenhoek pada tahun 1675. Hal tersebut memicu keingintahuan para ilmuwan untuk melakukan penelitian terkait dengan "animalcule". Pada tahun 1700-an muncul teori *generatio spontanea* yang dipelopori oleh Jhon T Neddham, namun teori ini berhasil disanggah oleh ilmuwan pendukung biogenesis dengan serangkaian eksperimennya. Pada tahun 1860 dan 1900-an banyak dilakukan penemuan penting sehingga ini memacu perkembangan mikrobiologi yang ditandai dengan munculnya teori baru tentang fermentasi dan teori nutfah penyebab penyakit. Berkembang pula serangkaian prosedur untuk mengisolasi dan mengembangkan biakan murni mikroorganisme untuk keperluan penelitian, pembuatan vaksin dan untuk kepentingan pembuatan produk makanan dan minuman melalui proses fermentasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonimous (2008) 'SEJARAH PERKEMBANGAN MIKROBIOLOGI',in. Available at: <https://www.scribd.com/document/427100147/sejarah-perkembangan-mikrobiologi>.
- Lud Waluyo (2019) *Mikrobiologi Umum*. UMM Press. Available at: <https://ummpress.umm.ac.id/buku/detail/mikrobiologi-umum>.
- N. Minasari (2008) 'Kandidiasis Rongga Mulut dan Diabetes Mellitus', *Majalah Kedokteran Nusantara* 41(3) : 200-6.
- Pelczar, Michael J.Chan, E.C.S. (2008) *Dasar-dasar mikrobiologi 1*. 1st edn. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press), 2008. Available at: <https://lib.ui.ac.id/detail?id=20486158&lokasi=lokal>.
- Staf Pengajar Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia (2010) *Buku Ajar Mikrobiologi Kedokteran*. Edisi Revi. Jakarta: Binarupa Aksara Publisher. Available at: <https://ecampus.sttif.ac.id/pustaka/main/item/2481>.
- Sylvia T. Pratiwi (2008) *Mikrobiologi Farmasi*. Surabaya: Erlangga Medical Series. Available at: <https://ecampus.sttif.ac.id/pustaka/main/item/2693>.

BAB 2

VIABILITAS DAN PERTUMBUHAN MIKROORGANISME

Oleh Nisa Hakimah

2.1 Pendahuluan

Mikroorganisme memegang peranan penting dalam berbagai aspek kehidupan, memengaruhi keseimbangan ekosistem, kesehatan manusia, serta proses industri. Pemahaman tentang viabilitas, yaitu kemampuan mikroorganisme untuk bertahan hidup dan menjalankan fungsi metabolisme, serta pertumbuhan yang mencakup peningkatan jumlah sel, merupakan hal yang sangat penting. Kedua aspek ini saling terkait dan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti suhu, pH, ketersediaan nutrisi, oksigen, dan kehadiran senyawa antimikroba. Pengetahuan mendalam mengenai faktor-faktor ini dapat mendukung pengelolaan mikroorganisme dalam berbagai aplikasi, mulai dari bioteknologi hingga pengendalian penyakit (A'yun et al., 2022).

Pentingnya pemahaman mengenai viabilitas dan pertumbuhan mikroorganisme sangat jelas dalam berbagai bidang. Dalam industri pangan, pengetahuan ini menjadi dasar praktik pengawetan makanan, menjamin keamanan produk, dan mengendalikan mikroba patogen (Yuniastri, Ismawati and Putri, 2018). Di bidang kesehatan, pemahaman ini berkontribusi pada pengembangan strategi pencegahan

dan pengobatan penyakit infeksi, serta pemanfaatan mikroba yang menguntungkan untuk kesehatan (Marco, 2021). Dalam konteks lingkungan, studi tentang viabilitas dan pertumbuhan mikroba membantu memahami dinamika populasi mikroba di alam dan mengeksplorasi potensi mikroba dalam bioremediasi lingkungan yang tercemar (Ayilara and Babalola, 2023).

2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroba

Pertumbuhan mikroba dipengaruhi oleh berbagai faktor yang menentukan laju dan keberhasilannya. Faktor-faktor tersebut meliputi suhu, pH, ketersediaan air, serta nutrisi yang tersedia di lingkungannya. Interaksi yang tepat antara faktor-faktor ini akan mendukung pertumbuhan mikroba secara efisien, sementara kondisi yang kurang ideal dapat menghambat atau bahkan menghentikan pertumbuhan mikroba (Moral *et al.*, 2017).

2.2.1 Faktor intrinsik

1. Ketersediaan nutrisi

Nutrisi merupakan faktor intrinsik yang sangat penting dalam pertumbuhan mikroba, digunakan tidak hanya untuk membangun komponen seluler tetapi juga untuk menghasilkan energi dan menjalankan fungsi metabolisme. Jenis dan jumlah nutrisi dalam suatu lingkungan menentukan jenis dan populasi mikroba yang dapat tumbuh (Preetha and Narayanan, 2020). Mikroba memerlukan air, unsur-unsur esensial seperti karbon, nitrogen, hidrogen, oksigen, serta senyawa organik seperti glukosa, vitamin, dan asam amino (Ngatirah,

2017). Air berperan dalam melarutkan dan mengangkut nutrisi serta mendukung reaksi hidrolisis. Karbon digunakan untuk menghasilkan molekul penting, sedangkan nitrogen dibutuhkan untuk sintesis protein. Bakteri juga memerlukan garam mineral seperti fosfat dan magnesium, serta energi yang diperoleh dari cahaya atau oksidasi senyawa (Bonnet *et al.*, 2020).

2. pH (keasaman atau kebasaan)

Konsentrasi ion hidrogen (pH) merupakan faktor penting dalam pertumbuhan mikroba karena setiap mikroba memiliki rentang pH optimalnya. Mikroba asidofil dan alkalofil, yang mampu bertahan hidup di lingkungan dengan pH ekstrem, mengembangkan mekanisme khusus, termasuk adaptasi pada struktur permukaan selnya, untuk menghadapi kondisi tersebut (Jin and Kirk, 2018).

Asidofil adalah mikroba yang tumbuh secara optimal pada pH rendah (<5). Mereka memiliki enzim dan metabolit khusus yang berguna dalam berbagai aplikasi bioteknologi, seperti biomining, bioremediasi, dan produksi biofuel. Namun, kultur asidofil di laboratorium bisa menjadi tantangan karena persyaratan pertumbuhannya yang unik, meliputi pH rendah, sumber energi tertentu, serta kondisi pertumbuhan anaerobik atau mikroaerofilik (Krause *et al.*, 2017).

Sebagian besar mikroba termasuk dalam kategori neutrofil, yaitu mikroba yang tumbuh secara optimal pada pH netral (5-9). Bakteri memerlukan pH optimum antara 6,5 hingga 7,5 untuk pertumbuhan yang ideal, dengan nilai pH minimum dan maksimum untuk pertumbuhan kebanyakan spesies bakteri adalah 4 dan 9. Pengaruh pH terhadap pertumbuhan bakteri terkait dengan aktivitas

enzim, yang diperlukan oleh beberapa bakteri untuk mengkatalisis reaksi-reaksi yang mendukung pertumbuhan mereka (Suriani, Soemarno and Suharjo, 2013).

Alkalofil merupakan mikroba yang tumbuh secara optimal pada pH tinggi (>9). Mereka memiliki adaptasi struktural dan metabolik khusus yang memungkinkan mereka bertahan dan berkembang dalam lingkungan yang bersifat alkali. Dinding sel mereka, mengandung polimer asam yang dapat melindungi sel dari ion hidroksida. Contoh alkalofil adalah bakteri yang ditemukan di lingkungan alkali seperti tanah soda dan danau soda (Jin and Kirk, 2018).

3. Aktivitas air (a_w)

Aktivitas air (a_w) merupakan parameter penting yang menggambarkan ketersediaan air bebas dalam suatu lingkungan, yang secara langsung mempengaruhi kemampuan mikroba untuk tumbuh dan berkembang biak. Skala a_w berkisar antara 0 (tidak ada air bebas) hingga 1 (air murni). Mayoritas mikroba memerlukan lingkungan dengan a_w tinggi (0,9-1) untuk mencapai pertumbuhan optimal.

Namun, beberapa mikroba telah beradaptasi untuk bertahan hidup dan bahkan berkembang di lingkungan dengan aktivitas air rendah. Halofil, misalnya, mampu tumbuh di lingkungan dengan a_w rendah ($<0,75$) akibat konsentrasi garam yang tinggi. Mereka ditemukan di laut, danau garam, dan makanan fermentasi. Halofil diklasifikasikan berdasarkan kebutuhan garam, yaitu halofil ringan (3-15% NaCl), halofil ekstrem ($<25\%$ NaCl), dan halotoleran (2,5% NaCl) (Vigneshwari, Arjunan and Natesan, 2022). Osmofil juga dapat tumbuh pada

lingkungan dengan a_w rendah (<0.6) karena konsentrasi gula yang tinggi, contohnya jamur yang ditemukan pada selai dan madu. Terakhir, xerofil merupakan mikroba yang mampu tumbuh pada lingkungan dengan a_w sangat rendah (<0.6) karena kondisi kering, seperti jamur yang ditemukan pada makanan kering dan debu (Arisandi *et al.*, 2017).

4. Potensial oksidasi-reduksi (Eh)

Oksigen bebas yang terdapat di udara merupakan elemen esensial bagi banyak bakteri untuk menjalankan proses respirasi seluler. Namun, kebutuhan bakteri terhadap oksigen bervariasi, tergantung pada sistem enzim biooksidatif yang dimiliki oleh masing-masing spesies. Berdasarkan sistem ini, respirasi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu respirasi aerob yang menggunakan oksigen bebas sebagai penerima elektron terakhir, dan respirasi anaerob yang menggunakan senyawa anorganik selain oksigen sebagai penerima elektron terakhir (Tjampakasari and Hanifah, 2023).

Keragaman kebutuhan oksigen ini tercermin dalam klasifikasi mikroba menjadi beberapa kelompok. Aerob obligat, seperti *Mycobacterium tuberculosis*, sangat bergantung pada oksigen. Sebaliknya, anaerob obligat, seperti *Clostridium tetani*, tidak dapat bertahan hidup jika ada oksigen. Anaerob fakultatif, seperti *Escherichia coli*, memiliki fleksibilitas untuk tumbuh dengan atau tanpa oksigen (Jufri, 2020). Mikroaerofil, contohnya *Campylobacter jejuni*, tumbuh optimal dengan sedikit oksigen, sementara anaerob aerotoleran, seperti *Lactobacillus acidophilus*, tidak memerlukan oksigen tetapi dapat menoleransi keberadaannya. Keanekaragaman adaptasi ini memungkinkan mikroba

untuk menghuni berbagai habitat, mulai dari lingkungan kaya oksigen hingga lingkungan tanpa oksigen (Oktavia *et al.*, 2022).

5. Senyawa antimikroba alami

Senyawa antimikroba alami memiliki peran penting dalam menghambat pertumbuhan mikroba melalui berbagai mekanisme. Senyawa ini ditemukan dalam tanaman, rempah-rempah, dan bahan alami lainnya, serta telah lama digunakan dalam pengobatan tradisional dan pengawetan makanan. Aktivitas antimikroba dari senyawa alami ini dapat mengganggu membran sel mikroba, menghambat sintesis protein, atau mengganggu metabolisme seluler, sehingga menghentikan pertumbuhan atau membunuh mikroba (Tumiwa, Yudistira and Wewengkang, 2019). Efektivitas senyawa antimikroba alami dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis mikroba, konsentrasi senyawa, pH lingkungan, dan suhu. Misalnya, senyawa seperti minyak atsiri, flavonoid, eugenol dan tanin menunjukkan spektrum aktivitas yang luas terhadap bakteri, jamur, dan virus (Kalalo *et al.*, 2020).

6. Struktur biologis

Struktur biologis mikroba memainkan peran krusial dalam menentukan faktor pertumbuhannya. Struktur dinding sel mempengaruhi resistensi mikroba terhadap tekanan osmotik dan senyawa antimikroba (Malik *et al.*, 2019). Kehadiran kapsul atau lapisan lendir memberikan perlindungan dari sistem kekebalan inang dan kondisi lingkungan yang keras. Struktur internal seperti flagela dan pili memungkinkan pergerakan dan perlekatan pada permukaan, meningkatkan akses ke nutrisi. Lebih lanjut, endospora pada beberapa mikroba memberikan

kemampuan bertahan hidup dalam kondisi ekstrem, seperti suhu tinggi atau kekeringan. Dengan demikian, struktur biologis mikroba secara signifikan mempengaruhi kemampuan mereka untuk tumbuh dan berkembang biak dalam berbagai lingkungan.

2.2.2 Faktor ekstrinsik

1. Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan mikroorganisme. Setiap jenis mikroorganisme memiliki rentang suhu optimal di mana pertumbuhan dan reproduksi dapat berlangsung dengan baik. Beberapa mikroorganisme mampu tumbuh pada suhu serendah -10°C, sementara yang lain dapat bertahan pada suhu setinggi 100°C atau lebih. Rentang suhu ini dipengaruhi oleh proses metabolisme sel. Pada suhu rendah, pergerakan molekul melambat, enzim tidak dapat mengkatalisis reaksi kimia, dan kekentalan sitoplasma menghentikan seluruh aktivitas sel. Dengan meningkatnya suhu, pergerakan molekul semakin cepat, enzim mempercepat metabolisme, dan sel-sel tumbuh lebih cepat. Namun, jika suhu melebihi batas tertentu, aktivitas metabolisme menjadi sangat tinggi, menyebabkan enzim terdenaturasi, yang akhirnya menghambat pertumbuhan sel secara keseluruhan (Isnawati and Trimulyono, 2018).

Berdasarkan rentang suhu optimalnya, mikroorganisme dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok. Salah satunya adalah psikrofil, mikroba yang tumbuh optimal pada suhu rendah (0-20°C). Psikrofil dapat ditemukan di berbagai lingkungan dingin seperti laut dalam, salju, permafrost, es laut, gletser, danau air

dingin, tanah dingin, gurun dingin, dan gua. Mereka memiliki adaptasi khusus, seperti enzim cold-active, untuk berfungsi optimal pada suhu rendah (Hamdan, 2018).

Kelompok lain yang penting adalah mesofil, mikroba ini tumbuh optimal pada suhu sedang (20-45°C) dan mencakup berbagai mikroba yang penting bagi manusia, baik yang merugikan seperti patogen maupun yang bermanfaat dalam industri makanan dan farmasi. Di alam, mikroba mesofil berperan signifikan dalam siklus nutrisi, terutama pada tahap awal pengomposan, di mana mereka memulai proses dekomposisi bahan organik (Liao *et al.*, 2023).

Di sisi lain, termofil adalah mikroorganisme, terutama bakteri, yang mampu bertahan dan berkembang pada suhu tinggi (45-80°C) atau lebih. Mereka sering ditemukan di lingkungan ekstrem seperti mata air panas dan ventilasi hidrotermal laut dalam. Termofil menghasilkan enzim termostabil (thermozymes) yang tetap aktif pada suhu tinggi, menjadikannya sangat berharga dalam berbagai aplikasi bioteknologi, termasuk polymerase chain reaction (PCR) dan proses industri lainnya (Bosco Nshimiyimana *et al.*, 2018).

Teakhir, ada hipertermofil, mikroba yang tumbuh pada suhu yang sangat tinggi (>80°C) dan sebagian besar termasuk dalam kelompok archaea. Mikroba ini sering ditemukan di lingkungan vulkanik, sumber air panas, serta lubang hidrotermal di dasar laut. Enzim mereka, yang sangat stabil pada suhu tinggi, memiliki potensi besar untuk aplikasi industri, terutama dalam bioteknologi. Enzim tahan panas ini digunakan dalam berbagai proses industri yang membutuhkan suhu tinggi,

seperti pada reaksi PCR (*Polymerase Chain Reaction*) dan produksi biofuel (Graham *et al.*, 2011).

2. Kelembaban relatif

Kelembaban udara (RH) sangat mempengaruhi pertumbuhan mikroba. Kombinasi suhu dan kelembaban udara menentukan seberapa cepat dan baik mikroba berkembang biak. Contohnya, pada kelembaban udara 98%, jamur *P. camemberti* tumbuh jauh lebih cepat, bahkan hingga 106 kali lebih cepat pada suhu 16°C. Bakteri *B. aurantiacum* juga tumbuh jauh lebih baik pada kelembaban dan suhu tinggi, meskipun hal ini bisa membuat warna keju menjadi coklat tua. Penelitian ini menunjukkan bahwa kelembaban udara, bersama dengan suhu, sangat penting untuk mengontrol pertumbuhan mikroba, terutama dalam pembuatan makanan seperti keju. Dengan mengatur kelembaban dan suhu dengan tepat, kita bisa memastikan mikroba yang diinginkan tumbuh dengan baik, menghasilkan produk berkualitas tinggi (Leclercq-Perlat *et al.*, 2012).

3. Interaksi mikroba

Mikroorganisme berinteraksi baik satu sama lain maupun dengan organisme inangnya, dan interaksi ini sangat penting bagi pembentukan koloni serta keberlangsungan hidup di berbagai lingkungan. Komunitas mikroba yang beragam, dengan berbagai spesies yang memiliki peran serupa, lebih kuat dan sulit diserang oleh organisme lain. Mikroorganisme dalam komunitas ini saling bergantung dan berevolusi bersama, memungkinkan mereka berbagi tugas, bertahan dari tekanan lingkungan, serta saling mendukung dalam pertumbuhan. Komunikasi antar mikroorganisme terjadi melalui aktivasi gen tertentu sebagai respons terhadap

kondisi lingkungan, yang menghasilkan molekul-molekul yang memungkinkan interaksi, pertukaran informasi, dan kerja sama di antara mereka. Dengan memahami cara mikroba berkomunikasi, kita dapat mengembangkan metode untuk mengganggu komunikasi tersebut saat mereka menyebabkan infeksi, sehingga melemahkan dan memudahkan pengendalian terhadap mikroba tersebut (Braga, Dourado and Araújo, 2016).

2.3 Teknik Pertumbuhan dan Kultur Mikroorganisme

2.3.1 Media kultur

Dalam laboratorium mikrobiologi, pemilihan media kultur yang tepat sangat penting untuk mendukung pertumbuhan dan studi mikroorganisme. Salah satu cara mengklasifikasikan media kultur adalah berdasarkan konsistensinya, yang menghasilkan tiga jenis utama yaitu media padat, media semi padat, dan media cair.

Pertama, ada media padat, yang mengandung agar dengan konsentrasi tinggi (1,5-2,0%) sehingga memiliki tekstur yang padat. Keunggulan media padat terletak pada kemampuannya untuk mengisolasi bakteri murni dan mengamati morfologi koloni mereka secara jelas.

Selanjutnya, terdapat media semi padat, yang mengandung agar dalam konsentrasi lebih rendah (0,5% atau kurang), menghasilkan konsistensi yang lebih lunak. Media ini sangat berguna untuk mengkultur bakteri mikroaerofilik, yang membutuhkan oksigen dalam jumlah terbatas, serta untuk mengamati motilitas atau pergerakan

bakteri. Media Cair: Medium ini tidak mengandung bahan pematat seperti agar atau gelatin, sehingga berbentuk cair.

Terakhir, ada media cair, yang tidak mengandung agen pematat seperti agar, sehingga berbentuk cair. Fleksibilitas media cair menjadikannya ideal untuk berbagai keperluan, termasuk propagasi mikroorganisme, studi fermentasi, serta beragam pengujian biokimia seperti uji fermentasi gula dan MR-VR (Kanojia *et al.*, 2017).

2.3.2 Pemilihan media kultur

Media kultur yang ideal harus memenuhi sejumlah kriteria penting untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme secara optimal. Selain mampu mendukung pertumbuhan dari inokulum yang sangat kecil, media ini juga harus memungkinkan pertumbuhan yang cepat, mudah disiapkan, ekonomis, dan mampu mengungkapkan karakteristik mikroorganisme yang diinginkan. Faktor-faktor seperti pH yang sesuai, kondisi steril, serta persyaratan fisik optimal seperti suhu, tekanan osmotik, dan tingkat oksidasi juga harus diperhatikan (Atmanto, Asri and Kadir, 2022).

Selain faktor-faktor tersebut, komposisi nutrisi media kultur juga memegang peranan penting. Sumber karbon, baik berupa karbon dioksida untuk autotrof atau senyawa organik untuk heterotrof, merupakan komponen krusial. Nitrogen, esensial untuk sintesis protein dan asam nukleat, juga harus tersedia, baik dalam bentuk anorganik maupun organik. Selain itu, unsur-unsur seperti fosfat, magnesium, dan besi, serta faktor pertumbuhan tambahan, mungkin diperlukan untuk memenuhi kebutuhan spesifik mikroorganisme tertentu (Atlas, 2010).

