e-ISSN 3062-8849
The 4th National Conference on Innovative Agriculture 2026
Jember, 25 – 26 September 2026

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.691

Teknologi Non-Termal untuk Ekstraksi Hijau Polisakarida Jamur: Tinjauan Narasi tentang Intensifikasi Proses, Rekayasa Struktur, Bioaktivitas, dan Aplikasinya

Non-Thermal Technologies for the Green Extraction of Fungal Polysaccharides: A Critical Review of Process Intensification, Structural Engineering, Bioactivity, and Applications

Angga Prasetyo[1], Lulus Mualimin[2], Shinta Widyaningtyas[3], Amellia Dwi Rizkyana[4], Nadiyah Zuhroh[5]*

[1,2,3]Program Studi Teknologi Rekayasa Pengemasan, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember
[4,5]Program Studi Teknologi Rekayasa Pangan, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

*Email Koresponden: nadiyah_zuhroh@polije.ac.id

Received : 24 September 2026 | Accepted : 24 September 2026 | Published : 31 Oktober 2026

Kata Kunci

Ekstraksi; Jamur; *Pleurotus ostreatus*; Polisakarida; Teknologi non-termal

ABSTRAK

Polisakarida jamur merupakan sumber senyawa bioaktif yang berpotensi dikembangkan untuk material pangan, pangan fungsional, dan nutrasetikal. Ekstraksi konvensional memiliki keterbatasan berupa penggunaan energi dan pelarut yang tinggi serta risiko degradasi senyawa sensitif terhadap panas. Kajian ini bertujuan menganalisis penerapan teknologi ekstraksi non-termal terhadap karakteristik, bioaktivitas, dan potensi aplikasi polisakarida jamur. Metode yang digunakan adalah *narrative review* dengan menelaah artikel penelitian primer yang diperoleh melalui Google Scholar, mencakup *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE), *Pulsed Electric Field* (PEF), *High-Pressure Processing* (HPP), plasma dingin, *Enzyme-Assisted Extraction* (EAE), dan *Deep Eutectic Solvents* (DES). Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi tersebut dapat meningkatkan perolehan polisakarida dan memodifikasi berat molekul, kelarutan, gugus fungsi, serta aktivitas biologis. Efektivitas ekstraksi bergantung pada intensitas perlakuan dan bioaktivitas target. Pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada ekstraksi berbasis struktur, fungsi, keberlanjutan, dan kesiapan skala industri.

Keywords

Extraction; Fungal; Pleurotus ostreatus; Polysaccharides; Non-thermal technology

ABSTRACT

Fungal polysaccharides are a source of bioactive compounds with potential applications in functional foods, nutraceuticals, and food materials. Conventional extraction methods have limitations, including high energy and solvent consumption and the risk of degradation of heat-sensitive compounds. This review aimed to analyze the application of non-thermal extraction technologies to the characteristics, bioactivities, and potential applications of fungal polysaccharides. A narrative review was conducted by examining primary research articles obtained through Google Scholar, covering Ultrasound-Assisted Extraction (UAE), Pulsed Electric Field (PEF), High-Pressure Processing (HPP), cold plasma, Enzyme-Assisted Extraction (EAE), and Deep Eutectic Solvents (DES). The results indicate that these technologies can improve polysaccharide recovery and modify molecular weight, solubility, functional groups, and biological activities. Extraction effectiveness depends on treatment intensity and the targeted bioactivity. Future development should focus on structure- and function-oriented extraction, sustainability, and industrial-scale readiness.

1. PENDAHULUAN

Jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) merupakan salah satu jamur pangan yang banyak dibudidayakan dan dikonsumsi karena memiliki nilai nutrisi serta potensi fungsional yang tinggi. Selain komponen gizi, jamur tiram mengandung berbagai senyawa bioaktif, seperti polisakarida, glikoprotein, protein, senyawa fenolik, lipid, dan metabolit sekunder (Corrêa et al., 2016; Mukherjee et al., 2026). Di antara komponen tersebut, polisakarida mendapat perhatian khusus karena berperan penting dalam berbagai aktivitas biologis (Liu & Wang, 2025) dan berpotensi dikembangkan sebagai bahan pangan fungsional maupun sumber senyawa bioaktif (Devi et al., 2024; Kumla et al., 2025).

Polisakarida pada jamur tiram memiliki struktur yang beragam, meliputi β-glukan, α-glukan, heteropolisakarida, mannogalaktan, serta kompleks β-glukan–kitin yang merupakan bagian dari matriks dinding sel jamur (Baeva et al., 2019; Flores et al., 2024; Pérez-Bassart et al., 2023). Pada *P. ostreatus*, salah satu polisakarida yang banyak dikaji adalah pleuran, yaitu β-(1→3)(1→6)-glukan (Vetter, 2023). Penelitian mengenai karakterisasi struktur menunjukkan bahwa fraksi polisakarida pada jamur tiram dapat memiliki karakteristik struktur dan kelarutan yang berbeda bergantung pada metode ekstraksi yang digunakan (Baeva et al., 2019; D. Guo et al., 2025). Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik polisakarida yang diperoleh tidak hanya ditentukan oleh bahan baku, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi dan teknik ekstraksi.

Keberadaan polisakarida tersebut menjadikan jamur tiram sebagai kandidat yang sangat potensial untuk dikembangkan sebagai sumber senyawa bioaktif. Berbagai penelitian melaporkan bahwa ahwa polisakarida asal jamur tiram ini menunjukkan ragam aktivitas biologis yang signifikan, mencakup potensi antioksidan, antitumor, imunomodulator, antibakteri, antikoagulan hingga antivirus (Barbosa et al., 2020; Lesa et al., 2022; Rizkyana et al., 2022; Sharma et al., 2021). Aktivitas tersebut berkaitan dengan karakteristik fisikokimia dan struktur polisakarida, termasuk komposisi monosakarida, berat molekul, serta pola percabangan rantai. Dengan demikian, optimasi ekstraksi polisakarida dari jamur tiram tidak hanya berorientasi pada hasil rendemen yang tinggi, melainkan juga harus memastikan bahwa metode yang digunakan mampu mempertahankan karakteristik dan aktivitas biologis senyawa

yang diperoleh.

Proses ekstraksi memegang peranan penting dalam isolasi polisakarida dari jamur. Teknik konvensional, termasuk maserasi, ekstraksi dengan air panas, dan ekstraksi Soxhlet, merupakan pendekatan yang umum digunakan (Amirullah et al., 2023; Sun et al., 2022). Akan tetapi, teknik-teknik ini memiliki kelemahan signifikan, seperti durasi proses yang lama, kebutuhan pelarut dalam jumlah besar, dan kondisi operasi pada suhu tinggi yang dapat mendegradasi komponen bioaktif yang sensitif terhadap panas. Selain itu, perbedaan parameter ekstraksi dapat menghasilkan variasi yang nyata pada rendemen, distribusi berat molekul, komposisi monosakarida, serta aktivitas biologis polisakarida yang diperoleh (Leong et al., 2021; Rosyida et al., 2024).

Keterbatasan tersebut mendorong eksplorasi teknologi ekstraksi non-konvensional yang mampu menawarkan efisiensi proses serta efektivitas perolehan (yield) senyawa bioaktif yang lebih tinggi. Berbagai pendekatan, seperti *ultrasound-assisted extraction* (UAE), *microwave-assisted extraction* (MAE), *enzyme-assisted extraction* (EAE), *subcritical water extraction* (SWE), serta kombinasi beberapa teknologi, telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi polisakarida jamur. Pada jamur tiram, penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa modifikasi teknologi ekstraksi dapat meningkatkan rendemen polisakarida sekaligus mempertahankan atau meningkatkan aktivitas antioksidan ekstrak dibandingkan ekstraksi secara konvensional.

Dengan demikian, pemahaman mengenai keterkaitan kondisi ekstraksi dengan rendemen dan aktivitas biologis polisakarida dapat mendukung pengembangan bahan bioaktif berbasis jamur tiram secara lebih optimal. Oleh karena itu, artikel review ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis berbagai metode ekstraksi polisakarida dari jamur, menganalisis pengaruhnya terhadap karakteristik fisikokimia dan aktivitas biologis, serta merumuskan rekomendasi strategi ekstraksi yang efektif untuk pengembangan senyawa bioaktif berbasis jamur tiram di masa depan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan narasi (*narrative review*) dengan memaparkan rangkuman yang bersifat non-sistematis dan menganalisis topik tertentu secara spesifik (Gregory & Denniss, 2018). Penelitian dilaksanakan dengan merangkum dan menganalisis perkembangan teknologi ekstraksi senyawa bioaktif dari polisakarida dan hasil samping pangan. Kajian mencakup teknologi *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE), *Pulsed Electric Field* (PEF), *High-Pressure Processing* (HPP), *Cold Plasma*, *Enzyme-Assisted Extraction* (EAE), dan *Deep Eutectic Solvents* (DES), serta karakterisasi, bioaktivitas, aplikasi, dan prospek hasil ekstraksi. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Google Scholar menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan masing-masing teknologi ekstraksi, polisakarida, senyawa bioaktif, karakterisasi, bioaktivitas, aplikasi, dan prospek teknologi ekstraksi untuk polisakarida.

Literatur yang dipilih meliputi artikel penelitian primer dari jurnal nasional dan internasional yang diterbitkan dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris dan relevan dengan topik kajian. Artikel yang membahas mekanisme atau penerapan teknologi ekstraksi polisakarida, karakteristik senyawa hasil ekstraksi, aktivitas biologis, serta potensi aplikasinya dimasukkan dalam kriteria inklusi. Kriteria eksklusi berupa artikel yang tidak relevan dengan fokus kajian, tidak tersedia dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris, serta karya ilmiah berupa skripsi, tesis, dan disertasi. Selain itu, artikel review digunakan sebagai sumber pendukung untuk memperoleh informasi umum dan menelusuri referensi penelitian primer yang relevan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknologi ekstraksi non-termal berkembang sebagai solusi inovatif untuk memulihkan senyawa bioaktif dari matriks biologis tanpa risiko kerusakan akibat panas (degradasi termal). Metode seperti Ultrasound-Assisted Extraction (UAE), Pulsed Electric Field (PEF), High Pressure Processing (HPP), dan Supercritical CO_2 Extraction (SFE) mengandalkan gaya mekanis, disrupsi membran sel, dan perubahan fasa fluida untuk meningkatkan efisiensi dan menjaga kualitas zat aktif (Garcia-Vaquero et al., 2017; Unal, 2025).

3.1.1 Ultrasound-Assisted Extraction (UAE)

UAE memanfaatkan gelombang ultrasonik (20–100 kHz) yang memicu siklus kompresi dan rarefaksi dalam pelarut cair. Mekanisme utamanya adalah kavitasi akustik, yaitu pembentukan dan pemecahan gelembung mikroskopis yang menghasilkan gaya geser lokal (shear forces), jet mikro berkecepatan tinggi, dan erosi sel. Dampak mekanis ini merusak dinding sel, memperkecil ukuran partikel, serta mempercepat penetrasi pelarut dan transfer massa polisakarida, polifenol, dan minyak atsiri (Chemat et al., 2017; Garcia-Vaquero et al., 2017; Sulihtyorini et al., 2026).

