

DASAR-DASAR BAKTERIOLOGI MEDIS: STRUKTUR, IDENTIFIKASI, DAN PATOGENESIS



Penulis:

- 1. Kurniawan**
- 2. Ninda Devita**
- 3. Sufi Desrini**
- 4. Mardhia**
- 5. Delima Fajar Liana**

Editor:

Rima Agnes Widya Astuti



BUKU AJAR
DASAR-DASAR
BAKTERIOLOGI MEDIS:
STRUKTUR, IDENTIFIKASI,
DAN PATOGENESIS

Penulis:

1. Kurniawan
2. Ninda Devita
3. Sufi Desrini
4. Mardhia
5. Delima Fajar Liana

Editor:

Rima Agnes Widya Astuti



PT. Mustika Sri Rosadi

BUKU AJAR DASAR-DASAR BAKTERIOLOGI MEDIS: STRUKTUR, IDENTIFIKASI, DAN PATOGENESIS

Penulis:

Kurniawan; Ninda Devita; Sufi Desrini; Mardhia; Delima Fajar Liana

Editor: Rima Agnes Widya Astuti

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Febriansyah

ISBN: 978-634-7535-19-1 (PDF)

Cetakan Pertama: 12 Desember 2025

Hak Cipta 2025

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh Penerbit PT Mustika Sri Rosadi

Alamat Penerbit: Citra Indah City, Bukit Heliconia AG
23/32, Kecamatan Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Buku Ajar Dasar-Dasar Bakteriologi Medis: Struktur, Identifikasi, dan Patogenesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai upaya menghadirkan bahan ajar yang komprehensif, sistematis, dan mudah dipahami bagi mahasiswa serta tenaga kesehatan yang membutuhkan landasan kuat dalam memahami konsep-konsep dasar bakteriologi medis.

Perkembangan ilmu mikrobiologi yang sangat pesat, kemunculan penyakit infeksi baru, serta meningkatnya kasus resistensi antibiotik menuntut siapa pun yang berkecimpung dalam dunia kesehatan untuk memiliki pemahaman mendalam tentang bakteri, cara identifikasinya, dan mekanisme terjadinya infeksi. Oleh karena itu, buku ini dirancang untuk menggabungkan aspek fundamental dengan perkembangan ilmu terkini, sehingga pembaca dapat memahami bakteri tidak hanya sebagai mikroorganisme penyebab penyakit, tetapi juga sebagai bagian penting dari ekosistem tubuh manusia dan lingkungan.

Isi buku ini mencakup sejarah bakteriologi, struktur dan fungsi sel bakteri, pertumbuhan dan klasifikasi, mekanisme patogenesis, resistensi antibiotik, hingga pengenalan bakteri penyebab infeksi klinis serta prinsip dasar diagnostik laboratorium. Setiap bab disusun secara terarah agar pembaca dapat membangun pemahaman secara bertahap dari konsep dasar hingga aplikasi klinis.

Kami menyadari bahwa penyusunan buku ini tentu masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, saran dan

masukan sangat kami harapkan untuk penyempurnaan di masa mendatang. Semoga kehadiran buku ini dapat memberikan manfaat yang luas, menjadi referensi terpercaya, serta mendukung proses pembelajaran dan praktik di bidang kesehatan.

Bogor, 12 Desember 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I. PENDAHULUAN BAKTERIOLOGI MEDIS - Kurniawan	1
A. Pendahuluan	1
B. Sejarah Penemuan dan Perkembangan Ilmu Bakteriologi.....	2
C. Peran Bakteri dalam Bidang Kesehatan dan Penyakit.....	7
D. Ruang Lingkup Bakteriologi Medis	13
E. Latihan Soal	19
BAB 2. KLASIFIKASI DAN NOMENKLATUR BAKTERI - Ninda Devita	22
A. Pendahuluan	22
B. Prinsip dan Hierarki Taksonomi.....	22
C. Teknik Identifikasi Bakteri	24
D. Sistem Klasifikasi Bakteri.....	29
E. Latihan Soal	32
BAB 3. PATOGENESIS DAN FAKTOR VIRULENSI BAKTERI - Sufi Desrini	36
A. Pendahuluan	36
B. Konsep Dasar Patogenesis.....	37
C. Tahapan Umum Patogenesis Bakteri.....	38
D. Faktor Virulensi Bakteri	44
E. Latihan Soal	47
BAB 4. RESISTENSI ANTIBIOTIK DAN MEKANISME PERLAWANAN BAKTERI - Sufi Desrini	51
A. Pendahuluan	51

B.	Konsep dan Mekanisme Resistensi Antibiotik	52
C.	Dampak dan Urgensi Pengendalian Resistensi Antibiotik	58
D.	Latihan Soal	60
BAB 5.	BAKTERI PENYEBAB INFEKSI KLINIS UMUM – Mardhia	63
A.	Pendahuluan	63
B.	Bakteri Gram-Negatif Penyebab Infeksi Klinis Umum	64
C.	Bakteri Gram-Negatif Penyebab Infeksi Klinis Umum	74
D.	Bakteri Penyebab Infeksi Spesifik dan Kronis	76
E.	Latihan Soal	79
BAB 6.	PRINSIP DASAR DIAGNOSTIK LABORATORIUM MIKROBIOLOGI - Delima Fajar Liana	83
A.	Pendahuluan	83
B.	Tahap Pre Analitik	84
C.	Tahap Analitik	87
D.	Tahap Post Analitik	92
E.	Latihan Soal	93
	BIOGRAFI PENULIS	97
	DAFTAR PUSTAKA.....	104
	LAMPIRAN.....	119
	SINOPSIS.....	120

BAB I. PENDAHULUAN BAKTERIOLOGI MEDIS

Oleh: Kurniawan

A. Pendahuluan

Ilmu bakteriologi medis berkembang dari rasa ingin tahu para ilmuwan terhadap makhluk hidup berukuran sangat kecil yang tidak terlihat oleh mata. Sejak penemuan mikroskop pertama, pemahaman manusia tentang bakteri berubah total. Apa yang dulu dianggap sekadar "makhluk tak dikenal" kini terbukti memainkan peran besar dalam kesehatan dan diagnosis penyakit. Perjalanan panjang ini mengubah cara dunia kedokteran memandang penyebab infeksi, metode diagnosis, serta strategi pencegahan dan pengobatan suatu penyakit.

Di bidang kesehatan, bakteri tidak selalu identik dengan penyakit. Banyak bakteri yang hidup berdampingan dengan tubuh manusia dan bahkan membantu menjaga keseimbangan fungsi biologis. Namun sebagian bakteri lainnya mampu menimbulkan gangguan serius, bahkan memicu wabah yang memengaruhi populasi (masyarakat) secara luas. Oleh karena itu, memahami sifat, perilaku, dan kemampuan adaptasi bakteri menjadi ilmu dasar yang penting bagi perkembangan ilmu kedokteran modern.

Bakteriologi medis menggabungkan pengetahuan tentang struktur, fisiologi, ekologi, hingga interaksi bakteri dengan tubuh manusia. Tujuannya jelas, yaitu memberikan landasan ilmiah untuk mendiagnosis infeksi, menentukan langkah terapi yang tepat, dan merancang strategi pencegahan yang efektif. Dengan munculnya

teknologi molekuler dan sistem diagnostik yang lebih cepat, ruang lingkup bakteriologi menjadi semakin luas dan relevansinya semakin tinggi dalam praktik klinis.

