

Transformasi Molekuler Kayu melalui Pirolisis: Mekanisme Reaksi, Pembentukan Produk, dan Potensi Biofuel

Sulpika Samsu^{1*}, Dea Angriani A.Mailili¹, Azhar Hasan¹, Indra Lateka¹, Suhendra Iskandar¹

¹ Pendidikan Guru Madrasah Ibtidaiyah, UIN Sultan Amai Gorontalo, Gorontalo, Indonesia.

Received: 23 September 2026

Revised: 23 September 2026

Accepted: 24 September 2026

Published: 24 September 2026

Corresponding Author:

Sulpika Samsu:

sulpikasamsufikar@gmail.com

© 2025 The Authors. This open access article is distributed under a (CC-BY License)



Phone*: +62...

Abstrak: Pirolisis biomassa merupakan salah satu teknologi termokimia yang berpotensi mendukung pemanfaatan limbah biomassa menjadi produk bernilai tambah, terutama bio-oil, biochar, dan gas. Artikel ini bertujuan mengkaji pengaruh jenis dan karakteristik bahan baku, kondisi pirolisis, serta interaksi antarkomponen lignoselulosa terhadap distribusi dan karakteristik produk pirolisis, sekaligus mengevaluasi potensinya sebagai sumber biofuel. Kajian dilakukan melalui analisis dan sintesis terhadap berbagai penelitian mengenai pirolisis biomassa dengan mempertimbangkan karakteristik bahan baku, suhu, laju pemanasan, waktu tinggal, teknologi pemanasan, penggunaan katalis, serta komposisi produk yang dihasilkan. Hasil kajian menunjukkan bahwa karakteristik biomassa dan kondisi proses saling berinteraksi dalam menentukan jalur dekomposisi, distribusi bio-oil, biochar, dan gas, serta komposisi kimia bio-oil. Bio-oil memiliki potensi sebagai sumber bahan bakar dan bahan baku produk kimia, tetapi karakteristik senyawa beroksigen, keasaman, dan stabilitasnya perlu dipertimbangkan dalam pemanfaatan langsung maupun proses upgrading. Biochar dan gas pirolisis juga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar, sumber energi proses, maupun material bernilai tambah. Dengan demikian, optimalisasi pirolisis biomassa perlu dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan karakteristik bahan baku dan kondisi proses untuk menghasilkan produk yang sesuai dengan tujuan pemanfaatannya serta mendukung valorisasi biomassa secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Pirolisis kayu, biomassa lignoselulosa, *bio-oil*, bioenergi, peningkatan mutu.

Pendahuluan

Krisis energi global yang kian mendesak (Iskandar and Firdausiah 2026), ditandai oleh penipisan cadangan bahan bakar fosil konvensional serta peningkatan emisi gas rumah kaca akibat aktivitas industri dan transportasi, telah memicu urgensi global untuk beralih ke sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Di tengah pencarian alternatif energi hijau tersebut, biomassa lignoselulosa—khususnya kayu dan limbah industri kehutanan—muncul sebagai salah satu kandidat yang menjanjikan karena ketersediaannya yang melimpah, sifatnya yang terbarukan, serta potensinya dalam mendukung pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Pemanfaatan kayu sebagai bahan baku energi tidak hanya berpotensi memberikan solusi terhadap persoalan pengelolaan limbah organik, tetapi juga membuka peluang bagi pengembangan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, pemanfaatan biomassa kayu menjadi produk energi bernilai tambah merupakan salah satu topik penting dalam pengembangan energi terbarukan.

Salah satu pendekatan yang banyak dikaji untuk meningkatkan nilai guna biomassa kayu adalah konversi termokimia melalui pirolisis. Proses ini menarik perhatian karena biomassa tidak hanya dapat dikonversi menjadi satu jenis produk, tetapi dapat menghasilkan produk cair, padat, dan gas yang memiliki karakteristik serta potensi pemanfaatan yang berbeda. Fraksi cair berupa bio-oil menjadi perhatian khusus karena berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku biofuel maupun sebagai sumber berbagai senyawa kimia bernilai tambah. Namun, karakteristik bio-oil yang dihasilkan dari biomassa berbeda dengan bahan bakar minyak konvensional. Menurut Yanti et al. (2022) dan Gholizadeh et al. (2023), bio-oil merupakan campuran senyawa organik beroksigen dengan komposisi yang beragam dan memiliki kandungan air yang relatif tinggi, sehingga karakteristiknya perlu dipahami lebih lanjut sebelum dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan bakar.

Potensi tersebut semakin menarik ketika pirolisis tidak hanya diterapkan pada biomassa kayu murni, tetapi juga dikaji melalui kombinasi dengan berbagai jenis limbah lainnya. Menurut Ahmadi et al. (2022), pirolisis limbah kayu furnitur, plastik campuran, dan ban bekas menunjukkan adanya perbedaan distribusi produk ketika bahan-bahan tersebut diproses secara individual maupun dalam berbagai kombinasi. Pada pirolisis individual, limbah plastik campuran menghasilkan fraksi cair sebesar 70,6% berat, lebih tinggi dibandingkan kayu furnitur dan ban bekas. Temuan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik bahan baku dan interaksinya selama proses termokimia dapat berperan penting dalam menentukan distribusi serta karakteristik produk yang dihasilkan, sehingga pemanfaatan limbah melalui pirolisis memiliki ruang pengembangan yang luas dalam konteks produksi energi dan peningkatan nilai produk.