3.1.2 Pulsed Electric Field (PEF)

PEF mengaplikasikan pulsa listrik bertegangan tinggi (10–80 kV/cm) dalam durasi singkat (mikro hingga milidetik). Proses ini memicu elektroporasi, yaitu pembentukan pori-pori mikroskopis pada membran lipid sel akibat gangguan polaritas listrik. Permeabilitas membran sel meningkat secara drastis sehingga zat intraseluler dan serat terlarut dapat keluar dengan cepat tanpa membutuhkan pemanasan signifikan(PotatoPro, 2024; Timmermans et al., 2022).

3.1.3 High Pressure Processing (HPP)

HPP menerapkan tekanan hidrostatik ekstrem (400–700 MPa) secara seragam dan instan sesuai hukum isostatis. Tekanan tinggi ini melonggarkan struktur kaku dinding selulosa dan mukopolisakarida serta merusak matriks seluler. Aksesibilitas pelarut terhadap polisakarida (seperti karagenan dan pektin) serta antioksidan intraseluler meningkat tanpa memutuskan ikatan kovalen senyawa bioaktif sensitif (Lim et al., 2025; FDA Guidance, 2011).

Tabel 1. Matriks Perbandingan Teknologi Ekstraksi Non-Termal

TEKNOLOGI	MEKANISME UTAMA	KEUNGGULAN & SENYAWA TARGET	RUJUKAN UTAMA
UAE (ULTRASOUND)	Kavitasi akustik: gelembung mikro meletus memicu gaya geser & mikrojet pelonggar sel.	Transfer massa cepat, hemat energi/pelarut. Target: polisakarida, polifenol, minyak atsiri.	Chemat et al. (2017); Garcia-Vaquero et al. (2017)
PEF (PULSED ELECTRIC FIELD)	Elektroporasi: pulsa listrik tegangan tinggi membentuk pori pada membran sel.	Murni non-termal, menjaga kesegaran/nutrisi. Target: serat terlarut, protein, pasteurisasi cairan.	PotatoPro, (2024); Timmermans et al.(2022)
HPP (HIGH PRESSURE)	Pelonggaran selisostatis: tekanan 400–700 MPa merusak dinding selulosa.	Inaktivasi mikrobiologi tanpa panas. Target: polisakarida (karagenan, pektin), jus dingin.	Lim et al. (2025); FDA Guidance, (2011)

3.1.4 Plasma Dingin (Cold Plasma/CP)

Plasma dingin merupakan gas terionisasi sebagian yang berada dalam kondisi ketidaksetimbangan termodinamika (*thermodynamic non-equilibrium*). Dalam kondisi ini, elektron memiliki energi kinetik tinggi, sedangkan partikel berat seperti ion, molekul radikal, dan molekul netral tetap berada pada suhu relatif rendah sehingga suhu keseluruhan sistem umumnya dapat dipertahankan di bawah 40°C (Mohammadi et al., 2025; Shah et al., 2026; W. Yu et al., 2026). Karakteristik tersebut menjadikan CP menarik untuk diaplikasikan pada pengolahan biomasa dan ekstraksi senyawa bioaktif yang sensitif terhadap panas. Plasma dapat dibangkitkan menggunakan berbagai konfigurasi reaktor, antara lain *dielectric barrier discharge* (DBD), *atmospheric pressure plasma jet* (APPJ), *corona discharge*, *sliding arc*, dan *glow discharge*. DBD merupakan salah satu konfigurasi yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan plasma yang relatif stabil dan homogen pada tekanan atmosfer (Heydari et al., 2023).

Dalam proses ekstraksi polisakarida, CP umumnya berperan sebagai praperlakuan untuk meningkatkan aksesibilitas matriks biomasa terhadap pelarut**.** Efek tersebut terjadi melalui mekanisme fisik dan kimia yang berlangsung secara simultan. Secara fisik, elektron, ion, dan radiasi ultraviolet yang dihasilkan plasma berinteraksi dengan permukaan biomasa dan menyebabkan pengikisan (*etching*) serta perubahan morfologi permukaan. Paparan plasma dapat menghasilkan retakan, pori, dan celah pada dinding sel sehingga struktur biomasa menjadi lebih terbuka. Perubahan tersebut meningkatkan luas permukaan dan menurunkan hambatan perpindahan massa sehingga pelarut lebih mudah membasahi dan menembus jaringan biomasa (Amiri et al., 2025; Heydari et al., 2023; Li et al., 2026).

Selain perubahan morfologi, CP menghasilkan berbagai *Reactive Oxygen and Nitrogen Species* (RONS), seperti radikal hidroksil, ozon (O_3), hidrogen peroksida (H_2O_2), oksigen *singlet*, serta spesies nitrogen reaktif. Spesies aktif tersebut dapat berinteraksi dengan komponen dinding sel dan matriks ekstraseluler. Radikal hidroksil, misalnya, dapat menginisiasi oksidasi dan pemutusan sebagian ikatan pada rantai polisakarida, sedangkan spesies oksidatif lainnya dapat melemahkan interaksi antara polisakarida dengan komponen struktural lain seperti protein, lignin, atau senyawa fenolik. Akibatnya, polisakarida yang sebelumnya terperangkap dalam matriks sel menjadi lebih mudah terlepas selama proses ekstraksi (Y. Li et al., 2026; Yu et al., 2026). Interaksi plasma juga dapat menyebabkan perubahan karakteristik kimia polisakarida melalui oksidasi gugus fungsional. Pembentukan atau peningkatan gugus hidroksil, karbonil, dan karboksil dapat meningkatkan polaritas serta kemampuan interaksi polisakarida dengan air. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan kelarutan dan mempercepat perpindahan massa selama ekstraksi (Yu et al., 2025). Namun, efek plasma sangat bergantung pada parameter proses, seperti jenis gas, tegangan, daya, waktu paparan, jarak elektroda, dan karakteristik biomasa. Perlakuan yang terlalu intens dapat menyebabkan oksidasi dan depolimerisasi berlebihan sehingga berpotensi menurunkan berat molekul atau mengubah struktur dan aktivitas biologis polisakarida (Gupta & Routray, 2025; Kong et al., 2026).

Plasma dingin memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode ekstraksi konvensional. Proses dapat dilakukan pada suhu relatif rendah sehingga risiko degradasi termal terhadap senyawa sensitif dapat diminimalkan. Selain itu, CP membutuhkan waktu perlakuan yang relatif singkat dan dapat mengurangi penggunaan pelarut serta konsumsi energi (Kauser et al., 2025). Pembentukan RONS dan radiasi UV selama proses juga memberikan efek antimikroba sehingga CP berpotensi berfungsi sebagai teknologi praperlakuan sekaligus dekontaminasi biomasa. Keunggulan tersebut menjadikan CP menarik sebagai pendekatan yang lebih efisien dan berpotensi lebih ramah lingkungan dibandingkan penggunaan suhu

tinggi atau bahan kimia dalam jumlah besar. Meskipun demikian, penerapan CP masih memiliki beberapa keterbatasan. Sistem plasma memerlukan generator tegangan tinggi dan konfigurasi reaktor yang sesuai sehingga biaya investasi awal dapat relatif tinggi(Kong et al., 2026; Trzaskowska et al., 2022). Selain itu, distribusi plasma pada biomasa yang tebal atau tidak homogen dapat menjadi tantangan karena efek plasma cenderung lebih kuat pada permukaan. Penggunaan energi atau waktu paparan yang berlebihan juga dapat menyebabkan oksidasi yang tidak diinginkan (Gupta & Routray, 2025; Kauser et al., 2025).

3.1.5 Enzyme-Assisted Extraction (EAE)

Ekstraksi berbantuan enzim merupakan metode ekstraksi yang memanfaatkan aktivitas enzim hidrolitik untuk mendegradasi secara selektif komponen makromolekul penyusun dinding sel, seperti selulosa, hemiselulosa, pektin, dan protein. Komponen-komponen tersebut dapat membentuk matriks yang berperan sebagai penghalang fisik terhadap pelepasan senyawa intraseluler, termasuk polisakarida. Enzim seperti selulase, hemiselulase, pektinase, dan protease bekerja dengan memutus ikatan glikosidik atau ikatan peptida pada struktur dinding sel sehingga menyebabkan pelonggaran matriks dan peningkatan porositas dinding sel (Banjanac et al., 2026). Perubahan struktural tersebut dapat menurunkan resistensi perpindahan massa dan meningkatkan penetrasi pelarut ke dalam jaringan sehingga polisakarida yang terperangkap dalam matriks dapat lebih mudah berdifusi dan larut ke dalam media ekstraksi. Dengan mekanisme tersebut, EAE berpotensi meningkatkan pelepasan polisakarida tanpa menyebabkan kerusakan berlebihan terhadap struktur utama polimer target (Nguyen et al., 2024; Wang et al., 2023).

EAE memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode ekstraksi konvensional. Proses ini umumnya dapat dilakukan pada kondisi suhu rendah hingga moderat dan pH yang relatif sesuai dengan kondisi optimum enzim sehingga dapat meminimalkan degradasi termal maupun perubahan struktur makromolekul yang sensitif. Kondisi operasi yang lebih ringan juga berpotensi mempertahankan karakteristik struktural dan aktivitas biologis polisakarida, seperti aktivitas antioksidan dan imunomodulator. Selain itu, penggunaan enzim memungkinkan proses ekstraksi berlangsung secara lebih selektif karena enzim dapat diarahkan untuk mendegradasi komponen tertentu dari matriks sel. EAE juga termasuk pendekatan yang relatif ramah lingkungan karena umumnya menggunakan media berbasis air dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap pelarut organik serta penggunaan asam atau basa kuat (Guo et al., 2023; Li et al., 2018; Liu et al., 2026). Namun demikian, penerapan EAE masih menghadapi beberapa keterbatasan, terutama tingginya biaya enzim komersial, kebutuhan optimasi kondisi proses, serta sensitivitas aktivitas enzim terhadap perubahan pH dan suhu. Waktu inkubasi yang terlalu lama atau penggunaan dosis enzim yang tidak tepat juga dapat menyebabkan hidrolisis berlebih terhadap polisakarida yang telah dilepaskan sehingga menurunkan berat molekul dan memengaruhi karakteristik fungsional produk. Selain itu, stabilitas enzim selama penyimpanan dan tantangan dalam penerapan proses pada skala industri menjadi aspek yang perlu diperhatikan (Banjanac et al., 2026; He et al., 2024).

