

## Perkembangan Terapi Berbasis Senyawa Alam Dalam Pengobatan Infeksi: Kajian Kimia Biologi

### *The Development of Natural Compound-Based Therapy in the Treatment of Infections: A Chemical Biology Study*

Cut Novrita Rizki<sup>1\*</sup>, Syakia Tursina<sup>1</sup>, Ratih Purwanti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tadris Biologi/Fakultas Agama Islam, Universitas Muhammadiyah Aceh, Banda Aceh, Indonesia.

<sup>2</sup>Prodi D3/ Farmasi/Politeknik Kesehatan Permata, Yogyakarta, Indonesia.

\*Email: cut.novritarizki@unmuha.ac.id

---

#### **Abstract**

*Infectious diseases remain one of the leading causes of morbidity and mortality worldwide. The increasing resistance of microorganisms to conventional antibiotics has driven the development of alternative therapeutic approaches based on natural compounds. This article aims to review recent advances in natural compound-based therapies for the treatment of infectious diseases from a chemical biology perspective. The study employed a literature review method, analyzing scientific articles and books published between 2018 and 2025. The findings indicate that bioactive compounds, including flavonoids, alkaloids, terpenoids, phenolic compounds, essential oils, and antimicrobial peptides, exhibit antimicrobial activities through various mechanisms, such as disrupting microbial cell membranes, inhibiting protein synthesis, preventing biofilm formation, and modulating quorum sensing. Furthermore, advances in nanoencapsulation technology and the combination of natural compounds with conventional antibiotics have enhanced therapeutic efficacy while reducing microbial resistance. From a chemical biology perspective, the relationship between chemical structure and biological activity of natural compounds serves as a fundamental basis for the development of future antimicrobial drug candidates. Therefore, natural compound-based therapies hold significant promise as safer and more effective alternatives for the treatment of infectious diseases.*

**Keywords:** *natural compounds; antimicrobial agents; antibiotic resistance; chemical biology; infectious disease therapy.*

#### **Abstrak**

Penyakit infeksi masih menjadi salah satu penyebab utama morbiditas dan mortalitas di dunia. Peningkatan resistensi mikroorganisme terhadap antibiotik konvensional mendorong pengembangan terapi alternatif berbasis senyawa alam. Artikel ini bertujuan mengkaji perkembangan terapi berbasis senyawa alam dalam pengobatan infeksi dari perspektif kimia biologi. Metode yang digunakan berupa studi literatur terhadap artikel ilmiah dan buku terbitan tahun 2018–2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa senyawa bioaktif seperti flavonoid, alkaloid, terpenoid, fenolik, minyak atsiri, dan peptida antimikroba memiliki aktivitas antimikroba melalui berbagai mekanisme, antara lain kerusakan membran sel mikroba, penghambatan sintesis protein, inhibisi pembentukan biofilm, serta modulasi quorum sensing. Perkembangan teknologi nanoenkapsulasi dan kombinasi senyawa alam dengan antibiotik modern turut meningkatkan efektivitas terapi dan menurunkan resistensi mikroba. Berdasarkan kajian kimia biologi, hubungan antara struktur kimia dan aktivitas biologis senyawa alam menjadi dasar penting dalam pengembangan kandidat obat antimikroba masa depan. Dengan

demikian, terapi berbasis senyawa alam memiliki prospek besar sebagai alternatif pengobatan infeksi yang lebih aman dan efektif.

**Kata Kunci:** senyawa alam; antimikroba; resistensi antibiotik; kimia biologi; terapi infeksi

## 1. PENDAHULUAN

Penyakit infeksi yang disebabkan oleh bakteri, virus, jamur, maupun parasit masih menjadi masalah kesehatan utama di berbagai negara. Penggunaan antibiotik secara tidak rasional menyebabkan meningkatnya resistensi antimikroba yang berdampak pada menurunnya efektivitas pengobatan. Resistensi antibiotik bahkan telah dikategorikan sebagai ancaman kesehatan global karena meningkatkan angka kematian, lama rawat inap, dan biaya pengobatan.