Bab ini memberikan gambaran awal tentang sejarah penemuan dan perkembangan ilmu bakteriologi medis, peran penting bakteri dalam kesehatan dan diagnosis penyakit, serta ruang lingkup ilmu bakteriologi medis sebagai pondasi yang akan mendukung pembahasan bab-bab berikutnya.

B. Sejarah Penemuan dan Perkembangan Ilmu Bakteriologi

Ilmu bakteriologi tidak muncul secara tiba-tiba, tetapi merupakan hasil penemuan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang dilakukan secara terus-menerus terkait dengan mikroorganisme, mulai dari gagasan spekulatif hingga metode ilmiah modern. Rekonstruksi sejarah menunjukkan bahwa perkembangan ilmu bakteriologi mampu dibagi ke dalam beberapa fase, yaitu mulai dari pengamatan awal terhadap dunia mikroorganisme hingga era biologi molekuler saat ini.

1. Abad ke-17: Penemuan Mikroskop dan Pengamatan Mikroorganisme

Momen paling awal yang menandai "pintu masuk" manusia ke dunia mikroorganisme terjadi pada abad ke-17, ketika seorang ilmuwan Belanda, *Antonie van Leeuwenhoek* (1632–1723), menggunakan mikroskop rakitannya sendiri untuk mengamati "makhluk kecil" di dalam air, air hujan, dan cairan lainnya. Pada akhirnya tokoh ini memberikan nama "*animalcules*" untuk

menyebut makhluk kecil yang dilihatnya di bawah mikroskop.

Penemuan ini menjadi titik awal bagi lahirnya kesadaran bahwa ada makhluk hidup yang ukurannya terlalu kecil untuk dilihat mata telanjang. Sebelumnya, keberadaan mikroorganisme hanya berupa spekulasi atau teori saja, bahkan banyak orang yang percaya terhadap konsep *generatio spontanea* yang menyatakan bahwa kelahiran spontan berasal dari benda mati (materi yang tak hidup). Hal ini sangat wajar, mengingat pada masa ini, ilmu pengetahuan belum mampu menjelaskan tentang mikroorganisme secara detail dan lengkap. Para ilmuwan belum mampu mengenal dan membedakan jenis-jenis mikroorganisme (bakteri, jamur, protozoa, virus), serta hampir tidak ada pemahaman tentang peran mikroorganisme bagi kesehatan dan penyebab penyakit.

2. Abad ke-19: Konsolidasi Ilmu: Lahirnya Bakteriologi Modern

Lompatan besar berikutnya terjadi di abad ke-19, ketika berkembang teknik ilmiah yang memungkinkan identifikasi, kultur, dan studi sistematis tentang mikroorganisme, terutama bakteri. Dua orang ilmuwan yang menjadi tokoh utama dalam fase ini adalah *Louis Pasteur* (1822–1895) dan *Robert Koch* (1843–1910).

Louis Pasteur melakukan penelitian yang terkait dengan peran bakteri dalam proses fermentasi dan pembusukan bahan makanan atau organik lainnya. Tokoh ini menyanggah teori *generatio spontanea* melalui sebuah eksperimen menggunakan media cair yang telah disterilkan melalui proses pasteurisasi, dan menunjukkan hasil bahwa pembusukan berasal dari

mikroorganisme yang terdapat pada udara atau debu yang masuk ke dalam bejana dan mengkontaminasi bahan makanan. Dari hasil penemuan tersebut, akhirnya muncul suatu konsep bahwa bakteri dapat menyebabkan suatu penyakit, sehingga membuka jalan bagi berkembangnya ilmu mikrobiologi medis.

Sementara itu *Robert Koch* mengembangkan suatu metode kultur (menumbuhkan) bakteri pada medium padat (agar), melakukan pewarnaan bakteri, dan membuat biakan murni, sehingga hal ini memungkinkan seseorang untuk melakukan isolasi dan identifikasi bakteri penyebab suatu penyakit. Dengan metode ini, tokoh ini membuktikan bahwa bakteri tertentu dapat menyebabkan penyakit tertentu pada manusia atau hewan. *Robert Koch* kemudian merumuskan suatu prinsip klasik yang disebut sebagai *Postulat Koch* (1882), sebagai pedoman untuk menegaskan hubungan sebab-akibat antara bakteri dan penyakit.

Adanya penemuan mikroskop, hasil penelitian dan penemuan dua ilmuwan tersebut, maka terbentuklah pondasi yang kuat untuk berkembangnya cabang ilmu baru, yaitu bakteriologi medis. Melalui mikroskop, bakteri yang terdapat pada suatu sampel penyakit (darah, urine, sputum, cairan lainnya) dapat dilihat dengan jelas, kemudian didukung dengan kemampuan untuk mengisolasi, memurnikan, dan mengidentifikasi jenis bakteri yang menginfeksi manusia atau hewan, serta adanya kerangka konseptual (teori kuman penyakit dan *postulat Koch*), maka dikenal cabang ilmu baru yaitu bakteriologi medis.

Postulat Koch menjadi fondasi penting dalam menentukan penyebab penyakit, yaitu bakteri. Meskipun

demikian, postulat ini tetap memiliki keterbatasan, yaitu tidak semua bakteri dapat dikultur di media buatan (*dehydrated media*), dan tidak semua bakteri patogen dapat menyebabkan penyakit. Kemampuan untuk menumbuhkan mikroorganisme (*culture-based methods*) telah banyak ditingkatkan, namun dengan kemajuan ilmu biologi molekuler dan sekuensing, pendekatan non-kultur kini mampu memperluas cakupan pemahaman kita terhadap mikroba, termasuk bakteri yang sulit dikultur.

3. Abad ke-20: Penemuan Antibiotik, Imunologi, dan Perluasan Ruang Lingkup

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, ilmu bakteriologi medis memasuki era baru, yaitu pemanfaatan ilmu secara praktis terkait pemahaman tentang bakteri dan penyebab penyakit. Salah satu tonggak terpenting di abad ini adalah penemuan antibiotik penisilin oleh seorang ilmuwan bernama *Alexander Fleming* pada tahun 1928. Penemuan ini, menginspirasi para ilmuwan lainnya untuk menemukan jenis-jenis antibiotik lainnya yang sangat diperlukan untuk mengobati para tentara dan warga sipil korban perang dunia secara lebih efektif dan efisien.

Dalam periode ini, ilmu bakteriologi menjadi semakin dekat dengan ilmu kedokteran klinis, terkait metode diagnostik, pengobatan, dan pencegahan penyakit yang disebabkan oleh bakteri. Ilmu mikrobiologi, termasuk ilmu bakteriologi medis, menjadi salah satu disiplin ilmu yang penting dalam dunia kedokteran kontemporer.

