

BIOMASSA SEBAGAI SUMBER PREKURSOR SENYAWA ANTIMIKROBA BERBASIS KIMIA HIJAU: *LITERATURE REVIEW*

Nur Afni^{1*}, Andi Bulqiah Nur Bunyamin¹

¹Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: 30 April, 2026

Accepted: 26 Mei, 2026

Published: 03 Juni, 2026

KEYWORD

Biomassa; antimikroba; kimia hijau; platform chemicals; biomaterial

Biomass; antimicrobial; green chemistry; platform chemicals; biomaterials

CORRESPONDING AUTHOR

Nama : Nur Afni

E-mail : nur.afni@unm.ac.id

ABSTRACT

Resistensi antimikroba (AMR) menjadi salah satu tantangan kesehatan global yang mendorong pencarian sumber senyawa antimikroba baru yang lebih efektif dan berkelanjutan. Biomassa merupakan sumber daya terbarukan yang kaya akan senyawa bioaktif dan *platform chemicals* yang berpotensi dimanfaatkan sebagai prekursor pengembangan agen antimikroba berbasis kimia hijau. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji potensi biomassa sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba serta menelaah penerapan prinsip kimia hijau dalam proses pengembangannya. Kajian disusun menggunakan pendekatan *systematic literature review* terhadap artikel penelitian asli yang diperoleh dari database PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar pada periode 2019–2026. Sebanyak 20 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis secara deskriptif-kualitatif berdasarkan jenis biomassa, metode sintesis atau konversi, produk yang dihasilkan, aktivitas antimikroba, dan implementasi prinsip *green chemistry*. Hasil kajian menunjukkan bahwa biomassa dapat dimanfaatkan sebagai sumber senyawa antimikroba alami, *platform chemicals* seperti furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), dan *levulinic acid*, serta sebagai bahan baku sintesis nanomaterial dan biomaterial antimikroba. Penerapan prinsip kimia hijau melalui penggunaan bahan baku terbarukan, pelarut hijau, biosintesis, dan pemanfaatan limbah biomassa mampu meningkatkan keberlanjutan proses sekaligus mempertahankan efektivitas antimikroba. Dengan demikian, biomassa memiliki prospek yang sangat menjanjikan sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba yang mendukung pengembangan produk farmasi dan material kesehatan yang lebih ramah lingkungan.

Antimicrobial resistance (AMR) has emerged as a major global health challenge, driving the search for new and sustainable antimicrobial agents. Biomass represents a renewable resource rich in bioactive compounds and platform chemicals that can serve as precursors for antimicrobial development based on green chemistry principles. This review aims to evaluate the potential of biomass as a source of antimicrobial precursors and to examine the application of green chemistry approaches in their development. A systematic literature review was conducted using original research articles retrieved from PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar published between 2019 and 2026. A total of 20 eligible articles were analyzed descriptively based on biomass sources, conversion or synthesis methods, antimicrobial products, biological activities, and green chemistry implementation. The findings indicate that biomass can be utilized as a source of natural antimicrobial compounds, platform chemicals such as furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), and levulinic acid, as well as feedstocks for antimicrobial nanomaterials and biomaterials. The application of green chemistry principles through renewable feedstocks, green solvents, biosynthesis, and biomass waste valorization contributes to more sustainable processes while maintaining antimicrobial effectiveness. Therefore, biomass offers significant potential as a precursor source for the development of environmentally friendly antimicrobial agents, pharmaceutical products, and healthcare materials..

PENDAHULUAN

Resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance*, AMR) semakin berkembang dan menjadi ancaman kesehatan global yang cukup serius di abad ke-21 ini. Berdasarkan laporan komprehensif oleh Murray et al. (2022), AMR bakteri berkontribusi secara langsung atas perkiraan 1,27 kematian di seluruh dunia, dengan asosiasi yang lebih luas mencapai hampir 5 juta kematian per tahunnya. Manajemen klinis terhadap infeksi persisten yang disebabkan oleh patogen resisten multi-obat (*multidrug-resistant*, MDR) seperti *Staphylococcus aureus* (MRSA) dan *Pseudomonas aeruginosa* semakin terbatas akibat stagnannya penemuan antibiotik baru dalam beberapa dekade terakhir (Laxminarayan et al., 2013).

Di sisi lain, sintesis bahan aktif farmasi (*active pharmaceutical ingredients*, API) termasuk senyawa antibiotik konvensional masih sangat bergantung pada bahan baku berbasis petrokimia dan penggunaan bahan kimia seperti pelarut organik toksik yang dapat berkontribusi negatif terhadap lingkungan (Sheldon, 2017; Stefanache et al., 2025). Sheldon (2023) mengungkapkan bahwa nilai *E-factor* (*environmental factor*), yaitu rasio massa limbah yang dihasilkan per kilogram produk, tercatat sangat tinggi pada industri farmasi dibandingkan dengan industri kimia curah (*bulk chemicals*). Nilai *E-factor* pada industri farmasi berkisar 25-100 (bahkan mencapai 200 untuk obat-obatan kompleks), yang artinya untuk memproduksi 1 kg produk farmasi dihasilkan 25-200 kg limbah. Hal ini utamanya disebabkan oleh tahapan sintesis dengan banyak langkah yang kompleks, penggunaan reagen toksik dan pelarut organik secara intensif, serta pembentukan efluen berbahaya yang mencemari ekosistem. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan senyawa antimikroba baru dengan pendekatan sintesis yang lebih berkelanjutan dengan mengintegrasikan prinsip *green chemistry*.

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan antimikroba berkelanjutan adalah keterbatasan sumber prekursor kimia yang ramah lingkungan namun tetap memiliki aktivitas biologis tinggi. Biomassa menjadi salah satu sumber bahan baku terbarukan yang sangat potensial karena tersedia melimpah dan mengandung berbagai senyawa organik bernilai tinggi, seperti polisakarida, lignin, tanin, serta senyawa turunan furan (Isikgor & Becer, 2016). Berbagai studi telah mengungkapkan bahwa turunan biomassa mampu menghasilkan senyawa bioaktif dengan aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram-positif maupun Gram-negatif (Chen et al., 2024; Solihat et al., 2024). Selain itu, biomassa dapat dikonversi menjadi berbagai *platform chemicals* seperti furfural dan 5-hydroxymethylfurfural (HMF) yang berpotensi digunakan sebagai *building blocks* dalam sintesis senyawa antimikroba baru (Chacón-Huete et al., 2022; Seitkaliyeva et al., 2025; Wang et al., 2018).

Pengembangan sintesis hijau berbasis biomassa telah diaplikasikan dalam produksi nanopartikel antimikroba menggunakan ekstrak tanaman dan biomassa mikroalga sebagai agen pereduksi alami, yang menunjukkan aktivitas signifikan terhadap bakteri Gram-positif maupun Gram-negatif (Bernardes et al., 2025; Moussa et al., 2024). Studi oleh Yin et al. (2026) menunjukkan potensi biomassa sebagai bahan bakar dalam sintesis nanopartikel MgO dengan khasiat antimikroba yang kuat dan biokompatibilitas yang tinggi. Selain itu, studi oleh Zhang et al. (2024) menunjukkan bahwa lignin dapat dimodifikasi menjadi fotokatalis berbasis TiO₂ yang mampu mendegradasi senyawa berbahaya sekaligus membunuh bakteri hingga 90% dalam waktu tiga jam. Hal ini menegaskan potensi biomassa tidak hanya sebagai sumber prekursor antimikroba yang inovatif, tetapi juga sebagai agen pembentuk material aktif.