Dalam beberapa dekade terakhir, senyawa alam menjadi perhatian utama dalam pengembangan terapi antimikroba baru. Berbagai senyawa bioaktif yang berasal dari tumbuhan, mikroorganisme, organisme laut, dan fungi diketahui memiliki aktivitas biologis terhadap mikroorganisme patogen (Stan *et al.*, 2021). Selain berasal dari tumbuhan, senyawa bioaktif antimikroba juga ditemukan pada mikroorganisme laut dan fungi yang memiliki aktivitas terhadap bakteri resisten antibiotik modern (Guglielmi *et al.*, 2020; González-Pastor *et al.*, 2023).

Pendekatan kimia biologi memungkinkan pemahaman lebih mendalam mengenai hubungan antara struktur kimia senyawa alam dengan aktivitas biologisnya. Aktivitas antimikroba suatu senyawa dipengaruhi oleh gugus fungsi aktif, polaritas, struktur stereokimia, dan kemampuan interaksi molekul terhadap target biologis mikroorganisme. Oleh karena itu, kajian kimia biologi menjadi penting dalam pengembangan kandidat obat berbasis bahan alam.

Artikel ini membahas perkembangan terapi berbasis senyawa alam dalam pengobatan infeksi dengan meninjau jenis senyawa bioaktif, mekanisme kerja antimikroba, perkembangan teknologi terapi modern, serta tantangan dan prospek pengembangannya di masa depan.

## 2. METODE

### 2.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kajian pustaka (*literature review*) dengan pendekatan deskriptif-analitis. Kajian dilakukan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terkini mengenai perkembangan terapi berbasis senyawa alam dalam pengobatan infeksi dari perspektif kimia biologi. Pendekatan *literature review* memungkinkan peneliti memperoleh gambaran komprehensif mengenai jenis senyawa bioaktif, mekanisme kerja antimikroba, serta perkembangan teknologi yang mendukung pemanfaatan senyawa alam sebagai agen terapeutik (Guglielmi *et al.*, 2020).

### 2.2 Ruang Lingkup Kajian

Ruang lingkup kajian mencakup berbagai senyawa alam yang memiliki aktivitas antimikroba, meliputi flavonoid, alkaloid, terpenoid, fenolik, minyak atsiri, dan peptida antimikroba. Selain itu, kajian juga membahas mekanisme kerja senyawa tersebut terhadap mikroorganisme patogen, perkembangan teknologi penghantaran obat berbasis nanoteknologi, serta strategi kombinasi senyawa alam dengan antibiotik dalam mengatasi resistensi antimikroba (Stan *et al.*, 2021; Saha *et al.*, 2022).

### 2.3 Bahan dan Alat

Bahan utama penelitian berupa artikel ilmiah primer dan artikel review yang diperoleh dari basis data ilmiah internasional seperti PubMed, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, dan Google Scholar. Literatur yang digunakan dibatasi pada publikasi tahun 2018–2025 untuk memastikan kebaruan informasi.

Alat yang digunakan meliputi komputer atau laptop yang terhubung dengan internet, perangkat lunak pengelola referensi seperti Mendeley, serta aplikasi pengolah kata untuk penyusunan naskah.

## 2.4 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan secara mandiri melalui studi kepustakaan di lingkungan perguruan tinggi dan akses daring terhadap berbagai basis data ilmiah. Pengumpulan dan analisis literatur dilakukan pada tahun 2026.

## 2.5 Sumber Data

Sumber data penelitian terdiri atas:

### a. Data Primer

Data primer berupa artikel penelitian asli (*original research articles*) yang membahas aktivitas antimikroba senyawa alam, mekanisme kerja molekuler, dan pengembangan formulasi terapeutik berbasis bahan alam (Zhang *et al.*, 2021).

### b. Data Sekunder

Data sekunder berupa artikel review, buku ilmiah, laporan organisasi kesehatan, serta dokumen ilmiah lain yang relevan dengan topik penelitian (Álvarez-Martínez *et al.*, 2020).

## 2.6 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur menggunakan kata kunci : *natural compounds, natural antimicrobial agents, antimicrobial resistance, chemical biology, natural product therapy, bioactive compounds, infection treatment*.

Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

### Kriteria Inklusi

1. Artikel dipublikasikan tahun 2018–2025.
2. Artikel membahas senyawa alam dengan aktivitas antimikroba.
3. Artikel tersedia dalam teks lengkap (*full text*).
4. Artikel berasal dari jurnal ilmiah bereputasi.