Pada bahan jamur, penerapan EAE menjadi semakin relevan karena polisakarida struktural dan polisakarida bioaktif dapat terperangkap dalam jaringan dinding sel yang relatif kompleks dan kuat. Dinding sel jamur terutama tersusun atas komponen polisakarida seperti kitin, β-glukan, dan heteropolisakarida yang membentuk jaringan struktural bersama komponen lainnya (Prasetyo et al., 2025). Struktur tersebut dapat membatasi perpindahan massa dan menghambat pelepasan polisakarida selama ekstraksi (He et al., 2024; Liu et al., 2026). Oleh karena itu, penggunaan enzim hidrolitik dapat menjadi strategi untuk melonggarkan matriks dinding sel dan meningkatkan aksesibilitas terhadap polisakarida target. Mekanisme ini berlangsung melalui pemutusan komponen struktural tertentu sehingga terbentuk struktur

jaringan yang lebih permeabel (Prasetyo et al., 2019). Selanjutnya, pelarut dapat lebih mudah memasuki jaringan dan meningkatkan difusi polisakarida menuju fase ekstraksi (Nguyen et al., 2024).

Penerapan mekanisme tersebut dapat dilihat pada ekstraksi polisakarida dari jamur shiitake (*Lentinus edodes*) menggunakan bromelain. Pada penelitian He et al. (2024), bromelain yang diperoleh dari nanas digunakan sebagai enzim proteolitik untuk membantu pemecahan komponen struktural pada jaringan jamur. Hasil optimasi menunjukkan kondisi ekstraksi terbaik pada pH 5, suhu 45 °C, waktu ekstraksi 1,5 jam, dan dosis enzim 0,8 g/100 g dengan tiga kali pengulangan ekstraksi. Kondisi tersebut menghasilkan rendemen polisakarida sebesar 6,47%, lebih tinggi dibandingkan metode ekstraksi air panas yang menghasilkan rendemen sebesar 3,75%. Peningkatan rendemen tersebut menunjukkan bahwa perlakuan enzimatik dapat meningkatkan aksesibilitas terhadap polisakarida yang sebelumnya terperangkap dalam matriks jaringan jamur. Sementara itu, kombinasi *steam explosion* dan EAE menggunakan selulase, hemiselulase, dan pektinase pada *Ganoderma lucidum* menghasilkan rendemen GLP sebesar 15,39%, sekitar 6,96 kali lebih tinggi dibandingkan ekstraksi air panas (2,21%). Fraksi GLP-L juga menunjukkan aktivitas imunomodulator melalui peningkatan fagositosis makrofag RAW264.7. Hasil tersebut menunjukkan bahwa EAE efektif meningkatkan pelepasan polisakarida sekaligus berpotensi mempertahankan aktivitas biologisnya (Liu et al., 2026). Secara keseluruhan, EAE merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk ekstraksi polisakarida dari matriks biologis, termasuk jamur, karena mampu meningkatkan permeabilitas jaringan dan mengurangi hambatan perpindahan massa melalui degradasi selektif komponen struktural.

3.1.6 Deep Eutectic Solvent (DES)

DES merupakan salah satu pendekatan ekstraksi hijau yang bekerja dengan mengganggu jaringan ikatan hidrogen pada matriks dinding sel sehingga meningkatkan pelepasan polisakarida. DES terbentuk dari kombinasi *hydrogen bond acceptor* (HBA), seperti kolin klorida atau karnitin, dan *hydrogen bond donor* (HBD), seperti urea, gliserol, atau asam organik, yang menghasilkan campuran dengan titik leleh lebih rendah dibandingkan komponen penyusunnya. Ketika berinteraksi dengan biomasa, HBA dan HBD membentuk ikatan hidrogen baru yang berkompetisi dengan ikatan hidrogen pada matriks dinding sel dan rantai polisakarida (Jerome et al., 2026; Zdanowicz & Spychaj, 2018). Interaksi tersebut menyebabkan pembengkakan dan pelonggaran struktur jaringan sehingga meningkatkan penetrasi pelarut dan perpindahan massa polisakarida ke dalam media ekstraksi. Pada DES berbasis asam organik, kondisi asam juga dapat memicu hidrolisis parsial ikatan glikosidik sehingga menghasilkan fragmen polisakarida dengan berat molekul lebih rendah yang dapat memiliki karakteristik fungsional berbeda (Al-akayleh et al., 2025; Zdanowicz & Spychaj, 2018).

Keunggulan utama DES adalah sifatnya yang relatif ramah lingkungan, mudah disesuaikan melalui pemilihan jenis dan rasio HBA-HBD, serta memiliki tekanan uap rendah dan tidak mudah terbakar. Karakteristik tersebut memungkinkan DES dikombinasikan dengan teknik intensifikasi seperti ekstraksi berbantuan ultrasonik (UAE) atau gelombang mikro (Jerome et al., 2026). Namun, viskositas DES yang tinggi dapat menghambat perpindahan massa sehingga diperlukan pemanasan moderat atau penambahan air sebagai *co-solvent*. Penambahan air perlu dikontrol karena jumlah yang terlalu tinggi dapat melemahkan jaringan ikatan hidrogen antara HBA dan HBD serta mengurangi karakteristik eutektik dan selektivitas pelarut (Yusoff & Shafie, 2025). Selain itu, pemisahan polisakarida dari DES pada tahap hilir masih menjadi tantangan karena umumnya memerlukan penambahan antisolven dalam jumlah besar. Meskipun demikian, DES memiliki potensi ekonomi karena dapat dipulihkan dan

digunakan kembali, sehingga mengurangi kebutuhan pelarut baru pada proses ekstraksi berulang (Zhou et al., 2025; Zhu et al., 2024).

Penerapan DES pada jamur menunjukkan kemampuannya dalam meningkatkan pelepasan dan karakteristik polisakarida. Pada penelitian Wang et al. (2024), tangkai jamur shiitake (*Lentinula edodes*) diekstraksi menggunakan *natural deep eutectic solvent* (NDES) berbasis karnitin dan urea yang dioptimasi menggunakan COSMO-RS dan *mixture design*. Formulasi optimum terdiri atas karnitin 15%, urea 40,8%, dan air 44,2%, yang menghasilkan rendemen lentinan hingga 14,69 g/100 g. Perlakuan NDES juga menyebabkan terbentuknya pori dan rongga pada struktur dinding sel, sehingga meningkatkan aksesibilitas pelarut terhadap lentinan. Pada jamur kuping hitam (*Auricularia auricula*), Yao et al. (2023) mengombinasikan DES etilen glikol–kolin klorida (2:1) dengan ultrasonik dan kadar air 40%. Sistem UAE-DES menghasilkan rendemen polisakarida sebesar 18,68% dan menyebabkan penurunan berat molekul polisakarida melalui pemutusan sebagian rantai glikosidik yang selanjutnya meningkatkan paparan gugus hidroksil dan aktivitas antioksidan. Efektivitas DES juga ditunjukkan pada miselium *Paecilomyces hepiali* menggunakan sistem kolin klorida–asam suksinat (1:3) dengan kadar air 30%. Perlakuan tersebut menghasilkan rendemen polisakarida sebesar 12,78%, lebih tinggi dibandingkan ekstraksi air panas sebesar 8,67%, serta meningkatkan kandungan asam uronat hingga 22,34%. Kandungan asam uronat yang lebih tinggi menghasilkan struktur polisakarida yang lebih fleksibel dan berkaitan dengan peningkatan aktivitas imunomodulator pada makrofag RAW264.7 (Wang et al., 2022). Dengan demikian, DES tidak hanya berperan sebagai pelarut, tetapi juga sebagai sistem yang dapat direkayasa untuk memodifikasi interaksi antara pelarut, dinding sel, dan polisakarida. Pemilihan komponen HBA-HBD, kadar air, serta kombinasi dengan teknologi intensifikasi menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas ekstraksi.

3.2 Pengaruh Teknologi Non-Termal terhadap Karakteristik dan Bioaktivitas Polisakarida

Setelah prinsip kerja berbagai teknologi non-termal dibahas pada bagian sebelumnya, perhatian selanjutnya diarahkan pada konsekuensi perlakuan tersebut terhadap karakteristik polisakarida jamur. Teknologi non-termal tidak hanya berfungsi sebagai alternatif untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi, tetapi juga dapat menentukan karakteristik molekuler dan sifat fungsional polisakarida yang dihasilkan. Penghindaran suhu tinggi berpotensi mempertahankan struktur yang sensitif terhadap panas, seperti berat molekul tinggi dan konformasi triple helix, yang dapat mengalami degradasi selama ekstraksi termal konvensional (Sun et al., 2022). Namun, intensitas perlakuan non-termal yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan fragmentasi rantai atau perubahan gugus fungsi. Dengan demikian, pengaruh teknologi non-termal perlu dipahami sebagai proses yang dapat mempertahankan, memodifikasi, maupun mendegradasi struktur polisakarida, bergantung pada jenis teknologi, intensitas perlakuan, dan karakteristik bahan awal (W. Yu et al., 2025; Zhong et al., 2023).

3.2.1 Perubahan Karakteristik Struktural dan Fisikokimia

Perubahan karakteristik polisakarida akibat teknologi non-termal mencakup aspek rendemen dan kemurnian hingga struktur molekuler dan sifat fisikokimia. Oleh karena itu, peningkatan rendemen tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan ekstraksi. Teknologi yang menghasilkan lebih banyak polisakarida belum tentu menghasilkan fraksi dengan struktur dan fungsi biologis yang lebih baik. Perspektif ini penting karena tujuan ekstraksi bukan hanya memperoleh lebih banyak polisakarida, tetapi memperoleh polisakarida dengan karakteristik yang sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

Dari sisi perolehan, peningkatan rendemen merupakan salah satu keuntungan yang paling konsisten dilaporkan pada teknologi non-termal. Perlakuan *pulsed electric field* (PEF) pada *Agaricus bisporus* dilaporkan meningkatkan pemulihan karbohidrat hingga lebih dari 105% dibandingkan ekstraksi konvensional (Calleja-Gómez et al., 2022). Pada produk samping *Pleurotus pulmonarius*, PEF pada kuat medan 7,5–10 kV/cm juga mampu mempersingkat waktu ekstraksi dan menghasilkan kandungan β-glukan hingga 21,39% (Thikham et al., 2024). Kombinasi *deep eutectic solvent* (DES) dengan ultrasonik juga menunjukkan kinerja ekstraksi yang lebih baik dibandingkan pelarut konvensional pada beberapa matriks jamur (Wu et al., 2025)(Zade et al., 2025). Namun, peningkatan rendemen dapat disertai ko-ekstraksi protein, pigmen, dan senyawa fenolik sehingga kandungan karbohidrat total dan protein sisa tetap perlu diperhatikan (Thikham et al., 2024). Ekstraksi berbantu enzim (EAE) menawarkan selektivitas yang lebih baik melalui penggunaan selulase, protease, atau kompleks enzim, meskipun penerapannya dapat meningkatkan biaya proses (Sun et al., 2022). Dengan demikian, rendemen dan kemurnian perlu diperlakukan sebagai dua parameter yang berbeda dalam mengevaluasi keberhasilan ekstraksi.

