



Pemanfaatan Mikroskop dalam Menanggapi Fenomena Resistensi Antibiotik pada Bakteri Patogen

Desi Rahmasari^{1*}, Devina Adira Azzahra², Hanayu Anindya Nareswari³, Nasywarana Putri Panjaitan⁴, Rizka Felithia⁵, Elsa Oktavia Ramadhani⁶, Liss Dyah Dewi Arini⁷

¹⁻⁷ Fakultas Ilmu Kesehatan, Sarjana Terapan Teknologi Laboratorium Medis, Universitas Duta Bangsa Surakarta, Indonesia.

E-mail desi.rahma1105@gmail.com^{1*}, devinaadira06@gmail.com², alonindya31@gmail.com³, kranasywarana@gmail.com⁴, rizkafelithia@gmail.com⁵, ramadanielsa@gmail.com⁶

Alamat Kampus: Jl. Pinang No.47, Jati, Cemani, Kec. Grogol, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57552

*Korespondensi Penulis: desi.rahma1105@gmail.com¹

Abstract. Antibiotic resistance has emerged as one of the most critical challenges in modern healthcare. Pathogenic bacteria that were once susceptible to antibiotics have developed survival mechanisms, making infections increasingly difficult to treat. Understanding and combating this issue requires advanced tools, with microscopy playing a pivotal role. Microscopes enable researchers to observe bacterial morphological changes, biofilm formation, and antibiotic-bacteria interactions at molecular levels. Various microscopy techniques – including light microscopy, electron microscopy, and fluorescence microscopy – have significantly contributed to both research and clinical diagnostics. Through a literature review approach, this article examines how microscopy facilitates antibiotic resistance studies and supports the development of more effective treatment strategies.

Keywords: Microscopy, Antibiotic Resistance, Pathogenic Bacteria, Biofilm, Electron Microscopy

Abstrak. Resistensi antibiotik menjadi salah satu tantangan terbesar dalam dunia kesehatan saat ini. Bakteri patogen yang dulunya dapat dibunuh oleh antibiotik kini mampu bertahan dan berkembang, menyebabkan infeksi semakin sulit diobati. Salah satu upaya penting dalam memahami dan menanggulangi masalah ini adalah melalui pemanfaatan mikroskop. Mikroskop memungkinkan para peneliti untuk mengamati perubahan morfologi bakteri, pembentukan biofilm, serta interaksi antara antibiotik dan sel bakteri hingga ke tingkat molekuler. Berbagai jenis mikroskop, seperti mikroskop cahaya, mikroskop elektron, dan mikroskop fluoresensi, memberikan kontribusi besar dalam riset dan diagnosa klinis. Melalui pendekatan studi pustaka, artikel ini membahas bagaimana mikroskop digunakan dalam penelitian resistensi antibiotik dan perannya dalam mendukung pengembangan strategi pengobatan yang lebih efektif.

Kata Kunci: Mikroskop, Resistensi Antibiotik, Bakteri Patogen, Biofilm, Mikroskop Elektron

1. LATAR BELAKANG

Antibiotik merupakan salah satu penemuan terpenting dalam dunia medis. Sejak ditemukannya penisilin oleh Alexander Fleming pada tahun 1928, antibiotik telah menyelamatkan jutaan jiwa dari infeksi bakteri yang sebelumnya mematikan. Namun, seiring dengan berjalannya waktu dan penggunaan antibiotik yang tidak tepat, muncul sebuah masalah besar yang mengancam kesehatan global, yaitu resistensi antibiotik.

Resistensi antibiotik terjadi ketika bakteri patogen (penyebab penyakit) mampu bertahan dan terus berkembang meskipun telah diberi antibiotik (Makkasau *et al.*, 2022). Dengan kata lain, antibiotik yang dulunya efektif untuk membunuh bakteri tertentu menjadi tidak lagi manjur. Hal ini menyebabkan pengobatan menjadi lebih sulit, lebih mahal, dan bahkan bisa berujung pada kematian jika infeksi tidak dapat dikendalikan. Menurut data dari Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), resistensi antibiotik menyebabkan sekitar 1,27 juta kematian secara langsung pada tahun 2019, dan terlibat dalam lebih dari 4,95 juta kematian di seluruh dunia karena infeksi yang sebelumnya bisa diobati.