### Kriteria Eksklusi

1. Artikel yang tidak relevan dengan pengobatan infeksi.
2. Artikel tanpa akses naskah lengkap.
3. Artikel yang hanya membahas penggunaan tradisional tanpa dukungan data ilmiah.

Metode seleksi literatur ini sejalan dengan pendekatan kajian ilmiah yang banyak digunakan dalam penelitian pengembangan agen antimikroba berbasis bahan alam (González-Pastor *et al.*, 2023).

## 2.7 Definisi Operasional Variabel

Tabel 1. Definisi Operasional Variabel

Variabel	Definisi Operasional	Indikator
Senyawa alam	Senyawa bioaktif yang berasal dari tumbuhan, mikroorganisme, atau organisme laut	Flavonoid, alkaloid, terpenoid, fenolik, peptida antimikroba
Aktivitas antimikroba	Kemampuan senyawa menghambat atau membunuh mikroorganisme patogen	MIC, zona hambat, penghambatan biofilm
Mekanisme kerja	Cara senyawa mempengaruhi target biologis mikroba	Kerusakan membran, inhibisi DNA, inhibisi protein
Teknologi terapi	Pendekatan modern untuk meningkatkan efektivitas senyawa alam	Nanoenkapsulasi, terapi kombinasi
Resistensi antimikroba	Kemampuan mikroorganisme bertahan terhadap agen antimikroba	

## 2.8 Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan metode analisis isi (*content analysis*) dan analisis deskriptif kualitatif. Informasi yang diperoleh dari berbagai sumber literatur diklasifikasikan berdasarkan:

1. Jenis senyawa alam.
2. Aktivitas antimikroba.
3. Mekanisme kerja molekuler.
4. Pengembangan teknologi terapi.
5. Potensi dan tantangan aplikasi klinis.

Selanjutnya dilakukan sintesis data untuk mengidentifikasi tren perkembangan penelitian, kesenjangan pengetahuan (*research gap*), serta prospek pengembangan terapi berbasis senyawa alam dalam pengobatan infeksi (Lobiuc *et al.*, 2023; Pacyga *et al.*, 2024).

## 3. HASIL

Berdasarkan hasil telaah terhadap berbagai publikasi ilmiah tahun 2020–2025, ditemukan bahwa terapi berbasis senyawa alam mengalami perkembangan yang signifikan

dalam pengobatan infeksi bakteri, jamur, maupun virus. Senyawa bioaktif yang paling banyak diteliti meliputi flavonoid, alkaloid, terpenoid, fenolik, minyak atsiri, dan peptida antimikroba. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa senyawa-senyawa tersebut memiliki aktivitas antimikroba melalui mekanisme yang berbeda-beda, seperti kerusakan membran sel, inhibisi sintesis DNA dan protein, penghambatan biofilm, serta modulasi sistem komunikasi mikroba (*quorum sensing*) (Stan *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Lobiuc *et al.*, 2023).

### 3.1. Jenis Senyawa Alam dan Aktivitas Antimikroba

Hasil kajian menunjukkan bahwa flavonoid, alkaloid, dan terpenoid merupakan kelompok senyawa yang paling sering dilaporkan memiliki aktivitas antimikroba yang tinggi. Selain itu, peptida antimikroba dan senyawa fenolik juga menunjukkan efektivitas terhadap berbagai mikroorganisme patogen, termasuk bakteri yang telah mengalami resistensi terhadap antibiotik konvensional (Álvarez-Martínez *et al.*, 2020; Qadri *et al.*, 2022).

**Tabel 2. Kelompok Senyawa Alam dan Aktivitas Antimikroba**

Kelompok Senyawa	Contoh Senyawa	Target Mikroba	Mekanisme Utama
Flavonoid	Quercetin, Katekin	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	Inhibisi DNA dan biofilm
Alkaloid	Berberin, Sanguinarin	Bakteri Gram positif dan negatif	Gangguan sintesis DNA
Terpenoid	Eugenol, Timol	Bakteri dan jamur	Kerusakan membran sel
Fenolik	Asam galat, Resveratrol	Bakteri patogen	Inhibisi enzim mikroba
Peptida Antimikroba	Defensin, Cathelicidin	Berbagai bakteri patogen	Pembentukan pori membran

Sumber: Disusun dari Stan *et al.* (2021), Qadri *et al.* (2022), dan Lobiuc *et al.* (2023).