Berdasarkan uraian tersebut, *literature review* ini disusun untuk meninjau dan mengkaji potensi biomassa sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba berbasis *green chemistry*, dengan menekankan pada jenis biomassa yang berpotensi, strategi sintesis, hasil penelitian empiris, serta prospek aplikasinya di bidang kesehatan dan lingkungan.

METODE

Kajian literatur ini disusun dengan pendekatan tinjauan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis artikel penelitian yang berfokus pada pemanfaatan biomassa sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba yang dikembangkan melalui jalur kimia hijau. Penelusuran literatur dilakukan melalui *database* ilmiah, yaitu PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar terhadap artikel yang dipublikasikan pada periode 2019-2026. Strategi pencarian artikel dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci "*biomass-derived antimicrobial compounds*", "*green synthesis of antimicrobial agents*", "*biomass valorization*", "*bio-based antimicrobial compounds*", "*lignocellulosic biomass pharmaceutical applications*", "*furfural derivatives antibacterial activity*", dan "*green chemistry antimicrobial synthesis*" dengan bantuan operator Boolean (AND dan OR).

Artikel yang diikutsertakan adalah artikel penelitian asli yang melaporkan pemanfaatan biomassa sebagai sumber senyawa bioaktif, *platform chemicals*, nanomaterial, atau biomaterial antimikroba

dengan menerapkan minimal satu prinsip *green chemistry* serta memiliki data aktivitas antimikroba yang terukur. Artikel review, prosiding, editorial, dan publikasi yang tidak relevan dieksklusikan dari kajian. Proses seleksi dilakukan melalui identifikasi, penyaringan judul dan abstrak, evaluasi naskah lengkap, serta ekstraksi data yang meliputi jenis biomassa, metode sintesis atau konversi, produk yang dihasilkan, aktivitas antimikroba, dan implementasi prinsip kimia hijau. Sebanyak 20 artikel penelitian yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis secara deskriptif-kualitatif untuk mengidentifikasi tren penelitian, potensi aplikasi, serta prospek pengembangan biomassa sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba yang berkelanjutan.

HASIL & PEMBAHASAN

Karakteristik Literatur yang Dikaji

Berdasarkan proses identifikasi dan seleksi literatur, diperoleh 20 artikel penelitian (*Research Article*) yang memenuhi kriteria inklusi. Seluruh artikel dipublikasikan pada rentang tahun 2019–2026 dan berfokus pada pemanfaatan biomassa sebagai sumber senyawa antimikroba, prekursor sintesis antimikroba, nanomaterial antimikroba, maupun biomaterial antimikroba dengan penerapan prinsip *green chemistry*. Biomassa yang digunakan sangat beragam, meliputi limbah pertanian, limbah agroindustri, biomassa laut, lignin, selulosa, kitosan, mikroalga, serta platform chemicals hasil konversi biomassa seperti furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), dan *levulinic acid*. Secara umum, penelitian yang dianalisis menunjukkan tren pemanfaatan biomassa tidak hanya sebagai sumber bahan baku terbarukan tetapi juga sebagai komponen utama dalam pengembangan agen antimikroba yang berkelanjutan. Ringkasan karakteristik keseluruhan artikel penelitian yang dikaji dapat dilihat pada Tabel 1.

Implementasi Prinsip *Green Chemistry* dalam Penelitian yang Dikaji

Analisis terhadap artikel yang direview menunjukkan bahwa prinsip *green chemistry* telah diterapkan secara luas dalam pengembangan senyawa dan material antimikroba berbasis biomassa. Prinsip yang paling dominan adalah penggunaan bahan baku terbarukan (*renewable feedstock*), pemanfaatan limbah sebagai sumber bahan baku (*waste valorization*), penggunaan pelarut yang lebih aman, serta pengurangan konsumsi energi melalui sintesis hidrotermal, sonikasi, dan microwave. Ringkasan implementasi prinsip kimia hijau dalam keseluruhan artikel penelitian yang dikaji dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Implementasi prinsip *green chemistry*

Prinsip Green Chemistry	Contoh Implementasi
<i>Renewable feedstock</i>	Biomassa lignoselulosa, mikroalga, limbah agroindustri
<i>Waste valorization</i>	Kulit kakao, kulit jeruk, cangkang kemiri, jerami padi
<i>Safer solvents</i>	DES, NADES, air
<i>Energy efficiency</i>	Microwave synthesis, hidrotermal, ultrasonik
<i>Design for degradation</i>	Film kitosan, bioplastik pati, material selulosa
<i>Prevention of waste</i>	Pemanfaatan limbah pertanian dan agroindustri
<i>Inherently safer chemistry</i>	Biosintesis nanopartikel tanpa reduktor toksik

Biomassa sebagai Sumber Senyawa Antimikroba Alami

Biomassa merupakan sumber metabolit sekunder yang kaya akan senyawa fenolik, flavonoid, terpenoid, alkaloid, dan asam organik yang diketahui memiliki aktivitas antimikroba. Salah satu pendekatan paling sederhana dalam pemanfaatan biomassa untuk pengembangan antimikroba adalah melalui ekstraksi senyawa bioaktif yang secara alami terkandung dalam jaringan tumbuhan maupun limbah agroindustri. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa biomassa kaya akan polifenol, flavonoid, terpenoid, asam fenolat, dan metabolit sekunder lain yang memiliki aktivitas antibakteri dan antibiofilm. Studi oleh Kusumastuti et al. (2026) menunjukkan bahwa limbah kulit kakao yang diekstraksi menggunakan kombinasi sonikasi dan *deep eutectic solvent* (DES) menghasilkan ekstrak dengan kandungan fenolik dan flavonoid tinggi yang efektif menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Penggunaan DES berbasis kolin klorida dan asam laktat menunjukkan bahwa teknologi ekstraksi hijau mampu meningkatkan efisiensi ekstraksi atau perolehan senyawa aktif sekaligus mengurangi penggunaan pelarut organik konvensional yang bersifat toksik.