Meskipun memiliki prospek yang menjanjikan, pemanfaatan bio-oil sebagai bahan bakar masih menghadapi sejumlah persoalan yang berkaitan dengan karakteristik kimianya. Kandungan oksigen dan air yang relatif tinggi, keasaman, viskositas, nilai kalor, serta ketidakstabilan penyimpanan menjadi beberapa karakteristik yang dapat membatasi penggunaan bio-oil secara langsung sebagai pengganti bahan bakar fosil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan konversi biomassa menjadi biofuel tidak hanya ditentukan oleh jumlah produk cair yang dihasilkan, tetapi juga oleh karakteristik kimia dan kualitas produk tersebut. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik bahan baku, transformasi kimia selama pirolisis, pembentukan produk, serta kualitas bio-oil yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian tersebut, kajian mengenai pirolisis kayu sebagai jalur konversi biomassa menjadi biofuel menjadi penting untuk dilakukan, khususnya dari perspektif ilmu kimia. Literatur mengenai pirolisis kayu telah berkembang dengan membahas berbagai aspek, mulai dari karakteristik bahan baku hingga distribusi dan kualitas produk yang dihasilkan, tetapi informasi tersebut perlu dipahami secara terpadu untuk memperoleh gambaran mengenai potensi dan keterbatasannya sebagai sumber biofuel. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan menelaah perkembangan penelitian mengenai pirolisis kayu, dengan menitikberatkan pada transformasi kimia biomassa, pembentukan dan karakteristik bio-oil, serta faktor-faktor yang berkaitan dengan potensinya sebagai bahan bakar alternatif. Kajian ini diharapkan dapat memberikan perspektif kimia yang lebih komprehensif mengenai pemanfaatan kayu dan limbah lignoselulosa sebagai sumber biofuel serta peluang pengembangannya dalam mendukung transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur (literature review) untuk mengidentifikasi, mengumpulkan, dan menganalisis berbagai hasil penelitian mengenai pirolisis kayu untuk produksi biofuel. Literatur dikumpulkan dari berbagai sumber ilmiah yang relevan, terutama artikel penelitian yang membahas karakteristik bahan baku kayu, proses pirolisis, distribusi produk, karakteristik bio-oil, serta potensi pemanfaatannya sebagai bahan bakar. Penelusuran literatur dilakukan menggunakan beberapa basis data ilmiah dan mesin pencarian akademik dengan kata kunci yang relevan, seperti *wood pyrolysis*, *lignocellulosic biomass*, *bio-oil*, *biofuel production*, dan *pyrolysis products*. Literatur yang diperoleh kemudian dihimpun dan diseleksi berdasarkan kesesuaian topik dengan fokus kajian.

Tahap seleksi literatur dilakukan untuk memastikan bahwa sumber yang digunakan memiliki relevansi dan kualitas ilmiah yang memadai. Literatur diprioritaskan pada artikel jurnal ilmiah yang membahas pirolisis biomassa kayu dan produk hasil pirolisis, terutama penelitian yang memuat informasi mengenai karakteristik bahan baku, kondisi proses, distribusi produk, serta karakteristik fisik dan kimia bio-oil. Literatur yang tidak berkaitan langsung dengan pirolisis kayu, tidak menyediakan informasi yang relevan dengan fokus kajian, atau hanya membahas aspek di luar produksi dan karakterisasi biofuel tidak dijadikan sumber utama. Selain artikel penelitian, sumber ilmiah pendukung seperti artikel ulasan dan buku akademik dapat digunakan untuk memperkuat konsep dasar mengenai biomassa lignoselulosa, mekanisme pirolisis, serta karakteristik bio-oil.

Data dari literatur terpilih selanjutnya diekstraksi dan dikelompokkan berdasarkan beberapa aspek utama, yaitu jenis dan karakteristik bahan baku, kondisi pirolisis, distribusi produk, karakteristik bio-oil, serta potensi pemanfaatannya sebagai biofuel. Informasi mengenai komponen utama kayu, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dibandingkan untuk memahami keterkaitannya dengan pembentukan produk selama pirolisis. Data mengenai temperatur, laju pemanasan, waktu tinggal, dan jenis reaktor juga dicatat sebagai informasi pendukung untuk melihat kecenderungan pengaruh kondisi proses terhadap distribusi produk. Selanjutnya, karakteristik bio-oil seperti kadar air, densitas, viskositas, nilai kalor, keasaman, serta komposisi senyawa organik dianalisis secara komparatif berdasarkan hasil penelitian yang dilaporkan dalam literatur.

Analisis literatur dilakukan secara deskriptif-komparatif dan sintesis naratif dengan membandingkan temuan dari berbagai penelitian untuk mengidentifikasi pola, persamaan, perbedaan, serta faktor-faktor yang berhubungan dengan kualitas dan potensi bio-oil sebagai bahan bakar. Hasil penelitian terdahulu tidak hanya dirangkum, tetapi juga diinterpretasikan berdasarkan perspektif kimia, khususnya hubungan antara komposisi lignoselulosa, transformasi termokimia, pembentukan senyawa hasil pirolisis, dan karakteristik bio-oil. Hasil sintesis kemudian digunakan untuk mengidentifikasi potensi, keterbatasan, dan peluang pengembangan pirolisis kayu sebagai salah satu jalur konversi biomassa menjadi biofuel. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan kajian pirolisis kayu berdasarkan bukti ilmiah yang telah dipublikasikan.

Hasil dan Pembahasan

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian-penelitian yang dikaji menunjukkan keragaman jenis, sumber, dan karakteristik biomassa, yang pada akhirnya dapat memengaruhi perilaku pirolisis dan produk yang dihasilkan. Vestergaard et al. (2027) menggunakan *pine wood* sebagai salah satu bahan utama dan membandingkannya dengan *wheat straw*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa kinetika pirolisis bersifat spesifik terhadap jenis biomassa, sehingga parameter kinetika *pine wood* perlu diterapkan secara hati-hati pada biomassa lain, khususnya jenis *hardwood*. Penelitian Liu et al. (2027), Strandberg et al. (2027), dan Yousef et al. (2027) juga menggunakan *pine wood* atau *wood pellets*, sedangkan penelitian Subramani et al. (2027) memanfaatkan limbah kayu hasil pembongkaran (*demolition wood*), yang menunjukkan bahwa biomassa kayu dari berbagai sumber tetap berpotensi dikonversi melalui proses pirolisis. Selain biomassa kayu, penelitian Sampaolesi et al. (2026) menggunakan *brewer's spent grain* (BSG), *eucalyptus wood chips* (EWC), *willow and poplar sawdust* (WPS), serta *tree pruning residues* (TPR), dengan kandungan lignin EWC dan WPS masing-masing sebesar 22,4% dan 24,7% basis kering.