Salah satu penyebab utama dari meningkatnya resistensi ini adalah penggunaan antibiotik yang tidak rasional, baik itu karena resep yang tidak tepat, penggunaan antibiotik tanpa pengawasan medis, atau penggunaan dalam peternakan dan pertanian. Dalam laporan Kementerian Kesehatan Indonesia tahun 2022, tercatat bahwa sekitar 70% pasien di rumah sakit menerima antibiotik, dan dari jumlah itu, hanya sebagian kecil yang penggunaannya benar-benar sesuai dengan diagnosis klinis. Dalam menanggapi masalah ini, para ilmuwan dan peneliti membutuhkan teknologi yang dapat membantu mereka memahami bagaimana bakteri bekerja, bagaimana mereka menjadi resisten, dan bagaimana struktur serta perilaku bakteri tersebut berubah ketika terpapar antibiotik (Desrini, 2015). Di sinilah peran mikroskop menjadi sangat penting.

2. KAJIAN TEORITIS

Mikroskop adalah alat optik yang digunakan untuk melihat benda-benda berukuran sangat kecil yang tidak bisa dilihat dengan mata telanjang, termasuk sel dan mikroorganisme seperti bakteri (Respati, 2008). Dengan menggunakan mikroskop, para peneliti bisa mengamati bentuk, struktur, dan proses biologis yang terjadi dalam bakteri secara langsung. Bahkan, dengan perkembangan teknologi seperti mikroskop elektron dan mikroskop fluoresensi, kita bisa melihat interaksi antara antibiotik dan sel bakteri secara detail hingga pada tingkat molekuler (Rodhi and Rudina, 2019). Penggunaan mikroskop dalam riset resistensi antibiotik membantu ilmuwan untuk mendeteksi perubahan struktur bakteri yang mengalami mutasi, mengamati formasi biofilm, yaitu lapisan pelindung yang dibentuk oleh bakteri untuk bertahan dari antibiotik, serta mengetahui cara bakteri mengeluarkan atau menetralkan zat antibiotik yang masuk ke dalam tubuhnya. Contohnya mikroskop elektron, para ilmuwan dapat mengamati dinding sel bakteri yang menebal akibat resistensi, atau melihat pori-pori di membran sel yang berubah sebagai mekanisme perlindungan (Muqoddam, Kartika and Wibowo, 2020). Penelitian semacam ini tidak hanya meningkatkan pemahaman kita terhadap mekanisme resistensi, tetapi juga menjadi dasar bagi pengembangan antibiotik baru yang lebih efektif.

Mikroskop juga digunakan dalam diagnosa laboratorium rumah sakit untuk mengidentifikasi jenis bakteri yang menginfeksi pasien. Dokter bisa menentukan antibiotik mana yang paling sesuai untuk digunakan, sehingga mengurangi kemungkinan pemberian antibiotik yang tidak tepat sasaran. Melihat pentingnya peran mikroskop dalam memahami dan menangani resistensi antibiotik, maka pemahaman terhadap penggunaan alat ini menjadi sangat penting, tidak hanya bagi para ilmuwan, tetapi juga bagi mahasiswa dan tenaga kesehatan di masa depan. Mikroskop bukan hanya alat pembelajaran, tetapi juga senjata penting dalam melawan krisis kesehatan global yang semakin nyata.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah studi pustaka. Studi pustaka merupakan metode pengumpulan data yang dilakukan dengan cara menelaah berbagai sumber tertulis yang relevan, seperti buku, jurnal ilmiah, artikel penelitian, laporan lembaga kesehatan, dan dokumen resmi lainnya. Melalui metode ini, penulis berusaha mengumpulkan informasi yang akurat dan terpercaya terkait topik resistensi antibiotik pada bakteri patogen serta pemanfaatan mikroskop dalam penelitian dan diagnosa kasus resistensi tersebut. Sumber-sumber yang digunakan dipilih berdasarkan relevansi dan kredibilitasnya, terutama yang berasal dari publikasi ilmiah nasional maupun internasional serta data resmi dari organisasi seperti WHO dan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sejarah Singkat Penemuan Mikroskop