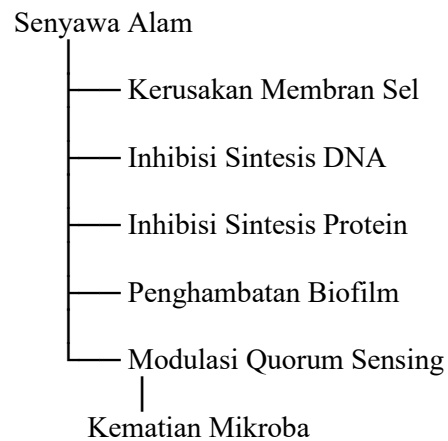
Tabel 2 menunjukkan bahwa setiap kelompok senyawa memiliki target dan mekanisme kerja yang berbeda. Keragaman mekanisme ini menjadi salah satu keunggulan terapi berbasis senyawa alam karena dapat mengurangi

kemungkinan munculnya resistensi mikroba.

### 3.2. Mekanisme Kerja Senyawa Alam dalam Pengobatan Infeksi

Analisis terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar senyawa alam bekerja melalui lebih dari satu target biologis. Flavonoid dan polifenol diketahui mampu menghambat sintesis DNA serta mengganggu pembentukan biofilm bakteri. Sementara itu, minyak atsiri dan terpenoid lebih dominan bekerja melalui kerusakan membran sel mikroba sehingga menyebabkan kebocoran sitoplasma dan kematian sel (Saha *et al.*, 2022).

Peptida antimikroba memiliki mekanisme yang berbeda karena dapat berinteraksi langsung dengan membran sel mikroba melalui gaya elektrostatis sehingga membentuk pori yang mengakibatkan lisis sel (Zhang *et al.*, 2021).



**Gambar 3.2.** Mekanisme Umum Senyawa Alam dalam Menghambat Mikroba

### 3.3. Perkembangan Teknologi Penghantaran Senyawa Alam

Hasil kajian menunjukkan bahwa salah satu kendala utama penggunaan senyawa alam adalah rendahnya stabilitas dan bioavailabilitas. Oleh karena itu, berbagai penelitian mengembangkan teknologi penghantaran berbasis nanoteknologi seperti liposom, nanoemulsi, dan nanopartikel polimer untuk meningkatkan efektivitas terapeutik (Stan *et al.*, 2021).

**Tabel 3. Teknologi Penghantaran Senyawa Alam**

Teknologi	Fungsi Utama	Keunggulan
Liposom	Mengenkapsulasi senyawa aktif	Meningkatkan stabilitas
Nanoemulsi	Meningkatkan kelarutan	Penyerapan lebih baik
Nanopartikel Polimer	Penghantaran terkontrol	Bioavailabilitas tinggi
Solid Lipid Nanoparticle	Perlindungan senyawa aktif	Toksitasitas lebih rendah

**Sumber:** Stan *et al.* (2021).

Teknologi nanoenkapsulasi terbukti mampu meningkatkan efektivitas antimikroba sekaligus mengurangi efek samping yang mungkin muncul akibat penggunaan dosis tinggi senyawa bioaktif.

### 3.4. Efektivitas Kombinasi Senyawa Alam dan Antibiotik

Kajian menunjukkan bahwa kombinasi antara senyawa alam dan antibiotik konvensional memberikan efek sinergis terhadap berbagai bakteri resisten antibiotik. Beberapa flavonoid dan alkaloid mampu meningkatkan sensitivitas bakteri terhadap antibiotik dengan cara menghambat mekanisme resistensi yang dimiliki mikroba (Vaou *et al.*, 2022).

Selain kombinasi dengan antibiotik, kombinasi antar senyawa bioaktif tumbuhan juga dilaporkan meningkatkan aktivitas antimikroba. Interaksi sinergis tersebut berpotensi menjadi strategi baru dalam pengembangan terapi infeksi yang lebih efektif dan aman.