Pada tingkat molekuler, berat molekul (Mw) dan distribusinya merupakan salah satu karakteristik yang paling sensitif terhadap perlakuan non-termal. UAE, misalnya, dapat menggeser distribusi polisakarida menuju fraksi dengan berat molekul lebih rendah (Villares et al., 2012). Polisakarida *Hohenbuehelia* yang diperoleh melalui UAE memiliki Mw 1,14 kDa, dibandingkan 3,87 kDa pada ekstraksi air panas, sedangkan pada *Flammulina velutipes* perlakuan ultrasonik meningkatkan proporsi fraksi ber-Mw rendah (Kumla, Thangrongthong, et al., 2025). Fenomena serupa ditemukan pada *Auricularia auricula*, ketika ekstraksi menggunakan sistem DES berbantu ultrasonik memecah polisakarida berukuran awal 851 kDa menjadi beberapa fraksi berukuran 811, 277, dan 15,5 kDa (Yao et al., 2023). Temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi non-termal tidak selalu hanya meningkatkan pelepasan polisakarida, tetapi juga dapat mengubah distribusi ukuran molekulnya.

Perubahan pada komposisi monosakarida dan struktur kimia primer menunjukkan pola yang lebih kompleks. Beberapa perlakuan dapat mempertahankan *backbone* polisakarida, sedangkan perlakuan lain menyebabkan perubahan rasio komponen gula atau fragmentasi rantai (Tang et al., 2023). Pada eksopolisakarida glukan, perlakuan plasma dingin dilaporkan menurunkan Mw melalui fragmentasi rantai tanpa perubahan yang berarti pada *backbone* kimia berdasarkan analisis FTIR (Shah et al., 2026). Hal ini menunjukkan bahwa penurunan Mw tidak selalu berarti perubahan total struktur kimia primer, sehingga evaluasi struktur perlu dilakukan menggunakan beberapa teknik karakterisasi secara bersamaan.

Pada struktur tingkat lebih tinggi, perubahan konformasi menjadi aspek yang sangat penting karena dapat memengaruhi sifat fungsional dan bioaktivitas. Ekstraksi termal pada suhu tinggi dilaporkan menyebabkan penguraian struktur *triple helix*, sedangkan ultrasonik dengan intensitas tinggi juga dapat menyebabkan kerusakan konformasi tersebut pada polisakarida *F. velutipes* (Kumar et al., 2021). Pada *Lyophyllum decastes*, fraksi LDP-B1 dengan Mw lebih rendah tidak menunjukkan pembentukan *triple helix*, sedangkan fraksi LDP-A1 dengan Mw lebih tinggi menunjukkan organisasi rantai yang berbeda (W. Wang et al., 2024). Temuan ini menunjukkan bahwa intensifikasi ekstraksi perlu dikendalikan agar peningkatan pelepasan polisakarida tidak diikuti oleh kerusakan struktur yang justru diperlukan untuk aktivitas biologis tertentu.

Teknologi berbasis spesies reaktif, khususnya plasma dingin, memberikan mekanisme perubahan yang berbeda. Spesies oksigen dan nitrogen reaktif (ROS/RNS) dapat mendorong depolimerisasi, pembentukan ikatan silang, dan penataan ulang gugus fungsi secara simultan (W. Yu et al., 2025). Pada eksopolisakarida glukan, perlakuan plasma dingin menyebabkan fragmentasi rantai dan penurunan Mw, tetapi tetap mempertahankan *backbone* kimia, serta

meningkatkan kelarutan, kapasitas penahanan air (*water-holding capacity*, WHC), dan kapasitas pengikatan minyak (*oil-binding capacity*, OBC) (Mohammadi et al., 2025). Perubahan tersebut menunjukkan bahwa modifikasi pada tingkat molekuler dapat diterjemahkan menjadi perubahan sifat fungsional polisakarida.

Sifat fisikokimia juga menunjukkan keterkaitan yang erat dengan perubahan struktur. Penurunan Mw akibat fragmentasi umumnya meningkatkan kelarutan dan menurunkan viskositas larutan. Pada *A. auricula*, fragmentasi polisakarida melalui sistem DES menghasilkan produk dengan kelarutan yang lebih tinggi (Mohammadi et al., 2025). Demikian pula, perubahan morfologi permukaan dapat memberikan indikasi keberhasilan disrupsi matriks. Analisis SEM pada produk samping *P. pulmonarius* yang diproses menggunakan PEF menunjukkan terbentuknya struktur dinding sel yang lebih berpori, yang mendukung pelepasan komponen polisakarida (Ramaswamy et al., 2024).

Karakterisasi polisakarida perlu dilakukan secara multidimensional, bukan hanya menggunakan satu teknik. FTIR berguna untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan memantau perubahan *backbone* kimia, sedangkan NMR memberikan informasi lebih rinci mengenai konfigurasi anomerik, ikatan glikosidik, dan pola percabangan. HPSEC/GPC digunakan untuk menentukan Mw dan distribusinya, sementara HPLC dapat digunakan untuk menganalisis komposisi monosakarida. SEM dan AFM memberikan informasi mengenai morfologi permukaan, sedangkan Congo red dan XRD dapat digunakan untuk mengevaluasi konformasi *triple helix* dan karakteristik kristalinitas (Cui et al., 2018; L. Liu et al., 2025; Yao et al., 2023).

Tabel 2. Sintesis pengaruh teknologi non-termal terhadap karakteristik polisakarida jamur

Teknologi	Sumber polisakarida	Kondisi utama	Rendemen/perolehan	Perubahan struktur	Sifat fisikokimia	Karakterisasi	Ref.
UAE	*Lyophyllum decastes*	Ultrasonik + fraksinasi DEAE	↑ dibanding HWE	LDP-B1 memiliki Mw lebih rendah dan tidak membentuk *triple helix*	Gugus -OH bebas lebih tinggi pada LDP-B1	HPLC, FTIR, SEM, XRD, Congo red	(Cui et al., 2018)
UAE	*Hohenbueheli a* sp.	UAE dibanding HWE	—	Mw 3,87 → 1,14 kDa	Kelarutan ↑	HPSEC	(Sun et al., 2022)
UAE	*Flammulina velutipes*	UAE intensitas tinggi	—	Proporsi Mw rendah ↑; *triple helix* rusak	—	HPSEC	(Kumla, Thangrongthong, et al., 2025)
PEF	*Agaricus bisporus*	≈38 kV/cm; pemanasan ringan	Pemulihan karbohidrat ↑105%	Struktur primer relatif terjaga	Mikrostruktur lebih berpori	SEM	(Calleja-Gómez et al., 2023)
PEF	*Pleurotus pulmonarius* (produk samping)	7,5–10 kV/cm	β-glukan hingga 21,39%; waktu ekstraksi lebih singkat	—	Dinding sel lebih berpori	SEM	(Thikham et al., 2024)
Plasma dingin	Eksopolisakarida glukan	Plasma dingin	—	Fragmentasi rantai; Mw ↓; *backbone* relatif terjaga	Viskositas ↓; kelarutan, WHC, dan OBC ↑	FTIR	(Shah et al., 2026)
DES–UAE	*Auricularia auricula*	DES berbantu ultrasonik	—	851 kDa → 811, 277, dan 15,5 kDa	Kelarutan ↑	HPSEC	(Yao et al., 2023)
DES	*Paecilomyces hepiali*	ChCl–asam suksinat 1:3; 30%	—	Mw lebih rendah; asam uronat ↑	—	HPLC, FTIR	(Y. Wang et al.,

		air; 85 °C					2022a)
EAE kompleks	*Grifola frondosa*	Kompleks enzim	—	Mw lebih rendah (233,5 kDa)	—	HPSEC	(Giavasis, 2014)
EAE kompleks	*Lentinus edodes*	Kompleks enzim	—	Mw tinggi (644,7 kDa)	—	HPSEC	(Yang et al., 2024)

Catatan: tanda ↑/↓ menunjukkan arah perubahan relatif terhadap kontrol atau metode pembanding sebagaimana dilaporkan dalam studi masing-masing. Nilai antarstudi tidak dibandingkan secara langsung karena terdapat perbedaan spesies, bahan awal, kondisi proses, dan metode karakterisasi. Pendekatan berbasis arah perubahan ini lebih aman untuk sintesis lintas penelitian.

3.2.2 Hubungan Struktur Polisakarida dengan Bioaktivitas

Bioaktivitas polisakarida jamur tidak semata-mata ditentukan oleh jumlah polisakarida yang berhasil diekstraksi, tetapi juga oleh berat molekul, jenis ikatan glikosidik, derajat percabangan, konformasi, komposisi monosakarida, dan kelarutan (Dilrukshi et al., 2025; D. Guo et al., 2025). Oleh karena itu, perubahan yang terjadi selama ekstraksi dapat memperkuat atau justru menurunkan aktivitas biologis tertentu.

Hubungan tersebut terlihat paling jelas pada aktivitas imunomodulator β-glukan. Pengenalan β-glukan oleh sistem imun bawaan melibatkan sejumlah reseptor pengenal pola (*pattern recognition receptors*, PRR), termasuk Dectin-1, Toll-like receptor (TLR) 2 dan 6, serta complement receptor 3 (CR3) (L. Liu et al., 2025). Struktur β-glukan yang memiliki *backbone* β-(1→3), percabangan β-(1→6), berat molekul relatif tinggi, dan konformasi *triple helix* dapat memberikan interaksi biologis yang berbeda dibandingkan polisakarida dengan rantai lebih pendek atau struktur yang lebih acak (Zhong et al., 2023). Studi berbasis NMR menunjukkan bahwa afinitas terhadap Dectin-1 meningkat seiring dengan derajat polimerisasi, dari DP 6 ke DP 16 dan DP 25, sedangkan glukan dengan Mw menengah hingga tinggi menunjukkan struktur yang lebih terorganisasi dan aktivitas agonistik yang lebih kuat dibandingkan glukan ber-Mw rendah (Case et al., 2024).

Implikasinya adalah bahwa depolimerisasi tidak selalu menguntungkan. Penurunan Mw atau kerusakan *triple helix* yang berlebihan berpotensi menurunkan aktivitas imunomodulator. Namun, perubahan struktur yang terkendali pada kondisi tertentu justru dapat meningkatkan aktivitas. Sebagai contoh, polisakarida *P. hepiali* hasil ekstraksi DES memiliki Mw lebih rendah dan kandungan asam uronat lebih tinggi serta menghasilkan stimulasi sekresi sitokin makrofag RAW264.7 yang lebih kuat dibandingkan ekstrak berbasis air (Yao et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan struktur–aktivitas tidak dapat direduksi hanya menjadi prinsip "Mw tinggi lebih baik", tetapi bergantung pada kombinasi beberapa atribut molekuler.

Pada aktivitas antikanker, berat molekul dan konformasi kembali menjadi parameter penting karena polisakarida jamur dapat bekerja melalui aktivasi sistem imun maupun mekanisme langsung seperti antiproliferasi dan proapoptosis (Zade et al., 2025). Polisakarida dengan Mw menengah pada kisaran 20–500 kDa dilaporkan memiliki aktivitas antikanker yang signifikan (Deveci et al., 2024). Namun, pada *L. edodes*, fraksi ber-Mw tinggi sebesar 644,7 kDa yang diperoleh melalui EAE kompleks menunjukkan penghambatan proliferasi sel HCT-116 dan HeLa yang lebih kuat dibandingkan fraksi dengan Mw lebih rendah (Sun et al., 2022). Perbedaan ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu rentang Mw yang secara universal paling aktif, karena bioaktivitas juga dipengaruhi oleh struktur, sumber jamur, dan sistem pengujian.