Keragaman bahan baku tersebut juga terlihat pada penggunaan biomassa dengan komposisi dan struktur yang dimodifikasi. Studi Niu et al. (2027) menggunakan biomassa kayu pinus yang difraksinasi menjadi sistem biner selulosa–hemiselulosa (C–H) dan selulosa–lignin (C–L) dengan variasi rasio komponen untuk mengevaluasi interaksi antarkomponen selama pirolisis. Proses fraksinasi mengubah morfologi bahan dari struktur yang relatif padat menjadi lebih berpori, tetapi tidak menghilangkan

kristalinitas selulosa I. Sementara itu, studi Barbara et al. (2027) menggunakan batang *Nicotiana tabacum* yang dimodifikasi secara genetik melalui ekspresi enzim α -L-arabinofuranosidase B (ABFB), sehingga penelitian tersebut lebih berfokus pada perubahan struktur dinding sel dan peningkatan keterprosesan biomassa daripada produksi *bio-oil* secara langsung. Studi Unsomsri et al. (2026) menggunakan *fresh palm fruit bunches* (FFB) yang dikonversi melalui sistem pirolisis kontinu terintegrasi dengan gasifikasi, sedangkan Nie et al. (2026) mengkaji campuran *polyethylene terephthalate* (PET) dan *balsa wood* (BW) sebagai model untuk mendukung proses daur ulang limbah bilah turbin angin. Selain itu, penelitian terhadap *eucalyptus wood* (EW) yang dikombinasikan dengan *polypropylene* (PP) menunjukkan bahwa pencampuran biomassa dengan material polimer dapat diarahkan untuk menghasilkan *bio-oil* yang kaya hidrokarbon aromatik (Teng et al. 2027).

Tabel 1. Ringkasan bahan baku, kondisi pirolisis, dan karakteristik produk dari penelitian yang dikaji

Studi	Bahan baku	Kondisi utama	Produk dominan/utama	Temuan penting
(Vestergaard et al. 2027)	<i>Pine wood, wheat straw</i>	523–1667 K; heating rate 0,5– 10^5 K s ⁻¹	Biochar, bio-oil, gas	Kinetika spesifik biomassa
(Teng et al. 2027)	EW + PP	450–650 °C; microwave; MNZ	Bio-oil	MAHs tinggi; 53,5 wt% bio-oil
(Liu et al. 2027)	<i>Pine wood</i>	400–900 °C	Biochar	Struktur karbon makin teratur
(Megía, Vizcaíno, and Carrero 2027)	<i>Pine wood waste</i>	Fast pyrolysis + ATR	H ₂	Integrasi produksi bio-oil–H ₂
(Strandberg et al. 2027)	<i>Pine wood</i>	Torrefaction–pyrolysis	Biochar	Anatomi kayu memengaruhi porositas
(Yousef et al. 2027)	<i>Wood pellets</i> + ZIF-67	Katalitik	Produk aromatik	Aktivitas katalitik pada 20 wt%
(Subramani et al. 2027)	<i>Demolition wood</i>	500–700 °C	Bio-oil	Maksimum sekitar 600 °C
(Niu et al. 2027)	Selulosa–hemiselulosa/lignin	TG-FTIR, Py-GC/MS	Oxygenates/aromatics	Interaksi antarkomponen
(Barbara et al. 2027)	<i>Nicotiana tabacum</i>	Py-GC/MS	Produk lignin	Pengaruh modifikasi dinding sel
(Sampaolesi et al. 2026)	BSG, EWC, WPS, TPR	Fast pyrolysis	Bio-oil, gas, biochar	Komposisi dipengaruhi lignin
(Unsomsri et al. 2026)	FFB	500 °C; kontinu	Oil, vinegar, gas, biochar	Sistem terpadu
(Nie et al. 2026)	PET + BW	Co-pyrolysis	Aromatics, aldehydes	Efek sinergis

Kondisi operasi pirolisis pada penelitian-penelitian yang dikaji menunjukkan rentang yang cukup luas dan bergantung pada karakteristik bahan baku, teknologi yang digunakan, serta tujuan konversi yang ingin dicapai. Vestergaard et al. (2027) menunjukkan bahwa perilaku pirolisis *pine wood* dapat dimodelkan pada rentang kondisi yang luas, dengan temperatur sekitar 523–1667 K, laju pemanasan 0,5– 10^5 K s⁻¹, dan ukuran partikel 80 μ m–20 mm. Perbedaan kondisi operasi tersebut menghasilkan karakteristik proses yang berbeda, di mana pirolisis lambat cenderung meningkatkan pembentukan biochar, sedangkan pirolisis cepat lebih diarahkan pada pembentukan produk cair dan gas. Temuan ini menunjukkan bahwa temperatur, laju pemanasan, ukuran partikel, dan waktu tinggal merupakan parameter penting yang memengaruhi jalannya dekomposisi dan distribusi produk pirolisis.

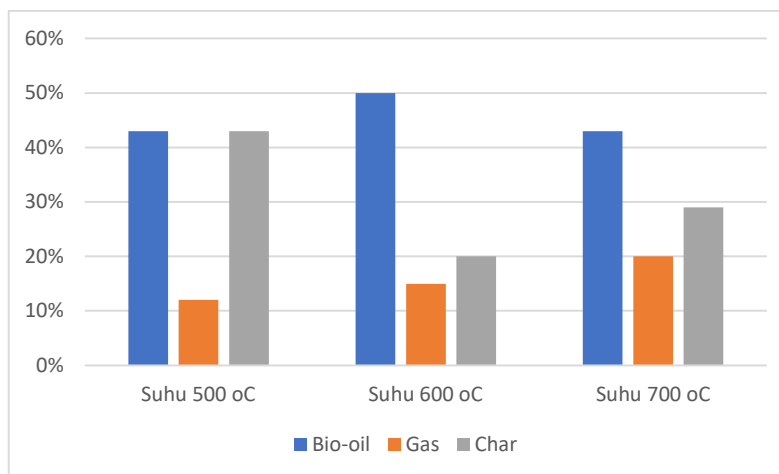
Pengaruh kondisi operasi menjadi lebih spesifik pada proses yang menggunakan katalis maupun teknologi pemanasan tertentu. Teng et al. (2027) melakukan *microwave-assisted ex-situ catalytic co-*