### 3.5. Tren Penelitian Terapi Berbasis Senyawa Alam

Berdasarkan literatur yang dianalisis, terjadi peningkatan jumlah penelitian mengenai senyawa alam sebagai agen antimikroba selama lima tahun terakhir. Fokus penelitian saat ini tidak hanya pada identifikasi senyawa aktif, tetapi juga pada optimasi struktur kimia, pengembangan sistem penghantaran obat, dan pemanfaatan pendekatan metabolomik serta bioinformatika untuk mempercepat penemuan kandidat obat baru (González-Pastor *et al.*, 2023; Woo *et al.*, 2023).

Temuan tersebut menunjukkan bahwa terapi berbasis senyawa alam memiliki prospek yang sangat besar untuk dikembangkan sebagai solusi dalam menghadapi meningkatnya resistensi antimikroba di masa depan.

## 4. PEMBAHASAN

### 4.1. Potensi Senyawa Alam sebagai Agen Antimikroba Baru

Hasil kajian menunjukkan bahwa senyawa alam memiliki potensi besar sebagai sumber kandidat obat antimikroba baru dalam menghadapi peningkatan resistensi antibiotik. Berbagai penelitian melaporkan bahwa metabolit sekunder tumbuhan, mikroorganisme, dan organisme laut memiliki aktivitas biologis yang mampu menghambat pertumbuhan bakteri, jamur, maupun virus patogen. Potensi tersebut didukung oleh keragaman struktur kimia senyawa alam yang memungkinkan interaksi dengan berbagai target biologis mikroorganisme (Álvarez-Martínez *et al.*, 2020).

Berbeda dengan antibiotik konvensional yang umumnya bekerja pada satu target spesifik, banyak senyawa alam memiliki mekanisme kerja multitarget. Kondisi ini menyebabkan mikroorganisme lebih sulit mengembangkan resistensi karena harus beradaptasi terhadap beberapa mekanisme penghambatan secara bersamaan. Oleh karena itu, senyawa alam dipandang sebagai salah satu alternatif yang menjanjikan dalam pengembangan terapi antimikroba generasi baru (Qadri *et al.*, 2022). Selain aktivitas antimikroba langsung, beberapa senyawa alam juga memiliki aktivitas antiinflamasi, antioksidan, dan imunomodulator. Kombinasi berbagai aktivitas biologis tersebut memberikan keuntungan terapeutik yang lebih luas dibandingkan antibiotik konvensional yang hanya berfokus pada eliminasi patogen (Pacyga *et al.*, 2024).

### 4.2. Hubungan Struktur Kimia dan Aktivitas Biologis Senyawa Alam

Perspektif kimia biologi menunjukkan bahwa aktivitas antimikroba suatu senyawa sangat dipengaruhi oleh struktur kimianya. Gugus hidroksil pada flavonoid, misalnya, berperan dalam pembentukan ikatan hidrogen dengan protein dan enzim mikroba sehingga dapat menghambat fungsi biologis yang penting bagi kelangsungan hidup mikroorganisme (Lobiuc *et al.*, 2023).

Flavonoid seperti quercetin dan katekin diketahui mampu menghambat sintesis asam nukleat serta mengganggu pembentukan biofilm bakteri. Kemampuan ini berkaitan dengan keberadaan gugus fenolik yang

mampu berinteraksi dengan membran sel dan enzim mikroba. Semakin banyak gugus hidroksil yang tersedia, semakin besar potensi aktivitas antimikroba yang ditunjukkan oleh senyawa tersebut (Woo *et al.*, 2023).

Pada kelompok alkaloid, keberadaan atom nitrogen dalam struktur molekul berperan penting dalam interaksi elektrostatis dengan DNA dan protein mikroba. Senyawa seperti berberin dan sanguinarin terbukti mampu menghambat replikasi DNA bakteri sehingga mengganggu proses pertumbuhan dan pembelahan sel (Qadri *et al.*, 2022).

Sementara itu, sifat lipofilik yang dimiliki terpenoid memungkinkan senyawa ini berpenetrasi ke dalam membran lipid mikroba. Interaksi tersebut menyebabkan perubahan permeabilitas membran sehingga terjadi kebocoran komponen intraseluler yang berujung pada kematian sel mikroba (Saha *et al.*, 2022).