4. Era Modern: Bioteknologi, Biologi Molekuler, dan Penemuan Mikroorganisme Baru

Memasuki abad ke-21, ilmu bakteriologi medis mampu berkembang dengan sangat cepat sejalan dengan kemajuan teknologi, berkembangnya ilmu biologi molekuler, teknik identifikasi cepat, hingga ilmu ekologi mikroorganisme. Studi terbaru menunjukkan bahwa penelitian terhadap mikroorganisme, termasuk bakteri, terus menghasilkan spesies dan strain baru dari berbagai lingkungan. Salah satu hasil penelitian, menyatakan adanya urgensi untuk melakukan isolasi dan karakterisasi spesies mikroorganisme baru sebagai bagian untuk memahami biodiversitas mikroorganisme dan potensi aplikasinya di bidang kesehatan, industri, dan lingkungan.

Dengan adanya metode pemeriksaan dan peralatan yang semakin modern seperti alat sekuensing, kultur canggih, dan bioinformatika, maka ilmu bakteriologi medis kini semakin mampu menjawab tantangan kontemporer, termasuk resistensi terhadap antibiotik, mikrobioma manusia, dan pemanfaatan mikroorganisme untuk kepentingan bioteknologi.

5. Urgensi untuk Memahami Sejarah Ilmu Bakteriologi Medis

Menelusuri sejarah perkembangan ilmu bakteriologi medis membuat kita semakin mengenal dan memahami bagaimana konsep dasar (mikroskop, kultur, dan teori kuman penyakit) dibangun, diuji, dan diubah seiring waktu. Hal ini membantu pembaca dan calon praktisi atau peneliti untuk menghargai dan menilai metode klasik sekaligus mengapresiasi kemajuan

modern. Selain itu, dengan memahami evolusi dari ilmu bakteriologi, kita mampu lebih kritis terhadap asumsi dasar dan metodologinya, misalnya bagaimana mengenali keterbatasan kultur bakteri, pentingnya deteksi molekuler, dan relevansi pendekatan ekologi mikroorganisme bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

C. Peran Bakteri dalam Bidang Kesehatan dan Penyakit

1. Bakteri sebagai bagian dari flora normal

Pada tubuh manusia, terdapat suatu komunitas besar bakteri dan mikroorganisme lainnya yang dikenal dengan istilah mikrobiota manusia (*human microbiota*) atau flora normal, yang hidup dan menetap di bagian kulit, saluran pencernaan, saluran pernapasan, saluran urogenital, mukosa mulut, dan bagian tubuh manusia lainnya. Sebagai contoh, di usus besar terdapat genus-genus bakteri seperti *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Bacteroides*, dan lainnya yang rutin hadir sebagai bagian dari flora normal. Keberadaan flora normal ini bersifat menguntungkan karena membantu fungsi fisiologis tubuh manusia.

Peran utama bakteri flora normal pada tubuh manusia meliputi:

- Menduduki "ruang ekologis" di kulit, mukosa, dan usus yang akan berkompetisi (antagonistik) dengan mikroorganisme patogen dan mencegah terjadinya kolonisasi patogen.
- Membantu proses pencernaan dan metabolisme zat gizi: bakteri flora normal usus mampu memecah polisakarida kompleks yang tidak mampu dicerna

oleh manusia, menghasilkan asam lemak rantai pendek seperti butirat, asetat, dan propionate, yang menjadi sumber energi bagi sel usus, serta mempunyai efek antiinflamasi dan mendukung kesehatan usus.

- Membantu produksi senyawa metabolit penting seperti vitamin dan asam amino, serta menstimulasi fungsi imun dan integritas epitel sehingga bakteri flora normal dapat mempertahankan homeostasis tubuh.

Dengan demikian, bakteri flora normal bukan “tidak melakukan apa-apa”, tetapi menjadi bagian penting dari sistem biologis manusia, mendukung kesehatan, pemanfaatan nutrisi, dan pertahanan tubuh terhadap infeksi.

2. Peran Bakteri dalam Metabolisme, Imunitas, dan Keseimbangan Tubuh

Komunitas bakteri yang hidup di dalam tubuh manusia memainkan peran penting dalam menjaga sistem fisiologis dan imunologis tubuh yang terjadi tidak hanya di saluran pencernaan, tetapi juga dalam memodulasi respon imun, metabolisme, serta proteksi terhadap mikroorganisme patogen. Bakteri usus menghasilkan metabolit seperti SCFA yang menjaga kesehatan mukosa usus, mendukung integritas sel epitel, dan berfungsi sebagai sinyal metabolik terhadap tubuh. SCFA juga dilaporkan memiliki sifat anti-inflamasi dan proteksi terhadap kerusakan sel di usus.

Bakteri flora normal membantu sistem kekebalan tubuh dengan cara merangsang respons imun mukosa, memacu maturasi sel imun, dan menahan pertumbuhan

mikroorganisme patogen melalui kompetisi nutrisi dan produksi senyawa antimikroba (bakteriosin) atau pengasaman lingkungan (melalui SCFA). Selain itu, bakteri flora normal juga membantu metabolisme nutrisi dan vitamin, dimana beberapa bakteri usus penting dalam sintesis vitamin, dan membantu penyerapan nutrisi dari makanan.

Contoh nyata peran positif dari bakteri adalah bahwa keseimbangan mikrobiota usus berhubungan dengan kesehatan sistem imun, dan ketidakseimbangan (*dysbiosis*) mampu meningkatkan risiko penyakit kronis, gangguan metabolik, autoimun, hingga gangguan neurologis. Dengan demikian bakteri bukan hanya sekedar “makhluk hidup kecil”, melainkan berperan sebagai mitra biologis penting bagi manusia, membantu fungsi fisiologis, menjaga keseimbangan internal, dan membentuk garis pertahanan (imunitas tubuh) pertama terhadap patogen.

3. Mekanisme Bakteri dalam Menyebabkan Penyakit

Meskipun ada banyak spesies bakteri yang memberikan dampak positif (menguntungkan) bagi manusia, namun ada pula spesies bakteri yang merugikan dan menyebabkan penyakit (patogen). Ada kalanya, bakteri flora normal berubah menjadi bakteri patogen (oportunistik) sehingga seseorang menjadi sakit atau menderita suatu penyakit. Proses ini umumnya dipicu oleh ketidakseimbangan mikrobiota, adanya gangguan sistem imun, atau adanya pergerakan atau perpindahan suatu spesies bakteri dari habitat aslinya menuju ke bagian tubuh yang lain yang awalnya steril.

Terdapat beberapa mekanisme umum terkait patogenesis bakteri yaitu:

- Adhesi atau pelekatan bakteri ke sel epitel tubuh, umumnya terjadi pada mukosa usus, lapisan mukosa saluran pernapasan, atau permukaan kulit. Proses ini memungkinkan bakteri patogen untuk menetap, melakukan kolonisasi, dan berkembang biak di permukaan tubuh.
- Produksi racun (toksin), enzim proteolitik, *biofilm*, dan endospora. Tergantung pada spesies bakterinya, keempat senyawa atau struktur sel bakteri tersebut mampu menembus sistem imunitas tubuh manusia, merusak sel, dan memicu peradangan sehingga bakteri-bakteri patogen tersebut semakin mudah untuk menyebar pada atau di dalam tubuh manusia.
- Kompetisi (antagonistik) dengan bakteri flora normal. Jika bakteri flora normal terganggu, misalnya setelah pengobatan dengan antibiotik, maka ruang ekologis di dalam tubuh manusia akan mengalami "kekosongan" sehingga ruang tersebut akan ditempati oleh bakteri patogen opportunistik untuk menetap dan berkembangbiak.