Tabel 1. Karakteristik artikel penelitian yang dikaji

No	Jenis Biomassa	Metode Green Chemistry	Produk/Senyawa yang Dihasilkan	Aktivitas Antimikroba	Referensi
1	Furfural dan 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF)	<i>Grindstone synthesis</i> (reaksi mekanokimia tanpa pelarut & katalis), one-pot multicomponent reaction (MCR), suhu ruang (25°C), efisiensi atom tinggi, minim limbah	Derivat Hydrazinyl-thiazoles (senyawa 4a-4h)	Aktivitas antibakteri terhadap <i>E. coli</i> dan <i>B. subtilis</i> . Senyawa paling aktif adalah 4e dengan MIC >6,25 µg/mL terhadap <i>E. coli</i> dan MIC >25 µg/mL terhadap <i>B. subtilis</i> . Senyawa 4h menunjukkan MIC >12,5 µg/mL terhadap <i>E. coli</i> dan >25 µg/mL terhadap <i>B. subtilis</i> . Senyawa 4d memiliki MIC >25 µg/mL terhadap kedua bakteri.	Gurav et al., 2025
2	5-Hydroxymethylfurfural (HMF)	Pemanfaatan bio-based platform chemicals yaitu 5-HMF sebagai agen antibiofilm	Tidak dilakukan sintesis senyawa baru. Produk yang diuji adalah 5-HMF sebagai senyawa aktif antibiofilm.	Menghambat biofilm <i>Acinetobacter baumannii</i> sebesar 85% dan <i>A. nosocomialis</i> sebesar 78% pada konsentrasi 100 µg/mL (BIC) tanpa menghambat pertumbuhan bakteri (non-bakterisidal)	Vijayakumar and Thirunanasambandham, 2020
3	Eugenol (minyak cengkeh), asam levulinat, dan asam valerat	<i>One-pot synthesis</i> menggunakan bahan baku terbarukan (<i>Renewable feedstock</i>)	Eugenyl Levulinate (TL, ML) dan Eugenyl Valerate (MV)	TL menunjukkan aktivitas terbaik dengan zona hambat 6,1 mm terhadap <i>S. aureus</i> dan 2,4 mm terhadap <i>E. coli</i> ; ML dan MV aktif terutama terhadap <i>S. aureus</i> .	Xuan et al., 2020
4	Limbah kulit kakao (<i>cacao shells</i>)	Integrasi <i>Sonication-Assisted Extraction</i> (SAE) dan <i>Deep Eutectic Solvent</i> (DES) berbasis choline chloride : lactic acid (1:2) sebagai pelarut hijau	Senyawa fenolik dan flavonoid dari kulit kakao (termasuk indikasi keberadaan quercetin dan polifenol lainnya)	Efektif terhadap <i>E. coli</i> (33,33 ± 0.21 mm) dan <i>S. aureus</i> (28,83 ± 0.76 mm) berdasarkan metode difusi sumuran.	Kusumastuti et al., 2026
5	Limbah kulit jeruk (<i>orange peels</i>)	<i>Natural Deep Eutectic Solvent</i> (NADES) + <i>Ultrasound-Assisted Extraction</i> (UAE)	Ekstrak fenolik kaya hesperidin (20 mg/g kulit jeruk), naringin, rutin, p-kumarat; Minyak atsiri kaya D-limonene (83,60%)	Minyak atsiri menunjukkan penghambatan pertumbuhan <i>S. aureus</i> (90,36%) dan <i>E. coli</i> (90,12%)	Bertolo et al., 2025
6	Residu hutan pinus maritim, berupa <i>pine needles</i> dan <i>pine bark</i>	<i>Deep Eutectic Solvent</i> (Levulinic acid : Formic acid) + <i>Ultrasound-Assisted Extraction</i> (UAE)	Ekstrak polifenol (274,38–314,62 mg/g dw)	Ekstrak polifenol menunjukkan penghambatan total pertumbuhan <i>S. aureus</i> . Tidak ditemukan fase pertumbuhan setelah paparan ekstrak polifenol dari jarum maupun kulit pinus pada kurva pertumbuhan	Duarte et al., 2022
7	Biomassa tanaman (Kulit delima, biji pinang, kulit kayu soga, kulit manggis, kulit kayu nangka, daun mangga, pucuk teh hijau, dan kayu secang)	Ekstraksi air (<i>water extraction</i>) dan diikuti proses <i>freeze-drying</i>	Ekstrak kaya polifenol (katekol, resorsinol, pirogalol, eugenol, asam elagat, mirisetin, D-limonena, dan senyawa fenolik lainnya)	Zona hambat 8–19 mm terhadap <i>S. aureus</i> , <i>S. epidermidis</i> , <i>P. acnes</i> , <i>B. subtilis</i> , dan <i>E. coli</i> . Aktivitas tertinggi ditunjukkan oleh ekstrak kayu secang dengan zona hambat 19 mm terhadap <i>S. aureus</i> dan <i>P. acnes</i>	Ismayati et al., 2026
8	Mikroalga <i>Chlorella vulgaris</i>	Sintesis hidrotermal berbasis air tanpa bahan kimia tambahan (green hydrothermal synthesis).	<i>Carbon Quantum Dots</i> (CQDs) berukuran 7,19 nm dengan <i>quantum yield</i> 41,24%.	Zona hambat 25,16–26,78 mm terhadap <i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumoniae</i> , dan <i>S. typhi</i> ; MIC 5,38–8,64 µL/mL; MBC 3,64–5,53 µL/mL; serta penghambatan quorum sensing hingga >80%	Thakur et al., 2024

No	Jenis Biomassa	Metode Green Chemistry	Produk/Senyawa yang Dihasilkan	Aktivitas Antimikroba	Referensi
9	Polisakarida rumput laut coklat <i>Padina australis</i> .	Sintesis hidrotermal satu tahap (<i>one-step hydrothermal synthesis</i>)	PAPBCDs (<i>Padina australis</i> Polysaccharide-Betaine Carbon Dots) atau carbon dots terkuaternisasi (quaternized carbon dots) dengan ukuran rata-rata sekitar 9 nm	Antibakteri terhadap <i>Escherichia coli</i> dan <i>Staphylococcus aureus</i> dengan persentase inhibisi masing-masing 99,38% dan 90,89%. Selain itu mempercepat penyembuhan luka terinfeksi <i>S. aureus</i> pada model tikus.	Lv et al., 2024
10	<i>Purple rice lixivium</i> (air cucian/ekstrak limbah beras ungu)	Sintesis hidrotermal satu tahap (<i>one-step hydrothermal synthesis</i>)	1. BCDs (<i>Biomass Carbon Dots</i>) 2. CDFs (<i>FITC-functionalized Carbon Dots</i>) untuk deteksi bakteri Gram-positif 3. CDPs (<i>Protoporphyrin IX-functionalized Carbon Dots</i>) untuk terapi fotodinamik antibakteri (PDT)	Selektif terhadap bakteri Gram-positif terutama <i>Staphylococcus aureus</i> . CDPs menunjukkan MIC ₅₀ ≈ 5 µg/mL, MBC 5 µg/mL, eradikasi biofilm >75%, serta efisiensi bakterisidal in vivo sebesar 99,98% pada model luka terinfeksi.	Xu et al., 2025
11	Jerami padi (<i>Oryza sativa</i>)	Sintesis hidrotermal menggunakan air sebagai media reaksi pada suhu dan tekanan tinggi.	<i>Silica Nanoparticles</i> (SiNPs) atau nanopartikel silika berukuran sekitar 69,47–69,98 nm dengan distribusi ukuran yang seragam.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktif terhadap <i>Staphylococcus aureus</i> dan <i>Escherichia coli</i>. ▪ Zona hambat ±24–28 mm. ▪ MIC: 1,546 mg/mL (<i>S. aureus</i>) dan 3,238 mg/mL (<i>E. coli</i>). ▪ MBC: 0,638 mg/mL (<i>S. aureus</i>) dan 1,452 mg/mL (<i>E. coli</i>). ▪ Menunjukkan efek bakterisidal pada uji time-kill. 	Kamboj et al., 2024
12	Daun leci (<i>Litchi chinensis</i>)	<i>Green synthesis</i> (biosintesis) menggunakan ekstrak air daun <i>Litchi chinensis</i> sebagai agen pereduksi dan agen penstabil	Nanostruktur berbasis seng hidroksida (<i>Zn-hydroxide-based nanostructure</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktif terhadap <i>Bacillus subtilis</i>. ▪ Zona hambat 22,13–39 mm tergantung konsentrasi. ▪ Zona hambat maksimum sekitar 39 mm pada 0,4 mg/mL. ▪ Mampu menghambat pembentukan biofilm berdasarkan uji Congo Red. 	Srivastava et al., 2023
13	Buah <i>Citrullus colocynthis</i> (L.) Schrad (ekstrak buah kering)	Green hydrothermal synthesis	Nanokomposit Ag/Ni ₁₅ O ₁₆	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antibakteri terhadap <i>E. coli</i> (27 ± 0,4 mm) dan <i>S. aureus</i> (24 ± 0,5 mm). ▪ Antifungi terhadap <i>Phytophthora infestans</i> dengan inhibisi maksimum 96,057 ± 1,75%. ▪ MIC terendah 10 µg/mL dan MBC terendah 12 µg/mL pada <i>E. coli</i>. 	Khalid et al., 2026
14	Alga merah <i>Gracilaria birdiae</i> (polisakarida sulfat hasil ekstraksi)	<i>Green synthesis</i> nanopartikel perak menggunakan polisakarida alga sebagai reducing agent dan stabilizing agent.	<i>Silver nanoparticles</i> (AgNPs) berukuran 20,2–94,9 nm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antibakteri terhadap <i>Escherichia coli</i> (MIC terendah 34,3 µM). ▪ Antibakteri terhadap <i>Staphylococcus aureus</i> (MIC terendah 81,2 µM). ▪ Aktivitas lebih efektif terhadap bakteri Gram-negatif (<i>E. coli</i>) dibandingkan Gram-positif (<i>S. aureus</i>). 	Aragão et al., 2019