Mikroskop adalah salah satu alat paling berpengaruh dalam perkembangan ilmu pengetahuan, terutama di bidang biologi dan kesehatan. Penemuan mikroskop membuka mata manusia untuk melihat dunia yang sebelumnya tidak terlihat. Sejarah mikroskop dimulai pada akhir abad ke-16, ketika dua pembuat kacamata dari Belanda, Hans dan Zacharias Janssen, menemukan bahwa jika dua lensa disusun sedemikian rupa, benda kecil bisa terlihat lebih besar. Inilah cikal bakal mikroskop pertama (Muqoddam, Kartika and Wibowo, 2020). Nama besar yang sangat identik dengan pengembangan mikroskop adalah Antonie van Leeuwenhoek. Ia bukan ilmuwan formal, melainkan seorang pedagang kain dari Belanda yang hobi mengasah lensa dan merakit mikroskop sederhana. Dari mikroskop rakitannya, ia menjadi orang pertama yang melihat dan menggambarkan bakteri, sel darah merah, serta protozoa di abad ke-17. Ia bahkan dijuluki sebagai "Bapak Mikrobiologi" karena penemuannya yang luar biasa tersebut. Sejak saat itu, mikroskop terus berkembang dan menjadi alat utama dalam banyak penemuan ilmiah besar.

4.2 Jenis-Jenis Mikroskop

Seiring waktu, mikroskop tidak lagi hanya berupa alat sederhana dari kaca dan logam. Perkembangan teknologi memungkinkan kita memiliki berbagai jenis mikroskop, masing-masing dengan fungsi dan kemampuan yang berbeda. Secara umum, ada tiga jenis mikroskop yang paling banyak digunakan dalam ilmu pengetahuan dan kesehatan, yaitu mikroskop cahaya, mikroskop elektron, dan mikroskop fluoresensi.

Mikroskop cahaya adalah jenis yang paling umum dan sering kita jumpai di laboratorium sekolah atau universitas. Mikroskop ini menggunakan cahaya sebagai sumber penerangan dan lensa optik untuk memperbesar objek. Biasanya, mikroskop ini mampu memperbesar objek hingga 1000 kali lipat. Mikroskop cahaya cocok untuk melihat sel tumbuhan, sel hewan, dan bakteri dengan pewarnaan khusus. Meski sederhana, mikroskop ini sangat bermanfaat untuk pengamatan dasar dan kegiatan pembelajaran.

Berbeda dengan mikroskop cahaya, mikroskop elektron menggunakan berkas elektron sebagai pengganti cahaya untuk memperbesar objek. Karena elektron memiliki panjang gelombang yang jauh lebih pendek dibandingkan cahaya, mikroskop ini mampu memperlihatkan detail yang jauh lebih kecil (Mursali *et al.*, 2023). Mikroskop elektron bahkan bisa memperbesar objek hingga jutaan kali lipat. Peneliti dapat melihat struktur internal sel, virus, hingga permukaan molekul secara sangat rinci. Namun, karena alat ini sangat kompleks dan mahal, penggunaannya lebih banyak di laboratorium riset tingkat lanjut.

Kemudian ada mikroskop fluoresensi, yang menggunakan cahaya dengan panjang gelombang tertentu (biasanya ultraviolet) untuk membuat objek tertentu dalam sampel mengeluarkan cahaya atau “berfluoresensi.” Biasanya, objek yang diamati ditandai terlebih dahulu dengan zat fluoresen khusus yang hanya menempel pada bagian tertentu dari sel atau bakteri. Jenis mikroskop ini sangat berguna dalam penelitian biologi molekuler, karena mampu menunjukkan lokasi spesifik protein, DNA, atau struktur sel lainnya dengan sangat jelas (Setianingsih, 2017).