Salah satu contoh klasik adalah infeksi oleh bakteri *Clostridioides difficile* (*C. difficile*). Ketika seseorang menjalani terapi antibiotik berat, bakteri flora normal usus akan terganggu (*dysbiosis*) sehingga *C. difficile*, yang dulu mungkin "tenang", mampu berkembang pesat, menghasilkan toksin, dan menyebabkan diare berat atau kolitis pseudomembranosa. Infeksi oleh *C. difficile* merupakan ilustrasi bagaimana ketidakseimbangan

mikrobiota mampu mengubah bakteri flora normal menjadi bakteri patogen.

4. Interaksi antara Bakteri dengan Faktor *Host* dan Lingkungan

Peran bakteri, baik sebagai bakteri yang menguntungkan maupun sebagai bakteri patogen sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara bakteri, *host* (manusia), dan lingkungan. Faktor *host* seperti genetik, status imunitas, pola makan, gaya hidup, jenis kelamin, dan usia dapat memengaruhi komposisi mikrobiota. Selain itu, lingkungan eksternal dan perilaku, misalnya diet, kebersihan, paparan antibiotik, perubahan pH, dan derajat stres juga dapat memengaruhi kondisi mikrobiota dan potensi terjadinya *dysbiosis*.

Interaksi antara bakteri, *host* dan lingkungan digambarkan sebagai sebuah ekosistem. Pada kondisi *host* dan lingkungan yang baik, mikrobiota berada dalam posisi keseimbangan sehingga mampu menghasilkan berbagai senyawa metabolit yang dapat digunakan untuk melawan berbagai spesies bakteri patogen. Namun, jika kondisi *host* dan lingkungan terganggu, maka ekosistem akan terganggu, dan bakteri patogen akan mengambil alih ekosistem tersebut dan akhirnya menyebabkan penyakit.

5. Manfaat Bakteri pada Bidang Medis, Industri, dan Bioteknologi

Selain berperan dalam menjaga kesehatan tubuh manusia, ternyata bakteri juga memberikan kontribusi besar di bidang medis, industri, dan bioteknologi. Berikut

adalah beberapa peran penting dan manfaat utama adanya bakteri:

- Bakteri yang baik (menguntungkan) dapat dimanfaatkan sebagai probiotik untuk mendukung kesehatan saluran pencernaan, regenerasi flora normal usus, dan memperkuat sistem imun.
- Mikroorganisme (bakteri, jamur) yang baik dapat dimanfaatkan dalam proses produksi makanan fermentasi (yogurt, kefir, tempe, tape, keju, dsb) untuk meningkatkan citarasa, nilai gizi, menghasilkan vitamin, enzim, dan probiotik alami.
- Di bidang farmasi dan bioteknologi, bakteri telah menjadi sumber produksi antibiotik, enzim terapeutik, dan dimanfaatkan sebagai objek penelitian untuk terapi di masa depan, misalnya mikrobioma-terapi, modulasi mikrobiota, dan *bioengineering*.

Tabel 1.1 Peran, manfaat dan risiko dari bakteri yang hidup pada tubuh manusia

Peran / Konteks	Contoh/Manfaat	Catatan / Risiko Potensial
Bakteri flora normal tubuh	Pencernaan, produksi vitamin, imunitas, proteksi terhadap patogen	<i>Dysbiosis</i> dapat menyebabkan penyakit (misal usus, kulit)
Probiotik & terapi mikrobiota	Memulihkan keseimbangan usus, mendukung kesehatan umum	Efektivitas tergantung kondisi <i>host</i> , risiko resistensi
Fermentasi pangan / produk	Yogurt, keju, tape, tempe, dsb, makanan bernutrisi & mikroba baik	Hygiene & keamanan pangan harus dijaga
Bioteknologi & medis	Produksi antibiotik, penelitian mikrobioma, terapi berbasis mikroba	Resistensi, regulasi ketat, variabilitas individu

D. Ruang Lingkup Bakteriologi Medis

1. Tujuan Mempelajari Bakteriologi Medis

Bakteriologi medis memfokuskan diri pada pemahaman struktur, fisiologi, genetika, patogenesis, dan pengendalian bakteri yang berhubungan dengan kesehatan manusia. Tujuan utamanya adalah menyediakan landasan ilmiah agar tenaga kesehatan dapat mendiagnosis infeksi dengan tepat, memahami proses terjadinya penyakit, memilih terapi yang rasional, dan merancang strategi pencegahan yang efektif. Dalam

praktik klinis, pengetahuan yang mendalam tentang ilmu bakteriologi menjadi dasar utama dalam memilih antibiotik, menentukan pola kewaspadaan terhadap infeksi nosokomial, serta memahami penyebaran bakteri patogen di masyarakat.

Kebutuhan ini menjadi semakin penting karena pola penyakit infeksi saat ini telah mengalami perubahan yang sangat cepat, dan ditambah dengan adanya fenomena resistensi antimikroba yang meningkat secara global. Organisasi kesehatan seperti WHO dan CDC mencatat bahwa mikroorganisme yang telah resisten terhadap antibiotik saat ini telah menjadi ancaman yang serius bagi kesehatan masyarakat dunia karena menyebabkan terjadinya peningkatan angka rawat inap dan menurunkan efektivitas terapi.

2. Klasifikasi dan Karakter Dasar Bakteri yang Relevan Secara Klinis

Dalam konteks medis, bakteri tidak hanya diklasifikasikan berdasarkan jalur filogenetiknya saja, tetapi juga harus berdasarkan karakter klinisnya yang meliputi bentuk sel, sifat dinding sel (Gram positif atau Gram negatif), kemampuan membentuk spora, kebutuhan oksigen, motilitas, serta mekanisme adaptasi dan sifat virulensi. Dasar klasifikasi ini penting, mengingat setiap bakteri memiliki kemampuan untuk bertahan hidup, pola penyebaran, dan respon terhadap antibiotik yang berbeda-beda.

Contoh relevansi klasifikasi bakteri terhadap jenis penyakit yang ditimbulkannya adalah sebagai berikut:

- Bakteri Gram positif bentuk kokus seperti *Staphylococcus aureus*, sering menimbulkan infeksi

pada kulit, abses, hingga sepsis. Strain bakteri MRSA (*Methicillin-Resistant S. aureus*) muncul sebagai ancaman yang serius di rumah sakit.

- Bakteri Gram negatif bentuk basil seperti *Escherichia coli* atau *Klebsiella pneumoniae*, umum menyebabkan infeksi pada saluran pencernaan, saluran kemih dan pneumonia.
- Bakteri anaerob seperti *Clostridioides difficile*, menyebabkan kolitis setelah penggunaan antibiotik.