No	Jenis Biomassa	Metode Green Chemistry	Produk/Senyawa yang Dihasilkan	Aktivitas Antimikroba	Referensi
15	Limbah cangkang kemiri	Sintesis graphene nanosheets dari limbah biomassa melalui pirolisis dua tahap (<i>waste valorization/green nanomaterial synthesis</i>)	Graphene nanosheets atau lembaran nano grafena	<ul style="list-style-type: none"> Antibakteri terhadap <i>Staphylococcus aureus</i> (MIC 12,5 µg/mL; MBC 25 µg/mL). Antibakteri terhadap <i>Salmonella enteritidis</i> (MIC 6,25 µg/mL; MBC 12,5 µg/mL). Bersifat bakterisidal (MBC/MIC = 2). Menghambat dan merusak biofilm kedua bakteri secara signifikan. 	Azmi et al., 2026
16	Limbah sabut kelapa (<i>Cocos nucifera</i>)	Konversi limbah biomassa menjadi graphene oxide melalui kalsinasi satu tahap, diikuti sintesis hidrotermal komposit ZnO-NiO-ZrO ₂ /kitosan	CNH-GO@ZnO-NiO-ZrO ₂ @CS (komposit graphene oxide berbasis sabut kelapa yang dimodifikasi ZnO-NiO-ZrO ₂ dan kitosan)	Antibakteri terhadap <i>Escherichia coli</i> dan <i>Staphylococcus aureus</i> dengan zona hambat maksimum masing-masing 14,33 ± 0,57 mm dan 15,66 ± 0,57 mm	Mushahary et al., 2025
17	Gelatin (biomassa hewani) dan asam fitat (biomassa tumbuhan)	Pembentukan coating bio-based melalui reaksi ionik gelatin-asam fitat dalam air dan aplikasi pada Lyocell dengan metode impregnasi	PAGe (Phytic Acid-Gelatin coating) dan PAGe/Lyocell fabric	Sangat kuat terhadap <i>E. coli</i> dan <i>S. aureus</i> dengan persentase inhibisi mencapai 99,99% pada PAGe/Lyocell	Hu et al., 2025
18	Rumput <i>Brachiaria decumbens</i> (biomassa lignoselulosa)	Hidrolisis alkali langsung menggunakan NH ₃ (1 M, 24 jam, 40°C) tanpa ekstraksi komponen biomassa dan dengan pemanfaatan biomassa secara penuh	Bioplastik antimikroba berbasis rumput yang diperkaya ε-polylysine (GPL10, GPL20, GPL30)	Sangat kuat terhadap <i>E. coli</i> dan <i>S. aureus</i> , dengan reduksi populasi bakteri mencapai >99–99,9%, terutama pada formulasi GPL20 dan GPL30	Estrada-Sotomayor et al., 2025
19	Limbah cangkang udang (<i>Penaeus monodon</i>), khususnya bagian kepala yang kaya kitin	Ekstraksi kitin-kitosan dari limbah cangkang udang melalui demineralisasi, deproteinisasi, deasetilasi, dan fabrikasi film menggunakan metode EIPS (<i>Solvent Evaporation Induced Phase Separation</i>)	Kitosan dan film antibakteri kitosan-asetat biodegradable	Sangat kuat terhadap <i>Staphylococcus aureus</i> dengan zona hambat maksimum 45 mm dan nilai MIC 5 µg	Rahman et al., 2025
20	Peloid (lumpur terapeutik) dengan prekursor biomassa berupa tumbuhan darat, alga, dan mikroorganisme	Pemanfaatan lumpur terapeutik alami sebagai biomaterial terbarukan tanpa modifikasi kimia, dapat digunakan kembali (<i>circular economy</i>), diikuti ekstraksi bahan organik dan karakterisasi GC-MS.	n-alkana rantai panjang (n-C27–n-C31), diterpenoid (16α-phylloladane, isopimarane), ester asam benzoat, aldehida, alkohol, asam lemak dan ester asam lemak.	MIC terbaik 0,31 mg/mL terhadap <i>E. coli</i> , <i>P. hauseri</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. aureus</i> , <i>M. luteus</i> , dan <i>B. spizizenii</i> ; MIC 0,63 mg/mL terhadap <i>P. aeruginosa</i> dan <i>C. sporogenes</i>	Nikolovski et al., 2026

Hasil serupa juga dilaporkan pada berbagai biomassa tanaman Indonesia seperti kulit delima, biji pinang, kayu secang, kulit manggis, daun mangga, dan kulit teh hijau. Ekstrak biomassa tersebut menunjukkan aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram positif maupun Gram negatif meliputi *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Propionibacterium acnes*, *Bacillus subtilis*, and *Escherichia coli*, yang dikaitkan dengan tingginya kandungan polifenol dan senyawa fenolik. Analisis GC-MS menunjukkan bahwa aktivitas biologis tersebut merupakan hasil sinergi berbagai komponen bioaktif, bukan hanya satu senyawa dominan (Ismayati et al., 2026).