Secara lebih rinci, beberapa persyaratan utama yang harus dipenuhi oleh media kultur meliputi:

- a. Sumber energi: Mikroorganisme memerlukan energi untuk tumbuh, yang umumnya diperoleh melalui oksidasi senyawa organik seperti karbohidrat dan protein dalam media.
- b. Sumber karbon: Karbon adalah unsur penting untuk membangun struktur sel dan biomolekul. Sumber karbon dapat berasal dari senyawa organik seperti protein (ekstrak daging atau pepton) dan karbohidrat (glukosa, laktosa, sukrosa).
- c. Sumber nitrogen: Nitrogen diperlukan untuk sintesis protein dan asam nukleat. Sumber nitrogen bisa berupa nitrogen anorganik (seperti amonium nitrat atau amonium sulfat) atau nitrogen organik (seperti protein, pepton, atau asam amino).
- d. Garam mineral: Berbagai jenis garam mineral dibutuhkan untuk fungsi enzim dan proses seluler lainnya.
- e. pH yang sesuai: Sebagian besar mikroorganisme tumbuh optimal pada pH netral, meskipun ada yang memerlukan pH alkali.
- f. Tingkat oksidasi yang memadai: Oksigen dibutuhkan oleh mikroorganisme aerob, sementara mikroorganisme anaerob memerlukan kondisi bebas oksigen.
- g. Suhu yang sesuai: Setiap mikroorganisme memiliki rentang suhu pertumbuhan optimal.
- h. Tekanan osmotik yang sesuai: Media kultur harus isotonik untuk menghindari kerusakan sel akibat perbedaan tekanan osmotik.
- i. Faktor pertumbuhan: Beberapa mikroorganisme memerlukan faktor pertumbuhan spesifik seperti vitamin atau asam amino tertentu untuk berkembang (Atmanto, Asri and Kadir, 2022).

2.3.3 Metode inokulasi

Dalam dunia mikrobiologi, teknik inokulasi memainkan peran krusial dalam memindahkan dan menumbuhkan mikroorganisme secara terkendali. Keberhasilan inokulasi sangat bergantung pada penerapan teknik aseptik yang ketat, yaitu serangkaian tindakan pencegahan untuk mencegah kontaminasi, baik pada sampel maupun pada individu yang terlibat dalam proses tersebut (Papang et al., 2023). Di antara berbagai metode inokulasi yang ada, *Pour Plate*, *Spread Plate*, dan *Streak Plate* adalah yang paling umum digunakan.

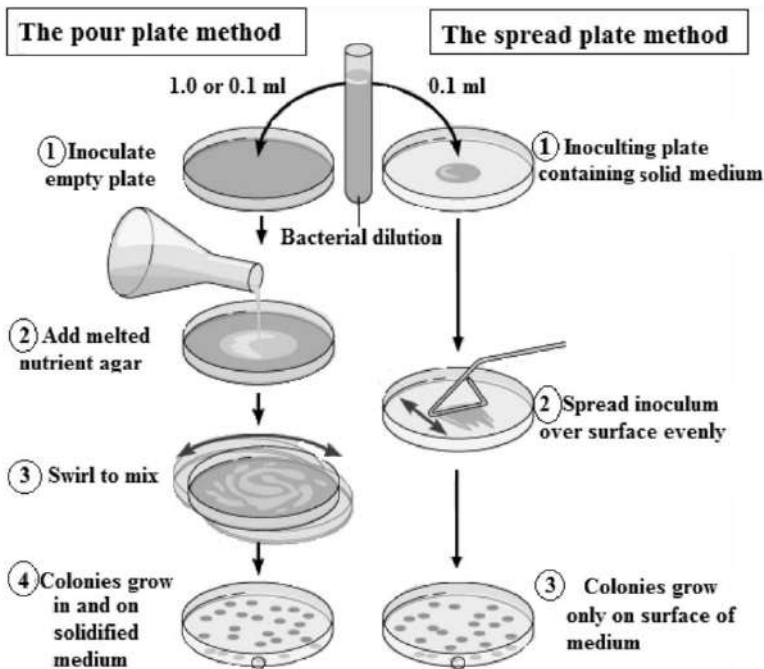
1. *Pour plate*

Metode tuang, meskipun sederhana dalam pelaksanaannya, memiliki keterbatasan signifikan dalam hal isolasi bakteri. Dalam teknik ini, suspensi bakteri dicampur dengan agar cair, lalu dituangkan ke dalam cawan petri. Meskipun memungkinkan pertumbuhan bakteri baik di dalam agar (lingkungan mikroaerofilik) maupun di permukaannya (lingkungan aerobik), distribusi bakteri yang tersebar di seluruh media padat seringkali menghasilkan koloni yang berdekatan atau bertumpuk. Hal ini menyulitkan isolasi koloni tunggal, yang penting untuk mendapatkan kultur murni (Najmah, et. al., 2024).

2. *Spread plate*

Metode cawan sebar (*spread plate*) adalah teknik yang umum digunakan untuk menumbuhkan koloni bakteri di permukaan media agar yang telah memadat. Dalam metode ini, suspensi bakteri diratakan secara hati-hati di atas permukaan agar menggunakan alat steril, seperti batang kaca bengkok, untuk memastikan distribusi bakteri yang merata. Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan koloni bakteri yang

terpisah dan terisolasi dengan baik, sehingga memudahkan pengamatan morfologi koloni serta penghitungan jumlahnya. Namun, teknik ini membutuhkan keterampilan dan ketelitian, terutama dalam meratakan suspensi bakteri tanpa menyebabkan kontaminasi. Kontaminasi dapat mengganggu hasil akhir dan mengurangi keandalan percobaan (Kurniawan, Ariami and Rohmi, 2023).

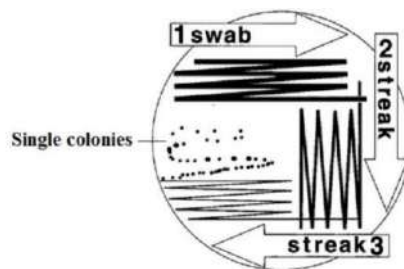


Gambar 2. 1. Metode Pour Plate dan Spread Plate (Najmah, et. al., 2024)

3. Streak plate

Teknik *streak plate*, atau metode goresan, adalah suatu metode fundamental dalam bidang mikrobiologi yang digunakan untuk mengisolasi kultur murni mikroorganisme, seperti bakteri atau jamur, dari sampel yang mengandung beragam jenis mikroorganisme. Prosesnya dimulai dengan mengambil sampel campuran menggunakan alat inokulasi

steril, kemudian menggoreskannya secara sistematis di atas media agar dalam cawan petri. Teknik ini relatif sederhana, mudah dilakukan, dan hanya memerlukan peralatan dasar. Selain itu, streak plate efektif untuk mengisolasi sebagian besar jenis mikroorganisme. Namun, keberhasilan teknik ini memerlukan keterampilan teknis yang baik, dan kurang cocok untuk sampel dengan jumlah mikroorganisme yang sangat rendah (Cox *et al.*, 2017).



Gambar 2. 2. Tahap goresan metode Steak Plate (Najmah, et. al., 2024)



Gambar 2. 3. Metode Steak Plate (a) Kotinyu; (b) Kuadran; (c) Streak T (Najmah, et. al., 2024)

2.3.4 Kondisi inkubasi

Kondisi inkubasi yang optimal sangat penting untuk pertumbuhan mikroorganisme, karena setiap jenis mikroorganisme memiliki kebutuhan lingkungan spesifik

untuk berkembang. 37°C adalah suhu inkubasi yang paling umum digunakan untuk mikroba, karena mendekati suhu tubuh manusia dan optimal untuk pertumbuhan banyak jenis mikroorganisme. Sesuai rekomendasi AAMI, semua kultur harus diinkubasi pada suhu 37°C selama 48 jam menggunakan media yang sesuai, seperti *Trypticase soy agar* (TSA), *standard methods agar* (SMA), atau sistem pengujian komersial lainnya. Langkah ini akan memastikan pertumbuhan mikroorganisme yang optimal, sehingga menghasilkan analisis atau eksperimen yang akurat dan dapat diandalkan (Abbasi *et al.*, 2020).

2.3.5 Pengukuran pertumbuhan

Pengukuran pertumbuhan mikroba dapat dilakukan melalui metode langsung dan tidak langsung. Metode langsung melibatkan penghitungan atau perkiraan jumlah sel mikroba yang ada. Salah satu teknik yang umum digunakan adalah *Total Plate Count* (TPC), di mana sampel mikroba diencerkan dan ditumbuhkan pada media agar, kemudian koloni yang terbentuk dihitung untuk menentukan jumlah sel (Yunita *et al.*, 2015). Teknik lain yang sering digunakan adalah *Most Probable Number* (MPN), yang memperkirakan jumlah mikroba berdasarkan jumlah tabung positif pada serangkaian pengenceran (Wardhana *et al.*, 2021). Mikroskopi langsung juga memungkinkan penghitungan sel secara visual dengan menggunakan mikroskop dan ruang hitung khusus.

Sebaliknya, pengukuran pertumbuhan mikroba secara tidak langsung tidak menghitung jumlah sel secara eksplisit, melainkan mengukur parameter yang berkorelasi dengan pertumbuhan mikroba. Salah satu teknik yang umum digunakan adalah turbidimetri, di mana kekeruhan suspensi

sel diukur. Kekeruhan ini meningkat seiring dengan pertumbuhan mikroba (Fahrudin *et al.*, 2019). Metode lain termasuk pengukuran biomassa, yang melibatkan penentuan berat kering atau kandungan komponen seluler seperti protein atau DNA, serta pengukuran aktivitas metabolik, seperti konsumsi nutrisi atau produksi produk sampingan, yang dapat berfungsi sebagai indikator pertumbuhan mikroba.

2.4 Pengendalian Pertumbuhan Mikroba

Pengendalian pertumbuhan mikroba merupakan aspek penting dalam berbagai bidang, termasuk kesehatan, industri pangan, dan lingkungan. Mikroba, yang mencakup bakteri, jamur, virus, dan protozoa, dapat menyebabkan infeksi, pembusukan makanan, dan kerusakan material. Oleh karena itu, pengendalian pertumbuhannya menjadi krusial untuk mencegah dampak negatif tersebut. Pendekatan dalam pengendalian mikroba meliputi metode fisik, seperti pemanasan, pendinginan, dan iradiasi, serta penggunaan senyawa kimia seperti disinfektan dan antiseptik. Selain itu, senyawa antimikroba alami juga semakin banyak digunakan karena dianggap lebih aman dan ramah lingkungan. Efektivitas pengendalian mikroba bergantung pada berbagai faktor, termasuk jenis mikroba, kondisi lingkungan, dan konsentrasi agen pengendali yang digunakan. Dengan pengendalian yang tepat, risiko yang ditimbulkan oleh mikroba dapat diminimalkan, sehingga kualitas produk dan kesehatan masyarakat dapat terjaga.

1. Metode fisik

Berbagai metode fisik digunakan untuk mengendalikan pertumbuhan mikroorganisme yang

masing-masing bekerja melalui mekanisme yang berbeda. Suhu tinggi, diterapkan dalam autoklaf, perebusan, dan sterilisasi udara panas, mampu mematikan mikroorganisme dengan denaturasi protein dan enzim vital mereka. Sebaliknya, suhu rendah, melalui pendinginan dan pembekuan, mampu memperlambat metabolisme mikroba, menghambat pertumbuhannya tanpa selalu membunuhnya. Desikasi atau pengeringan, dapat menghambat aktivitas enzim mikroba karena kekurangan air, sehingga memiliki efek statis. Tekanan osmotik tinggi, menciptakan lingkungan hipertonik, juga efektif menghambat pertumbuhan mikroba melalui plasmolisis. Radiasi, baik ultraviolet maupun ionisasi, mampu merusak DNA mikroba, radiasi ultraviolet menyebabkan pembentukan dimer timin yang mengganggu replikasi, sedangkan radiasi ionisasi menghasilkan radikal bebas yang merusak DNA dan protein. Terakhir, filtrasi secara fisik menghilangkan mikroorganisme dari cairan atau udara menggunakan filter berpori-pori kecil. (Choramo, 2022).

2. Metode kimia

Berbagai agen kimia digunakan dalam pengendalian mikroorganisme, masing-masing memiliki target dan mekanisme kerja yang spesifik. Disinfektan, seperti senyawa fenolik, halogen, alkohol, aldehida, gas, surfaktan, agen pengoksidasi, pewarna, logam berat, serta asam dan alkali, digunakan untuk membunuh atau menghilangkan mikroorganisme patogen pada benda mati. Antibiotik, baik alami maupun sintetis, bekerja dengan menghambat atau membunuh bakteri tertentu pada konsentrasi rendah, biasanya dengan mengganggu fungsi vital sel bakteri seperti sintesis dinding sel, membran sel, protein, atau asam nukleat. Obat antijamur,

di sisi lain, digunakan untuk mengobati infeksi jamur dengan menargetkan komponen spesifik dalam sel jamur, seperti ergosterol dalam membran sel atau sintesis dinding sel. Sementara itu, obat antivirus menyerang berbagai tahap dalam siklus replikasi virus, sering kali dengan bertindak sebagai analog basa yang mengganggu sintesis asam nukleat virus (Choramo, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- A'yun, Q., Anja A.R., Dina F., Awaluddin, Ika .A.R., Mahyarudin, Niken B.A., Jernita S., Erma S., Yohanes K., Muhammad A., dan Fathin H. 2022. Mikrobiologi Dasar. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.
- Abbasi, F. *et al.* (2020) 'The effect of incubation temperature and growth media on index microbial fungi of indoor air in a hospital building in Shiraz, Iran', *Journal of Building Engineering*, 31(February), p. 101294. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101294>.
- Arisandi, A. *et al.* (2017) 'DAMPAK PERBEDAAN BAKTERI *Vibrio fluvialis* SALINITAS', *Ilmu Pertanian*, 9(2), pp. 91–97.
- Atlas, R.M. (2010) *Handbook of Microbiological Media*, *Handbook of Microbiological Media*. <https://doi.org/10.1201/ebk1439804063>.
- Atmanto, Y.K.A.A., Asri, L.A. and Kadir, N.A. (2022) 'Media Pertumbuhan Kuman', *Jurnal Medika Hutama*, 04(01), pp. 3069–3075. <http://jurnalmedikahutama.com>.
- Ayilara, M.S. and Babalola, O.O. (2023) 'Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms', *Frontiers in Agronomy*, 5(May), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>.
- Bonnet, M. *et al.* (2020) 'Bacterial culture through selective and non-selective conditions: the evolution of culture media in clinical microbiology', *New Microbes and New Infections*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2019.100622>.
- Bosco Nshimiyimana, J. *et al.* (2018) 'Thermophiles: Isolation, Characterization and Screening for Enzymatic Activity', *Print) Bioscience Discovery*, 9(3), pp. 430–437. <http://biosciencediscovery.com>.

- Braga, R.M., Dourado, M.N. and Araújo, W.L. (2016) 'Microbial interactions: ecology in a molecular perspective', *Brazilian Journal of Microbiology*, 47, pp. 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.005>.
- Choramo, A. (2022) 'A Review on Chemical and Physical Methods of Controlling Microbial Growth', *Community Medicine & Public Health Care*, 9(2), pp. 1–7. <https://doi.org/10.24966/cmph-1978/1000107>.
- Cox, N.A. *et al.* (2017) 'A four-quadrant sequential streak technique to evaluate *Campylobacter* selective broths for suppressing background flora in broiler carcass rinses', *Journal of Food Safety*, 37(2), pp. 2–5. <https://doi.org/10.1111/jfs.12311>.
- Fahrudin *et al.* (2019) 'Uji kemampuan tumbuh isolat bakteri dari air dan sedimen Sungai Tallo terhadap logam timbal (Pb)', *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*, 10(2), pp. 58–64.
- Graham, J.E. *et al.* (2011) 'Identification and characterization of a multidomain hyperthermophilic cellulase from an archaeal enrichment', *Nature Communications*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms1373>.
- Hamdan, A. (2018) 'Psychrophiles: Ecological significance and potential industrial application Psychrophiles: Historical background', *S Afr J Sci.*, 114(5), pp. 1–6.
- Isnawati and Trimulyono, G. (2018) 'Temperature range and degree of acidity growth of isolate of indigenous bacteria on fermented feed "fermege"', *Journal of Physics: Conference Series*, 953(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012209>.
- Jin, Q. and Kirk, M.F. (2018) 'pH as a primary control in environmental microbiology: 1. thermodynamic perspective', *Frontiers in Environmental Science*, 6(MAY), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00021>.

- Jufri, R.F. (2020) 'The Effect of Environmental Factors on Microbial Growth', *Journal La Lifesci*, 1(1), pp. 12–17. <https://doi.org/10.37899/journallalifesci.v1i1.32>.
- Kalalo, M.J. *et al.* (2020) 'Potensi Antimikroba Cengkeh : Review Literatur', *Jurnal Farmasi Medica/Pharmacy Medical Journal (PMJ)*, 3(2), p. 53. <https://doi.org/10.35799/pmj.3.2.2020.32882>.
- Kanojia, V. *et al.* (2017) 'An overview of microbial cell culture', ~ 1923 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), pp. 1923–1928.
- Krause, S. *et al.* (2017) 'Characterisation of a stable laboratory co-culture of acidophilic nanoorganisms', *Scientific Reports*, 7(1), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03315-6>.
- Kurniawan, S., Ariami, P. and Rohmi (2023) 'Si Pinter Sebagai Alat Penghitung Koloni Bakteri Penunjang Laboratorium Mikrobiologi', *Jurnal Biotek Volume*, 9(1), pp. 1–10. https://www.researchgate.net/profile/Nurdiyanti-Nurdiyanti/publication/348404305_PERANAN_EDMO DO_SEBAGAI_ALTERNATIF_DALAM_PEMBELAJARAN_DARING/links/5ffd3479299bf140888c88dc/PERANA N-EDMODO-SEBAGAI-ALTERNATIF-DALAM-PEMBELAJARAN-DARING.pdf.
- Leclercq-Perlat, M.N. *et al.* (2012) 'Temperature and relative humidity influence the microbial and physicochemical characteristics of Camembert-type cheese ripening', *Journal of Dairy Science*, 95(8), pp. 4666–4682. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5368>.
- Liao, H. *et al.* (2023) 'Mesophilic and thermophilic viruses are associated with nutrient cycling during hyperthermophilic composting', *ISME Journal*, 17(6), pp. 916–930. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01404-1>.

- Malik, F. *et al.* (2019) 'Uji Aktivitas Madu Seulawah Sebagai Antibakteri dalam Menghambat Pertumbuhan *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853', *Jurnal Bioleuser*, 3(1), pp. 5-9. <http://www.jurnal.unsyiah.ac.id/bioleuser>.
- Marco, M.L. (2021) 'Defining how microorganisms benefit human health', *Microbial Biotechnology*, 14(1), pp. 35-40. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13685>.
- Moral, U. *et al.* (2017) 'A Growth of Different Types of Microorganism, Intrinsic and Extrinsic Factors of Microorganism and their Affects in Food: A Review', *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(1), pp. 290-298. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.601.035>.
- Najmah, Asriyani R., Tacik I., Emelda, Ni Made S.D., Dwi S., Syandrez P.P., Dwi K., Aini, dan Kristanti P. 2024. Pengantar Mikrobiologi. Purbalingga: Eureka Media Aksara. 55-58.
- Ngatirah. 2017. Mikrobiologi Umum. Yogyakarta: Instiper Yogyakarta. 52
- Oktavia, Y. *et al.* (2022) 'ISOLASI DAN KARAKTERISASI BAKTERI PROTEOLITIK ASAL TERASI IKAN SELUANG (*Stolephorus* sp.)', *Marinade*, 5(02), pp. 93-98. <https://doi.org/10.31629/marinade.v5i02.4943>.
- Papang, S.B., Tri U., dan Tarsisius C.T. 2023. Studi Observasi Penerapan Teknik Aseptik dalam Pembedahan pada Layanan Praktik Medik Veteriner di Klinik Hewan Kota Kupang. *Jurnal Veteriner Nusantara*, 6 (12): 1-6.
- Preetha, S.S. and Narayanan, R. (2020) 'Factors Influencing the Development of Microbes in Food', *Shanlax International Journal of Arts, Science and Humanities*, 7(3), pp. 57-77. <https://doi.org/10.34293/sijash.v7i3.473>.