Tabel 1.2 Relevansi klasifikasi bakteri dengan aspek klinik yang ditimbulkannya

Karakter Bakteri	Contoh Spesies	Relevansi Klinis
Bakteri Gram positif kokus	<i>S. aureus</i> , <i>S. pyogenes</i>	Infeksi kulit, faringitis, sepsis
Bakteri Gram negatif basil	<i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Infeksi saluran kemih, pneumonia, infeksi nosokomial
Bakteri anaerob	<i>C. difficile</i> , <i>Bacteroides fragilis</i>	Kolitis, infeksi intraabdominal
Endospora	<i>Bacillus</i> spp., <i>Clostridium</i> spp.	Tahan panas, bertahan lama di lingkungan

3. Prinsip Identifikasi Bakteri di Laboratorium

Identifikasi bakteri dilakukan melalui kombinasi pendekatan klasik dan metode modern. Metode klasik mencakup kultur, karakter biokimia, dan pewarnaan seperti *Gram staining*. Teknik ini tetap penting karena

murah, mudah, dan memberikan gambaran cepat tentang kemungkinan etiologi.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, dalam satu dekade terakhir, ilmu bakteriologi medis telah berkembang pesat dengan ditemukannya teknologi *Polymerase-Chain Reactions* (PCR) yang kemudian berkembang dalam banyak tipe atau varian, yaitu *real-time* PCR, qRT-PCR, metode *whole-genome sequencing* (WGS), dan MALDI-TOF MS. Semua teknologi ini memungkinkan untuk melakukan identifikasi bakteri patogen secara cepat, akurat, dan dapat mendeteksi bakteri yang tidak dapat tumbuh dalam kultur.

Sebagai contoh kasus klinis, pada kejadian pneumonia berat, identifikasi bakteri secara cepat dengan menggunakan teknik PCR dapat mengidentifikasi bakteri patogen seperti *Legionella pneumophila* atau *Mycoplasma pneumoniae* dalam hitungan jam. Hal ini tentunya akan memudahkan dokter untuk memilih dan meresepkan jenis antibiotik yang tepat, mempercepat penanganan dan pengobatan pasien, mengurangi risiko resistensi dan mengurangi durasi rawat inap dan biaya kesehatan.

4. Konsep Patogenisitas, Virulensi, dan Faktor Infeksi

Patogenisitas merujuk pada kemampuan bakteri untuk menyebabkan penyakit, sedangkan virulensi menunjukkan tingkat keparahan efek yang ditimbulkan oleh bakteri tersebut pada manusia. Virulensi bakteri dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi *adhesin*,

kapsul, toksin, *biofilm*, enzim proteolitik, dan kemampuan untuk menghindari sistem imun manusia.

Salah satu contoh dari beberapa faktor virulensi yang dimiliki oleh bakteri patogen adalah kemampuan dari bakteri *Streptococcus pneumoniae* untuk menghasilkan struktur kapsul yang tersusun atas polisakarida kompleks yang sulit untuk difagositosis sehingga terhindar dari sistem imun *host*-nya. Contoh lain adalah bakteri *Vibrio cholerae* yang mampu menghasilkan senyawa toksin kolera yang dapat memicu diare masif pada manusia, dan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* yang mampu menghasilkan lapisan *biofilm* yang dapat menyebabkan infeksi kronis pada pasien yang menggunakan alat bantu medis seperti kateter dan ventilator.

5. Penerapan Prinsip Bakteriologi Medis dalam Diagnosis, Terapi, Pencegahan, dan Pengendalian Infeksi

Penerapan ilmu dan prinsip bakteriologi medis di pusat layanan kesehatan (rumah sakit, puskesmas, klinik kesehatan) sangat luas dan mencakup empat pilar utama yaitu:

- **Diagnosis**

Laboratorium mikrobiologi melakukan pemeriksaan sampel untuk memastikan etiologi infeksi, memilih terapi, dan menentukan prognosis. Upaya ini dapat dilakukan dengan mengkombinasikan beberapa metode seperti metode kultur, mikroskopis, dan biologi molekuler (PCR).

- **Terapi**

Pemahaman terkait pola resistensi antibiotik bakteri sangat penting untuk proses pemilihan jenis antibiotik yang akan diresepkan kepada pasien. Uji kepekaan (antibiogram) menjadi acuan utama dalam melakukan terapi yang rasional, terutama pada infeksi bakteri nosokomial.

- **Pencegahan**

Vaksinasi berbasis bakteri, seperti vaksin pneumokokus dan vaksin difteri, merupakan strategi penting dalam mencegah penyakit menular.

- **Pengendalian Infeksi**

Setiap rumah sakit, puskesmas, dan klinik kesehatan perlu menerapkan kewaspadaan yang tinggi, *hand hygiene*, manajemen alat medis, dan surveilans resistensi secara berkala untuk mengurangi angka infeksi yang disebabkan oleh bakteri patogen.

6. **Tantangan dan Arah Penelitian Bakteriologi di Masa Depan**

Tantangan terbesar di bidang bakteriologi medis modern saat ini adalah tingginya resistensi bakteri terhadap antimikroba, munculnya bakteri patogen baru, dan adanya kebutuhan dan tuntutan untuk melakukan diagnosis secara cepat. Atas dasar permasalahan-permasalahan tersebut, maka penelitian dan pengembangan ilmu bakteriologi medis di masa yang akan datang harus diarahkan pada:

- **Terapi berbasis mikrobiota**, seperti *fecal microbiota transplantation* (FMT) untuk menangani infeksi *C. difficile* berulang.
- **Genomic surveillance** untuk memantau evolusi patogen.
- **Pengembangan antibiotik baru**, termasuk peptida antimikroba dan terapi *fag*.
- **Teknologi portable diagnostics**, misalnya *PCR handheld* dan biosensor untuk daerah terpencil.

E. Latihan Soal

1. Penemuan apa yang menjadi titik awal lahirnya kesadaran tentang keberadaan mikroorganisme?
 - A. Teori kuman penyakit
 - B. Penemuan antibiotic
 - C. Penemuan mikroskop oleh Antonie van Leeuwenhoek
 - D. Penemuan PCR
 - E. Postulat Koch
2. Konsep *generatio spontanea* menyatakan bahwa...
 - A. Mikroorganisme berasal dari udara
 - B. Mikroorganisme muncul dari benda mati
 - C. Semua penyakit disebabkan oleh bakteri
 - D. Antibiotik dapat membunuh semua mikroba
 - E. Mikroorganisme hanya hidup di jaringan hewan
3. Louis Pasteur dikenal karena...
 - A. Menemukan agen penyebab antraks
 - B. Membuktikan teori kuman penyakit
 - C. Menyanggah *generatio spontanea* melalui eksperimen media pasteurisasi

- D. Mengembangkan metode Gram staining
- E. Menemukan antibiotik penisilin
- 4. Metode kultur bakteri pada medium padat pertama kali dikembangkan oleh...
 - A. Antonie van Leeuwenhoek
 - B. Louis Pasteur
 - C. Robert Koch
 - D. Alexander Fleming
 - E. Joseph Lister
- 5. *Postulat Koch* digunakan untuk...
 - A. Menjelaskan cara kerja antibiotic
 - B. Menentukan hubungan sebab akibat antara bakteri dan penyakit
 - C. Mengidentifikasi bakteri melalui biakan cair
 - D. Membuktikan keberadaan virus
 - E. Menentukan pola pewarnaan Gram
- 6. Spesies bakteri berikut termasuk flora normal usus, kecuali...
 - A. *Lactobacillus*
 - B. *Bifidobacterium*
 - C. *Bacteroides*
 - D. *Vibrio cholerae*
 - E. *Roseburia*
- 7. Ketidakseimbangan flora normal usus akibat terapi antibiotik dapat menyebabkan pertumbuhan berlebihan bakteri...
 - A. *Streptococcus pneumoniae*
 - B. *Clostridioides difficile*
 - C. *Mycobacterium tuberculosis*
 - D. *Staphylococcus epidermidis*
 - E. *Salmonella typhi*