Pendekatan serupa juga dilaporkan oleh Bertolo et al. (2025) yang memanfaatkan limbah kulit jeruk sebagai sumber senyawa bioaktif melalui ekstraksi menggunakan *natural deep eutectic solvents* (NADES). Selain menghasilkan ekstrak dengan aktivitas antibakteri yang baik, metode ini mendukung konsep *waste valorization* karena mampu meningkatkan nilai tambah limbah agroindustri. Pada residu hutan, ekstrak polifenol dari limbah pinus maritim yang diperoleh menggunakan DES juga menunjukkan aktivitas antimikroba pada bakteri uji *S. aureus*. Temuan ini menunjukkan bahwa limbah kehutanan yang selama ini kurang termanfaatkan dapat menjadi sumber senyawa bioaktif bernilai tinggi (Duarte et al., 2022).

Selain biomassa tumbuhan, biomassa alami lain seperti peloid (lumpur terapeutik alami) juga menunjukkan aktivitas biologis yang menarik, salah satunya aktivitas antibakteri. Nikolovski et al. (2026) melaporkan bahwa aktivitas antibakteri peloid dipengaruhi oleh komposisi senyawa organik bioaktif seperti diterpenoid, ester asam benzoat, aldehida, alkohol, dan asam lemak. Menariknya, aktivitas antibakteri tidak berkorelasi dengan jumlah ekstrak yang diperoleh, melainkan lebih ditentukan oleh keragaman dan komposisi molekul bioaktif yang terkandung di dalamnya. Aktivitas paling tinggi ditunjukkan pada *Escherichia coli* and *Micrococcus luteus*, adapun aktivitas yang lebih rendah terhadap *Pseudomonas aeruginosa* dan *Clostridium sporogenes*. Secara umum, temuan-temuan ini menunjukkan bahwa biomassa tidak hanya berfungsi sebagai sumber bahan baku terbarukan tetapi juga sebagai reservoir senyawa bioaktif yang dapat dimanfaatkan secara langsung untuk aplikasi antimikroba.

Platform Chemicals Biomassa sebagai Prekursor Senyawa Antimikroba

Pendekatan lainnya yang berkembang pesat adalah pemanfaatan biomassa sebagai sumber *platform chemicals* yang kemudian dimodifikasi menjadi molekul antimikroba baru. *Platform chemicals* merupakan senyawa antara yang dihasilkan dari konversi biomassa dan dapat dimanfaatkan sebagai *building blocks* dalam sintesis berbagai produk bernilai tinggi, termasuk senyawa dengan aktivitas farmakologis. Dalam kajian ini ditemukan bahwa furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), dan *levulinic acid* serta eugenol merupakan contoh molekul platform yang berasal dari fraksinasi biomassa lignoselulosa dan merupakan *platform chemicals* yang paling banyak dieksplorasi untuk pengembangan agen antimikroba.

Gurav et al. (2025) berhasil mensintesis turunan hydrazinyl-thiazole dari furfural berbasis biomassa menggunakan metode *grindstone chemistry* tanpa pelarut. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi limbah proses tetapi juga menghasilkan senyawa dengan aktivitas antibakteri terhadap *Escherichia coli* dan *Bacillus subtilis*. Sementara itu, Vijayakumar & Thirunanasambandham (2021) melaporkan bahwa 5-hydroxymethylfurfural mampu menghambat pembentukan biofilm *Acinetobacter baumannii* pada konsentrasi 100 µg/mL tanpa menimbulkan efek bakterisidal langsung. Mekanisme yang diamati meliputi penurunan produksi polisakarida ekstraseluler serta penekanan ekspresi gen virulensi seperti *bfmR*, *bap*, *ompA*, dan *csuA/B*, yang berperan penting dalam pembentukan biofilm dan kolonisasi bakteri.

Penelitian oleh Xuan et al. (2020) memperlihatkan bahwa kombinasi eugenol dan *levulinic acid* menghasilkan *plasticizer* antibakteri yang efektif menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Studi ini memperlihatkan bahwa *platform chemicals* biomassa tidak hanya berfungsi sebagai bahan baku kimia, tetapi juga dapat menjadi prekursor molekul antimikroba generasi baru dan/atau dapat bertindak langsung sebagai agen antimikroba yang menargetkan faktor virulensi mikroorganisme. Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menunjukkan bahwa *platform chemicals* biomassa memiliki potensi besar sebagai sumber molekul awal dalam pengembangan kandidat antimikroba baru yang lebih berkelanjutan.

Sintesis Hijau Nanomaterial Antimikroba Berbasis Biomassa

Kelompok penelitian paling dominan dalam kajian ini adalah pengembangan nanomaterial antimikroba berbasis biomassa. *Carbon dots* menjadi salah satu nanomaterial yang paling banyak diteliti

karena memiliki biokompatibilitas tinggi, luas permukaan besar, dan kemampuan menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) yang efektif dalam membunuh bakteri (Sun et al., 2024). Tariq et al. (2022) melaporkan bahwa *carbon dots* yang disintesis dari biomassa buah ara (*Ficus religiosa*) menggunakan metode microwave menunjukkan aktivitas bakterisidal terhadap strain *Escherichia coli* yang resisten ampisilin dan *Bacillus subtilis* yang resisten tetrasiklin melalui mekanisme kerusakan membran yang dimediasi oleh pembentukan ROS.

Hasil serupa juga dilaporkan oleh Thakur et al. (2024) yang menemukan sintesis *carbon quantum dots* (CQD) dari *Chlorella vulgaris* menunjukkan aktivitas antibakteri dan *anti-quorum sensing* terhadap patogen *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*. Penelitian lain oleh Lv et al. (2024) menunjukkan bahwa *carbon dots* berbasis biomassa mampu memberikan efisiensi antibakteri lebih dari 90% sekaligus mempercepat penyembuhan luka terinfeksi pada model tikus luka terinfeksi *S. aureus*. Xu et al. (2025) selanjutnya mengembangkan *carbon dots* fungsional yang mampu mendeteksi dan membunuh bakteri Gram positif secara selektif sehingga berpotensi digunakan sebagai agen theranostik.

Selain *carbon dots*, biomassa juga dimanfaatkan untuk menghasilkan *graphene nanosheets*, nanosilika, nanopartikel logam, dan nanokomposit yang multifungsi, salah satunya memiliki aktivitas antibakteri. Studi oleh Azmi et al. (2026) berhasil mensintesis *graphene nanosheets* dari limbah cangkang kemiri yang menunjukkan aktivitas antibakteri dan antibiofilm yang kuat terhadap *Staphylococcus aureus* (MIC 12,5 µg/mL) dan *Salmonella enteritidis* (MIC 6,25 µg/mL). Material tersebut mampu merusak membran sel bakteri dan menghambat pembentukan biofilm melalui gangguan terhadap matriks *extracellular polymeric substances* (EPS).