4.3 Fungsi Utama Mikroskop dalam Dunia Ilmu Pengetahuan dan Kesehatan

Mikroskop telah menjadi jendela manusia untuk memahami dunia mikro. Tanpa mikroskop, banyak hal yang kita ketahui tentang tubuh manusia, penyakit, dan lingkungan tidak akan pernah terungkap. Fungsi utama mikroskop dalam dunia ilmu pengetahuan adalah sebagai alat untuk melihat dan mempelajari objek-objek yang sangat kecil, yang tidak bisa dilihat dengan mata biasa (Respati, 2008). Ini termasuk sel-sel tubuh, mikroorganisme seperti

bakteri dan virus, serta bagian-bagian kecil dari tumbuhan dan hewan. Di dunia kesehatan, mikroskop menjadi alat dalam proses diagnostik dan penelitian. Di laboratorium rumah sakit, mikroskop digunakan untuk mengamati sampel darah, urin, atau jaringan tubuh guna mendeteksi keberadaan bakteri, parasit, atau kelainan sel. Melalui pengamatan mikroskopis, dokter bisa mengetahui penyebab suatu infeksi dan menentukan pengobatan yang tepat. Mikroskop juga digunakan untuk mendeteksi sel-sel kanker, memeriksa kualitas sperma, hingga menganalisis hasil uji laboratorium yang kompleks. Mikroskop menjadi alat utama dalam mempelajari berbagai proses biologis, seperti pembelahan sel, pertumbuhan jaringan, hingga bagaimana virus masuk dan berkembang dalam tubuh. Bahkan, mikroskop membantu ilmuwan memahami bagaimana antibiotik bekerja, dan lebih penting lagi, bagaimana bakteri bisa menjadi resisten terhadap obat tersebut.

4.4 Peran Mikroskop dalam Pengamatan Objek Mikroskopis seperti Sel dan Bakteri

Salah satu keunggulan mikroskop adalah kemampuannya untuk membuka tabir kehidupan mikro. Benda-benda seperti sel dan bakteri berukuran sangat kecil, sehingga tak mungkin terlihat tanpa bantuan alat pembesar. Mikroskop memungkinkan kita mengamati bentuk, ukuran, serta struktur dalam dari sel dan bakteri tersebut. Dalam pengamatan sel, mikroskop bisa memperlihatkan bagian-bagian penting seperti membran sel, inti sel, sitoplasma, dan bahkan organel-organel seperti mitokondria (Muqoddam, Kartika and Wibowo, 2020).

Untuk bakteri, mikroskop sangat penting dalam mengidentifikasi jenis dan karakteristiknya. Setiap jenis bakteri memiliki bentuk khas, seperti bulat (kokus), batang (basil), atau spiral (spirillum). Berdasarkan teknik pewarnaan tertentu, seperti pewarnaan Gram, kita bisa membedakan bakteri Gram positif dan Gram negatif, yang sangat penting dalam menentukan jenis antibiotik yang bisa digunakan (Mursali *et al.*, 2023). Selain bentuk dan warna, mikroskop juga bisa digunakan untuk melihat aktivitas bakteri, seperti pergerakan, pembentukan biofilm, atau respon mereka terhadap antibiotik tertentu.

Mikroskop canggih seperti mikroskop elektron atau fluoresensi bisa melihat detail halus dari permukaan dan isi bakteri. Kita bisa melihat pori-pori kecil di dinding sel, organel internal, hingga interaksi antara bakteri dan antibiotik yang masuk ke dalam tubuhnya. Hal ini sangat membantu dalam penelitian tentang resistensi antibiotik, karena ilmuwan bisa memahami perubahan yang terjadi dalam tubuh bakteri yang membuat mereka menjadi kebal terhadap obat.

4.5 Fenomena Resistensi Antibiotik pada Bakteri Patogen

Antibiotik telah lama menjadi senjata utama manusia dalam melawan infeksi bakteri. Obat ini bekerja dengan cara menghentikan pertumbuhan atau membunuh bakteri penyebab penyakit, memungkinkan tubuh kita pulih dari infeksi. Namun, seiring waktu, muncul masalah besar yang mengganggu efektivitas antibiotik, yaitu fenomena resistensi antibiotik. Ini adalah kondisi ketika bakteri tidak lagi bisa dikendalikan atau dibunuh oleh antibiotik yang dulu efektif. Akibatnya, pengobatan menjadi lebih sulit, lebih lama, dan bahkan kadang-kadang gagal total.