8. Salah satu mekanisme bakteri menyebabkan penyakit adalah...
 - A. Produksi hormon metabolic
 - B. Pembentukan biofilm dan toksin
 - C. Menghambat absorpsi vitamin
 - D. Menghasilkan energi bagi sel epitel
 - E. Meningkatkan pH saluran cerna
9. Bakteri flora normal dapat mencegah kolonisasi patogen melalui mekanisme...
 - A. Memproduksi racun berbahaya
 - B. Menggantikan fungsi sistem imun
 - C. Bersaing memperebutkan nutrisi dan ruang ekologis
 - D. Menghentikan produksi SCFA
 - E. Menghambat pembentukan mukosa usus
10. Tantangan terbesar bakteriologi medis modern yang disebutkan dalam bab adalah...
 - A. Penurunan kualitas mikroskop
 - B. Resistensi antimikroba yang meningkat
 - C. Tidak tersedianya media kultur
 - D. Menurunnya jumlah tenaga kesehatan
 - E. Ketidakmampuan mengidentifikasi bakteri Gram negatif

BAB 2. KLASIFIKASI DAN NOMENKLATUR BAKTERI

Oleh: Ninda Devita

A. Pendahuluan

Klasifikasi dan nomenklatur bakteri merupakan bagian penting dalam ilmu mikrobiologi. Sistem klasifikasi bertujuan memahami hubungan kekerabatan dan perbedaan antarspesies bakteri. Sementara nomenklatur menyediakan bahasa ilmiah yang seragam untuk komunikasi global di bidang mikrobiologi klinik, lingkungan, dan industri.

Sistem pengelompokan bakteri terus mengalami perubahan seiring kemajuan teknologi. Klasifikasi dahulu didasarkan pada ciri morfologi sederhana seperti bentuk sel dan pewarnaan Gram. Saat ini, identifikasi dan klasifikasi bakteri banyak mengandalkan data molekuler. Pendekatan modern ini tidak hanya meningkatkan ketepatan identifikasi tetapi juga memperdalam pemahaman tentang evolusi dan hubungan filogenetik antar bakteri.

B. Prinsip dan Hierarki Taksonomi

Taksonomi merupakan cabang ilmu biologi yang berfungsi untuk mengelompokkan organisme, termasuk bakteri, berdasarkan kesamaan dan perbedaan karakteristiknya. Taksonomi terdiri dari tiga komponen utama yaitu klasifikasi, nomenklatur, dan identifikasi. Ketiganya saling berkaitan dan membentuk disiplin ilmu sistematika (*systematics*). Sedang yang berfokus pada evolusi, genetika, dan proses spesiasi organisme yang

sering disebut sebagai filogenetika (*phylogenetics*) (Pitt & Barer, 2012).

Klasifikasi bertujuan untuk mengelompokkan mikroorganisme secara teratur dan logis berdasarkan karakteristik tertentu, baik morfologi, fisiologi, biokimia, maupun genetik sehingga hubungan kekerabatan di antara mereka dapat dipahami. Dalam mikrobiologi, klasifikasi merupakan proses pengelompokan organisme ke dalam tingkatan taksonomi. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012; Sastry, 2021).

Nomenklatur berkaitan dengan pemberian nama yang sah dan konsisten kepada organisme. Perubahan dalam nomenklatur harus mengikuti aturan internasional yang telah disepakati. Nomenklatur memungkinkan komunikasi ilmiah yang jelas dan seragam di seluruh dunia (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012; Sastry, 2021).

Sementara itu, identifikasi merupakan penerapan praktis dari sistem klasifikasi untuk menentukan identitas suatu isolat bakteri. Identifikasi penting dalam konteks klinis untuk menegakkan diagnosis, menentukan terapi, serta mendukung upaya pencegahan infeksi. Dalam konteks klinis, mikrobiolog lebih sering berfokus pada identifikasi dibandingkan klasifikasi karena tujuannya mengenali penyebab infeksi secara cepat dan akurat. (Carol et al., 2016; Sastry, 2021)

Dalam sistem taksonomi, bakteri diklasifikasikan secara hierarkis ke dalam tingkatan berikut: Kingdom (Prokaryotae) → Division/Phylum (mis. Gracilicutes) → Class (mis. Betaproteobacteria) → Order (mis. Burkholderiales) → Family (mis. Burkholderiaceae) → Genus (mis. *Burkholderia*) → Species (mis. *Burkholderia cepacia*). (Carol et al., 2016; Sastry, 2021)

Hingga saat ini, belum ada satu sistem klasifikasi bakteri yang diakui secara universal. Namun *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* dan *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* tetap menjadi acuan utama yang diakui di seluruh dunia. Tata nama bakteri diatur oleh *International Code of Nomenclature of Prokaryotes (ICNP)* yang disusun oleh *International Committee on Systematic Bacteriology*. Nama bakteri dianggap sah apabila diterbitkan secara resmi dalam *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology (IJSEM)* melalui daftar validasi (Carol et al., 2016).

C. Teknik Identifikasi Bakteri

Metode identifikasi bakteri dapat dilakukan secara tidak langsung maupun langsung. Pendekatan tidak langsung umumnya menggunakan metode konvensional berbasis kultur dengan mengamati karakter fenotipik seperti morfologi, fisiologi, kimia, dan profil biokimia. Namun, metode ini memerlukan waktu 2–5 hari, sangat bergantung pada keterampilan laboran, membutuhkan banyak bahan, serta sering kali tidak mampu mengidentifikasi bakteri hingga tingkat spesies atau strain. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012).

Sebaliknya, pendekatan langsung bersifat *culture-independent*, memungkinkan deteksi mikroorganisme tertentu termasuk yang tidak dapat tumbuh pada media kultur. Untuk mengatasi keterbatasan metode fenotipik, teknik biologi molekuler kini banyak digunakan karena lebih cepat dan akurat. Tren terbaru menunjukkan bahwa kombinasi berbagai metode konvensional dan molekuler memberikan hasil identifikasi dan klasifikasi

mikroorganisme yang lebih presisi. (Carol et al., 2016; Franco-Duarte et al., 2019; Pitt & Barer, 2012).