Sementara itu, Kamboj et al. (2024) melaporkan nanopartikel silika (SiNPs) dari jerami padi juga menunjukkan aktivitas antibakteri yang kuat terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Aktivitas antimikroba SiNPs terutama disebabkan oleh kemampuannya merusak integritas membran sel bakteri sehingga menyebabkan kebocoran komponen seluler penting dan berujung pada kematian sel. Ukuran partikel yang sangat kecil memberikan luas permukaan yang besar sehingga meningkatkan interaksi antara nanopartikel dan dinding sel mikroba. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Escherichia coli* cenderung lebih sensitif terhadap SiNPs dibandingkan *Staphylococcus aureus*, meskipun perbedaannya tidak signifikan secara statistik. Perbedaan respons ini diduga berkaitan dengan variasi struktur dinding sel bakteri, di mana bakteri Gram-positif seperti *S. aureus* memiliki lapisan peptidoglikan tebal, sedangkan bakteri Gram-negatif seperti *E. coli* memiliki membran luar yang tersusun atas fosfolipid dan lipopolisakarida yang memengaruhi interaksi dengan nanopartikel. Dengan demikian, SiNPs berpotensi menjadi agen antimikroba yang efektif melalui mekanisme kerusakan membran sel bakteri (Kamboj et al., 2024).

Penelitian nanomaterial lainnya dilakukan oleh Srivastava et al. (2023) yang melaporkan sintesis hijau nanostruktur Zn(OH)₂ menggunakan ekstrak daun *Litchi chinensis* sebagai agen pereduksi dan penstabil alami. Nanomaterial yang dihasilkan menunjukkan aktivitas antibakteri yang baik terhadap bakteri patogen serta memiliki kemampuan menghambat pembentukan biofilm. Sementara itu, studi oleh Khalid et al. (2026) berhasil mengembangkan nanokomposit Ag/Ni₁₅O₁₆ melalui sintesis hidrotermal hijau dengan ekstrak buah *Citrullus colocynthis* yang menunjukkan aktivitas antimikroba yang kuat terhadap bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*, yang ditunjukkan oleh zona hambat masing-masing sebesar 27 ± 0,4 mm dan 24 ± 0,5 mm. Selain aktivitas antibakteri, material tersebut juga memiliki aktivitas antijamur dan antioksidan yang signifikan. Selain itu, komposit *graphene oxide* berbasis biomassa yang dipadukan dengan ZnO-NiO-ZrO₂ dan kitosan juga menunjukkan aktivitas antimikroba yang baik terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, sekaligus memberikan kemampuan adsorpsi yang tinggi terhadap polutan organik (Mushahary et al., 2025).

Nanopartikel logam hasil sintesis hijau juga banyak dikembangkan. Polisakarida dari alga merah *Gracilaria birdiae* yang digunakan sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel perak menunjukkan aktivitas antibakteri terhadap *E. Coli* yang lebih tinggi daripada aktivitasnya terhadap *S. Aureus*. Hal ini dikaitkan dengan perbedaan komposisi dinding sel bakteri Gram-positif dan Gram-negatif (Aragão et al., 2019; Kamboj et al., 2024). Secara umum, aktivitas antimikroba nanomaterial berbasis biomassa dikaitkan dengan pembentukan ROS, kerusakan membran sel, gangguan metabolisme bakteri, serta inhibisi pembentukan biofilm. Integrasi biomassa dan nanoteknologi membuka peluang besar untuk menghasilkan agen antimikroba yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Biomaterial Antimikroba Berbasis Biomassa

Selain menghasilkan molekul bioaktif dan nanomaterial, biomassa juga banyak dimanfaatkan sebagai bahan pembentuk biomaterial antimikroba. Film komposit berbasis selulosa yang mengandung asam tanat menunjukkan kemampuan menghambat pertumbuhan bakteri sekaligus memberikan aktivitas antioksidan dan perlindungan terhadap radiasi ultraviolet. Material ini berpotensi diaplikasikan sebagai kemasan pangan aktif yang ramah lingkungan (Huang et al., 2024). Bioplastik berbasis pati yang diperkuat dengan biomassa lignoselulosa dari limbah biji zaitun menunjukkan peningkatan sifat penghalang terhadap air dan oksigen serta aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram positif dan Gram negatif. Selain itu, material tersebut mampu terdegradasi lebih dari 70% setelah 14 hari pengomposan sehingga mendukung konsep material berkelanjutan (Lounis et al., 2024). Sementara itu, Estrada-Sotomayor et al. (2025) melaporkan konversi penuh biomassa rumput menjadi bioplastik antimikroba menunjukkan aktivitas antibakteri yang efektif terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*.

Pada sektor tekstil, penggunaan pelapis berbasis gelatin dan asam fitat pada kain Lyocell menghasilkan material multifungsi dengan tingkat inhibisi bakteri lebih dari 99,99% terhadap *E. coli* dan *S. aureus* (Hu et al., 2026). Di sisi lain, Rahman et al. (2025) mengembangkan film kitosan antibakteri dari limbah cangkang udang yang memiliki aktivitas antimikroba yang cukup tinggi terhadap bakteri uji *S. aureus* (MIC 5 µg/mL, zona hambat 45 mm).

Pengembangan biomaterial berbasis biomassa memberikan beberapa keuntungan, yaitu tidak hanya mampu menghasilkan material *biodegradable*, namun sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap polimer sintesis berbasis petrokimia. Oleh karena itu, biomaterial antimikroba berbasis biomassa berpotensi diaplikasikan pada bidang kemasan pangan aktif, tekstil kesehatan, pembalut luka, serta sistem penghantaran obat.

Research Gap dan Prospek Penelitian

Meskipun penelitian mengenai biomassa sebagai sumber antimikroba berkembang pesat, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengembangan nanomaterial dan biomaterial antimikroba. Sebaliknya, pemanfaatan *platform chemicals* biomassa seperti furfural, HMF, dan *levulinic acid* sebagai prekursor sintesis kandidat antibiotik baru masih relatif terbatas. Selain itu, mayoritas penelitian masih berada pada tahap *in vitro* sehingga diperlukan kajian lebih lanjut mengenai toksisitas, bioavailabilitas, stabilitas, dan efektivitas *in vivo*.

Ke depan, integrasi konsep *biorefinery*, *green chemistry*, nanoteknologi, dan desain obat berbantuan komputasi berpotensi mempercepat pengembangan senyawa antimikroba generasi baru yang lebih efektif, aman, dan berkelanjutan. Pemanfaatan *platform chemicals* biomassa sebagai *building blocks* sintesis obat merupakan arah penelitian yang sangat menjanjikan karena dapat menghasilkan molekul baru dengan aktivitas biologis yang lebih spesifik sekaligus mendukung konsep ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Biomassa memiliki potensi yang sangat besar sebagai sumber prekursor senyawa antimikroba berbasis *green chemistry* karena tersedia melimpah, bersifat terbarukan, dan mengandung berbagai senyawa bioaktif maupun *platform chemicals* yang dapat dikembangkan menjadi produk bernilai tinggi. Hasil kajian menunjukkan bahwa biomassa dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber senyawa antimikroba alami maupun sebagai bahan baku dalam sintesis nanomaterial dan biomaterial antimikroba melalui pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Penerapan prinsip *green chemistry*, seperti penggunaan bahan baku terbarukan, pelarut hijau, biosintesis, dan pemanfaatan limbah biomassa, terbukti mampu meningkatkan keberlanjutan proses tanpa mengurangi efektivitas antimikroba yang dihasilkan. Meskipun demikian, pemanfaatan *platform chemicals* biomassa seperti furfural, 5-hydroxymethylfurfural, dan *levulinic acid* sebagai prekursor sintesis kandidat antibiotik baru masih relatif terbatas dan menjadi peluang penelitian yang menjanjikan untuk mendukung pengembangan antimikroba generasi baru yang lebih efektif, aman, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Makassar atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penyusunan artikel ini.

Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan dan diskusi ilmiah sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aragão, A. P. de, Oliveira, T. M. de, Quelemes, P. V., Perfeito, M. L. G., Araújo, M. C., Santiago, J. de A. S., Cardoso, V. S., Quaresma, P., Leite, J. R. de S. de A., Silva, D. A. da, Aragão, A. P. de, Oliveira, T. M. de, Quelemes, P. V., Perfeito, M. L. G., Araújo, M. C., Santiago, J. de A. S., Cardoso, V. S., Quaresma, P., Leite, J. R. de S. de A., & Silva, D. A. da. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles using the seaweed *Gracilaria birdiae* and their antibacterial activity. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 4182–4188. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2016.04.014>
- Azmi, M. A., Samosir, F. R., Syaida, A. A. R., Jalil, M. T. M., Jamil, N. M., Nor, N. H. M., Siburian, R., & Yahya, M. F. Z. R. (2026). Exploring the antibacterial and antibiofilm potential of graphene nanosheets synthesized from candlenut shell waste. *Microbial Pathogenesis*, 214, 108426. <https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2026.108426>
- Bernardes, L. M. M., Malta, S. M., Santos, A. C. C., da Silva, R. A., Rodrigues, T. S., da Silva, M. N. T., Bittar, V. P., Borges, A. L. S., Justino, A. B., Nossol, A. B. dos S., Martins, M. M., Espíndola, F. S., Mendes-Silva, A. P., & Ueira-Vieira, C. (2025). Green synthesis, characterization, and antimicrobial activity of silver nanoparticles from water-soluble fractions of Brazilian Kefir. *Scientific Reports 2025 15:1*, 15(1), 10626-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95616-4>
- Bertolo, M. R. V., Oliveira, L. F. R., Titato, G. M., Lanças, F. M., & Correa, D. S. (2025). Sustainable extraction of value-added compounds from orange waste using natural deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, 431, 127703. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2025.127703>
- Chacón-Huete, F., Messina, C., Cigana, B., & Forgione, P. (2022). Diverse Applications of Biomass-Derived 5-Hydroxymethylfurfural and Derivatives as Renewable Starting Materials. *ChemSusChem*, 15(13), e202200328. <https://doi.org/10.1002/CSSC.202200328;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Chen, W., Zhang, P., Ding, Y., Xie, X., Fu, J., Zhao, R., Xiao, Y., Lukic, M. J., Li, B., Wang, W., & Chen, S. (2024). Bioactives from biomass: Treasure for future potent antimicrobial applications. *Chemical Engineering Journal*, 499, 155669. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.155669>
- Duarte, H., Gomes, V., Aliaño-González, M. J., Faleiro, L., Romano, A., & Medronho, B. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction of Polyphenols from Maritime Pine Residues with Deep Eutectic Solvents. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/FOODS11233754>
- Estrada-Sotomayor, J. D., Łopusiewicz, Ł., Lizundia, E., Guenther, S., & Merino, D. (2025). Full conversion of grass biomass into sustainable functional antimicrobial bioplastics. *Green Chemistry*, 27(17), 4587–4602. <https://doi.org/10.1039/D5GC00643K>
- Gurav, A., Gurav, R., Chavan, P. N., Nerlekar, N., Dandge, P., Sankpal, S., & Hangirgekar, S. (2025). Design and synthesis of novel hydrazinyl thiazoles from biomass derived furfurals: Their molecular docking, anti-cancer, anti-oxidant, and anti-bacterial study. *Journal of Molecular Structure*, 1323, 140541. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2024.140541>
- Hu, L., Xie, L., Wang, X., Ji, J., & Shao, Z. B. (2026). Construction of fully biomass coating on Lyocell fabrics by gelatin containing phosphorus for superior fire safety, antibacterial performance and Wearability. *Progress in Organic Coatings*, 215, 110117. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCAT.2026.110117>
- Huang, X., Huang, R., Zhang, Q., Zhang, Z., Fan, J., & Huang, J. (2024). Cellulose-based biomass composite films for plastic replacement: Synergistic UV shielding, antibacterial and antioxidant

properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132418. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.132418>

Isikgor, F., & Becer, C. R. (2016). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6(25), 4497–4559. <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>

Ismayati, M., Nurfajrin Solihat, N., Puspita Sari, F., Fatriasari, W., Krishanti, N. P. R. A., Saputro Wibowo, D., Qomariah, I., Mumtaz, N., Ismawati, Yuniastri, R., & Risnasari, I. (2026). Bioactive extracts from plant biomass: Antioxidant, antibacterial, and physicochemical characterization. *Biochemical Systematics and Ecology*, 124, 105161. <https://doi.org/10.1016/J.BSE.2025.105161>

Kamboj, R., Bains, A., Sharma, M., Kumar, A., Ali, N., Parvez, M. K., Chawla, P., & Sridhar, K. (2024). Green synthesis of rice straw-derived silica nanoparticles by hydrothermal process for antimicrobial properties and effective degradation of dyes. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.078>

Khalid, M., Khalil, A., Muhammad, S., Nawaz, H., Mahmood, K., Caprioli, G., Hussain, S., & Farid, T. (2026). Hydrothermal synthesis of Ag/Ni15O16 nanocomposite: Exploiting green chemistry for environmental and biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.132008>

Kusumastuti, Y., Maulana Ma'arif, J., Irsal, M., Widi, D. C., Putri, N. R. E., Pamungkas, M. S., Olivia, L., & Kristanto, J. (2026). Integrated sonication-assisted deep eutectic solvent for extraction of antibacterial compounds from cacao shells. *RSC Advances*, 16(22), 19870–19884. <https://doi.org/10.1039/D6RA01724J>

Laxminarayan, R., Duse, A., Wattal, C., Zaidi, A. K. M., Wertheim, H. F. L., Sumpradit, N., Vlieghe, E., Hara, G. L., Gould, I. M., Goossens, H., Greko, C., So, A. D., Bigdeli, M., Tomson, G., Woodhouse, W., Ombaka, E., Peralta, A. Q., Qamar, F. N., Mir, F., ... Cars, O. (2013). Antibiotic resistance—the need for global solutions. *The Lancet Infectious Diseases*, 13(12), 1057–1098. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(13\)70318-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(13)70318-9)

Lounis, F. M., Benhacine, F., & Hadj-Hamou, A. S. (2024). Improving water barrier properties of starch based bioplastics by lignocellulosic biomass addition: Synthesis, characterization and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 137823. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.137823>

Lv, J., Tian, H., Pan, L., Chen, Z., Li, M., Ghiladi, R. A., Qin, Z., & Yin, X. (2024). Biomass derived carbon dots with antibacterial and anti-inflammatory properties for the treatment of wound healing. *Chemical Engineering Science*, 295, 120084. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2024.120084>