pyrolysis terhadap *eucalyptus wood* dan PP menggunakan katalis MFI nanosheet zeolite (MNZ), dengan variasi temperatur katalitik 450–650 °C, daya microwave 600–1400 W, dan pemuatan katalis 0–200 wt%. Dalam rentang kondisi yang diteliti, kombinasi 100 wt% MNZ, temperatur 500 °C, dan daya microwave 1000 W menghasilkan performa terbaik. Sementara itu, penelitian Yousef et al. (2027) menunjukkan bahwa penambahan ZIF-67 sebesar 10–30 wt% memengaruhi perilaku dekomposisi *wood pellets*, dengan pemuatan 20 wt% menunjukkan aktivitas katalitik paling tinggi pada kondisi penelitian. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa selain temperatur dan laju pemanasan, jenis serta jumlah katalis dapat menjadi faktor penting dalam mengarahkan transformasi termal biomassa.

Variasi temperatur juga dapat menghasilkan perubahan distribusi produk yang tidak selalu bersifat linear. Penelitian Subramani et al. (2027) terhadap *demolition wood* menggunakan temperatur 500–700 °C dalam reaktor *solar-assisted quartz hybrid drop-tube/fixed-bed*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur tidak selalu meningkatkan hasil *bio-oil*, dengan hasil maksimum diperoleh pada 600 °C. Pada temperatur yang lebih tinggi, hasil *bio-oil* menurun dan dikaitkan dengan terjadinya reaksi *secondary cracking*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan intensitas kondisi operasi tidak selalu menguntungkan bagi produk yang ditargetkan, karena temperatur yang terlalu tinggi dapat mendorong terjadinya reaksi sekunder yang mengubah senyawa hasil dekomposisi primer menjadi produk gas atau senyawa dengan karakteristik berbeda.

Selain parameter operasi eksternal, kondisi proses juga dipengaruhi oleh interaksi antarkomponen penyusun biomassa. Studi Niu et al. (2027) menggunakan analisis TG-FTIR dan Py-GC/MS, yang dikombinasikan dengan *distributed activation energy model* (DAEM), untuk mengevaluasi pengaruh hemiselulosa dan lignin terhadap dekomposisi selulosa. Interaksi dengan hemiselulosa dan lignin menurunkan energi aktivasi pirolisis selulosa masing-masing sebesar 36,7 dan 22,6 kJ/mol, yang menunjukkan adanya interaksi antarkomponen selama proses termal. Pada studi Sampaolesi et al. (2026), analisis TGA dan TGA-FTIR digunakan untuk mengevaluasi karakteristik dekomposisi dan menentukan kondisi yang sesuai sebelum proses *fast pyrolysis* pada temperatur hingga sekitar 450 °C. Sementara itu, Unsomsri et al. (2026) menerapkan sistem pirolisis kontinu pada 500 °C dengan sumber panas yang berasal dari *wood pellets* melalui sistem gasifikasi–*syngas burner*, sedangkan Nie et al. (2026) mengkaji kinetika *co-pyrolysis* PET–BW menggunakan TG-MS dan Py-GC/MS; rasio pencampuran 1:1 menunjukkan efek sinergis paling kuat, ditandai dengan peningkatan kehilangan massa dan penurunan *apparent activation energy*. Berbeda dari penelitian-penelitian tersebut, studi Barbara et al. (2027) tidak secara khusus berfokus pada optimasi kondisi operasi pirolisis, tetapi menggunakan Py-GC/MS untuk mengidentifikasi perubahan profil produk yang dihasilkan akibat modifikasi struktur dinding sel.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi pirolisis tidak dapat dipandang sebagai parameter yang berdiri sendiri, tetapi berinteraksi dengan karakteristik bahan baku, komposisi penyusun biomassa, teknologi pemanasan, dan keberadaan katalis. Temperatur dan laju pemanasan terutama menentukan tingkat dan jalur dekomposisi, sedangkan ukuran partikel, waktu tinggal, serta interaksi antarkomponen dapat memengaruhi perpindahan panas, kinetika reaksi, dan distribusi produk. Oleh karena itu, penentuan kondisi operasi perlu disesuaikan dengan karakteristik bahan baku dan produk yang ditargetkan, baik biochar, *bio-oil*, maupun gas.



Gambar 1. Pengaruh temperatur terhadap distribusi produk pirolisis demolition wood

Distribusi produk pirolisis umumnya terdiri atas fraksi cair, padat, dan gas, tetapi proporsinya sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, komposisi biomassa, serta kondisi proses. Penelitian Subramani et al. (2027) terhadap *demolition wood* menunjukkan bahwa hasil *bio-oil* berdasarkan massa terukur mencapai sekitar 50 wt% pada 600 °C, sedangkan hasil gas berada pada kisaran 12,5–20,4 wt% dan hasil *char* sekitar 32 wt% sebelum sedikit menurun pada 700 °C. Namun, ketika *mass lost* turut diperhitungkan sebagai bagian dari produk cair, hasil *bio-oil* pada 500 °C dilaporkan mencapai 56 wt%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan yang digunakan dalam perhitungan dan penutupan neraca massa dapat memengaruhi interpretasi distribusi produk yang dihasilkan.

Kondisi operasi, khususnya temperatur dan laju pemanasan, berperan penting dalam menentukan proporsi masing-masing fraksi. Penelitian Vestergaard et al. (2027) menunjukkan bahwa pirolisis lambat cenderung menghasilkan fraksi biochar yang lebih tinggi, sedangkan pirolisis cepat lebih mendukung pembentukan produk cair dan gas. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian Liu et al. (2027) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pirolisis *pine wood* dari 400 hingga 900 °C menghasilkan perubahan karakteristik biochar, ditandai dengan meningkatnya keteraturan struktur karbon dan menurunnya rasio O/C dari 0,663 menjadi 0,083. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi tidak hanya memengaruhi jumlah masing-masing fraksi, tetapi juga dapat mengubah karakteristik kimia dan struktural produk yang dihasilkan.