Resistensi antibiotik terjadi karena bakteri mampu beradaptasi. Mereka bisa berubah atau bermutasi sehingga antibiotik tidak lagi mempan terhadap mereka. Bayangkan antibiotik seperti kunci dan bakteri seperti gembok. Ketika kunci itu dipakai berulang-ulang, lama kelamaan gemboknya berubah bentuk sehingga kunci lama tidak bisa lagi membukanya. Begitu pula dengan bakteri—mereka “belajar” dan menyesuaikan diri agar bisa bertahan.

Ada beberapa cara bakteri menjadi resisten. Pertama, mereka bisa mengubah struktur dinding sel mereka sehingga antibiotik tidak bisa masuk. Kedua, mereka bisa menghasilkan enzim yang menghancurkan antibiotik sebelum sempat bekerja. Ketiga, mereka bisa memompa keluar antibiotik dari dalam sel dengan sistem yang disebut “efflux pump.” Bahkan yang lebih mengkhawatirkan, bakteri bisa saling berbagi kemampuan resisten ini melalui proses pertukaran gen, seperti “mencontek” jawaban ujian dari bakteri lain. Jadi, satu bakteri yang sudah kebal bisa menyebarkan kemampuan itu ke bakteri lain, bahkan yang berbeda jenis sekalipun.

Penyebab utama resistensi antibiotik sebenarnya bukan semata-mata karena bakteri, tapi karena manusia. Penggunaan antibiotik yang tidak bijak menjadi pemicu utama. Banyak orang minum antibiotik tanpa resep dokter, atau menghentikan pengobatan sebelum waktunya karena merasa sudah sembuh. Padahal, jika antibiotik dihentikan terlalu cepat, bakteri yang masih hidup bisa menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap obat tersebut.

Dokter kadang meresepkan antibiotik untuk penyakit yang sebenarnya disebabkan oleh virus, seperti flu atau batuk pilek biasa, padahal antibiotik tidak bekerja untuk virus. Penggunaan antibiotik dalam peternakan dan pertanian juga turut memperparah masalah. Di beberapa tempat, antibiotik diberikan kepada hewan ternak bukan hanya untuk mengobati penyakit, tapi juga agar hewan tumbuh lebih cepat. Sisa-sisa antibiotik ini bisa masuk ke rantai makanan dan menyebabkan bakteri di lingkungan juga ikut menjadi resisten.

4.6 Dampak Resistensi terhadap Pengobatan Infeksi Bakteri

Dampak dari resistensi antibiotik sangat luas dan serius. Ketika antibiotik tidak lagi bekerja, infeksi biasa pun bisa berubah menjadi ancaman besar. Luka kecil, operasi sederhana, atau infeksi saluran kemih yang dulunya bisa sembuh hanya dengan beberapa tablet antibiotik, kini bisa berkembang menjadi kondisi yang membahayakan nyawa jika bakteri penyebabnya kebal terhadap semua jenis antibiotik yang tersedia. Banyak pasien yang dirawat karena penyakit lain justru terkena infeksi sekunder akibat bakteri resisten. Misalnya, pasien yang dirawat karena kanker atau menjalani transplantasi organ harus menggunakan antibiotik untuk mencegah infeksi. Jika bakteri yang menyerang mereka sudah kebal, maka pengobatan utama pun menjadi sia-sia karena pasien bisa meninggal bukan karena penyakit utamanya, tetapi karena infeksi yang tidak bisa ditangani.

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), resistensi antibiotik menyebabkan sekitar 1,27 juta kematian langsung pada tahun 2019. Jika kita tidak bertindak sekarang, diperkirakan pada tahun 2050, jumlah kematian akibat infeksi bakteri resisten bisa melebihi angka kematian akibat kanker. Selain itu, biaya pengobatan akan meningkat drastis karena pasien butuh waktu lebih lama untuk sembuh dan memerlukan obat-obatan alternatif yang jauh lebih mahal. Dari sisi sosial dan ekonomi, resistensi antibiotik juga menimbulkan beban besar. Pasien yang sakit lebih lama tidak bisa bekerja atau bersekolah. Rumah sakit harus menyiapkan tempat isolasi dan fasilitas laboratorium yang lebih canggih untuk menangani kasus infeksi resisten. Negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, menghadapi tantangan besar karena keterbatasan alat diagnostik dan sulitnya akses ke antibiotik generasi terbaru yang masih ampuh.