Moussa, H., Hamid, S., Mameri, A., Lekmine, S., Tahraoui, H., Kebir, M., Touzout, N., Dahmoune, F., Ola, M. S., Zhang, J., & Amrane, A. (2024). From Green Chemistry to Healthy Environments: Silver Nanoparticles as a Dual Antioxidant and Antibacterial Agents for Advancing Biomedicine and Sustainable Wastewater Treatment. *Bioengineering*, 11(12), 1205. <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING11121205>

Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles Aguilar, G., Gray, A., Han, C., Bisignano, C., Rao, P., Wool, E., Johnson, S. C., Browne, A. J., Chipeta, M. G., Fell, F., Hackett, S., Haines-Woodhouse, G., Kashef Hamadani, B. H., Kumaran, E. A. P., McManigal, B., ... Naghavi, M. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629–655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)

Mushahary, N., Baglary, G. R., Islary, A., Das, B., & Basumatary, S. (2025). Biomass derived graphene oxide/ZnO-NiO-ZrO₂/chitosan composite for efficient wastewater treatment and antimicrobial

property. *Diamond and Related Materials*, 157, 112487.
<https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2025.112487>

Nikolovski, Z., Šajnović, A., Novaković, I., Burazer, N., Gajica, G., & Jovančević, B. (2026). Environmental and geochemical determinants of bioactive organic constituents in peloids: Implications for antibacterial activity. *Environmental Research*, 303, 124737.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2026.124737>

Rahman, M. M., Maniruzzaman, M., & Saha, R. K. (2025). A green route of antibacterial films production from shrimp (*Penaeus monodon*) shell waste biomass derived chitosan: Physicochemical, thermomechanical, morphological and antimicrobial activity analysis. *South African Journal of Chemical Engineering*, 51, 153–169. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2024.11.005>

Seitkalieva, M. M., Vavina, A. V., Strukova, E. N., Samigullina, A. I., Sokolov, M. R., Kalinina, M. A., & Ananikov, V. P. (2025). Bio-Based Cationic Surfactants from 5-(Hydroxymethyl)furfural for Antimicrobial Applications: The Role of Cationic Substitutes, Alkyl Chains, and Ester Linkages. *ChemSusChem*, 18(11), e202402586.
<https://doi.org/10.1002/CSSC.202402586;CTYPE:STRING:JOURNAL>

Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, 19(1), 18–43. <https://doi.org/10.1039/C6GC02157C>

Sheldon, R. A. (2023). The E factor at 30: a passion for pollution prevention. *Royal Society of Chemistry*, 25(25), 1693–2030. <https://doi.org/10.1039/d2gc04747k>

Solihat, N. N., Hidayat, A. F., Ilyas, R. A., Thiagamani, S. M. K., Azeele, N. I. W., Sari, F. P., Ismayati, M., Bakshi, M. I., Garba, Z. N., Hussin, M. H., Restu, W. K., Syafii, W., Ariyanta, H. A., & Fatriasari, W. (2024). Recent antibacterial agents from biomass derivatives : Characteristics and applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 9(3), 283–309.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBAB.2024.02.002>

Srivastava, M., Singh, K. R., Singh, T., Asiri, M., Suliman, M., Sabia, H., Deen, P. R., Chaube, R., & Singh, J. (2023). Bioinspired fabrication of zinc hydroxide-based nanostructure from lignocellulosic biomass Litchi chinensis leaves and its efficacy evaluation on antibacterial, antioxidant, and anticancer activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126886.
<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126886>

Stefanache, A., Marcinschi, A., Marin, G. A., Mitran, A. M., Lungu, I. I., Miftode, A. M., Crivoi, F., Lacatusu, D., Baican, M., Cioanca, O., & Hancianu, M. (2025). Green Chemistry Approaches in Pharmaceutical Synthesis: Sustainable Methods for Drug Development. *AppliedChem 2025*, Vol. 5, 5(2). <https://doi.org/10.3390/APPLIEDCHEM5020013>

Sun, L., Zhao, Y., Peng, H., Zhou, J., Zhang, Q., Yan, J., Liu, Y., Guo, S., Wu, X., & Li, B. (2024). Carbon dots as a novel photosensitizer for photodynamic therapy of cancer and bacterial infectious diseases: recent advances. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), 210. <https://doi.org/10.1186/S12951-024-02479-4>

Tariq, M., Singh, A., Varshney, N., Samanta, S. K., & Sk, M. P. (2022). Biomass-derived carbon dots as an emergent antibacterial agent. *Materials Today Communications*, 33, 104347.
<https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2022.104347>

Thakur, S., Bains, A., Kumar, A., Goksen, G., Dhull, S. B., Ali, N., Khan, M. R., & Chawla, P. (2024). Biomass-derived carbon quantum dots from *Chlorella vulgaris*: Photocatalytic reduction of malachite green dye coupled with anti-quorum sensing and antimicrobial activity against food pathogens. *Food Bioscience*, 62, 105272. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.105272>

Vijayakumar, K., & Thirunanasambandham, R. (2021). 5-Hydroxymethylfurfural inhibits *Acinetobacter baumannii* biofilms: an in vitro study. *Archives of Microbiology*, 203(2), 673–682. <https://doi.org/10.1007/S00203-020-02061-0/FIGURES/6>

Wang, Y., Brown, C. A., & Chen, R. (2018). Industrial production, application, microbial biosynthesis and degradation of furanic compound, hydroxymethylfurfural (HMF). *AIMS Microbiology*, 4(2), 261. <https://doi.org/10.3934/MICROBIOL.2018.2.261>

Xu, K. F., Wang, Z., Cui, M., Jiang, Y., Li, C., Wang, Z. X., Li, L. Y., Jia, C., Zhang, L., & Wu, F. G. (2025). Turning Waste into Treasure: Functionalized Biomass-Derived Carbon Dots for Superselective Visualization and Eradication of Gram-Positive Bacteria. *Advanced Science (Weinheim, Baden-Wuerttemberg, Germany)*, 12(11). <https://doi.org/10.1002/ADVS.202411084>

Xuan, W., Odelius, K., & Hakkarainen, M. (2020). Dual-functioning antibacterial eugenol-derived plasticizers for polylactide. *Biomolecules*, 10(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/biom10071077>

Yin, Z., Yang, L., Wang, H., Liu, Z., Wang, P., Sun, H., Lu, X., Wang, Y., Kang, J., & Ma, C. (2026). Biomass fuel assisted green synthesis of defect-rich MgO nanoparticles for antimicrobial and biocompatibility studies. *Journal of Alloys and Compounds*, 1061, 187464. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2026.187464>

Zhang, W., Liang, Y., Hu, C., Li, W., Lai, J., Chen, K., Xiang, S., Niedzwiedzki, D., Wu, J., Li, A., & Dai, S. Y. (2024). 3D structure-functional design of a biomass-derived photocatalyst for antimicrobial efficacy and chemical degradation under ambient conditions. *Green Chemistry*, 26(19), 10139–10151. <https://doi.org/10.1039/D4GC01246A>