- Suriani, S., Soemarno and Suharjo (2013) 'Pengaruh Suhu dan pH terhadap Laju pertumbuhan Lima Isolat Bakteri Anggota Genus *Pseudomonas* yang diisolasi dari Ekosistem Sungai Tercemar Deterjen di sekitar Kampus Universitas Brawijaya', *Indonesian Journal of Environment and Sustainable Development*, 3(2), pp. 58–62.
- Tjampakasari, C.R. and Hanifah, N. (2023) 'Kultivasi dan Identifikasi Bakteri Anaerob *Bacteroides Fragilis*', *MAHESA : Malahayati Health Student Journal*, 3(11), pp. 3717–3729.
<https://doi.org/10.33024/mahesa.v3i11.11537>.
- Tumiwa, P.I., Yudistira, A. and Wewengkang, D.S. (2019) 'AKTIVITAS ANTIMIKROBA EKSTRAK ETIL ASETAT JAMUR LAUT YANG DIISOLASI DARI ORGANISME LAUT SPONS *Phyllospongia lamellosa* YANG DIAMBIL DARI PERAIRAN DESA TUMBAK, KECAMATAN PUSOMAEN, KABUPATEN MINAHASA TENGGARA TERHADAP MIKROBA *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, dan *Candida albicans*', *Pharmakon*, 8(4), p. 851.
<https://doi.org/10.35799/pha.8.2019.29362>.
- Vigneshwari, J., Arjunan, G. and Natesan, V. (2022) 'Review on halophilic microbes and their applications', *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 10(10), pp. 23–36. <http://www.beppls.com>.
- Wardhana, D.K. *et al.* (2021) 'Detection of *Escherichia coli* Contamination using Most Probable Number (MPN) methods in Chicken Meats in Market of Surabaya', *Jurnal Medik Veteriner*, 4(1), pp. 118–124.
<https://doi.org/10.20473/jmv.vol4.iss1.2021.118-124>.
- Yuniastri, R., Ismawati, I. and Putri, R.D. (2018) 'Mikroorganisme Dalam Pangan', *Jurnal Pertanian Cemara*, 15(2), pp. 15–20.
<https://doi.org/10.24929/fp.v15i2.653>.

Yunita, M. *et al.* (2015) 'Analisis Kuantitatif Mikrobiologi Pada Makanan Penerbangan (Aerofood ACS) Garuda Indonesia Berdasarkan TPC (Total Plate Count) Dengan Metode Pour Plate', *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 3(3), pp. 237–248.

BAB 3

GENETIKA MIKROORGANISME

Oleh Budi Rianto Wahidi

3.1 Pendahuluan

Mikrobiologi adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari makhluk hidup berukuran mikroskopis, seperti bakteri, virus, fungi, dan protozoa. Meskipun berukuran sangat kecil, tetapi memiliki dampak yang sangat besar terhadap kehidupan di Bumi. Makhluk hidup berukuran mikroskopis atau sering di istilahkan sebagai mikroorganisme, juga memiliki peran penting dalam siklus nutrisi, kesehatan manusia, industry pangan, dan berbagai bidang lainnya. Sebagai entitas biologis terkecil, mikroorganisme juga terlibat dalam berbagai proses kehidupan yang esensial. Mulai dari siklus biogeokimia, dimana mikroorganisme berperan dalam dekomposisi materi organik dan daur ulang nutrisi (Aprilia *et al.*, 2022), hingga dinamika populasi spesies lain. Kehadiran mikroorganisme dalam jumlah besar dan keberagaman jenis yang tinggi menjadikannya komponen kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem (Philippot, Griffiths and Langenheder, 2021).

Selain peran ekologisnya yang vital, mikroorganisme juga memiliki dampak signifikan terhadap kehidupan manusia. Mikroorganisme berperan penting dalam kesehatan manusia sebagai agen penyebab penyakit, namun juga sebagai komponen penting dalam mikrobioma tubuh

yang mendukung sistem imun. Selain itu, mikroorganisme juga memiliki potensi besar dalam bidang bioteknologi, energi terbarukan, dan remediasi lingkungan (Hariri *et al.*, 2021). Pada bab ini akan dibahas mengenai dasar-dasar genetika mikroorganisme, yang merupakan kunci untuk memahami bagaimana mikroorganisme beradaptasi, berevolusi, dan menyebabkan penyakit. Selain itu juga akan dipelajari struktur genom mikroorganisme, mekanisme mutasi dan rekombinasi genetik, serta aplikasi teknologi genetika. Dengan memahami genetika mikroorganisme, tentunya akan sangat membantu untuk mengembangkan strategi dalam mengatasi berbagai tantangan global, seperti resistensi antibiotik dan munculnya penyakit menular baru.

3.2 Struktur Genom Mikroorganisme

Genom adalah keseluruhan informasi genetik yang terdapat dalam suatu organisme (Sukweenadhi, 2023). Informasi ini tersimpan dalam bentuk molekul *Deoxyribonucleic Acid* (DNA) yang panjang dan kompleks. DNA adalah molekul yang berbentuk seperti tangga spiral (*double helix*), yang terdiri dari dua untai yang saling berpasangan, dihubungkan oleh basa nitrogen (adenin, timin, guanin, dan sitosin). Urutan basa nitrogen inilah yang membentuk kode genetik yang unik bagi setiap organisme. Terdapat dua kategori organisme berdasarkan organisasi selnya, yaitu prokariota dan eukariota. Prokariota memiliki struktur yang lebih sederhana (Aulia and Saputra, 2024). Genom prokariota umumnya berupa satu lingkaran DNA yang terletak langsung di dalam sitoplasma.

Tabel 3. 1. Perbedaan Genom Prokariota dan Eukariota

Karakteristik	Prokariota	Eukariota
Ukuran	Lebih Kecil	Lebih besar
Bentuk DNA	Sirkular	Linear
Struktur dan Organisasi	Sedehana, Operon	Kompleks, kromosom, intron, exon
Lokasi DNA	Nukleoid	Nukleus
Plasmid	Umum	Jarang

Sementara eukariota memiliki struktur yang lebih kompleks (Aulia and Saputra, 2024). Genom eukariota terbagi-bagi menjadi beberapa kromosom linear yang tersimpan di dalam nukleus. Perbedaan struktur genom ini mencerminkan tingkat kompleksitas organisme. Prokariota dengan genom yang lebih sederhana cenderung memiliki struktur sel yang lebih sederhana pula, dan umumnya bereproduksi secara aseksual. Sebaliknya, eukariota dengan genom yang lebih kompleks memiliki struktur sel yang lebih kompleks, dengan berbagai organel yang menjalankan fungsi khusus. Genom eukariota umumnya bereproduksi secara seksual, memungkinkan terjadinya variasi genetik yang lebih besar (Fu *et al.*, 2019). Secara singkat perbedaan antara genom prokariota dan eukariota dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa genom memiliki ukuran yang sangat bervariasi antar organisme. Mikroorganisme seperti bakteri dan archaea memiliki genom yang jauh lebih kecil dibandingkan organisme multiseluler (Novianti, 2020). Perbedaan ukuran ini mencerminkan kompleksitas dan cara hidup yang beragam dari masing-masing organisme. Mikroorganisme memiliki

kebutuhan dasar yang lebih sederhana, tidak memerlukan organ atau jaringan khusus. Maka dari itu mikroorganisme tidak memerlukan banyak gen untuk mengkode protein yang menjalankan berbagai fungsi tubuh. Selain itu, mikroorganisme sering hidup dalam lingkungan yang berubah-ubah dan kompetitif, sehingga cenderung mempertahankan genom yang efisien dan minimalis untuk mempercepat pertumbuhan dan reproduksi.

Berbeda dengan organisme uniseluler, organisme multiseluler memiliki struktur yang jauh lebih kompleks yang terdiri dari berbagai jenis jaringan dan organ yang memiliki fungsi khusus (Arfah, Novira and Adawiyah, 2022). Untuk mengkoordinasikan pertumbuhan dan aktivitas dari beragam jenis sel ini, organisme multiseluler memerlukan sistem kontrol yang lebih rumit. Dibandingkan dengan organisme uniseluler, genom organisme multiseluler mengandung jauh lebih banyak gen (Sinaga, 2010). Gen-gen ini tidak hanya mengkode protein yang menjalankan fungsi-fungsi dasar sel, tetapi juga berperan dalam mengatur perkembangan dan diferensiasi sel. Selain itu, genom organisme multiseluler juga kaya akan sekuen non-coding yang memiliki peran penting dalam mengatur ekspresi gen, menjaga stabilitas kromosom, dan memungkinkan terjadinya evolusi.

Perbedaan ukuran genom antara mikroorganisme dan organisme multiseluler memiliki implikasi yang sangat luas dalam berbagai disiplin ilmu. Ukuran genom mikroorganisme yang lebih kecil memungkinkan untuk bermutasi lebih cepat (Stelzer, Pichler and Hatheuer, 2021), menjadikannya model yang ideal untuk mempelajari mekanisme dasar kehidupan dan evolusi. Pemahaman mendalam tentang genom mikroorganisme juga telah

membuka jalan bagi pengembangan berbagai aplikasi bioteknologi, seperti produksi protein dalam skala besar dan pembersihan lingkungan. Dengan kata lain, perbedaan ukuran genom ini bukan hanya sekadar fakta biologis, tetapi juga memiliki implikasi yang sangat signifikan bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Replikasi genom adalah proses penggandaan materi genetik (DNA) sebelum pembelahan sel. Replikasi genom, transkripsi, dan translasi merupakan proses-proses fundamental dalam kehidupan sel. Genom yang berupa untaian DNA panjang, adalah cetak biru atau resep untuk membuat semua produk tersebut. Replikasi genom adalah proses penggandaan cetak biru ini sebelum sel membelah diri, sehingga setiap sel anak memiliki salinan yang lengkap (Rahmadina, 2019). Replikasi genom juga memastikan bahwa informasi genetik yang terkandung dalam sel induk dapat diwariskan secara akurat kepada keturunannya.

Setelah genom direplikasi, informasi genetik yang terkandung di dalamnya harus diterjemahkan menjadi protein. Proses penerjemahan ini disebut sebagai ekspresi gen (Geovana, 2020). Tahap pertama ekspresi gen adalah transkripsi, yaitu proses pembuatan salinan RNA dari DNA. RNA ini kemudian digunakan sebagai cetakan untuk membuat protein dalam proses yang disebut translasi. Proses transkripsi dan translasi ini mirip seperti menerjemahkan bahasa asing ke dalam bahasa yang lain. Pada bakteri dan virus, proses replikasi dan ekspresi gen memiliki karakteristik unik. Bakteri umumnya memiliki satu kromosom sirkular, sedangkan virus memiliki genom yang lebih kecil dan dapat berupa DNA atau RNA. Proses replikasi dan ekspresi gen pada virus sering kali bergantung pada enzim dan faktor yang disediakan oleh sel inang.

Salah satu faktor tersebut adalah lingkungan, virus membutuhkan lingkungan yang optimal untuk bereplikasi (Sanchez and Lagunoff, 2015), seperti suhu, pH, dan konsentrasi ion yang sesuai. Mikroorganisme memiliki kemampuan luar biasa untuk beradaptasi dengan lingkungan yang terus berubah. Salah satu kunci kemampuan adaptasi ini adalah kemampuan dalam mengatur ekspresi gen secara presisi. Ketika lingkungan berubah, mikroorganisme dapat dengan cepat mengaktifkan atau menonaktifkan gen-gen tertentu yang diperlukan untuk bertahan hidup dalam kondisi baru. Proses ini melibatkan berbagai mekanisme seperti operon, dan *small* RNA (sRNA).

Selain itu, mikroorganisme juga memiliki sistem mekanisme yang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan (Ma *et al.*, 2022; Wani *et al.*, 2022). Sistem ini memungkinkan untuk mendeteksi perubahan suhu, pH, ketersediaan nutrisi, dan adanya senyawa kimia tertentu yang dapat menghambat atau bahkan membahayakan bagi mikroorganisme. Misalnya, jika lingkungan menjadi lebih asam, mikroorganisme akan mengaktifkan gen yang mengkode protein yang dapat menetralkan asam. Ketika perubahan terdeteksi, mikroorganisme akan mengirimkan sinyal ke dalam sel untuk memicu perubahan ekspresi gen yang sesuai. Dengan demikian, mikroorganisme dapat mengatur metabolisme, pertumbuhan, dan perkembangannya agar tetap optimal dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

3.2.1 Meiosis

Meiosis adalah proses pembelahan sel khusus yang menghasilkan sel kelamin. Proses ini sangat penting dalam reproduksi seksual karena menghasilkan variasi genetik

pada keturunan. Salah satu kesulitan dalam mempelajari meiosis pada mikroorganisme adalah ukuran sel yang kecil dan kompleksitas genom yang bervariasi. Teknik mikroskopi modern dan analisis genomik telah memungkinkan para peneliti untuk mengamati secara langsung proses meiosis pada mikroorganisme dan mengidentifikasi gen-gen yang terlibat. Meiosis berperan sangat penting dalam siklus hidup mikroorganisme.

Salah satu peran meiosis pada mikroorganisme adalah meningkatkan keragaman genetik (Bergero *et al.*, 2021). Melalui pertukaran materi genetik selama meiosis, muncul kombinasi gen baru yang unik pada setiap keturunan. Hal ini memungkinkan mikroorganisme untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan yang cepat. Bayangkan saja, jika semua individu dalam suatu populasi memiliki gen yang sama, maka jika terjadi perubahan lingkungan yang ekstrem, seluruh populasi bisa terancam punah. Namun, dengan adanya variasi genetik, kemungkinan ada beberapa individu yang memiliki gen yang menguntungkan untuk bertahan hidup dalam kondisi baru.

Meiosis pada umumnya dikaitkan dengan organisme eukariotik multiseluler (Lenormand *et al.*, 2016). Meskipun banyak mikroorganisme bereproduksi secara aseksual, beberapa kelompok tertentu, seperti fungi dan beberapa protista, juga mengalami meiosis. Jika dibandingkan antara meiosis pada mikroorganisme (seperti bakteri, fungi, dan protista) dengan eukariota multiseluler (seperti tumbuhan dan hewan), terdapat beberapa perbedaan yang cukup signifikan. Salah satu perbedaan utama adalah kompleksitas siklus hidup. Mikroorganisme sering kali memiliki siklus hidup yang lebih sederhana dan memberikan fleksibilitas, dapat beralih dengan cepat antara reproduksi aseksual

(pembelahan biner) dan seksual (Aliviameita and Puspitasari, 2020; Suharman, 2020).

Sebaliknya, eukariota multiseluler memiliki siklus hidup yang lebih kompleks, dengan tahap-tahap perkembangan yang berbeda. Selain itu, jumlah kromosom pada mikroorganisme umumnya lebih sedikit dibandingkan eukariota multiseluler. Mekanisme regulasi reproduksi juga berbeda, pada mikroorganisme faktor lingkungan seringkali memicu reproduksi (Pichugin and Traulsen, 2022), ketika kondisi lingkungan stabil dan sumber daya melimpah, reproduksi aseksual lebih efisien karena menghasilkan banyak keturunan dalam waktu singkat. Namun, ketika kondisi lingkungan berubah, reproduksi seksual dapat memberikan keuntungan dengan menghasilkan keturunan yang memiliki kombinasi genetik baru yang mungkin lebih cocok untuk kondisi lingkungan yang baru. Sedangkan pada eukariota multiseluler, regulasi meiosis melibatkan banyak sinyal molekuler yang kompleks (Kimble, 2011).

Tujuan utama meiosis pada kedua kelompok organisme ini sama, yaitu menghasilkan variasi genetik. Variasi genetik ini sangat penting untuk adaptasi terhadap lingkungan yang terus berubah (Gustiano *et al.*, 2013). Namun, perbedaan terdapat pada cara mencapai tujuan tersebut. Pada mikroorganisme, meiosis seringkali terjadi sebagai respons terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, sedangkan pada eukariota multiseluler, meiosis merupakan bagian integral dari siklus reproduksi. Pada mikroorganisme, meiosis seringkali terkait dengan siklus hidup yang kompleks, melibatkan pergantian antara fase haploid dan diploid. Proses meiosis pada mikroorganisme ini memiliki beberapa perbedaan dengan organisme eukariotik multiseluler. Misalnya, jumlah

kromosom yang terlibat bisa jauh lebih sedikit, dan mekanisme pengaturan genetik yang mendasarinya mungkin berbeda.

Tabel 3. 2. Perbandingan Meiosis pada Mikroorganisme dengan Eukariota Multiseluler

Karakteristik	Mikroorganisme	Eukariota Multiseluler
Kompleksitas Siklus Hidup	Sederhana	Kompleks
Jumlah Kromosom	Umumnya lebih sedikit	Umumnya lebih banyak
Mekanisme Regulasi	Melibatkan faktor lingkungan	Melibatkan sinyal molekuler kompleks
Tujuan Meiosis	Meningkatkan keragaman genetik	Meningkatkan keragaman genetik dan pembentukan gamet

Pendekatan untuk mempelajari meiosis pada mikroorganisme merupakan tantangan tersendiri karena ukuran selnya yang kecil dan siklus hidup yang cepat. Namun beberapa peneliti telah mengembangkan berbagai teknik untuk mengamati dan menganalisis proses meiosis pada tingkat molekuler, seluler, dan organisme. Penggunaan mikroskop fluoresensi dan elektron memungkinkan untuk mengamati secara langsung struktur sel dan kromosom selama meiosis (Aoyama, Kuroiwa and Nakamura, 2008; Shemilt *et al.*, 2014). Dengan menggunakan pewarna spesifik, para peneliti dapat melacak pergerakan kromosom dan peristiwa penting lainnya selama meiosis. Teknik lain

yang dapat digunakan adalah metode *Polymerase Chain Reaction* (PCR) dan *sequencing* DNA yang memungkinkan untuk mengidentifikasi gen yang terlibat dalam meiosis (Garrido, Aguilar and Prieto, 2020; Sun *et al.*, 2024) dan menganalisis ekspresi gen selama proses tersebut.

Beberapa contoh kelompok mikroorganisme yang mengalami meiosis sebagai bagian dari siklus hidupnya adalah ragi (*Saccharomyces cerevisiae*). Ragi merupakan organisme populer yang digunakan untuk mempelajari meiosis karena siklus hidupnya yang pendek dan mudah dimanipulasi secara genetik. Meiosis pada ragi sangat penting untuk reproduksi seksual dan pembentukan spora. Kelompok lain adalah protozoa, seperti ciliata dan diatom. Kelompok ini juga mengalami meiosis sebagai bagian dari siklus hidupnya. Meiosis pada protozoa seringkali terkait dengan pertukaran materi genetik antara individu yang berbeda (Walliker, 1989).

3.2.2 Mutasi

Meiosis dan mutasi merupakan dua proses kunci dalam evolusi, keduanya saling terkait erat dalam membentuk keragaman genetik pada organisme, termasuk mikroorganisme. Meiosis menghasilkan kombinasi gen yang baru melalui rekombinasi genetik. Sedangkan mutasi adalah perubahan permanen pada urutan DNA. Berkaitan dengan keragaman genetik, mutasi menghasilkan alel baru yang dapat diwariskan, sementara meiosis mendistribusikan alel-alel tersebut ke dalam kombinasi yang berbeda-beda pada gamet. Kombinasi alel yang baru ini kemudian akan diwariskan ke generasi berikutnya, menghasilkan variasi genetik yang lebih besar. Variasi genetik inilah yang menjadi bahan baku bagi evolusi.

Mutasi dapat terjadi secara spontan atau disebabkan oleh faktor lingkungan (Bickham *et al.*, 2000; Elena and De Visser, 2003; Waldvogel and Pfenninger, 2021). Mutasi dapat dikategorikan berdasarkan perubahan yang terjadi pada urutan DNA. Beberapa jenis mutasi yaitu:

1. Substitusi: Pergantian satu basa nitrogen dengan basa nitrogen lain. Substitusi dapat bersifat sinonim (tidak mengubah asam amino) atau non sinonim (mengubah asam amino). Substitusi non sinonim dapat menyebabkan perubahan fungsi protein dan berdampak pada fenotip.
2. Insersi: Penambahan satu atau lebih basa nitrogen pada urutan DNA. Insersi dapat menyebabkan pergeseran rangka baca yang dapat mengubah seluruh urutan asam amino setelah titik insersi.
3. Delesi: Penghapusan satu atau lebih basa nitrogen dari urutan DNA. Delesi juga dapat menyebabkan pergeseran rangka baca.

Dampak mutasi pada fenotip mikroorganisme sangat bervariasi, tergantung pada jenis mutasi, lokasi mutasi, dan fungsi gen yang terpengaruh. Beberapa dampak mutasi yang mungkin terjadi antara lain terjadi perubahan sifat fisik. Mutasi ini dapat menyebabkan perubahan pada sifat fisik mikroorganisme, seperti warna koloni, bentuk sel, atau kemampuan untuk membentuk spora. Dampak lain adalah mikroorganisme mengalami perubahan metabolisme, misalnya kemampuan untuk memecah polutan atau menghasilkan produk fermentasi. Resistensi antibiotik merupakan salah satu contoh dampak dari terjadinya mutasi (Woodford and Ellington, 2007), dimana mutasi pada gen yang mengkode protein target antibiotik dapat menyebabkan bakteri menjadi resisten terhadap antibiotik tertentu.

3.3 Rekombinasi Genetik

Rekombinasi genetik adalah proses pertukaran materi genetik antara dua molekul DNA (Aisah, Farin and Mulyana, 2018). Pada mikroorganisme, proses ini sangat penting untuk menghasilkan variasi genetik yang memungkinkan adaptasi terhadap lingkungan yang terus berubah. Ada tiga mekanisme utama rekombinasi genetik pada mikroorganisme, yaitu transformasi, transduksi, dan konjugasi.

1. Transformasi

Transformasi adalah proses di mana sel bakteri mampu mengambil DNA bebas dari lingkungannya dan mengintegrasikannya ke dalam genomnya sendiri. DNA bebas ini bisa berasal dari bakteri lain yang telah mati dan melepaskan DNA-nya, atau dari DNA rekombinan yang dibuat di laboratorium.