Sebaliknya, aktivitas antioksidan memperlihatkan kecenderungan yang berbeda. Fraksi LDP-B1 *L. decastes* dengan Mw lebih rendah menunjukkan aktivitas penangkapan radikal DPPH dan ABTS lebih tinggi dibandingkan LDP-A1 dengan Mw lebih besar. Peningkatan tersebut dikaitkan dengan jumlah gugus hidroksil bebas dan mobilitas rantai yang lebih tinggi (W. Wang et al., 2024). Pada *A. auricula*, fragmentasi melalui DES juga meningkatkan

kemampuan penangkapan radikal ABTS, OH, dan DPPH serta memperpanjang umur *Caenorhabditis elegans* dibandingkan ekstrak air (Yao et al., 2023). Polisakarida *G. frondosa* dengan Mw lebih rendah hasil EAE kompleks juga menunjukkan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi dibandingkan fraksi dengan Mw lebih tinggi (Sun et al., 2022).

Kontras tersebut menghasilkan satu implikasi penting: arah perubahan struktur yang menguntungkan bergantung pada bioaktivitas yang ditargetkan. Depolimerisasi melalui UAE intensitas tinggi atau perlakuan berbasis plasma dan DES dapat meningkatkan aktivitas antioksidan pada kondisi tertentu, tetapi berpotensi merugikan aktivitas yang membutuhkan struktur lebih terorganisasi, seperti imunomodulasi (Luo et al., 2025). Dengan demikian, tidak tepat untuk menetapkan satu kondisi ekstraksi sebagai kondisi "terbaik" tanpa mempertimbangkan fungsi biologis yang menjadi target.

Pada aktivitas antidiabetes, karakteristik fisikokimia juga berperan bersama struktur molekuler. Polisakarida dengan Mw dan viskositas lebih tinggi dapat memperlambat penyerapan glukosa secara fisik, sedangkan penghambatan α-amilase dan α-glukosidase memberikan mekanisme enzimatik tambahan (Kumla, Thangrongthong, et al., 2025). Ekstrak polisakarida jamur menunjukkan kemampuan penghambatan α-glukosidase yang bervariasi antarspesies dan fraksi, dengan aktivitas yang dilaporkan mencapai 87,63% pada fraksi tertentu (Deveci et al., 2024). Sistem ekstraksi DES yang dikombinasikan dengan teknologi multimodal juga dilaporkan meningkatkan aktivitas penangkapan DPPH sebesar 15–30% serta memperbaiki penghambatan α-glukosidase pada beberapa sumber (Sun et al., 2026).

Selain aktivitas tersebut, polisakarida jamur juga memiliki potensi sebagai substrat prebiotik yang dapat memengaruhi komposisi mikrobiota usus dan produksi asam lemak rantai pendek. Aktivitas ini dipengaruhi oleh karakteristik seperti jenis ikatan, derajat percabangan, dan berat molekul (D. Guo et al., 2025). Produk samping *P. pulmonarius* hasil perlakuan PEF, misalnya, telah dikaji sebagai sumber potensial bahan prebiotik (X. Liu et al., 2022). Karena bukti untuk kategori ini masih berkembang, pembahasannya cukup ditempatkan sebagai bagian dari spektrum bioaktivitas tanpa memperluas fokus utama artikel.

Secara keseluruhan, bukti menunjukkan bahwa teknologi non-termal dapat dipandang bukan sekadar sebagai alat untuk meningkatkan rendemen, tetapi sebagai sarana untuk mengarahkan karakteristik dan fungsi polisakarida. Intensitas ultrasonik, kuat medan listrik, kondisi plasma, komposisi DES, maupun kombinasi teknologi dapat menentukan sejauh mana rantai polisakarida terfragmentasi, struktur *triple helix* dipertahankan, atau gugus fungsi mengalami perubahan (Yahaya et al., 2024). Dengan demikian, strategi ekstraksi ideal seharusnya ditentukan berdasarkan bioaktivitas target, bukan hanya berdasarkan rendemen maksimum. Polisakarida dengan struktur lebih terorganisasi dan Mw relatif tinggi dapat lebih sesuai untuk fungsi imunomodulator atau antikanker, sedangkan depolimerisasi terkendali dapat menguntungkan aktivitas antioksidan pada kondisi tertentu (M. Zhang et al., 2007).

3.3 Aplikasi, Tantangan, dan Arah Penelitian Masa Depan

Karakteristik struktural dan bioaktivitas polisakarida yang dibahas pada Bab 3 menjadi dasar bagi pengembangannya dalam pangan fungsional, nutraceutical, farmasi, kosmetik, serta material pangan seperti *edible film* dan *active packaging*. Potensi aplikasi ditentukan oleh kesesuaian struktur, sifat fisikokimia, dan fungsi biologisnya. Aktivitas imunomodulator dan antikanker mendukung pengembangan sebagai bahan nutraceutical dan farmasi (Deveci et al., 2024; Dilrukshi et al., 2025) aktivitas antioksidan berpotensi dimanfaatkan dalam kosmetik dan pengawetan pangan (M. He et al., 2024), sedangkan aktivitas antidiabetes mendukung penggunaannya sebagai komponen pangan fungsional (X. Liu et al., 2022). Pada aplikasi material, kelarutan, viskositas, kemampuan mengikat air, dan kemampuan membentuk film menjadi atribut penting. Polisakarida jamur yang kaya β-glukan, kitin, dan heteropolisakarida

memiliki potensi pembentukan film, biodegradabilitas, serta aktivitas antimikroba dan antioksidan, sehingga berpeluang menjadi alternatif berkelanjutan untuk kemasan berbasis plastik sintetis (Bains et al., 2026). Film berbasis *Flammulina velutipes*, misalnya, menunjukkan karakteristik mekanik, termal, dan *barrier* yang menjanjikan (Bains et al., 2026). Potensi tersebut juga dapat diperluas melalui valorisasi produk samping, seperti β-glukan dari produk samping *Pleurotus pulmonarius* yang dikaji sebagai bahan prebiotik (Thikham et al., 2024), serta pemanfaatan residu industri jamur dan *spent mushroom substrate* (SMS) sebagai sumber bahan fungsional untuk kemasan biodegradabel (Martín et al., 2023; Törős et al., 2025). Pendekatan ini relevan dalam ekonomi sirkular karena produksi jamur dapat menghasilkan sekitar tiga hingga lima ton SMS per ton jamur (Ghamari et al., 2025).

Meskipun potensinya luas, translasi dari skala laboratorium menuju industri masih menghadapi berbagai kendala, meliputi heterogenitas bahan baku, kebutuhan energi, biaya peralatan, skalabilitas, konsistensi karakteristik polisakarida, dan standardisasi metode karakterisasi (Bains et al., 2026). Perbedaan spesies, kondisi proses, dan protokol pengukuran juga menyulitkan perbandingan antarpublikasi dan penetapan spesifikasi produk yang konsisten. Tantangan tersebut bersifat spesifik terhadap teknologi yang digunakan. DES/NADES masih menghadapi persoalan pemulihan dan pemisahan pelarut serta aspek keamanan dan regulasi untuk aplikasi pangan (Yahaya et al., 2024). ekstraksi berbantu enzim terkendala biaya dan konsistensi antarbacth (Sun et al., 2022) sedangkan teknologi plasma memerlukan pengendalian keseragaman perlakuan pada skala besar serta pembatasan oksidasi berlebih (W. Yu et al., 2026). Oleh karena itu, keunggulan teknis pada skala laboratorium belum secara otomatis menunjukkan kesiapan industri, sehingga aspek keamanan, stabilitas, *reproducibility*, dan *scale-up* perlu dipertimbangkan secara terpadu.

Dalam konteks tersebut, *green extraction* perlu diarahkan tidak hanya untuk meningkatkan rendemen, tetapi juga meminimalkan konsumsi energi, pelarut, waktu, dan pembentukan limbah tanpa mengorbankan kualitas polisakarida. Integrasi teknologi non-termal dengan pelarut hijau seperti DES/NADES, enzim, maupun kombinasi ultrasonik dan medan listrik berdenyut berpotensi meningkatkan efisiensi dan selektivitas ekstraksi (Sun et al., 2026; Yao et al., 2023). Pendekatan *hybrid* atau *hurdle extraction* memungkinkan beberapa mekanisme intensifikasi digunakan pada intensitas lebih rendah sehingga pelepasan polisakarida dapat ditingkatkan dengan degradasi struktur yang lebih terkendali. Namun, predikat "hijau" perlu dibuktikan secara kuantitatif melalui indikator seperti E-factor, konsumsi energi per satuan produk, dan *life-cycle assessment* (LCA) (Guler et al., 2024; Olymon et al., 2026). Kajian LCA menunjukkan bahwa konsumsi listrik dapat menjadi *hotspot* dampak lingkungan; UAE dapat memberikan dampak lebih rendah pada kondisi tertentu, tetapi tidak selalu unggul pada semua skenario (Olymon et al., 2026). Demikian pula, manfaat lingkungan DES perlu diverifikasi melalui evaluasi daur hidup yang sistematis, bukan diasumsikan berdasarkan sifat pelarutnya semata (Ayyasamy et al., 2025; Yahaya et al., 2024).

Arah penelitian selanjutnya perlu bergeser dari *maximum extraction yield* menuju *structure- and bioactivity-oriented extraction*. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada rendemen, sementara hubungan kuantitatif antara parameter proses, perubahan struktur, dan bioaktivitas belum sepenuhnya dipahami (D. Guo et al., 2025; Z. Li et al., 2025). Dengan pendekatan baru ini, kondisi ekstraksi dirancang berdasarkan karakteristik molekuler dan bioaktivitas yang ditargetkan, sehingga teknologi ekstraksi berfungsi tidak hanya sebagai metode pemisahan, tetapi juga sebagai sarana untuk mengarahkan karakteristik fungsional polisakarida. Integrasi pemodelan dan kecerdasan buatan dapat memperkuat pendekatan tersebut. *Machine learning*, termasuk *support vector regression*, *random forest*, dan *artificial neural network*, telah digunakan untuk memodelkan hubungan non-linear antara kondisi proses, rendemen, berat molekul, komposisi monosakarida, dan bioaktivitas (J. Yu et al., 2026; J.

Zhang et al., 2026). Optimasi multi-tujuan berbasis algoritma genetika dan *Pareto front* memungkinkan beberapa atribut dioptimalkan secara simultan, sedangkan model *machine learning* telah digunakan untuk mengarahkan ekstraksi ultrasonik-enzimatik berdasarkan parameter yang berkaitan dengan aktivitas antioksidan (Z. Li et al., 2025; Ma et al., 2023).