#### **4.3. Mekanisme Antimikroba Senyawa Alam dalam Mengatasi Resistensi Mikroba**

Salah satu temuan penting dalam kajian ini adalah kemampuan senyawa alam untuk mengatasi berbagai mekanisme resistensi mikroba. Mikroorganisme resisten umumnya menggunakan beberapa strategi, seperti modifikasi target antibiotik, pembentukan biofilm, peningkatan pompa efluks (*efflux pump*), dan produksi enzim perusak antibiotik. Beberapa flavonoid dan polifenol diketahui mampu menghambat aktivitas pompa efluks sehingga antibiotik dapat kembali masuk ke dalam sel bakteri dan bekerja secara optimal. Mekanisme ini menjelaskan mengapa kombinasi antara senyawa alam dan antibiotik sering menghasilkan efek sinergis yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan antibiotik tunggal (Vaou *et al.*, 2022).

Selain itu, senyawa fenolik dan flavonoid juga mampu menghambat pembentukan biofilm. Biofilm merupakan lapisan pelindung yang memungkinkan mikroorganisme bertahan terhadap antibiotik dan respons imun tubuh. Penghambatan biofilm meningkatkan sensitivitas bakteri terhadap agen antimikroba sehingga memperbesar peluang keberhasilan terapi (Lobiuc *et al.*, 2023).

Peptida antimikroba memiliki mekanisme yang berbeda karena bekerja secara langsung pada membran sel mikroba. Mekanisme ini menyebabkan peluang terjadinya resistensi

relatif lebih rendah dibandingkan antibiotik yang menargetkan jalur metabolisme tertentu. Oleh karena itu, peptida antimikroba dianggap sebagai salah satu kandidat terapi yang menjanjikan untuk mengatasi krisis resistensi antibiotik global (Zhang *et al.*, 2021).

#### **4.4. Peran Nanoteknologi dalam Pengembangan Terapi Berbasis Senyawa Alam**

Meskipun memiliki aktivitas biologis yang tinggi, banyak senyawa alam menghadapi kendala berupa kelarutan rendah, stabilitas yang buruk, dan bioavailabilitas yang terbatas. Kondisi tersebut dapat mengurangi efektivitas terapi ketika diaplikasikan secara klinis.

Perkembangan nanoteknologi memberikan solusi terhadap berbagai kendala tersebut. Penggunaan liposom, nanoemulsi, nanopartikel polimer, dan *solid lipid nanoparticles* terbukti mampu meningkatkan stabilitas dan penghantaran senyawa aktif ke target biologis yang diinginkan (Stan *et al.*, 2021).

Nanoenkapsulasi juga memungkinkan pelepasan senyawa secara terkontrol sehingga konsentrasi terapeutik dapat dipertahankan dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain meningkatkan efektivitas terapi, pendekatan ini juga berpotensi menurunkan efek samping akibat penggunaan dosis tinggi. Oleh karena itu, integrasi antara senyawa alam dan teknologi nano menjadi salah satu arah penelitian yang paling berkembang dalam beberapa tahun terakhir (Stan *et al.*, 2021).

#### **4.5. Kombinasi Senyawa Alam dan Antibiotik sebagai Strategi Terapi Masa Depan**

Hasil kajian menunjukkan bahwa kombinasi senyawa alam dengan antibiotik konvensional merupakan strategi yang sangat menjanjikan. Interaksi sinergis antara kedua komponen tersebut mampu meningkatkan efektivitas pengobatan serta menekan perkembangan resistensi mikroba.

Vaou *et al.* (2022) melaporkan bahwa kombinasi berbagai senyawa bioaktif tumbuhan dapat meningkatkan aktivitas antibakteri melalui mekanisme yang saling melengkapi. Senyawa alam dapat meningkatkan permeabilitas membran mikroba sehingga antibiotik lebih mudah mencapai target intraseluler.

Selain kombinasi dengan antibiotik,

kombinasi antar senyawa bioaktif tumbuhan juga menunjukkan hasil yang positif. Pendekatan ini sesuai dengan konsep fitoterapi modern yang memanfaatkan berbagai komponen bioaktif secara bersamaan untuk menghasilkan efek terapeutik yang lebih optimal dibandingkan penggunaan senyawa tunggal (Vaou *et al.*, 2022).