2. Transduksi

Transduksi adalah proses transfer materi genetik dari satu sel bakteri ke sel bakteri lain dengan perantara virus bakteriofag (*Bacteriophage*). Bakteriofag adalah virus yang menginfeksi bakteri (Damayanti, Jannah and Rahaju, 2016). Terdapat dua jenis transduksi yaitu umum dan khusus. Pada transduksi umum, setiap gen dari donor dapat ditransfer. Sedangkan untuk transduksi khusus, transfer gen lebih terbatas dan hanya melibatkan gen-gen yang berdekatan dengan lokasi integrasi virus dalam genom bakteri.

3. Konjugasi

Konjugasi adalah proses transfer materi genetik secara langsung dari satu sel bakteri ke sel bakteri lain melalui kontak fisik. Proses ini biasanya melibatkan plasmid, yaitu

molekul DNA ekstrakromosomal yang dapat bereplikasi secara mandiri.

Rekombinasi genetik sangat penting bagi mikroorganisme, salah satunya karena adaptasi mikroorganisme (Arizala and Arif, 2024). Rekombinasi genetik memungkinkan mikroorganisme untuk memperoleh gen-gen baru yang mengkode sifat-sifat yang menguntungkan dalam lingkungan tertentu. Misalnya, bakteri dapat memperoleh gen resistensi antibiotik melalui transformasi atau konjugasi, sehingga mampu bertahan hidup di lingkungan yang mengandung antibiotik. Alasan lain adalah evolusi, rekombinasi genetik mempercepat laju evolusi (Levin and Cornejo, 2009; González-Torres *et al.*, 2019; Cavassim *et al.*, 2021) dengan cara menggabungkan mutasi yang terjadi pada individu yang berbeda. Hal ini memungkinkan munculnya kombinasi gen yang baru dan unik dalam waktu yang relatif singkat. Dalam jangka waktu yang panjang, rekombinasi genetik yang terus-menerus dapat menyebabkan terbentuknya spesies baru.

3.4 Aplikasi Genetika dalam Studi Mikrobiologi

Pemahaman mendalam tentang genom mikroorganisme telah membuka cakrawala baru dalam bidang mikrobiologi. Dengan kemajuan teknologi sekuensing DNA, kode genetik mikroorganisme dapat terbaca secara menyeluruh. Informasi genetik ini telah memungkinkan para peneliti dan ilmuwan untuk mengungkap mekanisme molekuler yang mendasari berbagai proses biologis pada mikroorganisme, mulai dari metabolisme hingga patogenesis. Lebih dari sekadar

pengetahuan dasar, data genetik ini telah menjadi landasan bagi pengembangan berbagai aplikasi yang revolusioner.

Aplikasi genetika dalam mikrobiologi telah mengubah lanskap berbagai bidang, dari kesehatan hingga industri. Melalui rekayasa genetika, genom mikroorganisme dapat dimanipulasi untuk menghasilkan produk-produk yang bermanfaat, seperti antibiotik baru, vaksin yang lebih efektif, dan enzim industri. Selain itu, genetika juga berperan penting dalam memahami dan mengatasi masalah kesehatan global, seperti resistensi antibiotik dan penyakit menular. Dengan terus berkembangnya teknologi genetika, akan muncul inovasi-inovasi baru yang akan meningkatkan kualitas hidup manusia dan memecahkan tantangan global yang kompleks.

Perkembangan teknologi molekuler telah membawa perubahan besar dalam dunia mikrobiologi. Salah satu teknik atau metode yang paling revolusioner adalah PCR (Giri Putra *et al.*, 2020), metode ini memungkinkan para peneliti untuk mengamplifikasi (menduplikasi) segmen DNA tertentu secara eksponensial dalam waktu singkat, seperti menggandakan atau membuat fotokopi dari satu halaman buku. Dengan PCR, jutaan salinan dapat dibuat dari gen yang ingin dipelajari, bahkan jika gen tersebut hanya ada dalam jumlah sangat sedikit dalam sampel. Hal ini memungkinkan untuk deteksi dan analisis mikroorganisme dengan lebih sensitif dan akurat.

Jika PCR adalah mesin fotokopi untuk DNA, maka sekuensing DNA adalah penerjemah yang sangat canggih. Urutan basa nitrogen dalam sebuah molekul DNA dapat ditentukan dengan sekuensing DNA (Lokapirnasari *et al.*, 2017; Mahdiyah, 2019). Dengan mengetahui urutan basa ini, identifikasi jenis mikroorganisme yang ada dalam suatu

sampel dapat dilakukan, melacak asal-usul suatu patogen, dan memahami bagaimana mikroorganisme beradaptasi dengan lingkungannya. Kombinasi PCR dan sekuensing DNA memungkinkan untuk membangun suatu database genom mikroorganisme yang sangat besar, yang dapat digunakan untuk berbagai tujuan penelitian.

PCR dan sekuensing DNA telah merevolusi studi mikrobiologi dengan cara yang belum pernah terjadi sebelumnya. Sebelum adanya metode ini, identifikasi dan karakterisasi mikroorganisme seringkali membutuhkan waktu yang lama dan proses yang rumit. Namun dengan keberadaan PCR dan sekuensing DNA, deteksi dan identifikasi mikroorganisme dapat dilakukan dalam hitungan hari atau bahkan jam. Selain itu, metode ini juga memungkinkan untuk mempelajari mikroorganisme yang sulit atau yang tidak dapat dibiakkan/dikultur di laboratorium. Sebagai contoh, mikrobioma yang berkoloni di kulit, mulut, saluran pencernaan, dan bagian tubuh lainnya manusia.

Mikrobioma manusia adalah komunitas mikroorganisme kompleks yang hidup di tubuh manusia (Sudarmono, 2016), terdiri dari berbagai jenis bakteri, virus, dan jamur. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa mikrobioma memainkan peran yang sangat penting dalam kesehatan manusia (Shreiner *et al.*, 2015; Mohajeri *et al.*, 2018; Ogunrinola *et al.*, 2020; Hou *et al.*, 2022). Keseimbangan mikrobioma yang sehat sangat penting untuk menjaga fungsi tubuh yang optimal, mulai dari pencernaan hingga sistem kekebalan tubuh.

Gangguan pada keseimbangan mikrobioma, yang sering disebut disbiosis, telah dikaitkan dengan berbagai penyakit, seperti penyakit radang usus, obesitas, dan

diabetes. Sebaliknya, mikrobioma yang sehat dapat memberikan banyak manfaat bagi kesehatan. Misalnya, beberapa bakteri usus menghasilkan vitamin yang penting bagi tubuh, sementara yang lainnya membantu mencegah pertumbuhan bakteri patogen. Dengan memahami hubungan antara mikrobioma dan kesehatan, dapat diketahui cara memanfaatkan mikrobioma untuk meningkatkan kesehatan manusia.

Pengetahuan tentang mikrobioma manusia membuka peluang besar untuk mengembangkan terapi baru. Beberapa pendekatan yang telah dikembangkan antara lain:

1. Probiotik

Probiotik adalah suplemen yang mengandung bakteri hidup yang bermanfaat bagi kesehatan. Probiotik dapat membantu memulihkan keseimbangan mikrobioma yang terganggu dan mencegah berbagai penyakit.

2. Prebiotik

Prebiotik adalah serat makanan yang tidak dapat dicerna oleh tubuh manusia, tetapi dapat menjadi makanan bagi bakteri baik dalam usus. Dengan mengonsumsi prebiotik, dapat mendorong pertumbuhan bakteri yang bermanfaat.

3. Transplantasi tinja

Dalam prosedur ini, tinja dari donor sehat ditransplantasikan ke pasien yang mengalami gangguan mikrobioma usus. Transplantasi tinja telah terbukti efektif dalam mengobati infeksi yang resisten terhadap antibiotik dan penyakit radang usus.

4. Pengembangan terapi berbasis *phage*

Phage adalah virus yang menginfeksi bakteri. Terapi berbasis *phage* dapat digunakan untuk mengobati infeksi bakteri yang resisten terhadap antibiotik.

Potensi mikrobioma untuk meningkatkan kesehatan manusia masih perlu dan banyak dieksplorasi lebih lanjut. Penelitian-penelitian lain diperlukan untuk menggali lebih dalam tentang mekanisme kerja mikrobioma dan interaksinya dengan tubuh manusia. Dengan pemahaman yang semakin mendalam, dapat dikembangkan suatu strategi yang lebih efektif untuk memanipulasi mikrobioma guna mencegah dan mengobati berbagai penyakit. Seiring dengan kemajuan pesat dalam teknologi biologi molekuler, maka untuk merealisasikan potensi yang lebih banyak dari mikrobioma dalam bidang kesehatan semakin dekat untuk terwujud. Di masa depan, pengobatan penyakit tidak hanya berfokus pada patogen, tetapi juga pada restorasi keseimbangan mikrobioma yang sehat.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisah, I., Farin, L. and Mulyana, H. (2018) 'Rekombinasi Molekul Dna', *Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika*, 10(1), p. 39. Available at: <https://doi.org/10.20884/1.jmp.2018.10.1.2836>.
- Aliviameita, A. and Puspitasari (2020) *Buku Ajar Mata Kuliah, Umsida Press Sidoarjo Universitas*.
- Aoyama, H., Kuroiwa, T. and Nakamura, S. (2008) 'Observations of chromosomal behaviour in living meiotic zygotes of *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyceae)', *European Journal of Phycology*, 43(4), pp. 389–394. Available at: <https://doi.org/10.1080/09670260701853566>.
- Aprilia, D. *et al.* (2022) 'Review: Biogeochemical process in mangrove ecosystem', *International Journal of Bonorowo Wetlands*, 10(2), pp. 126–141. Available at: <https://doi.org/10.13057/bonorowo/w100205>.
- Arfah, H., Novira, A. and Adawiyah, R. (2022) 'MAKALAH BIOLOGI SEL DAN BIODIVERSITAS "Sejarah Sel, Organisme Prokariota dan Eukariota dan Organisme Multiseluler"', (May). Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36783.82081>.
- Arizala, D. and Arif, M. (2024) 'Impact of Homologous Recombination on Core Genome Evolution and Host Adaptation of *Pectobacterium parmentieri*', *Genome Biology and Evolution*, 16(3), pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.1093/gbe/evae032>.
- Aulia, Y. and Saputra, M.A. (2024) 'Perbedaan Teori Organisme Sel Prokariotik, Eukariotik Dan Virus', (5).
- Bergero, R. *et al.* (2021) 'Meiosis and beyond – understanding the mechanistic and evolutionary processes shaping the germline genome', *Biological Reviews*, 96(3), pp. 822–841. Available at: <https://doi.org/10.1111/brv.12680>.

- Bickham, J.W. *et al.* (2000) 'Effects of chemical contaminants on genetic diversity in natural populations: Implications for biomonitoring and ecotoxicology', *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*, 463(1), pp. 33–51. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(00\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(00)00004-1).
- Cavassim, M.I.A. *et al.* (2021) 'Recombination Facilitates Adaptive Evolution in Rhizobial Soil Bacteria', *Molecular Biology and Evolution*, 38(12), pp. 5480–5490. Available at: <https://doi.org/10.1093/molbev/msab247>.
- Damayanti, R., Jannah, S.N. and Rahaju, H. (2016) 'Isolasi Bakteriofag Salmonella Spp. Dari Biofilm Pada Sistem Air Minum Isi Ulang', *Jurnal Biologi*, 5(2), pp. 1–11.
- Elena, S.F. and De Visser, J.A.G.M. (2003) 'Environmental stress and the effects of mutation', *Journal of Biology*, 2(2), pp. 1–4.
- Fu, C. *et al.* (2019) 'Genetic and genomic evolution of sexual reproduction: echoes from LECA to the fungal kingdom', *Current Opinion in Genetics and Development*, 58–59, pp. 70–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gde.2019.07.008>.
- Garrido, J., Aguilar, M. and Prieto, P. (2020) 'Identification and validation of reference genes for RT-qPCR normalization in wheat meiosis', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59580-5>.
- Geovana, D. (2020) 'Mekanisme Ekspresi Gen Pada Organisme Prokariot dan Enzim-enzim yang Berperan Mekanisme Ekspresi Gen Pada Organisme Prokariot dan Enzim-enzim yang Berperan Disusun Oleh', (June), pp. 1–22.

- Giri Putra, L.A. *et al.* (2020) 'A review of the development of Polymerase Chain Reaction technique and its uses in Scientific field', *Stannum: Jurnal Sains dan Terapan Kimia*, 2(1), pp. 14–30. Available at: <https://doi.org/10.33019/jstk.v2i1.1619>.
- González-Torres, P. *et al.* (2019) 'Impact of homologous recombination on the evolution of prokaryotic core genomes', *mBio*, 10(1), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1128/mBio.02494-18>.
- Gustiano, R. *et al.* (2013) 'Analisis Ragam Genotip Rapd dan Fenotip Truss Morfometrik pada Tiga Populasi Ikan Gabus (*Channa striata*, Bloch, 1793)', *Berita Biologi*, 12(3), pp. 325–333.
- Hariri, M.R. *et al.* (2021) 'Bioteknologi dalam bidang sumber daya energi', (August).
- Hou, K. *et al.* (2022) 'Microbiota in health and diseases', *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41392-022-00974-4>.
- Kimble, J. (2011) 'Molecular regulation of the mitosis/meiosis decision in multicellular organisms', *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(8), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a002683>.
- Lenormand, T. *et al.* (2016) 'Evolutionary mysteries in meiosis', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1706). Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0001>.
- Levin, B.R. and Cornejo, O.E. (2009) 'The population and evolutionary dynamics of homologous gene recombination in bacteria', *PLoS Genetics*, 5(8). Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000601>.

- Lokapirnasari, W. *et al.* (2017) 'Sekuensing 16S DNA Bakteri Selulolitik Asal Limbah Cairan Rumen Sapi Peranakan Ongole (SEQUENCING OF 16S DNA OF CELLULOLYTIC BACTERIA FROM BOVINE RUMEN FLUID WASTE ONGOLE CROSSBREED)', *Jurnal Veteriner*, 18(1), pp. 76–82. Available at: <https://doi.org/10.19087/jveteriner.2017.18.1.76>.
- Ma, F. *et al.* (2022) 'Development of Microbial Indicators in Ecological Systems', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph192113888>.
- Mahdiyah, U. (2019) 'Klasifikasi Dna Menggunakan Fitur N-Mers Dengan Integrasi Seleksi Data Dan Elm (Idelm) Sebagai Classifier', *Joutica*, 4(2), p. 268. Available at: <https://doi.org/10.30736/jti.v4i2.317>.
- Mohajeri, M.H. *et al.* (2018) 'The role of the microbiome for human health: from basic science to clinical applications', *European Journal of Nutrition*, 57(1), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00394-018-1703-4>.
- Novianti, T. (2020) 'Sel eukariota dan sel prokariota', (Nca 103), pp. 1–15.
- Ogunrinola, G.A. *et al.* (2020) 'The Human Microbiome and Its Impacts on Health', *International Journal of Microbiology*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/8045646>.
- Philippot, L., Griffiths, B.S. and Langenheder, S. (2021) 'Microbial Community Resilience across Ecosystems and Multiple Disturbances', *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 85(2), pp. 1–24. Available at: <https://doi.org/10.1128/mmbr.00026-20>.

- Pichugin, Y. and Traulsen, A. (2022) 'The possible modes of microbial reproduction are fundamentally restricted by distribution of mass between parent and offspring', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(12). Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2122197119>.
- Rahmadina, M.P. (2019) 'Modul Ajar Genetika Dasar', *Jurnal UNIVER05.3 bab 3SITAS ISLAM NEGERI SUMATERA UTARA*, pp. 1–82.
- Sanchez, E.L. and Lagunoff, M. (2015) 'Viral activation of cellular metabolism', *Virology*, 479–480, pp. 609–618. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.virol.2015.02.038>.
- Shemilt, L.A. *et al.* (2014) 'Scanning electron microscope studies of human metaphase chromosomes', *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2010). Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0144>.
- Shreiner, A.B. *et al.* (2015) 'Dicer (E-7): sc-393328', *Cell*, 69(1), p. 393328. Available at: <https://doi.org/10.1097/MOG.0000000000000139>.The.
- Sinaga, E. (2010) 'Regulasi Ekspresi Gen', *Regulasi Ekspresi Gen*, pp. 14–30. Available at: http://repository.unas.ac.id/1546/1/Lamp_A33-Diktat-Biomol-Regulasi_Ekspresi_gen.pdfhttp://repository.unas.ac.id/1546/1/Lamp_A33-Diktat-Biomol-Regulasi_Ekspresi_gen.pdf.
- Stelzer, C.P., Pichler, M. and Hatheuer, A. (2021) 'Linking genome size variation to population phenotypic variation within the rotifer, *Brachionus asplanchnoidis*', *Communications Biology*, 4(1), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02131-z>.

- Sudarmono, P.P. (2016) 'Mikrobioma: Pemahaman Baru tentang Peran Mikroorganisme dalam Kehidupan Manusia', *eJournal Kedokteran Indonesia*, 4(2), pp. 71–75. Available at: <https://doi.org/10.23886/ejki.4.6291.71-5>.
- Suharman (2020) 'Bahan Ajar Mata Kuliah Mikrobiologi Umum', *Jurnal Mikrobiologi*, 1(1), pp. 1–39.
- Sukweenadhi, J. (2023) 'Struktur Dan Fungsi Genomik'.
- Sun, S. *et al.* (2024) 'Whole transcriptome screening for novel genes involved in meiosis and fertility in *Drosophila melanogaster*', *Scientific Reports*, 14(1), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53346-z>.
- Waldvogel, A.M. and Pfenninger, M. (2021) 'Temperature dependence of spontaneous mutation rates', *Genome Research*, 31(9), pp. 1582–1589. Available at: <https://doi.org/10.1101/gr.275168.120>.
- Walliker, D. (1989) 'Implications of genetic exchange in the study of protozoan infections', *Parasitology*, 99(S1), pp. S49–S58. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0031182000083414>.
- Wani, A.K. *et al.* (2022) 'Microbial adaptation to different environmental conditions: molecular perspective of evolved genetic and cellular systems', *Archives of Microbiology*, 204(2), pp. 1–31. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02757-5>.
- Woodford, N. and Ellington, M.J. (2007) 'The emergence of antibiotic resistance by mutation', *Clinical Microbiology and Infection*, 13(1), pp. 5–18. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2006.01492.x>.

BAB 4

PERAN MIKROORGANISME DALAM KESEHATAN DAN LINGKUNGAN

Oleh Rina Hidayati Pratiwi

4.1 Pendahuluan

Mikroorganisme memainkan peran penting dalam kesehatan manusia, baik secara positif maupun negatif. Peran mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan virus yang secara alami hidup di tubuh manusia (misalnya di kulit, mulut, usus) dikenal sebagai mikrobiota. Mereka membantu menjaga keseimbangan dan fungsi tubuh. Mikroorganisme yang ada di tubuh pun sejak lahir sudah membantu dalam pengembangan dan pengaturan sistem kekebalan tubuh. Selain itu, mikroorganisme ada yang digunakan dalam produksi antibiotik, vaksin, enzim, dan berbagai produk farmasi lainnya.

Secara keseluruhan, mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kesehatan manusia, tetapi juga dapat menjadi penyebab penyakit jika tidak dikelola dengan baik. Dalam bab 5 ini akan dijabarkan apa saja peranan mikroorganisme terhadap bidang kesehatan dan lingkungan.

4.2 Peran Mikroorganisme dalam Dunia Kesehatan

4.2.1 Mikrobiologi sebagai Landasan Penting dalam Kedokteran

Mikrobiologi adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari mikroorganisme, yaitu organisme yang terlalu kecil untuk dilihat dengan mata telanjang, seperti bakteri, virus, jamur, dan protozoa. Mikrobiologi memiliki peran yang sangat penting dalam bidang kedokteran karena beberapa alasan berikut:

1. Diagnosis Penyakit

Mikrobiologi membantu dalam identifikasi agen penyebab infeksi. Dengan memahami karakteristik mikroorganisme, dokter dapat menentukan jenis patogen yang menyebabkan penyakit pada pasien. Ini dilakukan melalui berbagai teknik laboratorium, seperti kultur mikroba, tes sensitivitas antibiotik, dan metode deteksi molekuler. Identifikasi yang tepat memungkinkan pemberian pengobatan yang lebih akurat dan efektif.

2. Pengembangan Antibiotik dan Vaksin

Mikrobiologi berperan penting dalam pengembangan antibiotik dan vaksin. Pengetahuan tentang struktur, fungsi, dan mekanisme kerja mikroorganisme memungkinkan ilmuwan mengembangkan obat yang bisa menghambat atau membunuh patogen secara efektif tanpa merusak sel inang manusia. Selain itu, penelitian mikrobiologi juga membantu dalam pengembangan vaksin untuk

mencegah penyakit infeksi yang disebabkan oleh mikroorganisme.