1. Mikroskopi

Mikroskopi merupakan salah satu metode tertua sekaligus paling informatif dalam identifikasi bakteri. Gambar yang dihasilkan melalui mikroskopi memungkinkan analisis bentuk, pola pergerakan, serta klasifikasi objek biologis. Pewarnaan Gram tetap menjadi langkah dasar yang sangat penting karena mampu membedakan bakteri berdasarkan perbedaan struktur dinding selnya menjadi Gram-positif dan Gram-negatif. Teknik ini biasanya merupakan tahap pertama dalam menilai bakteri, baik yang berasal dari kultur maupun langsung dari spesimen klinis seperti urin. (Carol et al., 2016; Franco-Duarte et al., 2019; Pitt & Barer, 2012)

Selain pewarnaan Gram, pengamatan morfologi sel (termasuk bentuk, ukuran, dan susunan) memberikan petunjuk awal untuk mengarahkan suatu isolat ke kelompok biologis tertentu. Teknik mikroskopi tertentu diperlukan untuk kelompok spesifik seperti mikroskop lapang gelap digunakan untuk memvisualisasi *spirocheta*. Struktur lain seperti kapsul dapat ditunjukkan melalui pewarnaan negatif (misalnya dengan tinta India), dan pewarnaan Ziehl–Neelsen digunakan untuk mengidentifikasi bakteri tahan asam seperti *Mycobacterium*. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012)

Namun pengamatan mikroskopik memiliki beberapa keterbatasan seperti ukuran sel yang sangat kecil sering sulit dikenali, variasi ukuran prokariot yang luas membuat sebagian sel berada pada batas resolusi mikroskop cahaya, sel dapat terlewat ketika sampel

mengandung banyak partikel atau organisme yang jauh lebih besar; serta sulitnya membedakan sel hidup, sel mati, dan materi non-biologis dalam sampel alami. Analisis mikroskopis sebaiknya dikombinasikan dengan metode lainnya agar kemampuannya meningkat secara signifikan. (Madigan et al., 2006)

2. Kultur

Identifikasi bakteri secara fenotipik juga sangat bergantung pada pola pertumbuhan bakteri di media padat. Morfologi koloni (ukuran, bentuk, elevasi, warna, batas koloni, dan tingkat transparansi) sering kali khas untuk spesies tertentu. Perubahan pada media, seperti hemolisis pada agar darah, juga merupakan indikator diagnostik penting. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012)

Kondisi lingkungan pertumbuhan juga membantu membedakan spesies. Sebagai contoh, kemampuan bakteri tumbuh dalam kondisi aerob, anaerob, mikroaerofilik, atau dalam atmosfer tinggi CO₂. Media selektif yang mengandung faktor penghambat seperti garam empedu, antibiotik tertentu, atau pH ekstrem digunakan untuk memisahkan patogen dari flora normal, terutama pada spesimen dari saluran cerna atau saluran pernapasan. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012)

3. Uji Biokimia

Ketika pemeriksaan morfologi dan kultur belum cukup untuk mengidentifikasi bakteri hingga tingkat spesies, uji biokimia dilakukan untuk menilai kemampuan metabolik bakteri. Uji ini mencakup fermentasi berbagai karbohidrat (glukosa, laktosa, sukrosa, mannitol), produksi senyawa seperti indol dan

hidrogen sulfida, serta deteksi aktivitas enzim seperti oksidase, katalase, urease, gelatinase, dan lesitinase. (Carol et al., 2016; Pitt & Barer, 2012)

Saat ini, sebagian besar laboratorium mikrobiologi klinik telah beralih menggunakan panel uji komersial yang berisi berbagai uji biokimia dalam satu perangkat terpadu. Kit-kit ini tersedia untuk beragam kelompok bakteri sehingga proses identifikasi menjadi lebih cepat, terstandarisasi, dan tidak terlalu bergantung pada interpretasi subyektif analis. Salah satu perangkat identifikasi fenotip yang paling banyak digunakan adalah *Analytical Profile Index* (API). Sistem API 20E berisi 20 jenis pemeriksaan dengan substrat berbasis pH. Hasil masing-masing pengujian dinilai sebagai positif atau negatif. Hasil keseluruhan kemudian dibandingkan dengan sistem skor untuk menghasilkan profil analitis yang sesuai. API telah lama diandalkan untuk mengidentifikasi hampir 100 taksa bakteri. Hingga tahun 1992, uji ini masih dianggap sebagai baku emas dalam laboratorium mikrobiologi klinis. Keunggulan utamanya adalah basis data yang sangat luas, meskipun metode ini tetap memerlukan waktu inkubasi yang relatif lama. (Franco-Duarte et al., 2019)

4. MALDI-TOF MS (*Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-Of-Flight Mass Spectrometry*)

Pendekatan berbasis proteomik untuk identifikasi dan karakterisasi bakteri juga berkembang pesat. Metode yang paling menonjol adalah teknik berbasis *mass spectrometry* (MS), yang memungkinkan analisis cepat dan akurat tinggi terhadap protein khas yang

dihasilkan suatu strain bakteri. Pola peptida yang dihasilkan dari sel bakteri mengandung informasi yang dapat digunakan untuk identifikasi spesies. (Arbefeville et al., 2024; Carbonnelle et al., 2011; Franco-Duarte et al., 2019)

5. Sekuensing 16S rRNA

Polymerase Chain Reaction (PCR) memungkinkan amplifikasi cepat materi genetik dari jumlah sampel awal yang sangat kecil sehingga sangat sensitif untuk mendeteksi bakteri. Metode ini mampu memberikan identifikasi hingga tingkat genus pada >90% kasus dan 65-83% di tingkat spesies. Metode ini juga lebih cepat dibanding kultur. Namun, spesies yang sangat berkaitan dekat dan memiliki sekuens 16S rRNA hampir identik memerlukan target gen alternatif seperti *rpoB*, *tuf*, *gyrA*, *gyrB*, atau gen *heat-shock proteins*. (Franco-Duarte et al., 2019; Woo et al., 2008)

Saat ini sekuensing gen rRNA 16S dianggap sebagai baku emas untuk mengetahui hubungan filogenetik. Namun, teknik ini kurang akurat pada tingkat spesies sehingga memerlukan metode tambahan seperti hibridisasi DNA-DNA. Pemeriksaan terbaru menggunakan analisis multilokus dapat meningkatkan akurasi. (Rosselló-Móra & Amann, 2015)

6. Whole Genome Sequencing (WGS)

Whole-genome sequencing (WGS) memberikan informasi yang jauh lebih lengkap dibanding metode molekuler tradisional karena menganalisis keseluruhan genom. Informasi yang didapat termasuk pemetaan garis keturunan evolusioner, resistensi terhadap antibiotik,

serta penelusuran sumber dan pola penularan wabah. Kemajuan teknologi telah meningkatkan kecepatan analisis dan menurunkan biaya. Metode ini semakin dilirik untuk identifikasi patogen dan penentuan profil resistensi. (Franco-Duarte et al., 2019; Quainoo et al., 2017)

D. Sistem Klasifikasi Bakteri

Berdasarkan *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, bakteri dikelompokkan menjadi dua domain besar, yaitu *Eubacteria* dan *Archaeobacteria*. Keduanya memiliki perbedaan mendasar dalam struktur sel, komposisi dinding sel, dan mekanisme molekuler. *Eubacteria* merupakan kelompok bakteri klasik yang memiliki ciri tidak memiliki nukleus sejati, memiliki membran sel dengan lipid khas, memiliki mesin sintesis asam nukleat yang dapat dihambat secara selektif oleh antimikroba dan sebagian besar memiliki dinding sel yang mengandung peptidoglikan. Sedangkan *Archaeobacteria* tidak memiliki peptidoglikan pada dinding selnya dan memiliki karakteristik mirip sel eukariotik. Kedua kelompok ini kemudian diklasifikasikan kembali berdasar reaksinya terhadap pengecatan Gram. (Carol et al., 2016)