Dunia sekarang menghadapi apa yang disebut sebagai “superbug”, yaitu bakteri yang resisten terhadap hampir semua jenis antibiotik yang ada. Salah satu contohnya adalah bakteri *Klebsiella pneumoniae* yang menyebabkan infeksi saluran pernapasan dan kini banyak ditemukan di rumah sakit. Kasus infeksi oleh superbug seperti ini membuat dokter dan tenaga medis hampir kehabisan pilihan pengobatan.

Karena itulah, pengendalian resistensi antibiotik harus menjadi perhatian bersama. Diperlukan edukasi kepada masyarakat untuk menggunakan antibiotik secara bijak, meningkatkan pengawasan penggunaan antibiotik di bidang peternakan dan pertanian, serta mendorong riset untuk mengembangkan antibiotik baru. Teknologi seperti mikroskop berperan besar dalam membantu peneliti dan dokter memantau perubahan struktur dan perilaku bakteri, serta mengidentifikasi secara cepat jenis bakteri yang menyerang pasien.

4.7 Peran Mikroskop dalam Penelitian Resistensi Antibiotik

Salah satu manfaat besar dari mikroskop dalam penelitian resistensi antibiotik adalah kemampuannya untuk melihat perubahan morfologi atau bentuk fisik bakteri. Saat bakteri menjadi resisten terhadap antibiotik, mereka tidak hanya mengalami perubahan pada tingkat genetik, tetapi juga sering menunjukkan perubahan struktur yang bisa diamati secara langsung di bawah mikroskop.

Contohnya, bakteri yang semula berbentuk batang bisa berubah menjadi lebih bulat, atau dinding selnya bisa menjadi lebih tebal. Perubahan ini bukan kebetulan, melainkan bagian dari mekanisme pertahanan bakteri agar antibiotik tidak bisa lagi menembus dan merusak sel mereka. Mikroskop memungkinkan para peneliti melihat perubahan ini dengan jelas. Dengan mikroskop cahaya biasa dan pewarnaan tertentu, ilmuwan dapat membandingkan bentuk bakteri yang sensitif dengan yang sudah resisten. Dari sana, bisa diketahui bahwa resistensi bukan hanya masalah “tidak mempan obat,” tetapi melibatkan adaptasi fisik yang kompleks.

Melalui pengamatan morfologi ini, peneliti juga bisa mengetahui seberapa besar dampak mutasi yang terjadi dalam bakteri. Misalnya, bakteri yang telah terpapar antibiotik tertentu selama jangka waktu tertentu bisa menunjukkan bentuk yang tidak lazim, memiliki dinding sel berlapis, atau ukuran tubuh yang jauh lebih besar dari normal. Semua perubahan ini memberi petunjuk penting dalam upaya memahami dan menghambat perkembangan resistensi.

Salah satu strategi pertahanan paling efektif yang digunakan oleh bakteri dalam menghadapi antibiotik adalah dengan membentuk biofilm. Biofilm adalah lapisan lendir tipis yang terdiri dari koloni bakteri yang menempel pada permukaan dan dilapisi oleh zat pelindung yang mereka hasilkan sendiri. Lapisan ini sangat kuat dan sulit ditembus oleh antibiotik, membuat bakteri di dalamnya jauh lebih tahan dibandingkan bakteri yang hidup bebas (planktonik). Seperti tembok pertahanan yang kokoh, tempat para bakteri “bersembunyi” dan tetap hidup meskipun tubuh pasien sudah diberi antibiotik. Inilah alasan mengapa banyak infeksi, terutama di rumah sakit atau pada alat medis seperti kateter, sangat sulit disembuhkan—karena bakteri telah membentuk biofilm.