3. Pemahaman tentang Resistensi Antibiotik

Mikrobiologi memberikan wawasan mengenai mekanisme resistensi antibiotik, fenomena dimana bakteri menjadi kebal terhadap obat-obatan yang sebelumnya efektif. Pemahaman ini sangat penting untuk mengembangkan strategi baru dalam menghadapi resistensi antibiotik, termasuk penggunaan kombinasi terapi, pengembangan antibiotik baru, dan kebijakan penggunaan antibiotik yang lebih bijaksana.

4. Kontrol dan Pencegahan Infeksi

Ilmu mikrobiologi berkontribusi pada pengendalian dan pencegahan penyebaran infeksi, baik di lingkungan rumah sakit maupun di masyarakat umum. Ini mencakup praktik sterilisasi, disinfeksi, dan sanitasi yang efektif. Mikrobiologi juga membantu dalam pengembangan metode deteksi dini untuk wabah penyakit menular, yang memungkinkan respons cepat dan pencegahan penyebaran lebih lanjut.

5. Studi Mikrobioma Manusia

Studi tentang mikrobioma manusia, yaitu kumpulan mikroorganisme yang hidup di dalam dan pada tubuh manusia, telah membuka wawasan baru tentang kesehatan dan penyakit. Mikrobiologi membantu memahami peran mikrobioma dalam berbagai aspek kesehatan manusia, termasuk sistem pencernaan, kekebalan tubuh, dan bahkan kesehatan mental. Ketidakseimbangan mikrobioma dapat

dikaitkan dengan berbagai kondisi medis, dari gangguan pencernaan hingga penyakit autoimun.

6. Penelitian Dasar dan Pengembangan Teknologi Medis

Mikrobiologi juga berfungsi sebagai dasar untuk penelitian biomedis yang lebih luas, termasuk bioteknologi, genetika, dan imunologi. Pemahaman tentang mikroorganisme dan interaksi mereka dengan inang manusia membantu dalam pengembangan teknologi medis baru, seperti terapi gen, probiotik, dan terapi berbasis mikroba. Secara keseluruhan, mikrobiologi adalah fondasi penting dalam kedokteran yang tidak hanya membantu dalam diagnosis dan pengobatan penyakit infeksi tetapi juga dalam pengembangan berbagai pendekatan preventif dan terapeutik untuk meningkatkan kesehatan manusia.

4.2.2 Peran Mikrobiologi dalam Pengembangan Vaksin

Mikrobiologi memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan vaksin. Vaksin adalah salah satu cara paling efektif untuk mencegah penyakit infeksi dengan cara merangsang sistem kekebalan tubuh untuk mengenali dan melawan patogen. Berikut ini adalah beberapa cara mikrobiologi berperan dalam pengembangan vaksin:

1. Identifikasi Patogen Penyebab Penyakit

Sebelum vaksin dikembangkan, langkah pertama adalah mengidentifikasi mikroorganisme yang menyebabkan penyakit. Mikrobiologi memungkinkan para ilmuwan untuk mengisolasi dan mengidentifikasi bakteri, virus, atau patogen lainnya yang bertanggung jawab atas penyakit tertentu. Identifikasi ini sangat penting untuk menentukan target spesifik bagi vaksin.

2. Studi Struktur dan Fungsi Patogen

Mikrobiologi membantu dalam memahami struktur dan fungsi mikroorganisme, termasuk komponen seperti protein, enzim, dan asam nukleat yang penting untuk virulensi dan kemampuan patogen untuk menyebabkan penyakit. Dengan pengetahuan ini, ilmuwan dapat menentukan antigen spesifik (bagian dari patogen yang dikenali oleh sistem kekebalan tubuh) yang dapat digunakan untuk membuat vaksin.

3. Teknik Isolasi dan Kultur Mikroorganisme

Mikrobiologi menyediakan teknik dan metode untuk mengisolasi dan mengkultur patogen dalam kondisi laboratorium. Ini penting untuk memproduksi jumlah besar patogen yang diperlukan untuk penelitian dan pengembangan vaksin. Misalnya, untuk membuat vaksin polio yang dilemahkan, virus polio harus dikultur dalam sel hidup di laboratorium.

4. Pengembangan Vaksin Berbasis Antigen

Setelah antigen yang tepat diidentifikasi, mikrobiologi digunakan untuk menghasilkan antigen tersebut dalam jumlah besar. Misalnya, menggunakan teknologi rekombinan, gen yang mengkode antigen dapat dimasukkan ke dalam organisme lain, seperti bakteri atau ragi, untuk memproduksi antigen dalam jumlah besar. Ini adalah dasar dari banyak vaksin modern, seperti vaksin Hepatitis B dan beberapa vaksin COVID-19.

5. Studi Respons Imun

Mikrobiologi berperan dalam mempelajari bagaimana sistem kekebalan tubuh merespons patogen dan antigen tertentu. Pengetahuan ini membantu

ilmuwan merancang vaksin yang efektif, yaitu yang dapat merangsang respons imun yang kuat dan bertahan lama. Tes laboratorium dilakukan untuk memahami bagaimana antigen vaksin berinteraksi dengan sel imun dan untuk memastikan vaksin aman dan efektif sebelum uji klinis dilakukan pada manusia.

6. Pengembangan Vaksin Generasi Baru

Teknologi mikrobiologi terus berkembang, memungkinkan pengembangan jenis vaksin baru seperti vaksin DNA, vaksin mRNA (seperti yang digunakan dalam beberapa vaksin COVID-19), dan vaksin berbasis vektor virus. Pengetahuan mikrobiologi memungkinkan desain vaksin ini untuk lebih spesifik, aman, dan mudah diproduksi.

7. Pemantauan Keamanan dan Efikasi Vaksin

Setelah vaksin diluncurkan, mikrobiologi tetap penting untuk memantau efektivitas vaksin dalam populasi dan mendeteksi efek samping yang mungkin terjadi. Ini mencakup pemantauan munculnya strain patogen baru yang mungkin tidak dikenali oleh vaksin yang ada dan melakukan penyesuaian jika diperlukan, seperti yang terjadi pada vaksin influenza yang diperbarui secara rutin.

8. Pemahaman tentang Mikrobioma dan Vaksinasi

Mikrobiologi juga mengeksplorasi bagaimana mikrobioma (kumpulan mikroorganisme yang hidup di tubuh manusia) dapat mempengaruhi respons terhadap vaksin. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa komposisi mikrobioma usus dapat mempengaruhi bagaimana sistem kekebalan merespons vaksinasi,

memberikan wawasan untuk meningkatkan efektivitas vaksin melalui modulasi mikrobioma.

Secara keseluruhan, mikrobiologi merupakan dasar ilmiah yang krusial dalam seluruh proses pengembangan vaksin, dari tahap penelitian dasar hingga produksi dan pengujian, serta pemantauan pasca-pemasaran. Ini menunjukkan betapa pentingnya mikrobiologi untuk melindungi kesehatan manusia melalui pencegahan penyakit menular.

4.2.3 Pengendalian Penyebaran Penyakit Menular

Pengendalian penyebaran penyakit menular adalah salah satu aspek penting dalam kesehatan masyarakat. Penyakit menular dapat menyebar dengan cepat dan menyebabkan wabah jika tidak dikendalikan dengan baik. Mikrobiologi memainkan peran kunci dalam memahami mekanisme penyebaran penyakit dan dalam mengembangkan strategi untuk mencegah dan mengendalikannya. Berikut adalah beberapa strategi pengendalian penyebaran penyakit menular:

1. Imunisasi dan Vaksinasi

Salah satu cara paling efektif untuk mengendalikan penyebaran penyakit menular adalah melalui imunisasi. Vaksin melindungi individu dari infeksi dengan merangsang sistem kekebalan tubuh untuk mengenali dan melawan patogen spesifik. Program vaksinasi massal dapat secara signifikan mengurangi insiden penyakit menular, seperti polio, campak, dan influenza. Kekebalan kelompok juga dapat dicapai, di mana cukup banyak orang dalam populasi yang divaksinasi sehingga penyebaran penyakit di antara individu yang tidak divaksinasi menjadi sangat terbatas.

2. Isolasi dan Karantina

Isolasi adalah pemisahan individu yang sudah terinfeksi dari populasi yang sehat untuk mencegah penularan lebih lanjut. Karantina, di sisi lain, melibatkan pemisahan dan pembatasan pergerakan orang yang mungkin terpapar penyakit menular tetapi belum menunjukkan gejala. Strategi ini efektif untuk penyakit menular dengan masa inkubasi yang jelas dan dapat membantu memutus rantai penularan.

3. Penelusuran Kontak (*Contact Tracing*)

Penelusuran kontak adalah proses mengidentifikasi, menilai, dan mengelola orang yang telah melakukan kontak dengan individu yang terinfeksi. Dengan mengidentifikasi dan memantau kontak ini, petugas kesehatan dapat mengidentifikasi kasus baru lebih awal dan mencegah penyebaran lebih lanjut. Penelusuran kontak adalah strategi kunci dalam pengendalian wabah penyakit seperti COVID-19, Ebola, dan tuberkulosis.

4. Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)

Penggunaan APD, seperti masker, sarung tangan, dan pakaian pelindung, adalah langkah penting dalam mencegah penyebaran penyakit menular, terutama di kalangan petugas kesehatan. Alat pelindung diri membantu melindungi individu dari kontak langsung dengan patogen dan mengurangi risiko transmisi penyakit. Ini sangat penting dalam pengaturan klinis dan selama perawatan pasien dengan penyakit menular.

5. Kebersihan dan Sanitasi

Kebersihan tangan yang baik, penggunaan disinfektan, dan praktik sanitasi yang tepat adalah langkah-langkah penting dalam mencegah penyebaran penyakit menular. Mikroorganisme patogen dapat

menyebarkan melalui kontak langsung, permukaan yang terkontaminasi, air, dan makanan. Oleh karena itu, menjaga kebersihan lingkungan, menyediakan air bersih, dan memastikan keamanan pangan adalah langkah penting dalam pengendalian penyakit.

6. Edukasi dan Penyuluhan Kesehatan

Masyarakat perlu diberi informasi yang tepat tentang cara penyebaran penyakit dan langkah-langkah pencegahan yang dapat diambil. Edukasi kesehatan dapat mencakup pentingnya vaksinasi, praktik kebersihan yang baik, penggunaan APD, dan apa yang harus dilakukan jika seseorang sakit. Penyuluhan kesehatan yang efektif dapat mengubah perilaku masyarakat dan meningkatkan kepatuhan terhadap langkah-langkah pencegahan.

7. Surveilans Penyakit

Surveilans adalah pemantauan berkelanjutan terhadap kejadian penyakit menular untuk mendeteksi dan merespons wabah dengan cepat. Sistem surveilans yang efektif memungkinkan deteksi dini wabah, penilaian risiko, dan implementasi respons yang cepat dan tepat. Data surveilans membantu dalam perencanaan kebijakan kesehatan masyarakat dan alokasi sumber daya.

8. Pengembangan dan Penggunaan Terapi Antimikroba

Penggunaan antibiotik, antivirus, dan antimikotik yang tepat adalah langkah penting dalam pengobatan penyakit menular. Pengembangan terapi antimikroba baru sangat penting dalam menghadapi ancaman resistensi antimikroba, di mana mikroorganisme menjadi kebal terhadap obat-obatan yang ada. Mengontrol penggunaan obat ini dengan bijak melalui

kebijakan pengelolaan antimikroba membantu mencegah perkembangan resistensi.

9. Pembatasan Perjalanan dan Pergerakan Populasi

Selama wabah penyakit menular meluas, pembatasan perjalanan dapat diterapkan untuk mencegah penyebaran penyakit antar wilayah. Pembatasan ini termasuk penutupan perbatasan, pembatalan penerbangan, atau pembatasan pergerakan antar daerah. Langkah-langkah ini harus diimbangi dengan pertimbangan sosial-ekonomi dan dampak pada masyarakat.

10. Penelitian dan Pengembangan Ilmiah

Penelitian mikrobiologi dasar dan terapan diperlukan untuk memahami mekanisme penyakit, mengidentifikasi patogen baru, dan mengembangkan vaksin serta terapi baru. Inovasi dalam teknologi diagnostik juga memungkinkan deteksi yang lebih cepat dan akurat terhadap patogen penyebab penyakit menular.

Pengendalian penyebaran penyakit menular memerlukan pendekatan yang komprehensif dan terkoordinasi, melibatkan berbagai strategi yang saling melengkapi. Kolaborasi antara pemerintah, lembaga kesehatan, komunitas ilmiah, dan masyarakat sangat penting untuk mencapai keberhasilan dalam mengendalikan penyebaran penyakit menular.

4.2.4 Pengembangan Antibiotik dan Pengobatan Antiinfeksi

Mikrobiologi memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan antibiotik dan pengobatan antiinfeksi. Antibiotik adalah senyawa yang digunakan untuk membunuh atau menghambat pertumbuhan bakteri,

sedangkan pengobatan antiinfeksi mencakup agen yang digunakan untuk melawan berbagai jenis patogen, termasuk bakteri, virus, jamur, dan parasit. Berikut ini adalah cara-cara mikrobiologi berkontribusi dalam pengembangan antibiotik dan pengobatan antiinfeksi:

1. Identifikasi dan Isolasi Mikroorganisme Penghasil Antibiotik

Penelitian mikrobiologi memungkinkan identifikasi mikroorganisme yang secara alami menghasilkan senyawa antibiotik. Banyak antibiotik pertama kali ditemukan melalui isolasi dari mikroorganisme di lingkungan, seperti bakteri *Streptomyces* yang menghasilkan streptomisin dan *Penicillium* yang menghasilkan penisilin. Mikrobiolog mengisolasi mikroorganisme ini dari tanah, air, atau sumber lain dan meneliti potensinya sebagai sumber antibiotik baru.

2. Pemahaman tentang Mekanisme Aksi Antibiotik

Mikrobiologi membantu menjelaskan bagaimana antibiotik bekerja untuk membunuh atau menghambat pertumbuhan bakteri. Misalnya, penisilin mengganggu sintesis dinding sel bakteri, sedangkan tetrasiklin menghambat sintesis protein. Pengetahuan ini penting untuk memahami bagaimana antibiotik mempengaruhi bakteri dan bagaimana resistensi terhadap antibiotik dapat berkembang. Dengan memahami mekanisme aksi, ilmuwan dapat merancang antibiotik baru yang lebih efektif dan dengan target yang lebih spesifik.

3. Studi Resistensi Antibiotik

Mikrobiologi sangat penting dalam mempelajari bagaimana bakteri menjadi resisten terhadap antibiotik. Melalui studi laboratorium, mikrobiolog dapat

mengidentifikasi mekanisme resistensi, seperti produksi enzim yang menghancurkan antibiotik (misalnya, beta-laktamase), perubahan target molekuler antibiotik, atau mekanisme pompa keluar (efflux pumps). Pengetahuan ini penting untuk mengembangkan strategi mengatasi resistensi, termasuk pengembangan antibiotik baru yang dapat mengatasi mekanisme resistensi yang ada.

4. Penapisan dan Pengujian Antibiotik Baru

Proses pengembangan antibiotik melibatkan penapisan ribuan senyawa untuk menemukan kandidat yang efektif. Mikrobiologi menyediakan teknik untuk menguji aktivitas antimikroba senyawa terhadap berbagai bakteri patogen. Tes ini mencakup pengujian laboratorium menggunakan kultur bakteri untuk mengevaluasi efektivitas senyawa dalam menghambat pertumbuhan bakteri atau membunuhnya. Senyawa yang menunjukkan aktivitas antimikroba yang kuat kemudian diujikan lebih lanjut dalam uji praklinis dan klinis.

5. Rekayasa Genetika dan Produksi Antibiotik

Mikrobiologi modern memanfaatkan teknologi rekayasa genetika untuk meningkatkan produksi antibiotik. Mikroorganisme penghasil antibiotik dapat dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan produksi senyawa antibiotik tertentu atau untuk menghasilkan antibiotik yang lebih efektif. Selain itu, rekayasa genetika dapat digunakan untuk membuat analog dari antibiotik yang ada dengan memperbaiki struktur molekulnya untuk mengatasi resistensi atau meningkatkan spektrum aktivitas.

6. Pengembangan Agen Antiinfeksi Lainnya

Selain antibiotik, mikrobiologi juga berperan dalam pengembangan agen antiinfeksi lain, seperti antijamur, antivirus, dan antiparasit. Studi tentang biologi dasar patogen non-bakteri memungkinkan identifikasi target molekuler untuk pengobatan. Misalnya, penelitian mikrobiologi telah mengarah pada pengembangan obat antivirus seperti protease inhibitor untuk HIV dan remdesivir untuk pengobatan COVID-19.

7. Mikrobioma dan Terapi Berbasis Mikroba

Mikrobiologi juga membuka jalan untuk pengembangan terapi baru berdasarkan mikrobioma, yaitu kumpulan mikroorganisme yang hidup di tubuh manusia. Misalnya, transplantasi mikrobiota tinja digunakan untuk mengobati infeksi *Clostridium difficile* yang resisten terhadap antibiotik. Penelitian tentang mikrobioma juga mengarah pada pengembangan probiotik dan prebiotik sebagai alternatif atau tambahan untuk terapi antibiotik tradisional.

8. Pemantauan dan Diagnostik Infeksi

Teknik mikrobiologi digunakan untuk mendiagnosis infeksi dan menentukan sensitivitas bakteri terhadap antibiotik. Uji kultur, uji sensitivitas antibiotik, dan metode molekuler seperti PCR (*polymerase chain reaction*) adalah alat penting dalam menentukan pengobatan yang tepat untuk infeksi bakteri. Diagnostik yang cepat dan akurat memungkinkan pemberian terapi yang tepat, mengurangi penggunaan antibiotik yang tidak perlu, dan membantu mencegah perkembangan resistensi antibiotik.

9. Penelitian pada *Host-Pathogen Interaction*

Memahami interaksi antara patogen dan inangnya penting untuk mengembangkan terapi yang lebih efektif. Mikrobiologi mempelajari bagaimana patogen menginfeksi inang, mekanisme pertahanan inang, dan cara patogen menghindari respons imun. Penelitian ini membantu dalam mengidentifikasi target baru untuk pengembangan obat yang dapat mengganggu proses infeksi atau memperkuat pertahanan alami tubuh.

10. Pengembangan Terapi Kombinasi

Mikrobiologi membantu dalam pengembangan terapi kombinasi, di mana beberapa antibiotik atau agen antiinfeksi digunakan bersama untuk meningkatkan efektivitas pengobatan dan mengurangi kemungkinan resistensi. Kombinasi obat dapat mengeksploitasi mekanisme aksi yang berbeda, sehingga mempersulit bakteri untuk mengembangkan resistensi terhadap pengobatan.

Secara keseluruhan, mikrobiologi adalah fondasi penting dalam penelitian dan pengembangan antibiotik serta pengobatan antiinfeksi. Dengan pemahaman yang mendalam tentang mikroorganisme dan mekanisme infeksi, mikrobiologi menyediakan alat dan pengetahuan yang diperlukan untuk melawan penyakit infeksi secara lebih efektif dan berkelanjutan.

4.2.5 Kemajuan dalam Pengobatan Kanker

Mikroorganisme memainkan peran yang sangat penting dalam kemajuan pengobatan kanker melalui berbagai pendekatan ilmiah dan medis. Meski terdengar kontradiktif karena mikroorganisme sering diasosiasikan

dengan penyakit, penelitian menunjukkan bahwa mikroba, baik yang hidup secara alami di tubuh manusia maupun yang direkayasa, dapat digunakan untuk mendeteksi, mengobati, dan bahkan mencegah kanker. Berikut ini beberapa cara mikroorganisme berperan dalam kemajuan pengobatan kanker:

1. Penggunaan Bakteri dalam Terapi Kanker

Bakteri telah digunakan sebagai agen untuk menyerang tumor secara langsung. Beberapa jenis bakteri memiliki kemampuan untuk tumbuh di lingkungan tumor karena kondisi yang sesuai seperti kekurangan oksigen (hipoksia), sehingga membuat mereka menjadi kandidat ideal untuk terapi kanker. Misalnya:

- Bakteri *Clostridium* dan *Bifidobacterium*: Beberapa strain bakteri anaerob ini memiliki kemampuan untuk berkembang biak di dalam jaringan tumor yang kekurangan oksigen. Penelitian telah menunjukkan bahwa bakteri ini dapat dimodifikasi untuk membawa agen terapi seperti toksin yang dapat menghancurkan sel kanker atau untuk merangsang respons imun terhadap tumor.
- *Salmonella* yang Dilemahkan: *Salmonella* yang telah dilemahkan secara genetik juga sedang diteliti sebagai vektor untuk menghantarkan obat atau agen imunostimulan langsung ke sel tumor.