Penggunaan katalis dan material tambahan juga dapat mengarahkan distribusi serta komposisi produk. Pada penelitian Teng et al. (2027), *microwave-assisted catalytic co-pyrolysis eucalyptus wood* dan PP menggunakan MNZ menghasilkan *bio-oil* sebesar 53,5 wt% pada kondisi 100 wt% katalis, 500 °C, dan daya microwave 1000 W. Penggunaan MNZ juga menghasilkan deposisi kokas sebesar 1,23 wt%, lebih rendah dibandingkan HZSM-5 konvensional sebesar 2,51 wt% pada kondisi yang sama. Selain memengaruhi rendemen fraksi cair, keberadaan katalis tersebut mendorong pembentukan senyawa aromatik dan menunjukkan bahwa katalisis dapat mengubah jalur reaksi serta komposisi kimia produk yang dihasilkan.

Selain kondisi operasi dan katalis, komposisi penyusun biomassa serta interaksi antarkomponen juga berpengaruh terhadap distribusi produk. Pada studi Niu et al. (2027), interaksi selulosa–hemiselulosa meningkatkan pembentukan CO₂ dan senyawa karbonil pada tahap awal pirolisis serta menurunkan hasil levoglucosan hingga 34 kali lipat. Sebaliknya, interaksi selulosa–lignin meningkatkan hasil levoglucosan dan senyawa fenolik masing-masing sebesar 77% dan 70%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komponen biomassa tidak selalu berperilaku secara independen selama pirolisis, tetapi dapat mengalami interaksi yang mengubah jalur dekomposisi dan distribusi senyawa yang terbentuk.

Perbedaan distribusi produk juga terlihat pada biomassa dengan karakteristik lignoselulosa yang berbeda. Studi Sampaolesi et al. (2026) melaporkan bahwa *fast pyrolysis* menghasilkan 14–41% bio-oil, 28–38% fraksi gas, dan hingga 39% biochar, dengan distribusi yang berbeda antarjenis biomassa; kandungan lignin yang lebih tinggi pada EWC dan WPS berkorelasi dengan pembentukan senyawa fenolik. Pada Unsomsri et al. (2026), pirolisis FFB pada 500 °C menghasilkan 9,5% biochar, 21,9% pyrolysis oil, 40,0% wood vinegar, dan 28,6% gas. Sementara itu, *co-pyrolysis* PET–BW pada Nie et al. (2026) mengubah profil senyawa hasil pirolisis melalui peningkatan pembentukan senyawa aromatik dan aldehida, disertai penurunan fenol, ester, dan keton. Pada Barbara et al. (2027), perubahan profil produk yang berkaitan dengan fraksi lignin juga terdeteksi antar-*line* tanaman, meskipun perubahan tersebut tidak menunjukkan perubahan besar pada komposisi lignoselulosa secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, distribusi produk pirolisis merupakan hasil interaksi antara karakteristik bahan baku dan kondisi konversi. Temperatur, laju pemanasan, dan waktu tinggal dapat menggeser keseimbangan antara pembentukan fraksi padat, cair, dan gas, sedangkan komposisi lignoselulosa dan interaksi antarkomponen turut menentukan jenis senyawa yang terbentuk dalam setiap fraksi. Penggunaan katalis maupun bahan campuran selanjutnya dapat mengarahkan reaksi sekunder sehingga meningkatkan atau menekan pembentukan kelompok senyawa tertentu. Oleh karena itu, pengendalian distribusi produk tidak cukup dilakukan melalui pengaturan rendemen masing-masing fraksi, tetapi juga perlu mempertimbangkan komposisi kimia dan karakteristik produk dalam setiap fraksi.

Karakteristik *bio-oil* merupakan salah satu aspek penting dalam menentukan arah pemanfaatan produk cair hasil pirolisis, karena komposisi kimianya berpengaruh terhadap sifat dan kualitas penggunaannya. Penelitian Teng et al. (2027) menunjukkan bahwa penggunaan katalis MNZ pada *microwave-assisted catalytic co-pyrolysis eucalyptus wood* dan PP mampu menghasilkan *bio-oil* dengan kandungan *monocyclic aromatic hydrocarbons* (MAHs) sebesar 39,83%, termasuk sekitar 14,28% BTEX

pada kondisi terbaik. Kandungan MAHs tersebut dilaporkan 2,46 kali lebih tinggi dibandingkan penggunaan HZSM-5 konvensional pada kondisi yang sama. Peningkatan pembentukan hidrokarbon aromatik tersebut dikaitkan dengan struktur pori hierarkis MNZ, volume mesopori yang lebih besar, rasio situs asam Brønsted/Lewis yang lebih tinggi, serta kemampuannya dalam merespons pemanasan *microwave*.

Pengaruh katalis terhadap komposisi kimia produk cair juga ditunjukkan pada penelitian Yousef et al. (2027). Penambahan ZIF-67 sebesar 20 wt% menghasilkan aktivitas katalitik paling tinggi pada kondisi yang diteliti dan meningkatkan pembentukan senyawa aromatik, dengan senyawa yang kaya *tetrahydro-2-phenyl* menyumbang sekitar 85% dari total area puncak aromatik yang teridentifikasi melalui GC-MS. Selain mengubah komposisi produk, keberadaan katalis juga memengaruhi karakteristik kinetika proses; pemuatan ZIF-67 tersebut menurunkan rentang energi aktivasi dari sekitar 233–427 kJ/mol menjadi 159–295 kJ/mol. Temuan ini menunjukkan bahwa katalis dapat memengaruhi jalur reaksi sekaligus karakteristik energi yang diperlukan selama konversi termal biomassa.