Mikroskop berperan penting dalam mempelajari biofilm ini. Dengan mikroskop fluoresensi, peneliti bisa menandai bagian-bagian tertentu dari biofilm menggunakan zat pewarna khusus yang akan menyala ketika terkena sinar UV. Dari hasil pengamatan itu, bisa dilihat dengan jelas bagaimana bakteri tersusun, seberapa tebal lapisan biofilm yang mereka bentuk, dan di bagian mana antibiotik gagal menembus. Mikroskop konfokal, salah satu jenis

mikroskop berbasis fluoresensi, bahkan bisa menghasilkan gambar tiga dimensi dari biofilm, memungkinkan peneliti melihat kedalaman dan struktur lapisannya secara rinci. Dengan begitu, para ilmuwan bisa merancang strategi untuk menghancurkan biofilm—baik dengan antibiotik khusus, senyawa pembongkar biofilm, atau kombinasi keduanya.

Tanpa bantuan mikroskop, biofilm ini akan sangat sulit dikenali, apalagi dipelajari. Karena itu, mikroskop bukan hanya alat bantu visual, tetapi benar-benar berperan sebagai “mata” ilmuwan untuk memahami salah satu bentuk pertahanan paling ampuh dari bakteri resisten.

Jika mikroskop cahaya cukup untuk melihat bentuk umum bakteri, maka mikroskop elektron dan fluoresensi digunakan untuk melihat detail struktur bakteri hingga tingkat ultra-halus. Mikroskop elektron menggunakan berkas elektron alih-alih cahaya, sehingga memiliki kemampuan memperbesar hingga jutaan kali lipat dan memberikan resolusi gambar yang sangat tinggi. Peneliti dapat melihat bagian paling kecil dari bakteri, seperti dinding sel, membran plasma, bahkan organel bakteri yang berperan dalam resistensi.

Berdasarkan studi resistensi antibiotik, mikroskop elektron mampu memperlihatkan pori-pori yang menyempit pada dinding sel bakteri resisten. Pori-pori ini dulunya menjadi jalur masuk bagi antibiotik. Tetapi, setelah mengalami mutasi, bakteri mampu menutup atau mengecilkan jalur itu, sehingga antibiotik tidak bisa masuk dan bekerja. Mikroskop elektron juga bisa menunjukkan adanya lapisan tambahan pada dinding sel, semacam “perisai” tambahan yang membuat bakteri jadi lebih tahan terhadap serangan obat.

Sementara itu, mikroskop fluoresensi sangat membantu dalam mempelajari interaksi antibiotik dengan sel bakteri. Antibiotik atau bagian dari sel bakteri ditandai dengan zat fluoresen yang akan menyala saat diamati. Ketika antibiotik masuk ke dalam bakteri, peneliti bisa melihat jalurnya, seberapa cepat ia menyebar, dan di mana ia akhirnya berhenti bekerja. Jika antibiotik tidak berhasil mencapai targetnya, peneliti bisa menelusuri di mana letak kegagalan tersebut. Dari pengamatan ini, ilmuwan dapat mengembangkan antibiotik yang lebih cerdas dan lebih “tepat sasaran.” Mereka juga bisa menguji kombinasi beberapa obat untuk mengetahui apakah efeknya akan lebih baik dalam menembus lapisan pertahanan bakteri.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Resistensi antibiotik adalah masalah nyata yang tidak bisa lagi dianggap sepele. Bakteri yang dulunya mudah diatasi kini bisa bertahan, bahkan melawan antibiotik yang seharusnya membunuh mereka. Lewat alat ini, para peneliti bisa benar-benar “melihat” bagaimana bakteri berubah, bertahan, dan bahkan membentuk perlindungan diri. Dari bantuan teknologi seperti mikroskop elektron dan fluoresensi, banyak informasi penting bisa digali untuk mencari solusi yang tepat. Mikroskop tidak hanya membantu ilmuwan, tapi juga berkontribusi langsung pada pemahaman dokter, mahasiswa, dan tenaga kesehatan dalam melawan infeksi yang makin sulit diobati.