2. Imunoterapi Berbasis Mikroorganisme

Mikroorganisme digunakan dalam imunoterapi untuk merangsang sistem kekebalan tubuh melawan kanker. Terapi ini berfokus pada penggunaan mikroba

atau komponen mikroba untuk mengaktifkan respons imun yang lebih kuat terhadap sel kanker. Beberapa pendekatan yang melibatkan mikroorganisme dalam imunoterapi kanker antara lain:

- **Bacillus Calmette-Guerin (BCG):** BCG adalah bentuk bakteri hidup yang dilemahkan dan digunakan sebagai terapi untuk kanker kandung kemih. BCG disuntikkan ke dalam kandung kemih, dimana ia merangsang sistem kekebalan untuk menyerang sel kanker. Ini adalah salah satu contoh pertama penggunaan mikroorganisme dalam pengobatan kanker.
- **Vaksin Berbasis Bakteri dan Virus:** Mikroorganisme juga digunakan sebagai vektor untuk mengembangkan vaksin kanker. Virus onkolitik, misalnya, adalah virus yang dapat menginfeksi dan menghancurkan sel kanker. Vaksin berbasis mikroba dapat menargetkan antigen spesifik yang terkait dengan tumor, sehingga sistem kekebalan tubuh dapat mengenali dan melawan sel kanker.

3. Virus Onkolitik

Virus onkolitik adalah virus yang secara selektif menginfeksi dan menghancurkan sel kanker tanpa merusak sel sehat. Setelah virus menginfeksi sel kanker, virus tersebut memperbanyak diri dan menyebabkan lisis (penghancuran) sel kanker, sekaligus memicu respons imun terhadap tumor. Contoh dari virus onkolitik adalah:

- **Talimogene Laherparepvec (T-VEC):** Ini adalah virus herpes simpleks yang telah direkayasa untuk menyerang sel kanker. T-VEC digunakan dalam pengobatan melanoma, jenis kanker kulit yang

agresif. Setelah virus ini menginfeksi sel kanker, virus menyebabkan sel-sel ini mati, sambil merangsang respons imun tubuh terhadap kanker.

- Virus Adeno dan Poxvirus: Virus-virus ini juga sedang dikembangkan untuk terapi kanker. Mereka dimodifikasi agar lebih selektif dalam menyerang sel kanker dan memicu respons imun terhadap tumor.

4. Mikrobioma dan Kanker

Studi tentang mikrobioma, kumpulan mikroorganisme yang hidup di dalam tubuh manusia, telah menunjukkan bahwa komposisi mikrobioma dapat mempengaruhi respons terhadap pengobatan kanker, seperti imunoterapi. Mikroorganisme di dalam usus berperan dalam mengatur sistem kekebalan tubuh, dan perubahan dalam mikrobioma dapat memengaruhi efikasi terapi kanker.

Pengaruh mikrobioma usus terhadap imunoterapi: Penelitian menunjukkan bahwa pasien kanker dengan mikrobioma usus yang sehat dan beragam memiliki respons yang lebih baik terhadap imunoterapi berbasis checkpoint inhibitor, yang digunakan dalam pengobatan kanker seperti melanoma dan kanker paru-paru.

Modulasi Mikrobioma untuk Meningkatkan Respons Terapi: Penelitian sedang dikembangkan untuk mengubah mikrobioma usus dengan probiotik, prebiotik, atau transplantasi mikrobiota tinja (FMT) agar dapat meningkatkan efektivitas terapi kanker.

5. Produksi Senyawa Antikanker dari Mikroorganisme

Mikroorganisme juga merupakan sumber alami dari berbagai senyawa yang memiliki aktivitas antikanker. Banyak antibiotik dan senyawa alami yang berasal dari mikroba telah digunakan dalam pengobatan kanker, misalnya:

- Doxorubicin: Antibiotik antrasiklin ini, yang dihasilkan oleh bakteri *Streptomyces*, digunakan sebagai obat kemoterapi yang efektif untuk berbagai jenis kanker, seperti leukemia, limfoma, dan kanker payudara.
- Bleomycin: Obat ini, yang juga dihasilkan oleh bakteri *Streptomyces*, digunakan dalam pengobatan kanker seperti limfoma Hodgkin dan kanker testis. Senyawa ini bekerja dengan merusak DNA sel kanker.

6. Vaksin Pencegahan Kanker

Beberapa jenis kanker disebabkan oleh infeksi virus, dan mikrobiologi memainkan peran penting dalam pengembangan vaksin untuk mencegah infeksi ini, yang secara langsung dapat mengurangi risiko kanker:

- Vaksin HPV (Human Papillomavirus): HPV adalah penyebab utama kanker serviks, dan vaksin HPV telah dikembangkan untuk melindungi terhadap jenis virus yang paling berisiko menyebabkan kanker.
- Vaksin Hepatitis B: Hepatitis B dapat menyebabkan kanker hati (hepatocellular carcinoma). Vaksin hepatitis B, yang dikembangkan dengan bantuan

mikrobiologi, secara signifikan mengurangi risiko berkembangnya kanker hati.

7. Mikrobiologi Sintetik dan Terapi Rekayasa Genetika

Kemajuan dalam mikrobiologi sintetik memungkinkan para ilmuwan merekayasa mikroorganisme untuk tujuan spesifik dalam pengobatan kanker. Mikroba dapat dimodifikasi untuk menghasilkan obat antikanker secara tepat waktu atau untuk mengirimkan terapi langsung ke lokasi tumor. Misalnya, bakteri yang direkayasa secara genetika dapat menghantarkan gen atau protein antikanker ke sel-sel tumor dengan tingkat spesifisitas tinggi, meminimalkan efek samping pada jaringan sehat.

Secara keseluruhan, mikroorganisme telah membuka berbagai kemungkinan baru dalam pengobatan kanker melalui terapi inovatif, pemahaman lebih dalam tentang imunologi kanker, dan pengembangan senyawa antikanker. Penelitian mikrobiologi yang terus berkembang berpotensi untuk menciptakan terapi yang lebih efektif, personal, dan aman bagi pasien kanker.

4.2.6 Studi Mikrobiom Manusia

Studi tentang mikrobiom manusia telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir dan memberikan wawasan yang mendalam tentang hubungan antara mikroorganisme yang hidup di tubuh manusia dengan kesehatan dan penyakit. Mikrobiom manusia terdiri dari miliaran mikroorganisme, termasuk bakteri, virus, jamur, dan parasit, yang hidup di berbagai bagian tubuh, seperti usus, kulit, mulut, dan saluran pernapasan. Mikroorganisme

ini memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan kesehatan, serta dalam berbagai fungsi biologis tubuh.

Berikut adalah beberapa peran penting mikroorganisme dalam studi mikrobiom manusia:

1. Mikrobiom Usus dan Kesehatan Pencernaan

Mikrobiom usus adalah salah satu area yang paling banyak dipelajari dalam mikrobiom manusia. Mikroorganisme yang ada di usus, terutama bakteri, berperan dalam proses pencernaan, penyerapan nutrisi, dan pembentukan vitamin, seperti vitamin K dan beberapa vitamin B. Mikrobiota usus juga berperan dalam:

- Fermentasi serat makanan menjadi asam lemak rantai pendek (SCFA), seperti butirat, yang penting untuk kesehatan usus dan fungsi kekebalan.
- Melindungi usus dari patogen dengan mengisi ruang di permukaan mukosa, sehingga mencegah kolonisasi oleh mikroorganisme patogen.
- Regulasi motilitas usus, yang mempengaruhi laju pencernaan makanan dan pengosongan lambung.

Ketidakseimbangan mikrobiota usus, yang disebut disbiosis, dapat menyebabkan gangguan kesehatan pencernaan, seperti sindrom iritasi usus besar (IBS), penyakit radang usus (IBD), dan intoleransi laktosa.

2. Peran Mikrobiom dalam Sistem Kekebalan Tubuh

Mikrobiom manusia memainkan peran penting dalam mengatur sistem kekebalan tubuh. Mikroorganisme yang hidup di usus, kulit, dan selaput lendir lainnya berinteraksi dengan sel kekebalan tubuh

untuk menjaga keseimbangan antara respons kekebalan dan toleransi terhadap mikroba komensal (yang hidup di tubuh tanpa menyebabkan penyakit). Beberapa peran penting mikroorganisme dalam sistem kekebalan tubuh meliputi:

- Mempromosikan perkembangan sistem kekebalan pada bayi baru lahir. Paparan mikroorganisme sejak lahir membantu tubuh membangun toleransi dan respon imun yang efektif.
- Mengatur respons inflamasi dengan menginduksi pelepasan molekul sinyal, seperti sitokin, yang memodulasi aktivitas sel kekebalan tubuh.
- Melawan patogen dengan meningkatkan produksi sel kekebalan seperti limfosit T dan meningkatkan pengenalan antigen asing.

Keseimbangan mikrobiota yang sehat mendukung kekebalan tubuh, sementara disbiosis dapat berkontribusi pada gangguan autoimun, alergi, dan infeksi kronis.

3. Mikrobiom dan Kesehatan Metabolik

Mikrobiom manusia juga terlibat dalam regulasi metabolisme tubuh. Mikrobiota usus berperan dalam metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein, serta mempengaruhi pengaturan berat badan dan risiko obesitas. Beberapa studi menunjukkan bahwa mikrobiota tertentu dapat mempengaruhi:

- Efisiensi penyimpanan energi: Beberapa bakteri membantu tubuh mengekstrak lebih banyak kalori dari makanan.
- Peradangan tingkat rendah: Disbiosis dapat menyebabkan pelepasan molekul inflamasi, yang

berkontribusi pada resistensi insulin dan penyakit metabolik seperti diabetes tipe 2.

- Metabolisme lemak: Mikrobiota yang sehat membantu mengatur kadar lemak dalam tubuh dengan memecah asam lemak rantai pendek yang memiliki efek anti-inflamasi.

Penelitian juga menemukan bahwa mikrobiota usus berhubungan dengan berbagai penyakit metabolik, termasuk diabetes tipe 2, obesitas, dan penyakit hati berlemak non-alkoholik (NAFLD).

4. Mikrobiom dan Kesehatan Mental: Sumbu Gut-Brain

Ada hubungan yang erat antara mikrobiom usus dan otak, yang disebut gut-brain axis (sumbu usus-otak). Mikroorganisme dalam usus memproduksi neurotransmitter, seperti serotonin dan gamma-aminobutyric acid (GABA), yang memengaruhi suasana hati dan fungsi kognitif. Mikrobiota juga berperan dalam:

- Pengaturan mood: Beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan mikrobiota dapat berkontribusi pada gangguan mental seperti depresi, kecemasan, dan autisme.
- Respon stres: Mikrobiota dapat mempengaruhi produksi hormon stres, seperti kortisol, dan memodulasi respons stres tubuh.
- Neuroinflamasi: Mikroorganisme usus dapat memicu atau mengurangi peradangan di sistem saraf pusat, yang berhubungan dengan gangguan neurologis seperti penyakit Alzheimer dan Parkinson.

Penelitian pada sumbu usus-otak membuka peluang baru untuk pengobatan gangguan mental melalui pendekatan berbasis mikrobiota, termasuk probiotik dan transplantasi mikrobiota tinja.

5. Mikrobiom Kulit dan Pertahanan Fisik

Mikrobiota kulit berfungsi sebagai lapisan pertahanan pertama tubuh terhadap infeksi dan penyakit. Mikroorganisme ini bekerja dengan melindungi kulit dari patogen eksternal dan menjaga keseimbangan mikroflora alami. Mikrobiom kulit juga terlibat dalam:

- Produksi molekul antimikroba yang melawan patogen berbahaya.
- Menjaga keseimbangan pH dan kelembapan kulit, yang membantu menghindari infeksi kulit seperti dermatitis, jerawat, dan psoriasis.
- Pemulihan luka: Beberapa mikroorganisme membantu dalam proses penyembuhan luka dengan mengurangi risiko infeksi dan mempercepat regenerasi jaringan.

6. Penggunaan Terapeutik Mikrobiom (Transplantasi Mikrobiota Tinja)

Transplantasi mikrobiota tinja (FMT) adalah prosedur medis di mana mikrobiota sehat dari tinja donor ditransplantasikan ke saluran pencernaan pasien untuk mengobati disbiosis yang parah, seperti infeksi *Clostridium difficile*. Ini telah menunjukkan efektivitas luar biasa dalam memulihkan keseimbangan mikrobiota usus dan mengobati berbagai penyakit gastrointestinal yang resisten terhadap terapi konvensional.

7. Peran Mikrobiom dalam Penyakit Kanker

Mikrobiom juga dapat berperan dalam perkembangan dan pengobatan kanker. Beberapa mikroorganisme diketahui dapat menyebabkan kanker dengan memicu peradangan kronis atau merusak DNA sel, seperti *Helicobacter pylori* yang berhubungan dengan kanker lambung, atau virus seperti Human Papillomavirus (HPV) yang terkait dengan kanker serviks. Sebaliknya, mikrobiota usus yang sehat dapat mendukung respons positif terhadap pengobatan kanker, seperti imunoterapi.

8. Mikrobiom dan Respon Terhadap Obat

Mikrobiota mempengaruhi metabolisme obat di dalam tubuh. Beberapa mikroorganisme dapat mengaktifkan atau menonaktifkan obat, memodulasi efek terapeutik dan toksisitasnya. Contohnya, kemoterapi dan imunoterapi kanker seringkali lebih efektif pada pasien dengan komposisi mikrobiota usus yang sehat. Studi lebih lanjut tentang interaksi antara mikrobiota dan obat dapat membantu dalam personalisasi pengobatan dan memaksimalkan efektivitas terapi.

9. Mikrobiom dan Alergi

Ketidakseimbangan mikrobiota usus atau kulit, terutama pada usia dini, dapat meningkatkan risiko berkembangnya alergi dan penyakit atopik, seperti asma, eksim, dan rinitis alergi. Penelitian menunjukkan bahwa eksposur mikroorganisme yang sehat pada bayi dapat mengurangi kemungkinan munculnya alergi melalui pematangan sistem kekebalan tubuh yang lebih baik.

Mikroorganisme dalam mikrobiom manusia memainkan peran fundamental dalam banyak aspek kesehatan, termasuk pencernaan, kekebalan, metabolisme, kesehatan mental, dan pengobatan penyakit. Penelitian tentang mikrobiom manusia telah membuka peluang baru dalam diagnosis, pengobatan, dan pencegahan berbagai kondisi medis, dan terus menjadi bidang yang berkembang pesat dengan potensi besar untuk memajukan pengobatan berbasis mikrobiota, termasuk probiotik, prebiotik, dan terapi mikrobiom lainnya.

4.2.7 Mendukung Kesehatan Masa Depan

Mikroorganisme memainkan peran yang sangat penting dalam berbagai aspek kesehatan manusia, dan di masa depan, pemahaman serta penggunaan mikroorganisme akan semakin berkembang untuk mendukung kesehatan dengan lebih inovatif dan personal. Berikut adalah beberapa peran utama mikroorganisme yang dapat mendukung kesehatan di masa depan:

1. Terapi Berbasis Mikrobioma

Mikrobioma manusia, yang terdiri dari miliaran mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan virus, sangat penting dalam menjaga keseimbangan kesehatan. Di masa depan, terapi berbasis mikrobioma dapat menjadi bagian integral dari perawatan kesehatan untuk:

- Pemulihan dari disbiosis: Dengan lebih memahami bagaimana ketidakseimbangan mikrobiota (disbiosis) menyebabkan penyakit, terapi seperti transplantasi mikrobiota tinja (FMT) dan

penggunaan probiotik yang dipersonalisasi dapat lebih efektif dalam mengatasi gangguan pencernaan, penyakit autoimun, dan masalah metabolik.

- Pengobatan penyakit kronis: Penelitian menunjukkan bahwa mikrobiota usus berhubungan dengan berbagai penyakit kronis, seperti diabetes, obesitas, dan bahkan gangguan kesehatan mental. Di masa depan, modifikasi mikrobiota mungkin menjadi terapi utama dalam mengatasi kondisi ini, dengan probiotik, prebiotik, atau terapi berbasis mikrobiota yang dapat mengembalikan keseimbangan mikrobiota usus.

2. Mikroorganisme sebagai Agen Terapeutik

Mikroorganisme rekayasa genetik dapat digunakan sebagai agen terapeutik dalam berbagai penyakit:

- Bakteri onkolitik: Mikroba yang dimodifikasi secara genetik akan digunakan untuk menyerang tumor secara langsung, seperti bakteri anaerob yang mampu tumbuh di lingkungan tumor yang kekurangan oksigen. Ini memungkinkan terapi kanker yang lebih spesifik dan dengan efek samping yang lebih sedikit dibandingkan dengan terapi konvensional.
- Mikroorganisme sebagai pembawa obat: Mikroorganisme yang direkayasa genetik dapat dirancang untuk menghantarkan obat atau agen imunoterapi langsung ke jaringan yang memerlukan, seperti tumor atau area yang terinfeksi, yang akan meningkatkan efisiensi pengobatan dan mengurangi efek samping.

3. Probiotik dan Prebiotik yang Dipersonalisasi

Di masa depan, kita dapat melihat perkembangan probiotik dan prebiotik yang lebih dipersonalisasi berdasarkan komposisi mikrobioma individu. Pendekatan ini akan memanfaatkan informasi genetik dan mikrobiomik untuk menciptakan probiotik yang dirancang khusus untuk mendukung kesehatan mikrobiota individu, meningkatkan kesehatan pencernaan, metabolisme, dan kekebalan tubuh.

4. Pencegahan Penyakit Melalui Modifikasi Mikrobiom

Teknologi baru akan memungkinkan kita untuk memodifikasi mikrobiota sejak dini guna mencegah perkembangan penyakit di masa depan. Misalnya, pada bayi yang lahir dengan risiko penyakit tertentu, seperti alergi atau diabetes tipe 1, intervensi mikrobiota dapat membantu mencegah perkembangan penyakit tersebut.

Penggunaan mikroba untuk mengurangi risiko alergi seperti eksposur mikroorganisme yang baik di awal kehidupan dapat membantu memperkuat sistem kekebalan tubuh dan mengurangi risiko alergi atau penyakit atopik. Modifikasi mikrobiota untuk pencegahan penyakit metabolik dengan memodifikasi mikrobiota usus, maka potensi berkembangnya obesitas dan diabetes tipe 2 bisa dikurangi di masa depan.

5. Imunoterapi Berbasis Mikrobiom

Mikrobiom memainkan peran penting dalam mengatur respons kekebalan tubuh, dan di masa depan, imunoterapi yang berbasis mikrobiom dapat lebih dikembangkan. Hal ini termasuk:

- Imunoterapi kanker yang lebih efektif: Penelitian menunjukkan bahwa mikrobiota usus yang sehat dapat meningkatkan efektivitas imunoterapi kanker. Di masa depan, terapi berbasis mikrobiota yang dirancang untuk memperkuat respons kekebalan tubuh dapat meningkatkan hasil pengobatan kanker.
- Vaksin mikroba yang dipersonalisasi: Pengembangan vaksin yang memanfaatkan mikrobiom individu dapat menghasilkan respons imun yang lebih kuat dan efektif.

6. Peningkatan Pengobatan Infeksi Antibiotik-Resisten

Resistensi antibiotik adalah salah satu ancaman kesehatan global terbesar. Mikroorganisme dapat mendukung pengobatan masa depan dengan:

- Pengembangan agen antimikroba baru: Mikroorganisme yang ditemukan di lingkungan ekstrem atau mikroorganisme laut mungkin menyediakan sumber antibiotik baru yang efektif melawan bakteri resisten.
- Terapi bakteriofag: Bakteriofag adalah virus yang dapat menyerang bakteri spesifik. Di masa depan, terapi ini dapat menjadi alternatif utama untuk mengatasi infeksi yang kebal antibiotik dengan spesifisitas tinggi dan tanpa mengganggu mikrobiota tubuh yang sehat.

7. Deteksi dan Diagnostik Penyakit Berbasis Mikrobiom

Teknologi sekuensing genetik dan metagenomik memungkinkan identifikasi cepat dari mikrobiota yang berhubungan dengan penyakit. Di masa depan, tes

diagnostik berbasis mikrobiom yang canggih dapat digunakan untuk:

- Deteksi dini penyakit: Analisis komposisi mikrobiota tubuh dapat digunakan sebagai alat untuk mendeteksi tanda-tanda awal penyakit, seperti kanker usus besar, penyakit kardiovaskular, atau bahkan gangguan mental.
- Pemantauan kesehatan: Tes mikrobiom reguler dapat memberikan gambaran menyeluruh tentang status kesehatan individu dan risiko penyakit di masa depan, sehingga memungkinkan intervensi dini.

8. Mikrobiom dan Nutrisi Fungsional

Nutrisi fungsional berbasis mikrobiom akan menjadi tren di masa depan. Pola makan yang dirancang khusus untuk memperbaiki atau memelihara kesehatan mikrobiota usus dapat menjadi alat penting dalam menjaga kesehatan jangka panjang:

- Nutrisi yang mendukung mikrobiom sehat: Makanan yang kaya serat prebiotik dan senyawa bioaktif lainnya dapat meningkatkan populasi mikrobiota yang menguntungkan di usus.
- Pendekatan nutrisi individual: Berdasarkan komposisi mikrobiota individu, rekomendasi diet dapat disesuaikan untuk mendukung kesehatan metabolik, kekebalan, dan bahkan kognitif.