Eubacteria merupakan kelompok bakteri yang sangat beragam dan terbagi menjadi tiga kelompok utama berdasarkan struktur dinding selnya. *Eubacteria* Gram-negatif memiliki membran luar, ruang periplasma dengan peptidoglikan tipis. Sebaliknya, *Eubacteria* Gram-positif memiliki lapisan peptidoglikan tebal, *Eubacteria* tanpa dinding sel (*Mollicutes/Mycoplasma*)

tidak memiliki peptidoglikan, hanya dibatasi membran plasma. (Carol et al., 2016)

Archaea atau *Archaeobacteria* merupakan prokariot yang secara filogenetik berbeda dari *eubacteria* dan banyak ditemukan di lingkungan ekstrem. Organisme ini memiliki membran sel unik yang tersusun dari lipid isoprenoid diether, tidak memiliki peptidoglikan (beberapa memiliki pseudopeptidoglikan) dan mampu hidup pada kondisi ekstrem seperti suhu sangat tinggi, salinitas tinggi, atau lingkungan anaerob. (Carol et al., 2016)

Seiring kemajuan teknologi sekuensing, klasifikasi bakteri tidak lagi hanya mengandalkan morfologi dan pewarnaan Gram tetapi juga melibatkan kedekatan filogenetik berbasis DNA. (Pitt & Barer, 2012)

Actinobacteria merupakan kelompok bakteri Gram positif dengan kandungan GC tinggi yang mencakup banyak produsen antibiotik serta beberapa patogen penting. Kelompok ini meliputi *Actinomyces*, bakteri anaerob yang tidak tahan asam dan cenderung terfragmentasi menjadi bentuk kokus atau basil pendek; *Streptomyces*, yang membentuk miselium serta rantai konidia dan dikenal luas sebagai penghasil antibiotik; *Mycobacterium*, bakteri tahan asam dengan dinding sel kaya asam mikolat seperti *M. tuberculosis*; *Nocardia*, bakteri aerob yang sebagian bersifat tahan asam dan juga mengandung asam mikolat; serta *Corynebacterium*, basil pleomorfik Gram positif yang memiliki asam mikolat seperti *C. diphtheriae*. (Pitt & Barer, 2012)

Firmicutes merupakan kelompok besar bakteri Gram positif dengan GC rendah yang mencakup berbagai genus penting secara medis. Di dalamnya

termasuk *Streptococcus*, yaitu kokus Gram positif yang tumbuh berantai seperti *Streptococcus Pyogenes* dan *Streptococcus pneumoniae* yang cenderung ditemukan sebagai diplokokus. *Staphylococcus* terdiri dari kokus Gram positif yang membentuk kelompok tidak beraturan karena pembelahan sel terjadi pada berbagai bidang. Selain itu, terdapat *Mycoplasma* dan *Ureaplasma*, bakteri pleomorfik yang tidak memiliki peptidoglikan dalam dinding selnya. Genus *Veillonella*, yang merupakan bakteri gram negatif berbentuk kokus kecil seperti *Veillonella parvula*. Gram negatif basil pembentuk spora meskipun termasuk dalam kelompok Firmicutes secara filogenetik, bersifat Gram negatif dan merupakan kokus anaerob kecil yang biasanya berpasangan atau berkelompok. Kelompok ini juga mencakup basil pembentuk spora seperti *Bacillus* dan *Clostridium*. Selain itu, terdapat basil Gram positif non-pembentuk spora seperti *Erysipelothrix* dan *Lactobacillus* yang tumbuh dalam rantai atau filamen, serta *Listeria* yang memiliki kemampuan motilitas melalui flagela. (Pitt & Barer, 2012)

Kelompok *Proteobacteria* merupakan filum besar bakteri Gram negatif yang dibagi menjadi beberapa kelas berdasarkan karakteristik fisiologis dan filogenetik. *Alphaproteobacteria* mencakup bakteri penting seperti *Rickettsia* yang bersifat bergantung pada sel inang, serta *Brucella* dan *Bartonella* yang mampu hidup secara intraseluler fakultatif. *Betaproteobacteria* meliputi *Neisseria*, yaitu kokus Gram negatif yang biasanya berpasangan dan tampak sedikit memanjang, serta *Burkholderia* yang berbentuk basil, misalnya *B. pseudomallei*. *Gammaproteobacteria* adalah kelompok terbesar yang mencakup basil penting seperti

enterobacteria (*Escherichia coli*), *Pseudomonas*, *Legionella*, serta bakteri berbentuk batang melengkung seperti *Vibrio cholerae*. *Deltaproteobacteria* tidak memiliki spesies yang signifikan secara medis. Sementara itu, *Epsilonproteobacteria* terdiri dari basil melengkung atau spiral longgar, termasuk *Helicobacter* dan *Campylobacter*, yang keduanya dikenal sebagai patogen penting pada manusia. (Pitt & Barer, 2012)

Bacteroidetes adalah bakteri gram-negatif anaerob yang penting dalam flora usus. Sedangkan *Spirochaetes* adalah bakteri spiral dengan flagela internal (endoflagela) seperti misal *Treponema*, *Borrelia*. Kelompok terakhir adalah *Chlamydiae*. Kelompok ini meliputi parasit intraseluler obligat dengan siklus hidup khas.

E. Latihan Soal

1. Nomenklatur adalah bagian dari klasifikasi. Apakah tujuan kegiatan tersebut?
 - A. Mengidentifikasi bakteri tanpa melakukan uji laboratorium
 - B. Memberikan nama yang konsisten dan diakui secara internasional
 - C. Menentukan tingkat resistensi antibiotic
 - D. Menilai perubahan fisiologis bakteri
 - E. Mengelompokkan organisme berdasarkan morfologi
2. Manakah tingkatan taksonomi bakteri yang benar dari yang paling tinggi ke paling rendah?
 - A. Genus – Spesies – Famili – Ordo
 - B. Filum – Kingdom – Kelas – Ordo
 - C. Kingdom – Filum – Kelas – Ordo – Famili – Genus – Spesies

- D. Kingdom – Ordo – Filum – Kelas
 - E. Kingdom-Kelas-Ordo-Famili-Spesies
3. Teknik identifikasi berbasis proteomik yang menghasilkan pola spektrum massa khas suatu bakteri. Manakah teknik yang dimaksud?
- A. API 20E
 - B. PCR konvensional
 - C. MALDI-TOF MS
 - D. Pewarnaan Ziehl-Neelsen
 - E. Hanging-drop preparation
4. Apakah keunggulan utama sekuensing 16S rRNA dibandingkan identifikasi fenotipik adalah...
- A. Dapat digunakan untuk semua virus dan jamur
 - B. Lebih cepat dan mampu mengidentifikasi bakteri sulit tumbuh
 - C. Tidak membutuhkan PCR
 - D. Menggantikan semua metode kultur
 - E. Menghasilkan morfologi koloni yang jelas
5. Apakah perbedaan mendasar antara *Eubacteria* dan *Archaeobacteria*?
- A. *Archaeobacteria* memiliki peptidoglikan, *Eubacteria* tidak
 - B. *Eubacteria* hidup hanya di lingkungan ekstrem
 - C. *Archaeobacteria* tidak memiliki peptidoglikan dan memiliki membran unik
 - D. *Eubacteria* memiliki nukleus sejati
 - E. *Archaeobacteria* hanya dapat tumbuh pada media selektif
6. Apakah dasar utama klasifikasi bakteri pada sistem modern adalah...
- A. Bentuk koloni