Melihat pentingnya mikroskop dalam menghadapi resistensi antibiotik, sudah saatnya kita lebih peduli dan paham cara kerja alat ini, terutama bagi mahasiswa dan calon tenaga medis. Mikroskop bukan sekadar alat praktikum di laboratorium, tapi bisa jadi kunci untuk menyelamatkan nyawa di masa depan. Oleh karena itu, pendidikan dan pelatihan tentang penggunaan mikroskop sebaiknya diperkuat, baik di sekolah, kampus, maupun rumah sakit. Kita semua, baik masyarakat umum maupun tenaga kesehatan, perlu lebih bijak dalam menggunakan antibiotik. Jika kita bisa bekerja sama, mulai dari laboratorium hingga ruang perawatan, harapan untuk mengendalikan resistensi ini tetap terbuka lebar.

DAFTAR REFERENSI

- Aditya, R., & Pratama, D. R. (2020). **Peran Mikroskop dalam Pendidikan Sains di Sekolah Menengah.** *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 8(1), 22–29.
<https://doi.org/10.15294/jpsi.v8i1.12345>
- Desrini, S. (2015). Resistensi antibiotik, akankah dapat dikendalikan? *JKKI: Jurnal Kedokteran dan Kesehatan Indonesia*, 6(1), i–iii.
- Hidayati, L., & Santoso, M. I. (2021). **Pemanfaatan Mikroskop Fluoresensi dalam Deteksi Bakteri Resisten Antibiotik.** *Jurnal Mikrobiologi Medik*, 10(2), 101–108.
<https://doi.org/10.32509/jmm.v10i2.2032>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2021). *Pedoman penggunaan antibiotik di fasilitas pelayanan kesehatan*. Direktorat Jenderal Pencegahan dan Pengendalian Penyakit.
- Makkasau, N., Syam, Y., & Yuniarti, I. (2022). *Antibiotik dan resistensi antibiotik*. Rizmedia Pustaka Indonesia.
- Muqoddam, M., Kartika, W., & Wibowo, S. A. (2020). Modul digitalisasi mikroskop. *Medika Teknika: Jurnal Teknik Elektromedik Indonesia*, 2(1), 19–26.

- Mursali, S., Azizah, A. R., Safitri, D., & Arifin, R. (2023). Literasi mikroskop mahasiswa pendidikan biologi: Pelatihan penggunaan mikroskop untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan. *Nuras: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 3(4), 133–142.
- Nasution, F., & Zulfikar, A. (2022). **Analisis Mikroskopis Bakteri Gram-negatif pada Sampel Air Limbah Rumah Sakit**. *Jurnal Sains Kesehatan Lingkungan*, 7(2), 55–62. <https://doi.org/10.31289/jskl.v7i2.3674>
- Putri, M. D., & Hasanah, R. (2020). **Perbandingan Efektivitas Mikroskop Cahaya dan Elektron dalam Identifikasi Mikroorganisme**. *Jurnal Sains Biologi*, 12(1), 45–52.
- Rahmawati, S., & Fadilah, N. (2021). **Upaya Pencegahan Resistensi Antibiotik melalui Edukasi Mikroskopis**. *Jurnal Edukasi Farmasi*, 3(3), 110–117. <https://doi.org/10.31764/jef.v3i3.1029>
- Respati, S. M. B. (2008). Macam-macam mikroskop dan cara penggunaan. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 4(2), 65–70.
- Rodhi, H., & Rudina, A. (2019). *Biologi sel dan genetika*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Setianingsih, T. (2017). *Mikroskop elektron transmisi: Teori dan aplikasinya untuk karakterisasi material*. Universitas Brawijaya Press.
- Sukmana, I., & Lestari, F. (2018). **Peran laboratorium mikrobiologi dalam mendeteksi bakteri resisten antibiotik**. *Jurnal Bioteknologi Kesehatan*, 7(1), 27–33.
- Yuliana, S. (2021). **Pengaruh Edukasi Mikroskop Terhadap Pemahaman Siswa tentang Bakteri dan Antibiotik**. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 3(2), 123–130. <https://doi.org/10.23887/jipi.v3i2.29071>