9. Teknologi Mikrobiologi Sintetik

Mikrobiologi sintetik adalah bidang baru yang memanfaatkan rekayasa genetika untuk menciptakan mikroorganisme dengan sifat yang diinginkan. Di masa

depan, mikroorganisme rekayasa dapat digunakan untuk:

- Menghasilkan senyawa obat baru: Mikroba dapat direkayasa untuk memproduksi obat atau zat terapeutik yang sebelumnya sulit diperoleh melalui metode tradisional.
- Produksi vaksin yang lebih efisien: Mikroorganisme rekayasa dapat digunakan untuk memproduksi vaksin dengan efisiensi yang lebih tinggi dan dengan biaya yang lebih rendah.

10. Terapi Mikroba untuk Kesehatan Mental

Studi mengenai sumbu usus-otak menunjukkan hubungan antara mikrobiota usus dan kesehatan mental. Di masa depan, terapi mikrobiom dapat digunakan untuk mengobati gangguan mental, seperti depresi, kecemasan, dan gangguan spektrum autisme. Mikroorganisme yang memproduksi neurotransmiter seperti serotonin dan GABA dapat membantu menjaga keseimbangan emosional dan fungsi kognitif yang sehat.

11. Pengendalian Penyakit Menular dengan Mikrobiom

Mikrobiota alami tubuh memiliki kemampuan untuk melindungi dari patogen eksternal. Di masa depan, manipulasi mikrobiom untuk meningkatkan resistensi alami tubuh terhadap infeksi dapat membantu mengurangi penyebaran penyakit menular:

- Penggunaan mikroorganisme sebagai agen protektif: Probiotik yang dirancang khusus untuk memperkuat pertahanan alami tubuh dapat membantu melawan infeksi virus, bakteri, atau parasit.

- Mikrobiom sebagai penghalang infeksi: Mikrobiota kulit, saluran pencernaan, atau saluran pernapasan dapat dimodifikasi untuk menjadi lebih efektif dalam mencegah kolonisasi patogen.

4.3 Peran Mikroorganisme dalam Lingkungan

Adanya keprihatinan yang besar di antara masyarakat akan kualitas lingkungan telah membantu dicurahkan minat yang kian besar untuk mempelajari ekologi mikroba. Sebagai contoh mikroorganisme memegang peranan yang menentukan dalam menguraikan sampah yang berasal dari manusia dan industri yang dibuang ke dalam air dan tanah. Mereka mampu melaksanakan daur ulang terhadap banyak macam bahan. Kualitas dan produktivitas perairan alamiah saling berkaitan, terutama dengan populasi mikrobanya. Udara bersih serta bebas debu mengandung sedikit mikroorganisme. Dengan demikian nyatalah bahwa penilaian terhadap kualitas lingkungan mempunyai kaitan yang rumit dengan flora mikroba yang ada (Pelezar dan Chan, 2005).

Mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam lingkungan, berkontribusi terhadap berbagai proses ekologi yang mendukung kehidupan di Bumi. Berikut adalah beberapa peran utama mikroorganisme dalam lingkungan terutama dalam pengolahan limbah (bioremediasi):

4.3.1 Penggunaan Bakteri untuk Mengatasi Limbah Minyak Bumi

Penggunaan bakteri untuk mengatasi limbah minyak bumi dikenal sebagai bioremediasi. Ini adalah proses biologis di mana mikroorganisme, khususnya bakteri,

digunakan untuk menguraikan, menghilangkan, atau menetralkan polutan berbahaya, termasuk minyak bumi. Bakteri ini mampu memetabolisme senyawa hidrokarbon yang terdapat dalam minyak bumi, mengubahnya menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya, seperti air, karbon dioksida, dan biomassa.

1. Mekanisme Kerja Bakteri dalam Bioremediasi Minyak Bumi

Bakteri yang digunakan dalam bioremediasi minyak bumi dapat bekerja melalui mekanisme berikut:

a. Penguraian Hidrokarbon

Bakteri pemecah hidrokarbon, seperti *Pseudomonas*, *Alcanivorax*, dan *Rhodococcus*, mampu menggunakan senyawa hidrokarbon dalam minyak bumi sebagai sumber energi dan karbon. Mereka menghasilkan enzim khusus yang dapat memecah rantai hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih sederhana.

b. Aerobik dan Anaerobik

Bakteri pemecah minyak bumi dapat bekerja dalam kondisi aerobik (dengan oksigen) dan anaerobik (tanpa oksigen). Dalam kondisi aerobik, bakteri memanfaatkan oksigen untuk mengoksidasi hidrokarbon menjadi air dan karbon dioksida. Dalam kondisi anaerobik, bakteri memanfaatkan senyawa lain, seperti nitrat atau sulfat, sebagai akseptor elektron untuk menguraikan hidrokarbon.

c. Proses Metabolisme

Hidrokarbon yang terdapat dalam minyak bumi dipecah menjadi asam lemak yang lebih sederhana,

yang selanjutnya dapat digunakan dalam proses respirasi sel oleh bakteri. Selama proses ini, bakteri menghasilkan energi dan memproduksi senyawa-senyawa yang lebih ramah lingkungan.

2. Keuntungan Penggunaan Bakteri dalam Bioremediasi
 - a. Proses Alami
Bioremediasi menggunakan mekanisme alami, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan metode fisik atau kimia, seperti pembakaran atau penggunaan bahan kimia untuk memecah minyak.
 - b. Efisien pada Berbagai Skala
Bakteri dapat digunakan untuk mengatasi tumpahan minyak dalam skala kecil (seperti pada tanah atau air) maupun besar (seperti tumpahan minyak laut).
 - c. Menurunkan Biaya
Bioremediasi cenderung lebih murah daripada metode tradisional untuk membersihkan tumpahan minyak, seperti penggunaan dispersan atau metode mekanik.
 - d. Tantangan dalam Bioremediasi Minyak Bumi
Kondisi Lingkungan Efektivitas bakteri dalam menguraikan minyak bergantung pada kondisi lingkungan, seperti suhu, pH, ketersediaan oksigen, dan nutrisi. Bakteri mungkin kurang efektif dalam lingkungan yang ekstrem.
 - e. Waktu yang Diperlukan Bioremediasi adalah proses yang lambat dan memerlukan waktu lebih lama dibandingkan metode fisik atau kimia.

Pengendalian Spesies Tidak semua bakteri dapat bekerja secara optimal, dan diperlukan pemilihan spesies bakteri yang tepat untuk jenis hidrokarbon tertentu.

3. Penerapan di Lapangan

Contoh sukses bioremediasi minyak bumi adalah pemanfaatan bakteri untuk menangani tumpahan minyak besar di laut, seperti dalam kasus tumpahan minyak Exxon Valdez di Alaska (1989). Setelah tumpahan minyak besar tersebut, ilmuwan menggunakan bakteri untuk membantu menguraikan minyak yang mengendap di ekosistem laut. Bakteri ini juga digunakan dalam pengolahan tanah yang terkontaminasi di kilang minyak atau di lokasi pengeboran.

Secara keseluruhan, penggunaan bakteri untuk mengatasi limbah minyak bumi merupakan solusi yang efektif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, meskipun memerlukan pengendalian dan pemantauan yang tepat untuk mencapai hasil yang optimal.

4.3.2 Penggunaan Bakteri untuk Mengatasi Limbah Logam Berat

Penggunaan bakteri untuk mengatasi limbah logam berat juga merupakan salah satu bentuk bioremediasi, yang melibatkan mikroorganisme untuk menghilangkan atau mengurangi konsentrasi logam berat berbahaya dari lingkungan. Logam berat seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan arsenik (As) dapat menyebabkan pencemaran yang serius pada tanah dan air, serta berdampak buruk pada kesehatan manusia dan ekosistem.

Berbeda dengan minyak bumi yang diurai menjadi senyawa sederhana, logam berat tidak dapat dihancurkan secara kimia. Namun, bakteri dapat mengubah bentuk logam berat menjadi bentuk yang kurang toksik atau

memindahkannya dari lingkungan yang terkontaminasi melalui berbagai mekanisme biokimia.

1. Mekanisme Kerja Bakteri dalam Bioremediasi Logam Berat

- a. Bioakumulasi. Beberapa jenis bakteri mampu menyerap logam berat dari lingkungan melalui membran sel mereka. Proses ini disebut bioakumulasi, dimana bakteri menyimpan logam berat di dalam sel atau dinding sel mereka. Dengan cara ini, bakteri "mengambil" logam berat dari air atau tanah yang tercemar.
- b. Biosorpsi. Biosorpsi adalah proses di mana dinding sel bakteri menyerap logam berat dari lingkungannya. Ini biasanya terjadi melalui ikatan antara logam berat dan komponen sel bakteri, seperti protein atau polisakarida di dinding sel. Proses ini tidak memerlukan energi metabolik, sehingga terjadi lebih cepat.
- c. Biomineralisasi. Bakteri tertentu dapat memicu proses biomineralisasi, di mana logam berat diubah menjadi bentuk mineral yang tidak larut dan kurang berbahaya. Sebagai contoh, bakteri penghasil sulfat dapat mengubah ion logam berat seperti kadmium menjadi sulfida yang lebih stabil dan kurang toksik.
- d. Transformasi Reduksi-Oksidasi (Redoks). Beberapa bakteri dapat mengubah status oksidasi logam berat melalui proses redoks, sehingga logam berat menjadi bentuk yang kurang beracun. Misalnya, bakteri pengoksidasi arsenik mengubah arsenik dari bentuk yang sangat beracun (As^{3+}) menjadi bentuk yang kurang beracun (As^{5+}).
- e. Pengendapan. Logam Berat dapat memicu pengendapan logam dengan mengubah sifat kimianya sehingga logam tersebut mengendap dari larutan. Bakteri *sulfat-reducing* (pengurang sulfat)

misalnya, mengubah logam berat menjadi senyawa yang mengendap di tanah, seperti logam sulfida yang lebih stabil.

2. Bakteri yang Digunakan dalam Bioremediasi Logam Berat
 - a. *Pseudomonas*: Genus bakteri ini terkenal dengan kemampuan bioakumulasi logam berat, termasuk timbal, kadmium, dan merkuri. Bakteri ini sering digunakan dalam proses pembersihan tanah atau air yang terkontaminasi logam berat.
 - b. *Bacillus*: Bakteri ini mampu melakukan biosorpsi logam berat seperti tembaga (Cu), kromium (Cr), dan seng (Zn). Bakteri *Bacillus* juga memiliki dinding sel yang efektif dalam menyerap logam berat dari lingkungan.
 - c. *Desulfovibrio*: Bakteri ini termasuk dalam kelompok bakteri pengurang sulfat yang mampu mengendapkan logam berat dalam bentuk logam sulfida. Mereka digunakan dalam bioreaktor untuk mengatasi limbah logam berat dari industri.
 - d. *Shewanella*: Bakteri ini memiliki kemampuan untuk mereduksi logam berat dan mengubahnya menjadi bentuk yang tidak larut dan tidak toksik. Misalnya, *Shewanella* dapat mereduksi uranium (U^{6+}) menjadi uranium yang kurang berbahaya (U^{4+}).
3. Keuntungan Penggunaan Bakteri dalam Pengolahan Limbah Logam Berat
 - a. Ramah Lingkungan
Metode ini lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik kimiawi atau fisik yang mahal dan menghasilkan limbah sekunder yang berpotensi merusak.

- b. Biaya Rendah
Bioremediasi menggunakan bakteri sering kali lebih murah dan memerlukan infrastruktur yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode konvensional seperti filtrasi kimia atau pemisahan fisik.
 - c. Selektif dan Efektif
Beberapa bakteri dapat ditargetkan untuk logam berat tertentu dan mampu bekerja pada konsentrasi logam yang rendah, yang sulit ditangani oleh metode lain.
4. Tantangan dalam Bioremediasi Logam Berat
- a. Kecepatan proses bioremediasi logam berat cenderung lebih lambat dibandingkan dengan metode kimiawi, sehingga tidak selalu cocok untuk kasus darurat.
 - b. Ketergantungan pada kondisi lingkungan Efektivitas bakteri sangat bergantung pada kondisi lingkungan seperti pH, suhu, oksigen, dan keberadaan nutrisi. Lingkungan yang tidak sesuai dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas bakteri.
 - c. Kontaminasi Sekunder Meskipun bakteri dapat mengikat logam berat, ada risiko kontaminasi sekunder ketika bakteri mati atau terurai, yang dapat melepaskan logam berat kembali ke lingkungan.
 - d. Penerapan di Lapangan

Bioremediasi dengan bakteri telah diterapkan di berbagai tempat, seperti dalam penanganan tambang yang terkontaminasi logam berat, pengolahan air limbah industri, serta pemulihan tanah yang terkontaminasi akibat kegiatan pertambangan atau industri berat. Salah satu contoh yang terkenal adalah penggunaan bakteri pengurang sulfat untuk membersihkan air

limbah yang terkontaminasi logam berat di tambang logam.

5. Penggunaan Bakteri dalam Pengolahan Limbah yang Kaya Protein

Pengolahan limbah yang kaya protein menggunakan bakteri dikenal sebagai bagian dari biokonversi atau biodegradasi. Limbah kaya protein, seperti sisa makanan, limbah rumah tangga, limbah pertanian, dan limbah dari industri pengolahan daging atau susu, dapat diurai oleh mikroorganisme, terutama bakteri, untuk mengurangi dampak lingkungan dan menghasilkan produk yang bermanfaat.

Protein terdiri dari rantai panjang asam amino, dan bakteri memiliki enzim yang mampu memecah protein menjadi asam amino, kemudian mendaur ulangnya menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti gas (metana, amonia), asam organik, atau bahkan biomassa baru.

6. Mekanisme Pengolahan Limbah Protein oleh Bakteri

a. Proteolisis

Bakteri mengeluarkan enzim protease yang memecah protein menjadi asam amino. Asam amino ini kemudian digunakan oleh bakteri sebagai sumber energi atau karbon. Contoh bakteri yang melakukan proteolisis adalah *Bacillus subtilis* dan *Clostridium*.

b. Fermentasi Protein

Setelah protein dipecah menjadi asam amino, beberapa bakteri dapat memfermentasi asam amino tersebut menjadi produk seperti asam lemak volatil (VFA), amonia, atau gas lainnya. Proses fermentasi ini dapat menghasilkan biogas yang bisa digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

c. Proses Anaerobik dan Aerobik

Pengolahan Anaerobik: Dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen), bakteri metanogenik dapat menguraikan limbah protein untuk menghasilkan metana dan karbon dioksida. Limbah yang kaya protein sering diolah dalam biodigester anaerobik untuk menghasilkan biogas. Bakteri seperti *Methanobacterium* berperan penting dalam penguraian protein secara anaerobik.

Pengolahan Aerobik: Dalam kondisi aerobik (dengan oksigen), bakteri seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* dapat menguraikan protein menjadi asam amino, yang kemudian dioksidasi lebih lanjut menjadi karbon dioksida, air, dan energi. Proses ini umum dalam pengolahan limbah cair dan padat di instalasi pengolahan limbah kota (IPAL).

d. Produksi Bioplastik

Dalam beberapa kasus, bakteri dapat memetabolisme asam amino yang berasal dari penguraian protein menjadi senyawa polimer seperti polyhydroxyalkanoates (PHA), yang merupakan bahan dasar bioplastik. Ini adalah cara inovatif untuk mengolah limbah protein menjadi produk bernilai tambah.

7. Bakteri yang Digunakan dalam Pengolahan Limbah Protein

- a. *Bacillus subtilis*: Bakteri ini menghasilkan enzim protease yang efisien dalam memecah protein menjadi asam amino. *Bacillus subtilis* banyak digunakan dalam fermentasi industri dan pengolahan limbah protein dari industri makanan.
- b. *Pseudomonas*: Bakteri ini dapat hidup dalam kondisi aerobik dan memiliki kemampuan memecah berbagai jenis protein. *Pseudomonas* digunakan dalam pengolahan air limbah yang mengandung konsentrasi protein tinggi.
- c. *Clostridium*: Bakteri ini bekerja dalam kondisi anaerobik, menghasilkan gas seperti hidrogen dan metana dari penguraian limbah protein. Mereka sering digunakan dalam biodigester anaerobik untuk pengolahan limbah organik kaya protein.
- d. *Methanobacterium*: Bakteri ini berperan dalam fermentasi anaerobik untuk mengubah produk akhir penguraian protein menjadi metana dan karbon dioksida. Mereka sangat penting dalam proses pembuatan biogas.

8. Manfaat Penggunaan Bakteri dalam Pengolahan Limbah Protein

- a. Mengurangi Pencemaran Lingkungan: Pengolahan limbah protein yang efisien oleh bakteri membantu mengurangi pencemaran lingkungan dari limbah organik yang kaya protein, yang jika dibiarkan dapat menyebabkan pembusukan, bau tidak sedap, serta pelepasan amonia dan gas rumah kaca.
- b. Menghasilkan Biogas: Pengolahan limbah protein secara anaerobik menghasilkan biogas yang terdiri dari metana dan karbon dioksida. Metana dapat

digunakan sebagai sumber energi terbarukan, menggantikan bahan bakar fosil.

- c. **Produksi Pupuk Organik:** Hasil penguraian protein oleh bakteri juga menghasilkan senyawa nitrogen seperti amonia, yang dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk memperkaya tanah dan meningkatkan kesuburan lahan pertanian.
 - d. **Pengolahan Limbah Industri:** Industri makanan dan minuman yang menghasilkan limbah protein tinggi, seperti industri daging, susu, dan ikan, dapat memanfaatkan bakteri untuk mengolah limbah mereka menjadi produk bernilai tambah atau mengurangi beban limbah pada lingkungan.
9. **Tantangan Penggunaan Bakteri dalam Pengolahan Limbah Protein**
- a. **Kondisi Lingkungan yang Optimum:** Efektivitas bakteri tergantung pada kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan ketersediaan oksigen. Pengendalian lingkungan diperlukan agar proses penguraian berjalan optimal.
 - b. **Pembentukan Amonia:** Penguraian protein menghasilkan amonia, yang dalam konsentrasi tinggi bisa beracun dan mencemari udara dan air. Sistem pengendalian perlu diterapkan untuk menangani akumulasi amonia.
 - c. **Waktu Proses:** Pengolahan limbah protein secara biologis membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan metode kimiawi atau fisik. Dalam aplikasi industri besar, skala waktu ini bisa menjadi kendala.

10. Contoh Penerapan di Lapangan

- a. Pengolahan Air Limbah Industri Makanan: Banyak pabrik pengolahan makanan menggunakan bakteri untuk memecah limbah protein dalam air limbah. Limbah dari pengolahan daging, susu, dan makanan laut diurai oleh bakteri dalam reaktor anaerobik untuk menghasilkan biogas dan air bersih.
- b. Pengolahan Limbah Ternak: Limbah kotoran ternak yang kaya protein diolah menggunakan biodigester anaerobik untuk menghasilkan biogas dan pupuk organik. Sistem ini efektif dalam mengolah protein dari limbah kotoran hewan dan menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan di peternakan.

4.3.3 Bakteri untuk Memproses Limbah Tertentu untuk Menghasilkan Produk Bernilai Lebih Tinggi

Penggunaan bakteri untuk memproses limbah tertentu dan menghasilkan produk bernilai lebih tinggi adalah bagian dari konsep biokonversi atau biotransformasi. Dalam proses ini, limbah organik atau anorganik yang tidak bernilai diolah oleh mikroorganisme, terutama bakteri, menjadi produk yang dapat digunakan kembali atau memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi. Berikut adalah beberapa contoh penting dari pemanfaatan bakteri dalam biokonversi limbah menjadi produk bernilai tinggi:

- a. Produksi Bioplastik dari Limbah Organik
Bakteri: *Cupriavidus necator*, *Ralstonia eutropha*
Proses: Limbah organik, seperti sisa makanan, limbah pertanian, atau limbah industri, diolah oleh bakteri untuk menghasilkan polyhydroxyalkanoates (PHA), yang merupakan bahan baku bioplastik. PHA adalah polimer yang dapat digunakan sebagai alternatif

plastik konvensional yang ramah lingkungan karena dapat terurai secara alami.

Produk: Bioplastik ramah lingkungan yang dapat digunakan dalam kemasan, peralatan medis, dan produk konsumen lainnya.

b. Produksi Bioetanol dari Limbah Selulosa

Bakteri: *Zymomonas mobilis*, *Clostridium thermocellum*

Proses: Limbah pertanian seperti jerami, ampas tebu, atau limbah kayu yang kaya akan selulosa dan hemiselulosa diolah menggunakan bakteri yang mampu menguraikan serat tanaman menjadi gula sederhana. Gula ini kemudian difermentasi menjadi etanol.

Produk: Bioetanol, yang digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan atau sebagai bahan bakar campuran dengan bensin.

c. Produksi Biogas dari Limbah Organik

Bakteri: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Clostridium*

Proses: Limbah organik seperti kotoran ternak, limbah makanan, dan limbah industri pengolahan makanan diolah dalam reaktor biodigester anaerobik. Bakteri pengurai menguraikan bahan organik menjadi senyawa sederhana, dan bakteri metanogenik menghasilkan biogas yang terdiri dari metana dan karbon dioksida.