Namun, karakteristik *bio-oil* tidak hanya ditentukan oleh kandungan hidrokarbon aromatik atau keberhasilan pembentukan senyawa tertentu. Komposisi *bio-oil* sangat bergantung pada jenis dan komposisi lignoselulosa bahan baku, khususnya kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pada penelitian Sampaolesi et al. (2026), *bio-oil* dari *tree pruning residues* (TPR) dan *brewer's spent grain* (BSG) didominasi oleh asam asetat, keton, dan *anhydrosugars*, dengan kandungan asam asetat mencapai sekitar 30% dan kontribusi *anhydrosugars* pada *bio-oil* BSG mencapai hingga 37%. Sebaliknya, biomassa EWC dan WPS yang memiliki kandungan lignin lebih tinggi menghasilkan sekitar 7% dan 12% senyawa fenolik, yang menunjukkan kontribusi lignin terhadap pembentukan senyawa aromatik dalam *bio-oil*. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa perbedaan komposisi lignoselulosa dapat menghasilkan karakteristik kimia *bio-oil* yang berbeda meskipun biomassa dikonversi melalui proses pirolisis yang serupa.

Interaksi antarkomponen biomassa juga dapat memperkuat perbedaan tersebut. Studi Niu et al. (2027) menunjukkan bahwa keberadaan hemiselulosa dan lignin dapat mengubah jalur dekomposisi selulosa dan selanjutnya memengaruhi komposisi produk cair. Interaksi dengan hemiselulosa cenderung mengarahkan pembentukan produk selulosa menuju senyawa oksigenat berukuran lebih kecil, sedangkan interaksi dengan lignin meningkatkan pembentukan levoglucosan dan senyawa fenolik. Dengan demikian, komposisi *bio-oil* tidak hanya mencerminkan kandungan awal masing-masing komponen biomassa, tetapi juga hasil interaksi antarkomponen selama proses dekomposisi termal.

Karakteristik tersebut menjadi penting karena *bio-oil* mentah umumnya masih mengandung berbagai senyawa beroksigen yang dapat membatasi penggunaannya secara langsung sebagai bahan bakar. Oleh karena itu, pemanfaatannya perlu disesuaikan dengan karakteristik kimia yang dihasilkan, baik melalui penggunaan langsung pada aplikasi tertentu, proses *upgrading* untuk meningkatkan kualitas bahan bakar, maupun konversi lebih lanjut menjadi bahan kimia atau bahan bakar sekunder. Penelitian Megía et al. (2027), misalnya, menunjukkan bahwa *bio-oil* dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk proses *reforming* dalam menghasilkan hidrogen. Sementara itu, penelitian Unsomsri et al. (2026) menghasilkan fraksi *pyrolysis oil* sebesar 21,9%, tetapi lebih menitikberatkan pada performa sistem dan distribusi produk sehingga karakterisasi molekuler *bio-oil* tidak menjadi fokus utama. Secara keseluruhan, hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa evaluasi *bio-oil* perlu mempertimbangkan tidak hanya rendemennya, tetapi juga komposisi kimia, kandungan senyawa beroksigen, serta karakteristik yang menentukan kesesuaiannya untuk bahan bakar atau untuk dikonversi lebih lanjut.

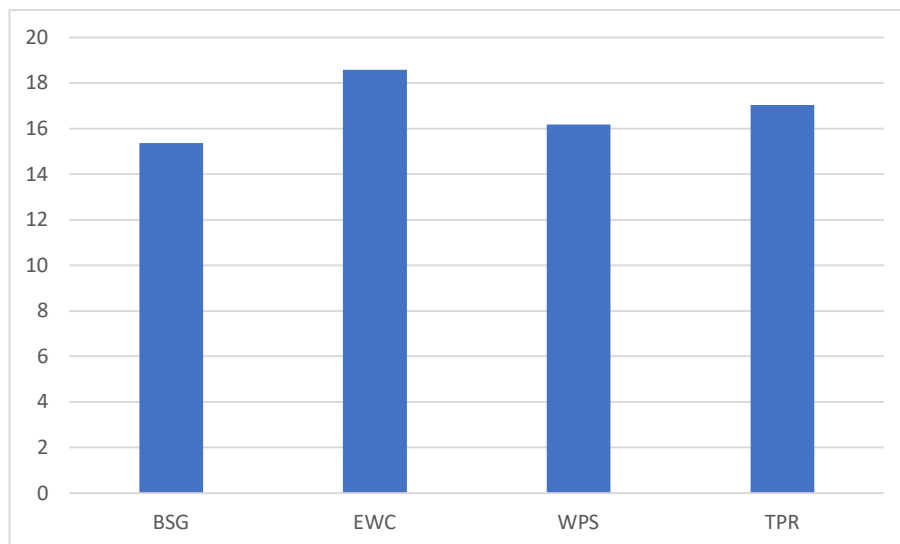
Hasil kajian menunjukkan bahwa produk pirolisis kayu memiliki jalur pemanfaatan energi yang beragam dan tidak terbatas pada penggunaan *bio-oil* secara langsung sebagai bahan bakar. Vestergaard et al. (2027) menyatakan bahwa *bio-oil* memiliki densitas energi yang lebih tinggi dibandingkan biomassa awal dan berpotensi ditingkatkan mutunya menjadi bahan bakar transportasi. Selain fraksi cair, biochar dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat, sedangkan gas hasil pirolisis dapat digunakan sebagai sumber energi, termasuk untuk mendukung kebutuhan panas dalam proses. Dengan demikian, pirolisis memungkinkan biomassa dikonversi secara simultan menjadi beberapa fraksi produk yang memiliki nilai dan jalur pemanfaatan energi berbeda.

Fraksi cair memiliki peluang pemanfaatan yang luas, baik sebagai bahan bakar maupun sebagai bahan baku untuk menghasilkan produk energi lainnya. Pada penelitian Teng et al. (2027), tingginya kandungan *monocyclic aromatic hydrocarbons* (MAHs) dalam *bio-oil* hasil *co-pyrolysis eucalyptus wood* dan PP menunjukkan peluang untuk menghasilkan hidrokarbon aromatik yang bernilai, khususnya melalui pendekatan katalitik. Sementara itu, penelitian Megía et al. (2027) menunjukkan jalur pemanfaatan yang berbeda dengan mengintegrasikan *fast pyrolysis* limbah *pine wood* dan *autothermal reforming* untuk

menghasilkan hidrogen. Analisis menunjukkan bahwa kedua skenario berbasis biomassa yang dikaji dapat menurunkan dampak perubahan iklim sekitar 80% dibandingkan *steam methane reforming*, meskipun masih terdapat dampak lain yang berkaitan dengan penggunaan listrik dan pengelolaan hutan. Dari perspektif ekonomi, konfigurasi yang mempertahankan fraksi organik *bio-oil* sebagai produk samping untuk bahan bakar boiler menghasilkan biaya hidrogen sebesar 2,8 €/2025/kg H₂, sedangkan konfigurasi yang mengonversi seluruh *bio-oil* menjadi hidrogen menghasilkan biaya sebesar 5,2 €/2025/kg H₂.