Namun, penerapan AI masih dibatasi oleh keterbatasan dan heterogenitas data, terutama akibat variasi spesies, bahan baku, parameter ekstraksi, metode karakterisasi, dan sistem pengujian bioaktivitas (J. Yu et al., 2026). Karena itu, pengembangan model prediktif perlu disertai standardisasi data, validasi eksternal, dan validasi eksperimental. Pada tahap translasi, validasi skala pilot, analisis tekno-ekonomi, dan LCA menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa teknologi yang dikembangkan tidak hanya menghasilkan rendemen dan bioaktivitas yang optimal, tetapi juga layak secara teknis, ekonomi, dan lingkungan (Kagueyam et al., 2025; Olymon et al., 2026). Dengan demikian, arah masa depan ekstraksi polisakarida jamur adalah menuju platform ekstraksi yang terarah dan berbasis fungsi, yang mengintegrasikan intensifikasi proses, pengendalian struktur, bioaktivitas, dan keberlanjutan dalam satu kerangka pengembangan.

Tabel 3. Sintesis aplikasi, tantangan, dan arah pengembangan polisakarida jamur hasil ekstraksi non-termal

Aspek	Potensi/Temuan Utama	Tantangan Kunci	Arah Pengembangan	Ref.
Pangan fungsional	β-glukan dan polisakarida bioaktif berpotensi sebagai komponen pangan fungsional	Stabilitas, kelarutan, rasa, dan konsistensi bioaktivitas	Optimasi struktur dan formulasi berbasis fungsi	(Arunachalam et al., 2022; X. Liu et al., 2022)
Nutraceutical	Potensi imunomodulator, antioksidan, antidiabetes, dan antikanker	Standardisasi struktur dan bioaktivitas	*Structure–activity relationship* dan validasi biologis	(Deveci et al., 2024; Dilrukshi et al., 2025)
Farmasi	Potensi sebagai imunostimulan dan bahan bioaktif antikanker	Kemurnian, keamanan, konsistensi, dan regulasi	Pemurnian, standardisasi, dan validasi *in vivo*	(Deveci et al., 2024; Zade et al., 2025)
Kosmetik	Potensi antioksidan, *moisturizing*, dan bahan aktif berbasis polisakarida	Stabilitas dan kompatibilitas formulasi	Rekayasa berat molekul dan optimasi formulasi	(Arunachalam et al., 2022; Törős et al., 2025)
Edible film / active packaging	Kemampuan membentuk film serta membawa komponen bioaktif	Sifat mekanik, permeabilitas, dan stabilitas	Kombinasi dengan biopolimer dan senyawa aktif	(Bains et al., 2026; Törős et al., 2025)
Valorisasi produk samping	Produk samping dan SMS dapat menjadi sumber polisakarida dan bahan fungsional	Variabilitas residu dan efisiensi pemulihan	Ekstraksi tertarget untuk mendukung ekonomi sirkular	(Sunil & Shamshina, 2026; Thikham et al., 2024; Törős et al., 2025)
Green extraction	Air, DES/NADES, UAE, PEF, EAE, dan plasma berpotensi meningkatkan efisiensi proses	Konsumsi energi, biaya, dan pembuktian dampak lingkungan	Optimasi *energy–yield–quality* serta E-factor dan LCA	(Guler et al., 2024; Olymon et al., 2026; Yahaya et al., 2024)
Hybrid / hurdle extraction	Kombinasi teknologi berpotensi meningkatkan pelepasan dan selektivitas	Kompleksitas proses dan *scale-up*	Kombinasi perlakuan dengan intensitas terkendali	(Z. Li et al., 2025; Sun et al., 2026)
Skala industri	Potensi meningkatkan efisiensi dan menghasilkan polisakarida bernilai tinggi	*Scale-up*, *reproducibility*, dan investasi peralatan	Validasi skala pilot dan analisis tekno-ekonomi	(Guler et al., 2024; Olymon et al., 2026)
AI dan pemodelan	Prediksi dan optimasi parameter proses serta karakteristik produk	Dataset terbatas dan heterogenitas data	*Machine learning*, validasi eksternal, dan optimasi multi-tujuan	(Ma et al., 2023; J. Yu et al., 2026; J.

				Zhang et al., 2026)
Research gap	Hubungan proses–struktur–bioaktivitas belum terkuantifikasi secara komprehensif	Belum terdapat standar universal untuk proses dan atribut produk	*Structure-directed* dan *bioactivity-oriented extraction*	(D. Guo et al., 2025; Z. Li et al., 2025)

4. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, teknologi non-termal seperti UAE, PEF, plasma dingin, DES, dan EAE berpotensi meningkatkan ekstraksi sekaligus memodifikasi struktur dan sifat fisikokimia polisakarida jamur. Perubahan berat molekul, konformasi, dan kelarutan dapat memengaruhi bioaktivitas secara berbeda sehingga kondisi ekstraksi perlu disesuaikan dengan aktivitas biologis yang ditargetkan. Polisakarida hasil ekstraksi non-termal berpotensi dikembangkan untuk pangan fungsional, nutrasetikal, farmasi, kosmetik, *edible film/active packaging*, serta valorisasi produk samping. Ke depan, penelitian perlu diarahkan pada *structure- and bioactivity-oriented extraction* yang mengintegrasikan teknologi hijau, optimasi proses, *machine learning*, serta validasi skala pilot dan LCA untuk menghasilkan proses yang efektif, konsisten, ekonomis, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Al-akayleh, F., Agha, A. S. A. A., & Olaimat, A. R. (2025). Rationalizing Polysaccharide Extraction with Deep Eutectic Solvents : From Supramolecular Architecture to Emerging AI-Guided Solvent Design. *Polysaccharides*, 1–27.

Amiri, M., Arab, M., & Mortazavian, A. M. (2025). *The effect of cold plasma treatment on the phenolic and flavonoid content and antioxidant activity of whole buckwheat grain and flour*. 1–8.

Amirullah, N. A., Abdullah, E., Zainal Abidin, N., Abdullah, N., & Manickam, S. (2023). Influence of extraction technologies on the therapeutic properties of Pleurotus spp. (oyster mushrooms) – A critical review. *Food Bioscience*, *56*, 103352. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103352

Arunachalam, K., Sreeja, P. S., & Yang, X. (2022). The antioxidant properties of mushroom polysaccharides can potentially mitigate oxidative stress, beta-cell dysfunction and insulin resistance. *Frontiers in Pharmacology*, *13*, 874474.

Ayyasamy, V., Ravi, H., & Natarajan, V. (2025). Green extraction of marine bioactive compounds and their byproducts using pulsed electric field: mechanisms, applications, and impacts on aquatic foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *66*(15), 1–23. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2589457

Baeva, E., Bleha, R., Lavrova, E., Sushytskyi, L., Čopíková, J., Jablonsky, I., Klouček, P., & Synytsya, A. (2019). Polysaccharides from Basidiocarps of Cultivating Mushroom Pleurotus ostreatus: Isolation and Structural Characterization. In *Molecules* (Vol. 24, Issue 15, p. 2740). https://doi.org/10.3390/molecules24152740

Bains, A., Rani, R., Tosif, M. M., Goksen, G., Sadh, P. K., Kaushik, R., Rusu, A. V., Trif, M., & Chawla, P. (2026). Engineering smart hydrocolloid packaging using mushroom-derived polysaccharides for food safety and shelf-life enhancement. *Food Chemistry: X*, 103945. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fochx.2026.103945

Banjanac, K., Veljkovi, M., Simovi, M., & López-revenga, P. (2026). Pectic Polysaccharides Recovery from Rapeseed Meal via Conventional and Enzyme-Assisted Extraction Techniques : Toward Emerging Prebiotic Pectic Oligosaccharide Development. *Foods*, 1–

21.

Barbosa, J. R., S. Freitas, M. M., Oliveira, L. C., S. Martins, L. H., Almada-Vilhena, A. O., Oliveira, R. M., Pieczarka, J. C., B. Brasil, D. do S., & Carvalho Junior, R. N. (2020). Obtaining extracts rich in antioxidant polysaccharides from the edible mushroom Pleurotus ostreatus using binary system with hot water and supercritical CO2. *Food Chemistry*, *330*, 127173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127173

Calleja-Gómez, M., Castagnini, J. M., Carbó, E., Ferrer, E., Berrada, H., & Barba, F. J. (2022). Evaluation of pulsed electric field-assisted extraction on the microstructure and recovery of nutrients and bioactive compounds from mushroom (Agaricus bisporus). *Separations*, *9*(10), 302.

Calleja-Gómez, M., Roig, P., Rimac Brnčić, S., Barba, F. J., & Castagnini, J. M. (2023). Scanning electron microscopy and triple TOF-LC-MS-MS analysis of polyphenols from PEF-treated edible mushrooms (L. edodes, A. brunnescens, and P. ostreatus). *Antioxidants*, *12*(12), 2080.

Case, S., O'Brien, T., Ledwith, A. E., Chen, S., Horneck Johnston, C. J. H., Hackett, E. E., O'Sullivan, M., Charles-Messance, H., Dempsey, E., & Yadav, S. (2024). β-glucans from Agaricus bisporus mushroom products drive Trained Immunity. *Frontiers in Nutrition*, *11*, 1346706.

Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Review of Green Food Processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *41*, 357–377. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016

Corrêa, R. C. G., Brugnari, T., Bracht, A., Peralta, R. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2016). Biotechnological, nutritional and therapeutic uses of Pleurotus spp. (Oyster mushroom) related with its chemical composition: A review on the past decade findings. *Trends in Food Science & Technology*, *50*, 103–117. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.012

Cui, F.-J., Qian, L.-S., Sun, W.-J., Zhang, J.-S., Yang, Y., Li, N., Zhuang, H.-N., & Wu, D. (2018). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from Volvariella volvacea: Process optimization and structural characterization. *Molecules*, *23*(7), 1706.

Deveci, E., Tel-Cayan, G., Cayan, F., Yılmaz Altınok, B., & Aktas, S. (2024). Characterization of polysaccharide extracts of four edible mushrooms and determination of in vitro antioxidant, enzyme inhibition and anticancer activities. *ACS Omega*, *9*(24), 25887–25901.

Devi, P. V., Islam, J., Narzary, P., Sharma, D., & Sultana, F. (2024). Bioactive compounds, nutraceutical values and its application in food product development of oyster mushroom. *Journal of Future Foods*, *4*(4), 335–342. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.11.005

Dilrukshi, N., Grice, I. D., Mallard, B., & Tiralongo, J. (2025). Mushroom β-glucans as immunomodulators: Elucidation of structure-function relationship. *Food Chemistry*, *495*, 146468. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146468

Fakhzan Ahmad, L., Lim, F., Amran, S. A., Zulkurnain, M., Khan, M., & Ali, M. (2025). Effect of High-Pressure Pretreatment and Drying Conditions on the Physicochemical and Antioxidant Properties of Carrageenan from Kappaphycus alvarezii. *BIO Web of Conferences*, *05005*.