Produk: Biogas (metana), yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk listrik, pemanas, atau sebagai bahan bakar kendaraan.

d. Produksi Pupuk Organik dari Limbah Pertanian dan Limbah Padat

Bakteri: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*

Proses: Limbah pertanian (jerami, dedaunan, limbah hasil panen) atau limbah padat dari rumah tangga diolah oleh bakteri pengurai yang memecah bahan organik menjadi humus yang kaya nutrisi. Beberapa bakteri seperti *Azotobacter* juga membantu memperkaya nitrogen dalam kompos melalui proses pengikatan nitrogen dari udara.

Produk: Pupuk organik atau kompos yang dapat digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dalam pertanian organik.

e. Produksi Asam Laktat dari Limbah Pati atau Gula

Bakteri: *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus plantarum*

Proses: Limbah pati atau limbah yang kaya gula, seperti ampas tebu atau limbah makanan manis, difermentasi oleh bakteri asam laktat menjadi asam laktat. Asam laktat adalah bahan dasar dalam industri makanan, farmasi, dan bioplastik (PLA, polylactic acid).

Produk: Asam laktat, yang digunakan dalam pembuatan bioplastik, bahan pengawet makanan, dan produk farmasi.

f. Produksi Protein Sel Tunggal (Single-Cell Protein, SCP) dari Limbah Industri

Bakteri: *Methylophilus methylotrophus*, *Bacillus subtilis*

Proses: Limbah industri atau limbah organik yang kaya karbon, seperti gas metan atau limbah fermentasi, dapat digunakan sebagai substrat bagi bakteri untuk memproduksi protein sel tunggal (SCP). SCP merupakan sumber protein alternatif yang dapat digunakan sebagai pakan ternak atau bahkan bahan pangan manusia di masa depan.

Produk: Protein sel tunggal yang digunakan sebagai bahan pakan hewan atau suplemen makanan.

g. Produksi Hidrogen dari Limbah Organik

Bakteri: *Clostridium*, *Rhodobacter*

Proses: Limbah organik, seperti limbah dari pengolahan makanan atau limbah cair pertanian, dapat diolah oleh bakteri penghasil hidrogen melalui fermentasi. Limbah diuraikan menjadi asam organik dan gas hidrogen, yang bisa digunakan sebagai energi bersih.

Produk: Hidrogen sebagai sumber energi hijau untuk pembangkit listrik atau bahan bakar sel hidrogen.

h. Produksi Asam Lemak Volatil dari Limbah Industri Susu dan Daging

Bakteri: *Clostridium butyricum*, *Megasphaera elsdenii*

Proses: Limbah dari industri pengolahan daging dan susu yang kaya lemak dan protein diubah menjadi asam lemak volatil (VFA) oleh bakteri melalui fermentasi anaerobik. VFA seperti asam asetat, asam propionat, dan asam butirat dapat digunakan sebagai bahan kimia industri.

Produk: Asam lemak volatil (VFA), yang digunakan dalam industri kimia sebagai bahan baku untuk berbagai produk, seperti pelarut dan bahan bakar alternatif.

i. Produksi Pigmen dari Limbah Industri

Bakteri: *Serratia marcescens*, *Chromobacterium violaceum*

Proses: Limbah industri, seperti limbah cair atau limbah organik dari pengolahan makanan, dapat dimanfaatkan oleh bakteri penghasil pigmen untuk memproduksi pigmen alami yang digunakan dalam industri makanan, tekstil, dan kosmetik. Misalnya, bakteri *Serratia marcescens* dapat menghasilkan pigmen merah (prodigiosin), sementara

Chromobacterium menghasilkan pigmen ungu (violacein).

Produk: Pigmen alami, yang digunakan sebagai pewarna alami dalam produk makanan, tekstil, dan kosmetik.

1. Keuntungan Biokonversi Limbah Menggunakan Bakteri
 - a. Ramah Lingkungan: Proses ini memanfaatkan mekanisme alami untuk mengolah limbah tanpa mencemari lingkungan dengan bahan kimia berbahaya.
 - b. Efisiensi Biaya: Dengan mengubah limbah menjadi produk bernilai, proses ini membantu mengurangi biaya penanganan limbah dan menghasilkan keuntungan.
 - c. Mengurangi Pencemaran: Penggunaan bakteri untuk mengolah limbah dapat mengurangi volume limbah yang dibuang ke lingkungan dan meminimalkan polusi.
 - d. Sumber Energi Terbarukan: Beberapa proses biokonversi menghasilkan energi terbarukan, seperti biogas dan hidrogen, yang membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
2. Tantangan dalam Penggunaan Bakteri untuk Biokonversi
 - a. Kondisi Operasional: Efektivitas bakteri dalam mengolah limbah tergantung pada kondisi seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi.
 - b. Skalabilitas: Meskipun teknologi ini efektif di laboratorium, penerapannya dalam skala industri memerlukan investasi besar dan kontrol ketat.
 - c. Waktu Proses: Biokonversi oleh bakteri membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan

metode kimia, yang dapat menjadi kendala dalam situasi darurat.

4.4 Kesimpulan

Peran mikroorganisme dalam kesehatan masa depan sangat besar, mulai dari terapi penyakit kronis hingga pencegahan penyakit menular dan personalisasi perawatan kesehatan. Dengan kemajuan dalam teknologi sekuensing dan rekayasa genetika, kita dapat melihat peningkatan pemahaman tentang mikrobiom dan penerapan praktisnya dalam menciptakan pendekatan medis yang lebih tepat, aman, dan efisien, yang secara signifikan akan meningkatkan kualitas kesehatan di masa depan.

Mikroorganisme terus dimanfaatkan secara luas bagi kepentingan manusia dan alam. Para peneliti meyakini pemanfaatan mikroorganisme ini menjadi solusi bagi tantangan dunia mendatang terkait kerusakan dan pencemaran lingkungan serta adaptasi perubahan iklim. Pemilihan mikroorganisme yang tepat hingga teknik penanganannya hingga kini masih diutak-atik para peneliti untuk memperoleh peran dan potensi maksimalnya. Di sisi lain, temuan-temuan ini perlu diperluas agar aplikatif dan menjawab tantangan di lapangan.

Secara keseluruhan, penggunaan bakteri dalam mengatasi limbah logam berat, dalam pengolahan limbah yang kaya protein adalah solusi inovatif yang ramah lingkungan dan ekonomis, serta berkelanjutan untuk menangani limbah sambil menghasilkan produk bernilai tambah yang bermanfaat bagi berbagai industri, meskipun memerlukan kontrol yang cermat dan optimasi untuk memastikan keberhasilan di berbagai kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badrus, S. S., Audia, M., & Agustin, N. R. (2023). Peranan mikrobiologi dalam pengelolaan Lingkungan (Studi tentang mikro organisme di lingkungan alamiah). *Jurnal Sains dan Teknologi (JSIT)*, 3(2), 148-152.
- Har, A. S., & Si, M. (2015). *Mikrobiologi kesehatan: peran mikrobiologi dalam bidang kesehatan*. Penerbit Andi.
- Jekti, D. S. D. (2018). Peranan Mikroba Dalam Pengelolaan Lingkungan. In *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi* (pp. 1-9).
- Pratiwi, R. H. (2019). Peranan mikroorganisme endofit dalam dunia kesehatan: kajian pustaka. *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 16(1), 21-32.

INDEKS

A

Aerob obligat, 25
Aktivitas air (aw), 24
Alkalofil, 24
Anaerob fakultatif, 25
Antibiotik, 38, 72, 73, 80, 81, 82, 88, 98
Asidofil, 23

B

Bakteriofag, 58, 65, 98
Biakan, 18
Biakan murni, 18

D

Desikasi, 38
Disbiosis, 91
Disinfektan, 38
DNA, 37, 38, 48, 49, 51, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 67, 76, 88, 94

E

Enzim, 28, 65
Eukariota, 49, 55, 64

F

Faktor ekstrinsik, 27
Faktor intrinsik, 22
Faktor pertumbuhan, 32
Fermentasi, 13, 90, 109

G

Genom, 48, 49, 51

H

Halofil, 24

K

Koloni, 42
Kromosom, 55

M

Media kultur, 30, 31, 32
Metabolisme, 92, 102
Mikroaerofil, 25
Mikrobiologi, 7, 8, 20, 40, 42, 43, 45, 47, 59, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 89, 99, 118, 122, 126
Mikrobioma, 61, 69, 73, 76, 83, 87, 95
Mikroorganisme, 7, 8, 18, 21, 29, 30, 32, 44, 47, 48, 49, 52, 53, 55, 69, 71, 72, 75, 78, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 95, 96, 98, 100, 101, 117
Mutasi, 56, 57

N

Nukleoid, 49
Nukleus, 49
Nutrisi, 22, 99

O

Operon, 49
Osmofil, 24

P

Patogen, 74, 75
PCR, 28, 29, 56, 60, 61, 83
Pengendalian pertumbuhan mikroba, 37
Pengukuran pertumbuhan, 36
pH, 21, 22, 23, 24, 26, 31, 32, 41, 44, 52, 93, 103, 107, 111, 116
Plasmid, 49
Potensial oksidasi-reduksi (Eh), 25
Prebiotik, 62, 97
Probiotik, 62, 97, 100
Prokariota, 48, 49, 64
Psikrofil, 27

R

Radiasi, 38

Rekombinasi genetik, 58, 59
RNA, 51, 52

S

Senyawa antimikroba, 26
Suhu, 27, 32, 38, 44

T

Termofil, 28
Total Plate Count (TPC), 36

V

Vaksinasi, 76, 77

GLOSARIUM

Aerob obligat: Mikroorganisme yang membutuhkan oksigen untuk tumbuh dan bertahan hidup.

Aktivitas air (aw): Parameter yang menggambarkan ketersediaan air bebas dalam suatu lingkungan, mempengaruhi pertumbuhan mikroba.

Alkalofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada pH tinggi (>9).

Anaerob aerotoleran: Mikroorganisme yang tidak memerlukan oksigen tetapi dapat menoleransi keberadaannya.

Anaerob fakultatif: Mikroorganisme yang dapat tumbuh dengan atau tanpa oksigen.

Anaerob obligat: Mikroorganisme yang tidak dapat bertahan hidup jika ada oksigen.

Antibiotik: Senyawa yang menghambat atau membunuh bakteri.

Antibodi : Merupakan protein yang digunakan

Antiseptik: Senyawa kimia yang digunakan untuk membunuh atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme pada jaringan hidup.

Asidofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada pH rendah (<5).

Autoklaf: Alat sterilisasi yang menggunakan uap bertekanan tinggi untuk membunuh mikroorganisme.

Bakteriofag: Virus yang menginfeksi bakteri.

Bakteriofag: Virus yang menginfeksi bakteri.

- Desikasi:** Proses pengeringan yang mengurangi kadar air, menghambat pertumbuhan mikroba.
- Diatenuasi :** Merupakan suatu prosedur untuk melemahkan bibit penyakit untuk memicu terbentuknya antibodi dalam tubuh
- Disbiosis:** Gangguan pada keseimbangan mikrobioma.
- Disbiosis:** Gangguan pada keseimbangan mikrobioma.
- Disinfektan:** Senyawa kimia yang digunakan untuk membunuh atau menghilangkan mikroorganisme patogen pada benda mati.
- DNA:** Asam deoksiribonukleat, molekul yang membawa informasi genetik.
- Endospora:** Struktur resisten yang dibentuk oleh beberapa bakteri untuk bertahan hidup dalam kondisi ekstrem.
- Enzim:** Protein yang mengkatalisis reaksi kimia dalam sel.
- Eukariota:** Organisme bersel satu atau multisel yang memiliki nukleus yang jelas.
- Exon:** Sekuen coding pada gen eukariota.
- Faktor ekstrinsik:** Kondisi lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan mikroba.
- Faktor intrinsik:** Karakteristik internal bahan pangan yang memengaruhi pertumbuhan mikroba.
- Faktor pertumbuhan:** Senyawa organik esensial yang dibutuhkan oleh beberapa mikroorganisme untuk tumbuh.
- Fermentasi :** Merupakan proses reaksi yang terjadi perubahan karbohidrat menjadi asam dengan bantuan mikroorganisme
- Filtrasi:** Proses pemisahan fisik mikroorganisme dari cairan atau udara menggunakan filter.

- Flagela:** Struktur seperti cambuk yang memungkinkan pergerakan pada beberapa mikroorganisme.
- Genom:** Keseluruhan informasi genetik yang terkandung dalam suatu organisme.
- Halofil:** Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada lingkungan dengan konsentrasi garam tinggi.
- Hipertermofil:** Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada suhu yang sangat tinggi ($>80^{\circ}\text{C}$).
- Inkubasi:** Proses menjaga kultur mikroorganisme pada kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan.
- Inkubasi:** Proses penyimpanan kultur mikroorganisme pada kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan.
- Inokulasi:** Proses pemindahan mikroorganisme dari satu media ke media lain.
- Inokulasi:** Proses pemindahan mikroorganisme ke media kultur.
- Intron:** Sekuen non-coding pada gen eukariota.
- Kapsul:** Lapisan pelindung di luar dinding sel beberapa bakteri.
- Koloni :** Merupakan kumpulan bakteri yang sejenis berkumpul menjadi satu
- Kromosom:** Struktur yang terdiri dari DNA yang sangat terorganisasi dan protein.
- Media kultur:** Bahan yang menyediakan nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme di laboratorium.
- Media kultur:** Bahan yang menyediakan nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme di laboratorium.
- Mesofil:** Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada suhu sedang ($20-45^{\circ}\text{C}$).

Metabolisme: Proses kimia yang terjadi dalam sel untuk menghasilkan energi dan membangun komponen seluler.

Mikroaerofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal dengan sedikit oksigen.

Mikrobioma: Komunitas mikroorganisme yang hidup pada suatu habitat tertentu, misalnya tubuh manusia.

Mutasi: Perubahan permanen pada urutan DNA.

Neutrofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada pH netral (5-9).

Nukleoid: Daerah di dalam sel prokariota tempat DNA berada.

Nukleus: Organel yang berisi DNA pada sel eukariota.

Nutrisi: Zat yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk pertumbuhan dan fungsi seluler.

Operon: Unit genetik pada prokariota yang terdiri dari beberapa gen yang terkait secara fungsional dan diatur oleh promotor dan operator yang sama.

Osmofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada lingkungan dengan konsentrasi gula tinggi.

Patogen: Mikroorganisme yang menyebabkan penyakit.

PCR: Polymerase Chain Reaction, teknik amplifikasi DNA.

Pengendalian pertumbuhan mikroba: Teknik untuk menghambat atau membunuh mikroorganisme.

Pengukuran pertumbuhan: Metode untuk menentukan jumlah atau aktivitas mikroorganisme dalam suatu sampel.

Pertumbuhan mikroorganisme: Peningkatan jumlah atau ukuran populasi mikroorganisme.

pH: Ukuran keasaman atau kebasaan suatu larutan.

- Pili:** Struktur seperti rambut pendek pada permukaan beberapa bakteri yang membantu perlekatan.
- Plasmid:** Molekul DNA ekstrakromosomal yang dapat bereplikasi secara mandiri.
- Plasmolisis:** Penyusutan sel akibat kehilangan air dalam lingkungan hipertonik.
- Postulat :** Merupakan asumsi atau pernyataan yang dianggap benar tetapi kebenarannya belum dibuktikan melalui serangkaian eksperimen atau penelitian ilmiah.
- Potensial oksidasi-reduksi (Eh):** Ukuran kecenderungan suatu lingkungan untuk menerima atau menyumbangkan elektron.
- Prebiotik:** Serat makanan yang tidak dapat dicerna oleh tubuh manusia, tetapi dapat menjadi makanan bagi bakteri baik dalam usus.
- Probiotik:** Suplemen yang mengandung bakteri hidup yang bermanfaat bagi kesehatan.
- Prokariota:** Organisme bersel satu yang tidak memiliki nukleus yang jelas.
- Psikrofil:** Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada suhu rendah (0-20°C).
- Radiasi:** Energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel yang dapat merusak DNA mikroorganisme.
- Rekombinasi genetik:** Proses pertukaran materi genetik antara dua molekul DNA.
- RNA:** Asam ribonukleat, molekul yang berperan dalam sintesis protein.
- Sekuensing DNA:** Proses penentuan urutan basa nitrogen dalam suatu molekul DNA.

Senyawa antimikroba: Zat yang membunuh atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme.

Sterilisasi: Proses penghancuran semua bentuk kehidupan mikroba.

Suhu: Ukuran panas atau dinginnya suatu benda atau lingkungan.

Termofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada suhu tinggi (45-80°C).

Total Plate Count (TPC): Metode penghitungan jumlah mikroorganisme hidup dalam suatu sampel dengan menumbuhkannya pada media agar.

Transkripsi: Proses pembuatan salinan RNA dari DNA.

Translasi: Proses pembentukan protein berdasarkan urutan nukleotida pada mRNA.

Turbidimetri: Metode pengukuran pertumbuhan mikroba berdasarkan kekeruhan suspensi sel.

untuk pertahanan diri (sistem imun) untuk menetralkan zat yang membahayakan tubuh

Viabilitas: Kemampuan mikroorganisme untuk bertahan hidup dan menjalankan fungsi metaboliknya.

Xerofil: Mikroorganisme yang tumbuh optimal pada lingkungan yang sangat kering.

BIODATA PENULIS



apt. Ade Irawan, S.Farm, M.Farm

Dosen Program Studi S1 Farmasi
STIKes Muhammadiyah Cirebon

Penulis lahir di Klaten tanggal 11 Desember 1980. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 Farmasi Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Muhammadiyah Cirebon. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Farmasi dan Profesi Apoteker kemudian melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Farmasi. Penulis menekuni bidang Mikrobiologi dan Farmasi Bahan Alam. Selain mengajar penulis juga melakukan praktek pelayanan kefarmasian di Apotek. Semoga buku ini bermanfaat bagi pembacanya, terima kasih.

BIODATA PENULIS



drh. Nisa Hakimah, M.Sc.

Dosen Program Studi Teknik Penanganan Patologi
Perikanan Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo

Penulis lahir di Karanganyar pada 14 Agustus 1992 dan saat ini berdomisili di Sidoarjo. Penulis sebagai Dosen Tetap di Program Studi Teknik Penanganan Patologi Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo. Pendidikan Sarjana Kedokteran Hewan, penulis tempuh di Universitas Gadjah Mada, diikuti dengan pendidikan profesi Dokter Hewan di universitas yang sama. Selanjutnya, penulis melanjutkan studi Magister di Fakultas Sain Veteriner, Universitas Gadjah Mada. Dengan latar belakang pendidikan yang mendalam dan pengalaman profesional di bidang kedokteran hewan, penulis menunjukkan dedikasi yang tinggi dalam pengajaran dan penelitian di bidang patologi perikanan.

BIODATA PENULIS



Dr. Budi Rianto Wahidi, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Penanganan Patologi
Perikanan Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo

Penulis lahir di Bandung tanggal 23 Oktober 1978. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Penanganan Patologi Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia, S2 pada jurusan Bioteknologi Perikanan dan melanjutkan S3 pada Jurusan Ilmu Perikanan dan Kelautan.

BIODATA PENULIS



Dr. Rina Hidayati Pratiwi, M.Si.

Dosen di Universitas Indraprasta PGRI, Jakarta

Penulis merupakan staf pengajar perguruan tinggi di Universitas Indraprasta PGRI, Jakarta, program studi Pendidikan Biologi (S1) dan Pendidikan MIPA (S2). Pendidikan S-1 diperoleh penulis dari Departemen Biologi, Institut Pertanian Bogor (IPB) melalui beasiswa BBM. Di Universitas yang sama, penulis juga menyelesaikan pendidikan masternya (S-2) pada Program Studi Bioteknologi melalui program beasiswa BPPS Dikti. Pendidikan S-3 diselesaikan di Program Studi Biologi, Universitas Indonesia (UI) tahun 2016 menggunakan beasiswa BPPDN Dikti. Penulis juga menjadi trainer dan narasumber Mikrobiologi untuk beberapa perusahaan yang terkait. Dari skripsi hingga disertasi, riset yang penulis lakukan ialah di bidang Mikrobiologi Kesehatan. Bidang keilmuannya dalam bidang Microbial prospecting, kemopropecting dan pendidikan Mikrobiologi. Hingga saat ini, penulis juga aktif melakukan penelitian dalam berbagai bidang Mikrobiologi dan drug discovery dari hibah riset Kementerian, baik KemenristekDikti maupun Kemendikbud-

Ristek. Pencarian antimikroba patogen, baik dari virus fage maupun mikroba endofit hingga mendesign obat menjadi fokus dari bidang risetnya. Selain menulis buku, penulis juga aktif menulis di berbagai jurnal ilmiah internasional dan nasional. Saat ini penulis juga aktif sebagai editor dan reviewer di jurnal nasional maupun internasional serta reviewer penelitian Dikti.

E-mail penulis: rina.hp2012@gmail.com.

Researchgate penulis:

<https://www.researchgate.net/search/publication?q=rina%20hidayati%20pratiwixxx>