Selain sebagai sumber bahan bakar atau bahan baku konversi lebih lanjut, fraksi padat juga memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatan energi maupun aplikasi material. Penelitian Liu et al. (2027) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pirolisis menghasilkan biochar dengan struktur karbon yang semakin teratur, tingkat deoksigenasi yang lebih tinggi, dan reaktivitas oksidasi yang lebih rendah. Penelitian Strandberg et al. (2027) melaporkan bahwa biochar dari *pine wood* memiliki porositas sekitar 33–77%, sedangkan peningkatan temperatur dari torrefaksi menuju pirolisis meningkatkan mikroporositas dan luas permukaan yang dapat diakses. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa biochar tidak hanya berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat, tetapi juga memiliki peluang untuk diarahkan pada aplikasi material yang memanfaatkan sifat pori dan struktur karbonnya. Di sisi lain, penelitian Subramani et al. (2027) menunjukkan potensi penggunaan energi surya dalam proses pirolisis limbah kayu untuk menghasilkan *bio-oil* yang selanjutnya dapat diarahkan menuju produksi *sustainable aviation fuel* (SAF).

Potensi produk pirolisis sebagai sumber energi juga berkaitan erat dengan nilai kalor dan komposisi kimianya. Studi Sampaolesi et al. (2026) menunjukkan bahwa biomassa awal dan *bio-oil* memiliki HHV sekitar 13–19 MJ kg⁻¹, sedangkan wax hasil pirolisis BSG memiliki HHV yang lebih tinggi, yaitu 31,68 MJ kg⁻¹, sehingga menunjukkan potensi sebagai sumber energi. Namun, dominasi asam organik, senyawa oksigenat, dan komponen fenolik pada sebagian *bio-oil* menunjukkan bahwa pemanfaatannya sebagai bahan bakar secara langsung perlu mempertimbangkan kualitas produk dan kemungkinan proses *upgrading* (Niu et al. 2027; Sampaolesi et al. 2026). Dengan demikian, tingginya nilai kalor saja belum cukup untuk menentukan kesesuaian suatu produk pirolisis sebagai biofuel, karena karakteristik kimia dan kestabilan produk juga berpengaruh terhadap penggunaannya.



Gambar 2. Higher Heating Value (HHV) pada bio-oil yang dihasilkan untuk raw material yang berbeda

Pengembangan pemanfaatan produk pirolisis selanjutnya dapat diarahkan pada pendekatan *selective valorization*, yaitu memilih jalur konversi berdasarkan karakteristik dan nilai masing-masing fraksi. Studi Unsomsri et al. (2026) menunjukkan bahwa sistem pirolisis FFB menghasilkan *pyrolysis oil* sebesar 21,9% bersama biochar dan gas serta menunjukkan kelayakan teknis dan ekonomi sistem terpadu untuk valorisasi residu sawit menjadi produk bernilai energi. Sementara itu, studi Niu et al. (2027) memperlihatkan bahwa pengaturan interaksi antarkomponen biomassa dapat menggeser pembentukan produk menuju senyawa tertentu, sehingga membuka peluang untuk mengarahkan fraksi hasil pirolisis baik untuk bahan bakar maupun bahan kimia bernilai tambah. Oleh karena itu, pengembangan biofuel

berbasis pirolisis tidak hanya bergantung pada peningkatan rendemen *bio-oil*, tetapi juga pada pengendalian komposisi, nilai kalor, dan kestabilan produk melalui pemilihan bahan baku, pengaturan kondisi proses, serta strategi *upgrading* yang sesuai (Niu et al. 2027; Sampaolesi et al. 2026; Unsomsri et al. 2026).

Tabel 2. Komposisi dan karakteristik kimia bio-oil dari berbagai bahan baku dan kondisi pirolisis

Studi	Bahan baku	Kondisi/katalis	Komponen utama	Kandungan/hasil	Implikasi pemanfaatan
(Teng et al. 2027)	EW + PP	MNZ	MAHs	39,83%	Aromatic hydrocarbons
(Yousef et al. 2027)	Wood pellets	ZIF-67	Aromatic compounds	~85% area aromatik	Produk aromatik
(Niu et al. 2027)	C-H/C-L	—	Levoglucosan, phenolics, carbonyls	perubahan hingga 34x, 77%, 70%	Selective valorization
(Sampaolesi et al. 2026)	BSG/EWC/WPS/TP R	Fast pyrolysis	Acetic acid, ketones, anhydrosugars, phenolics	7–37% tergantung fraksi	Fuel/upgrading/chemical
(Unsomsri et al. 2026)	FFB	500 °C	Pyrolysis oil	21,9%	Energy valorization

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian, pirolisis biomassa merupakan proses termokimia yang hasilnya dipengaruhi secara simultan oleh jenis dan karakteristik bahan baku, kondisi operasi, serta interaksi antarkomponen lignoselulosa. Perbedaan komposisi dan struktur biomassa, bersama dengan suhu, laju pemanasan, waktu tinggal, ukuran partikel, teknologi pemanasan, dan penggunaan katalis, menentukan distribusi serta karakteristik bio-oil, biochar, dan gas yang dihasilkan. Bio-oil berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi, bahan bakar, maupun bahan baku produk kimia setelah mempertimbangkan karakteristik kimianya dan kebutuhan upgrading, sedangkan biochar dan gas dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar, sumber energi proses, atau material bernilai tambah. Dengan demikian, pengembangan pirolisis biomassa perlu diarahkan pada pengendalian bahan baku dan kondisi proses secara terpadu untuk menghasilkan produk yang sesuai dengan tujuan pemanfaatan serta mendukung valorisasi limbah biomassa secara berkelanjutan.