#### **4.6. Tantangan dan Prospek Pengembangan Terapi Berbasis Senyawa Alam**

Walaupun memiliki potensi yang besar, pengembangan terapi berbasis senyawa alam masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu kendala utama adalah variasi kandungan metabolit sekunder akibat perbedaan spesies, kondisi lingkungan, metode ekstraksi, dan proses penyimpanan bahan baku (González-Pastor *et al.*, 2023).

Selain itu, sebagian besar penelitian masih berada pada tahap *in vitro* dan *in vivo*, sementara jumlah uji klinis pada manusia masih relatif terbatas. Akibatnya, data mengenai efektivitas dan keamanan jangka panjang masih perlu diperkuat sebelum dapat diterapkan secara luas dalam praktik klinis (Pacyga *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, perkembangan teknologi metabolomik, bioinformatika, dan kecerdasan buatan membuka peluang baru dalam penemuan kandidat obat berbasis bahan alam. Teknologi tersebut memungkinkan identifikasi senyawa bioaktif yang lebih cepat, akurat, dan efisien dibandingkan metode konvensional (González-Pastor *et al.*, 2023). Indonesia sebagai negara dengan keanekaragaman hayati yang tinggi memiliki peluang besar untuk berkontribusi dalam pengembangan obat antimikroba berbasis bahan alam. Eksplorasi biodiversitas lokal yang didukung oleh pendekatan kimia biologi modern dapat menghasilkan kandidat obat baru yang mampu menjawab tantangan resistensi antimikroba di masa depan.

## **5. KESIMPULAN & SARAN**

### **Kesimpulan**

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa terapi berbasis senyawa alam memiliki potensi yang sangat besar dalam pengobatan penyakit infeksi, terutama sebagai solusi terhadap meningkatnya kasus resistensi antimikroba.

Berbagai kelompok senyawa bioaktif seperti flavonoid, alkaloid, terpenoid, fenolik, minyak atsiri, dan peptida antimikroba menunjukkan aktivitas antimikroba yang efektif melalui berbagai mekanisme, antara lain kerusakan membran sel mikroba, penghambatan sintesis DNA dan protein, inhibisi pembentukan biofilm, serta modulasi sistem komunikasi mikroba (*quorum sensing*). Kajian dari perspektif kimia biologi menunjukkan bahwa aktivitas biologis senyawa alam sangat dipengaruhi oleh struktur kimianya, terutama keberadaan gugus fungsi aktif, sifat lipofilik, dan kemampuan interaksi molekul terhadap target biologis mikroorganisme. Pemahaman mengenai hubungan struktur dan aktivitas biologis (*structure-activity relationship*) menjadi dasar penting dalam pengembangan kandidat obat antimikroba baru.

Selain itu, perkembangan teknologi modern seperti nanoenkapsulasi, metabolomik, bioinformatika, dan terapi kombinasi telah meningkatkan efektivitas, stabilitas, serta bioavailabilitas senyawa alam. Kombinasi senyawa alam dengan antibiotik konvensional juga menunjukkan efek sinergis yang berpotensi meningkatkan keberhasilan terapi sekaligus mengurangi risiko perkembangan resistensi mikroba.

Secara keseluruhan, terapi berbasis senyawa alam merupakan salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam pengembangan obat antimikroba generasi berikutnya. Dengan dukungan penelitian multidisiplin dan teknologi modern, senyawa alam berpotensi menjadi sumber utama kandidat obat baru yang lebih efektif, aman, dan berkelanjutan untuk pengobatan infeksi.

### **Saran**

Berdasarkan hasil kajian ini, beberapa rekomendasi yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan lebih banyak penelitian eksperimental dan uji klinis untuk memastikan keamanan, efektivitas, dosis optimal, serta potensi efek samping senyawa alam pada manusia.
2. Pengembangan teknologi formulasi dan penghantaran obat berbasis nanoteknologi perlu terus ditingkatkan guna mengatasi

keterbatasan bioavailabilitas dan stabilitas senyawa bioaktif alami.