Flores, G. A., Cusumano, G., Venanzoni, R., & Angelini, P. (2024). The Glucans Mushrooms: Molecules of Significant Biological and Medicinal Value. In *Polysaccharides* (Vol. 5, Issue 3, pp. 212–224). https://doi.org/10.3390/polysaccharides5030016

Garcia-Vaquero, M., Rajauria, G., O'Doherty, J. V, & Sweeney, T. (2017). Polysaccharides

from macroalgae: Recent advances, innovative technologies and challenges in extraction and purification. *Food Research International*, *99*, 1011–1020. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.016

Ghamari, M., Suvish, Hwang See, C., Yu, H., Anitha, T., Balamurugan, V. T., Velusamy, S., Hughes, D., & Sundaram, S. (2025). Nanocellulose Extraction from Biomass Waste: Unlocking Sustainable Pathways for Biomedical Applications. *Chemical Record (New York, N.Y.)*, *25*(5), e202400249. https://doi.org/10.1002/tcr.202400249

Giavasis, I. (2014). Bioactive fungal polysaccharides as potential functional ingredients in food and nutraceuticals.

Current Opinion in Biotechnology, *26*, 162–173.

Gregory, A. T., & Denniss, A. R. (2018). An Introduction to Writing Narrative and Systematic Reviews - Tasks, Tips and Traps for Aspiring Authors. *Heart, Lung & Circulation*, *27*(7), 893–898. https://doi.org/10.1016/j.hlc.2018.03.027

Guler, B. A., Tepe, U., & Imamoglu, E. (2024). Sustainable point of view: life cycle analysis for green extraction technologies. ChemBioEng Rev. 11, 348–362. *ChemBioEng Rev.*, *11*, 348–362.

Guo, D., Liu, C., Zhu, H., Cheng, Y., Guo, Y., Yao, W., Jiang, J., & Qian, H. (2025). Advanced insights into mushroom polysaccharides: Extraction methods, structure-activity, prebiotic properties, and health-promoting effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, *308*, 142319. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142319

Guo, P., Chen, H., Ma, J., Zhang, Y., Chen, H., Wei, T., Gao, D., & Li, J. (2023). characterization , and in vitro antioxidant activity of polysaccharides from Potentilla. *Frontiers in Nutrition*.

Gupta, K. K., & Routray, W. (2025). *Cold plasma : A nonthermal pretreatment , extraction , and solvent activation technique for obtaining bioactive compounds from agro-food industrial biomass*. *472*(May 2024).

He, M., Peng, Q., Xu, X., Shi, B., & Qiao, Y. (2024). Antioxidant capacities and non-volatile metabolites changes after solid-state fermentation of soybean using oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) mycelium. *Frontiers in Nutrition*, *11*. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1509341

He, W., Liu, J., Shen, J., Du, F., & Yu, A. (2024). Extraction of Polysaccharides from Shiitake Mushroom Based on Pineapple Enzymatic Technology Extraction of Polysaccharides from Shiitake Mushroom Based on Pineapple Enzymatic Technology. *Journal of Physics: Conference Series*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2679/1/012029

Herrero, M., Cifuentes, A., & Ibañez, E. (2006). Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. *Food Chemistry*, *98*(1), 136–148. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058

Heydari, M., Carbone, K., Gervasi, F., Parandi, E., Rouhi, M., Rostami, O., Abedi-firoozjah, R., Kolahdouz-nasiri, A., Garavand, F., & Mohammadi, R. (2023). *Cold Plasma-Assisted Extraction of Phytochemicals : A Review*.

Jerome, R. E., Sivapragasam, N., Gupta, V. K., Tiwari, B. K., & Rajauria, G. (2026). Role of deep eutectic solvents for the extraction of polysaccharides from seaweed for food applications. *Carbohydrate Polymers*, *388*(March), 125575. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2026.125575

Kagueyam, S. S., dos Santos Filho, J. R., Contato, A. G., de Souza, C. G. M., Castoldi, R., Corrêa, R. C. G., Conte Junior, C. A., Yamaguchi, N. U., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2025). Green extraction of bioactive compounds from plant-based agri-food residues: Advances toward sustainable valorization. *Plants*, *14*(23), 3597.

Kauser, S., Hussain, A., Imtiaz, S., Anjum, M., Muhammad, M., Ali, Q., & Najam, A. (2025). Cold plasma technology : an epochal enabler in elevating food preservation , ensuring safety , and enhancing quality standards. *Discover Applied Sciences*. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07212-w

Kong, L., Shi, C., Zhou, D., Wang, Y., Deng, Z., & Li, W. (2026). Cold plasma modification of polysaccharide and protein edible films : substrate and state dependence. *Future Foods*, *14*(March), 101089. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2026.101089

Kumar, H., Bhardwaj, K., Sharma, R., Nepovimova, E., Cruz-Martins, N., Dhanjal, D. S., Singh, R., Chopra, C., Verma, R., & Abd-Elsalam, K. A. (2021). Potential usage of edible mushrooms and their residues to retrieve valuable supplies for industrial applications. *Journal of Fungi*, *7*(6), 427.

Kumla, J., Lumyong, S., & Suwannarach, N. (2025). Centesimal Composition, Bioactive Compounds, Antioxidant and α-Glucosidase Inhibitory Activities of Commercial Edible Oyster Mushrooms at Different Maturity Stages in Northern Thailand. In *Foods* (Vol. 14, Issue 20, p. 3511). https://doi.org/10.3390/foods14203511 Kumla, J.,

Thangrongthong, S., Kaewnunta, A., & Suwannarach, N. (2025). Research advances in fungal polysaccharides: Production, extraction, characterization, properties, and their multifaceted applications. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, *15*, 1604184. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1604184

Leong, Y. K., Yang, F.-C., & Chang, J.-S. (2021). Extraction of polysaccharides from edible mushrooms: Emerging technologies and recent advances. *Carbohydrate Polymers*, *251*, 117006. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117006

Lesa, K. N., Khandaker, M. U., Mohammad Rashed Iqbal, F., Sharma, R., Islam, F., Mitra, S., & Emran, T. Bin. (2022). Nutritional Value, Medicinal Importance, and Health-Promoting Effects of Dietary Mushroom (Pleurotus ostreatus). *Journal of Food Quality*, *2022*(1), 2454180. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/2454180

Li, Y., Zeng, L., Wu, J., Meng, J., Li, M., Huang, J., & Huang, Y. (2026). *Plasma-Assisted Extraction of Polysaccharides from Siegesbeckia orientalis L .: Optimization , Purification , and Structural Characterization*. 1–26.

Li, Y., Zhu, C., Zhai, X., Zhang, Y., Duan, Z., & Sun, J. (2018). Optimization of enzyme assisted extraction of polysaccharides from pomegranate peel by response surface methodology and their anti-oxidant potential. *Chinese Herbal Medicines*, *10*(4), 416–423. https://doi.org/10.1016/j.chmed.2018.08.007

Li, Z., Li, Q., Hu, C., Yang, F., & Guo, F. (2025). The machine learning assisted optimization of ultrasound-synergistic enzymatic extraction and comprehensive evaluation of polysaccharides from Saposhnikovia divaricata. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107706.

Liu, J., Yang, Z., Huang, J., Sun, C., Chen, L., & Zhu, Z. (2026). Enzyme-Assisted Extraction of Polysaccharides from Steam-Exploded Ganoderma lucidum and Its Yield , Structural Characterisation , and Immunomodulatory Activity. *Molecules*, 1–18.

Liu, L., Feng, J., Lian, Z., Geng, J., Wang, W., Wang, J., Yan, M., Liu, Y., & Zhang, J. (2025). Structural characterization of β-glucans from five edible fungi and structure-activity relationship on Dectin-1/Toll like receptors activation. *Food Chemistry*, *493*, 145969. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145969

Liu, X., Luo, D., Guan, J., Chen, J., & Xu, X. (2022). Mushroom polysaccharides with potential in anti-diabetes: Biological mechanisms, extraction, and future perspectives: A review. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 1087826.

Liu, Z., & Wang, H. (2025). Research Progress on the Isolation, Purification, Structural Characteristics and Biological Activity Mechanism of Pleurotus citrinopileatus Polysaccharides. In *Molecules* (Vol. 30, Issue 13, p. 2816). https://doi.org/10.3390/molecules30132816

Luo, H., Liang, D., Liu, Q., Niu, L., Temirlan, K., & Li, W. (2025). Electron beam irradiation combined with cold plasma modification of chitosan to enhance physicochemical and functional properties. *Carbohydrate Polymers*, *354*, 123308. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123308

Ma, J., Yao, J., Ren, X., Dong, Y., Song, R., Zhong, X., Zheng, Y., Shan, D., Lv, F., & Li, X. (2023). Machine learning-assisted data-driven optimization and understanding of the multiple stage process for extraction of polysaccharides and secondary metabolites from natural products. *Green Chemistry*, *25*(8), 3057–3068.

Martín, C., Zervakis, G. I., Xiong, S., Koutrotsios, G., & Strætkvern, K. O. (2023). Spent substrate from mushroom cultivation: exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, *14*(1), 2252138.

Mohammadi, X., Hossain, A., Kontogiorgos, V., & Pratap-Singh, A. (2025). Cold oxygen plasma-induced modifications in chitosan films: effects of solution and film treatment on structure and functionality. *Food Hydrocolloids*, *169*, 111572.

Mukherjee, K., Panda, S. K., Samanta, I., Goswami, L., Maity, P. J., Love, S. K., Sasikumar, R., Chowdhary, G., T, S. K., & Jaiswal, A. K. (2026). Functional properties, health benefits, and biotechnological applications of the oyster mushroom (Pleurotus ostreatus): A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, *29*, 103103. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.103103

Nguyen, H. C., Ngo, K. N., Tran, H. K., & Barrow, C. J. (2024). Enzyme-Assisted Coextraction of Phenolics and Polysaccharides from Padina gymnospora. *Marine Drugs*.

Olymon, K., Sabari, R. S., Roy, N., Bhattacharjee, I., Sharma, N., Ahmed, S., Shukla, J., & Kumar, A. (2026). Sustainable biorefineries: integrating techno-economic analysis and life cycle assessment in the circular bioeconomy. In *Industrial Microbiology and Biotechnology: Trends in Microbial Biotechnology* (pp. 763–783). Springer.

Palos-Hernández, A., González-Paramás, A. M., & Santos-Buelga, C. (2025). Latest Advances in Green Extraction of Polyphenols from Plants, Foods and Food By-Products. In *Molecules* (Vol. 30, Issue 1, p. 55). https://doi.org/10.3390/molecules30010055

Pérez-Bassart, Z., Fabra, M. J., Martínez-Abad, A., & López-Rubio, A. (2023). Compositional differences of β-glucan-rich extracts from three relevant mushrooms obtained through a sequential extraction protocol. *Food Chemistry*, *402*, 134207. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134207

PotatoPro. (2024). *About Pulsed Electric Field Systems (PEF)*.