Referensi

- Ahmadi, Ayla, Mortaza Gholizadeh, Mehrab Fallahi-samberan, and Leila Amirkhani. 2022. "Pyrolysis of Municipal Waste : Effect of Waste Type and Co-Pyrolysis on the Formation of Products and Coke over Zeolite Catalyst." *Chemical Engineering Research and Design* 187:105–19. doi: 10.1016/j.cherd.2022.08.055.
- Barbara, Katarzyna, Aneta Basi, Karolina Soba, Magdalena Rakoczy, Dariusz Kruszka, Magdalena Zborowska, Jeannette Lucejko, Ł. Piotr, Agnieszka Dro, Wojciech Bia, Joanna Cerazy-waliszewska, and Tomasz Pniewski. 2027. "Enhancing Lignocellulosic Biomass Conversion for Bioethanol Production via Arabinofuranosidase-Mediated Cell Wall Remodeling in Tobacco." *Biomass and Bioenergy* 217:109863. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109863.
- Gholizadeh, M., S. Zhang, X. Hu, and Y. Wang. 2023. "Advances and Perspectives of Bio-Oil Hydrotreatment for Biofuel Production." *Energy & Fuels* 37(14):10134–54. doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c01647.
- Iskandar, Suhendra, and Syadza Firdausiah. 2026. "Readiness Model of Pre-Service Science Teachers for Integrating Education for Sustainable Development (ESD) Based on Green Science : A Structural Equation Modeling Analysis." *Journal of Natural Science and Integration* 9(1):147–60. doi: 10.24014/jnsi.v9i1.39148.

- Liu, Shaolin, Cécile Gaborieau, Audrey Duphil, and Jean Lachaud. 2027. "Multi-Scale Characterization of Pine Wood Biochar from TGA and Fixed-Bed Reactors : Implications for Two-Stage Hydrogen Production." *Biomass and Bioenergy* 217:109780. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109780.
- Megía, Pedro J., Arturo J. Vizcaino, and Alicia Carrero. 2027. "Hydrogen from Pine Wood Waste via Pyrolysis and Autothermal Steam Reforming : Technoeconomic and Environmental Performance of Single and Co-Production Pathways." *Biomass and Bioenergy* 217:110064. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.110064.
- Nie, Liubao, Kunyuan Liu, Jing Gu, and Hong Tian. 2026. "Unveiling Synergistic Mechanisms and Kinetic Behaviors in Co -Pyrolysis of Polyethylene Terephthalate and Balsa Wood from Waste Wind Turbine Blades." *Sustainable Materials and Technologies* 47:e01822. doi: 10.1016/j.susmat.2025.e01822.
- Niu, Zeyu, Xin Huang, Tianlong Liu, Yunlin Shao, Chuan Ma, and Jingyu Ran. 2027. "Insights into the Effects of Varying Hemicellulose and Lignin Ratios on Cellulose Pyrolysis within Biomass : Kinetics and Product Evolution." *Chemical Engineering Science* 339:125153. doi: 10.1016/j.ces.2026.125153.
- Sampaolesi, Sofia, Juan J. Musci, María V Toledo, and Laura E. Briand. 2026. "Pyrolysis of Lignocellulosic Based Waste : Comparison of Brewer ' s Spent Grain , Tree Pruning and Woody Biomass." *Biomass and Bioenergy* 210:109059. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109059.
- Strandberg, Anna, Markus Carlborg, Yusuf Tolunay, Kentaro Umeki, Mario Scheel, Anders Nordin, and Nils Skoglund. 2027. "Importance of Wood Anatomy for Pine Wood Biochar Properties : Insights from Multiscale Characterisation with Synchrotron X-Ray Microtomography and N₂ / CO₂ Gas Sorption Analyses." *Biomass and Bioenergy* 217:109999. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109999.
- Subramani, Vignesvar Krish, Sylvain Rodat, E. Pienihakkinen, Pouya Sirous-rezaei, and S. Abanades. 2027. "Influence of Temperature on the Bio-Oil Production from Biomass Pyrolysis in a Solar Hybrid Drop-Tube / Fixed-Bed Reactor." *Biomass and Bioenergy* 217:109982. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109982.
- Teng, Wen, Zhaosheng Yu, Gao Shen, and Xiaoqian Ma. 2027. "Ex-Situ Microwave-Assisted Co-Pyrolysis of Biomass with Plastics over Multilamellar MFI Nanosheets Zeolite Boosts Monocyclic Aromatics and Suppresses Coke." *Fuel* 430:141186. doi: 10.1016/j.fuel.2026.141186.
- Unsomsri, Nathawat, Pachara Koedthong, Sittinun Tawkaew, and Songkran Wiriyasart. 2026. "Continuous Gasification-Pyrolysis of Fresh Palm Fruit Bunches for Biochar Production and Carbon Sequestration." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 13:101309. doi: 10.1016/j.cscee.2025.101309.
- Vestergaard, Jonas, Mathias Boe, Hamid Hashemi, Peter Arendt, and Peter Glarborg. 2027. "Wide-Ranging Distributed Activation Energy Models for Pyrolysis of Woody and Agricultural Biomass." *Fuel* 430:141306. doi: 10.1016/j.fuel.2026.141306.
- Yanti, R. N., E. Hambali, G. Pari, and A. Suryani. 2022. "The Characteristics of Bio-Oil Hydrothermal Pyrolysis Empty Fruit Bunches Based on Powder Size and Hydrogen Gas Pressure." P. 012002 in *International CO nference on Environmental, Energy, and Earth Science*. Pekanbaru: IOP Publishing.
- Yousef, Samy, V. Kudelyte, N. Striugas, and M. A. Abdelnaby. 2027. "Biomass Pyrolysis over ZIF-67 Catalyst : Thermogravimetric , Pyrolysis Vapors , Kinetics , Thermodynamics and Artificial Neural Network Modelling." *Biomass and Bioenergy* 217:109868. doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109868.