3. Eksplorasi keanekaragaman hayati Indonesia perlu diperluas sebagai sumber senyawa bioaktif baru yang berpotensi dikembangkan menjadi agen antimikroba inovatif.
4. Pendekatan kimia biologi, metabolomik, dan bioinformatika perlu diintegrasikan dalam proses penemuan obat untuk mempercepat identifikasi dan optimasi kandidat senyawa antimikroba.
5. Kolaborasi multidisiplin antara peneliti bidang kimia, biologi, farmasi, kedokteran, dan teknologi kesehatan perlu diperkuat agar hasil penelitian dapat ditranslasikan menjadi produk farmasi yang siap digunakan dalam praktik klinis.

Dengan adanya penelitian lanjutan yang lebih mendalam dan terstandarisasi, terapi berbasis senyawa alam diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengatasi tantangan resistensi antimikroba dan mendukung pengembangan sistem kesehatan yang berkelanjutan.

## REFERENSI

- Álvarez-Martínez, F., Barrajon-Catalán, E., & Micol, V. (2020). Tackling antibiotic resistance with compounds of natural origin: A comprehensive review. *Biomedicines*, 8(10), 405. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8100405>
- González-Pastor, R., Carrera-Pacheco, S. E., Zúñiga-Miranda, J., Rodríguez-Pólit, C., Mayorga-Ramos, A., Guamán, L. P., & Barba-Ostria, C. (2023). Current landscape of methods to evaluate antimicrobial activity of natural extracts. *Molecules*, 28(4), 1995. <https://doi.org/10.3390/molecules28041995>
- Guglielmi, P., Pontecorvi, V., & Rotondi, G. (2020). Natural compounds and extracts as novel antimicrobial agents. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, 30(12), 949–962. <https://doi.org/10.1080/13543776.2020.1813714>
- Kalalo, M. J., Wewengkang, D. S., & Rotinsulu, H. (2020). Potensi antimikroba cengkeh (*Syzygium aromaticum*): Tinjauan literatur. *Pharmacy Medical Journal*, 3(2), 1–8.
- Lobiuc, A., Pavăl, N. E., Mangalagiu, I., Gheorghita, R., Teliban, G., Amăriucăi-Mantu, D., & Stoleru, V. (2023). Future antimicrobials: Natural and functionalized phenolics. *Molecules*, 28(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/molecules28031112>
- Pacyga, K., Pacyga, P., Topola, E., Viscardi, S., & Duda-Madej, A. (2024). Bioactive compounds from plant origin as natural antimicrobial agents for the treatment of wound infections. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1154. <https://doi.org/10.3390/ijms25021154>
- Qadri, H., Shah, A. H., Andrabi, S. M., Alshehri, B., Almilaibary, A., & Mir, M. A. (2022). Natural products and their semi-synthetic derivatives against antimicrobial-resistant human pathogenic bacteria and fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 1009–1022. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.034>
- Saha, P., Rahman, F., Hussain, F., Rahman, S., & Rahman, M. M. (2022). Antimicrobial diterpenes: Recent development from natural sources. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 823624. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.823624>
- Sari, R., Nurhidayati, N., & Fitriani, D. (2024). Potential of Indonesian plants as polymicrobial anti-biofilm agents. *Borneo Journal of Pharmacy*, 7(1), 12–25.
- Stan, D., Enciu, A., Mateescu, A., Ion, A., Brezeanu, A. C., Stan, D., & Tănase, C. (2021). Natural compounds with antimicrobial and antiviral effect and nanocarriers used for their transportation. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 723233. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.723233>
- Vaou, N., Stavropoulou, E., Voidarou, C.,

- Tsakris, Z., Rozos, G., Tsigalou, C., & Bezirtzoglou, E. (2022). Interactions between medical plant-derived bioactive compounds: Focus on antimicrobial combination effects. *Antibiotics*, 11(8), 1014. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11081014>
- Woo, S., Kim, Y., & Lee, J. (2023). Recent advances in the discovery of plant-derived antimicrobial natural products to combat antimicrobial resistant pathogens. *Natural Product Reports*, 40(7), 1271–1290. <https://doi.org/10.1039/D2NP00074K>
- Zhang, Q., Yan, Z., Meng, Y., Hong, X., Shao, G., Ma, J., Cheng, X., Liu, J., Kang, J., & Fu, C. (2021). Antimicrobial peptides: Mechanism of action, activity and clinical potential. *Military Medical Research*, 8(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s40779-021-00343-2>