Prasetyo, A., Rasmiyana, R., & Frengky Hermawan Hadi Prasetyo. (2025). Total Phenolic of Postbiotics from Rhizopus oligosporus with Edamame Husk Substrate (Glycine max (L.) Merrill). *Jurnal Biologi Tropis*, *25*(3), 4644–4650. https://doi.org/10.29303/jbt.v25i3.9878

Prasetyo, A., Sidharta, B. O. Y. R., Hartini, Y. S. R. I., & Mursyanti, E. (2019). Toxicity of Bioactive Compound from Endophytic Fungi Isolated from Red Ginger (Zingiber officinale var . rubrum) Utilizing Brine Shrimp Lethality Assay. *Biogenesis*, *7*(1), 30–37.

Ramaswamy, R., Krishnan, S. B., & Leong, S. S. J. (2024). Pulsed electric field technology for recovery of proteins from waste plant resources and deformed mushrooms: A review. *Processes*, *12*(2), 342.

Rizkyana, A. D., Ho, T. C., Roy, V. C., Park, J.-S., Kiddane, A. T., Kim, G.-D., & Chun, B.-S. (2022). Sulfation and characterization of polysaccharides from Oyster mushroom

(Pleurotus ostreatus) extracted using subcritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, *179*, 105412. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105412

Rosyida, V. T., Hayati, S. N., Wiyono, T., Darsih, C., & Ratih, D. (2024). Effect of aqueous extraction method on total water-soluble polysaccharides content and phytochemical properties of white oyster mushroom (Pleurotus ostreatus). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1377*(1), 12064. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1377/1/012064

Shah, I. A., Tiwari, S., Devi, P. B., Kalaivendan, R. G. T., Annapure, U. S., Kavitake, D., & Shetty, P. H. (2026). Cold plasma-induced modifications in the physico-functional properties of glucan exopolysaccharide derived from Enterococcus hirae OL616073. *Food Biomacromolecules*, *3*(1), 24–36.

Sharma, A., Sharma, A., & Tripathi, A. (2021). Biological activities of Pleurotus spp. polysaccharides: A review. *Journal of Food Biochemistry*, *45*(6), e13748. https://doi.org/10.1111/jfbc.13748

Sulihtyorini, E., Pranowo, D., & Dewanti, B. (2026). Extraction of bioactive compounds from tobacco stems using ultrasound-assisted extraction (UAE) method. *Advances in Food Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering (AFSSAAE)*, *9*(March), 193–200.

Sun, Y., He, H., Wang, Q., Yang, X., Jiang, S., & Wang, D. (2022). A review of development and utilization for edible fungal polysaccharides: extraction, chemical characteristics, and bioactivities. *Polymers*, *14*(20), 4454.

Sun, Y., Wang, F., Li, Z., Chen, X., Xie, Q., Meng, Z., Shen, H., Shi, S., & Li, H. (2026). Synergistic interplay of deep eutectic solvents and multi-modal extraction techniques: A paradigm shift in natural polysaccharide yield, structural modulation, and biofunctional enhancement. *Industrial Crops and Products*, *239*, 122478. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122478

Sunil, A., & Shamshina, J. L. (2026). From waste to resource: circular valorization of spent mushroom substrate into biochar and advanced materials. *Frontiers in Chemistry*, *14*, 1768384.

Tang, Y., He, X., Liu, G., Wei, Z., Sheng, J., Sun, J., Li, C., Xin, M., Li, L., & Yi, P. (2023). Effects of different extraction methods on the structural, antioxidant and hypoglycemic properties of red pitaya stem polysaccharide. *Food Chemistry*, *405*, 134804.

Thikham, S., Jeenpitak, T., Shoji, K., Phongthai, S., Therdtatha, P., Yawootti, A., & Klangpetch, W. (2024). Pulsed electric field-assisted extraction of mushroom ß-glucan from Pleurotus pulmonarius by-product and study of prebiotic properties. *International Journal of Food Science and Technology*, *59*(6), 3939–3949. https://doi.org/10.1111/ijfs.17144

Timmermans, R., Nierop Groot, M., & Matser, A. (2022). Liquid Food Pasteurization by Pulsed Electric Fields BT - Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry: Fundamentals and Applications. In J. Raso,
V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.), *Springer* (pp. 299–323). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_8

Törős, G., El-Ramady, H., Abdalla, N., Elsakhawy, T., & Prokisch, J. (2025). Valorization of Mushroom Residues for Functional Food Packaging. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(22), 10870.

Trzaskowska, M., Kwiatkowski, M., Zarzeczny, D., & Kazimierczak, P. (2022). *SURFACE MODIFICATIONS OF BIOMATERIAL WITH DIFFERENT COLD PLASMA REACTORS TO IMPROVE CELL ADHESION*.
165, 2–6. https://doi.org/10.34821/eng.biomat.165.2022.2-6

U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2011). *Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls for Human Food : Draft Guidance for Industry 1* (Vol. 1).

Unal, D. O. (2025). Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology Comparative Analysis of Green Extraction Techniques for Functional Ingredients from Cereal Wastes : A Sustainability Perspective. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, *13*(12), 4286–4307.

Vetter, J. (2023). The Mushroom Glucans: Molecules of High Biological and Medicinal Importance. In *Foods* (Vol. 12, Issue 5, p. 1009). https://doi.org/10.3390/foods12051009

Villares, A., Mateo-Vivaracho, L., & Guillamón, E. (2012). Structural features and healthy properties of polysaccharides occurring in mushrooms. *Agriculture*, *2*(4), 452–471.

Wang, D., Zhang, M., Lim, C., & Zhang, L. (2024). Natural deep eutectic solvents for the extraction of lentinan from shiitake mushroom : COSMO-RS screening and ANN-GA optimizing conditions. *Food Chemistry*, *430*(July 2023), 136990. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136990

Wang, W., Li, J., Lu, F., & Liu, F. (2024). Ultrasound-assisted multi-enzyme extraction for highly efficient extraction of polysaccharides from Ulva lactuca. *Foods*, *13*(6), 891. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods13060891

Wang, X., Su, Y., Su, J., Xue, J., Zhang, R., Li, X., Li, Y., & Ding, Y. (2023). Optimization of Enzyme − Assisted Aqueous Extraction of Polysaccharide from Acanthopanax senticosus and Comparison of Physicochemical Properties and Bioactivities of Polysaccharides with Different Molecular Weights. *Molecules*.

Wang, Y., Xu, F., Cheng, J., Wu, X., Xu, J., Li, C., Li, W., Xie, N., Wang, Y., & He, L. (2022a). Natural deep eutectic solvent-assisted extraction, structural characterization, and immunomodulatory activity of polysaccharides from Paecilomyces hepiali. *Molecules*, *27*(22), 8020.

Wang, Y., Xu, F., Cheng, J., Wu, X., Xu, J., Li, C., Li, W., Xie, N., Wang, Y., & He, L. (2022b). Polysaccharides from Paecilomyces hepiali. *Molecules*.

Wu, Y., Hu, H., Yang, G., Chen, Y., Zhong, X., Li, S., Pan, M., Li, Y., & Zhang, J. (2025). Enhancing the black truffle polysaccharide extraction efficiency using a combination of natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted techniques. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *19*(4), 2208–2219. https://doi.org/10.1007/s11694-024-03073-w

Yahaya, N., Mohamed, A. H., Sajid, M., Zain, N. N. M., Liao, P.-C., & Chew, K. W. (2024). Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for extraction of polysaccharides from natural sources: Status, challenges and prospects. *Carbohydrate Polymers*, *338*, 122199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122199

Yang, S., Li, S., Li, G., Li, C., Li, W., Bi, Y., & Wei, J. (2024). Pulsed electric field treatment improves the oil yield, quality, and antioxidant activity of virgin olive oil. *Food Chemistry: X*, *22*, 101372.

Yao, J., Zeng, J., Tang, H., Cheng, Y., Tan, J., Li, T., Li, X., He, J., & Zhang, Y. (2023). Effect of deep eutectic solvent extraction on Auricularia auricula polysaccharide solubilization and antioxidant potential. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *34*, 101166. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101166

Yu, J., Liu, N., Xu, H., & Luo, C. (2026). Artificial intelligence empowering polysaccharide research in drug development. *Targetome*, *2*(3).

Yu, W., Chen, P., Xu, X., Nie, L., Huang, Z., Muhammad, A. H., Wang, Y., Bu, T., Sun, P., & Cai, M. (2025). Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on Dendrobium officinale polysaccharides: Physicochemical and functional properties. *International*

Journal of Biological Macromolecules, *311*, 143740.

Yu, W., Chen, P., Zhang, W., Huang, Z., Abdul, R. H., Wang, Y., Bu, T., Wang, J., Sun, P., & Cai, M. (2026). Cold plasma modification of natural polysaccharides: mechanisms, regulatory factors, and biological activity enhancement. *Food Chemistry*, *518*, 149609. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.149609

Yusoff, M. H., & Shafie, M. H. (2025). Polysaccharide extraction with deep eutectic solvents : A review on impacts to extraction yield , physicochemical properties and bioactivities. *International Journal of Biological Macromolecules*, *306*(P1), 141469. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141469

Zade, S., Upadhyay, T. K., Rab, S. O., Sharangi, A. B., Lakhanpal, S., Alabdallah, N. M., & Saeed, M. (2025). Mushroom-derived bioactive compounds pharmacological properties and cancer targeting: a holistic assessment. *Discover Oncology*, *16*(1), 654. https://doi.org/10.1007/s12672-025-02371-z

Zdanowicz, M., & Spychaj, T. (2018). Deep eutectic solvents for polysaccharides processing . A review. *Carbohydrate Polymers*, *200*(March), 361–380. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.078

Zhang, J., Xu, Z., Zhong, C., Liu, H., Zhu, Q., Sun, Z., Guo, Q., & Cui, S. W. (2026). Artificial Intelligence Reshaping Non-Starch Polysaccharides Research: A Comprehensive Review of Intelligent Integration From Extraction Optimization to Functional Design. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *25*(1), e70379.

Zhang, M., Cui, S. W., Cheung, P. C. K., & Wang, Q. (2007). Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on their isolation process, structural characteristics and antitumor activity. *Trends in Food Science & Technology*, *18*(1), 4–19.

Zhong, X., Wang, G., Li, F., Fang, S., Zhou, S., Ishiwata, A., Tonevitsky, A. G., Shkurnikov, M., Cai, H., & Ding, F. (2023). Immunomodulatory Effect and Biological Significance of β-Glucans. *Pharmaceutics*, *15*(6), 1–16. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061615

Zhou, D., Hu, Y., Zhou, T., Peng, S., Li, R., He, J., & Zhao, M. (2025). Ultrasonics Sonochemistry Deep eutectic solvent extraction of polysaccharides from Gastrodiae elata with ultrasonic and enzymes assistance : Process optimization , structure , and antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, *119*(April), 107383. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107383

Zhu, M., Shang, B., Zhou, F., Yuan, Y., Yin, F., & Cao, J. (2024). Polysaccharides of Aspergillus cristatus attenuate obesity by regulating gut microbiota and gut microbiota-related metabolites. *Food Science and Human Wellness*, *13*, 1513