

Mekanisme dan Aplikasi Pirolisis Biomassa Dalam Produksi Biochar, Bio-Oil dan Gas Pirolisis

Firda Rizki Rhomadoni¹, Siti Jamilatun^{1*}, M. Idris¹, Martomo Setyawan¹

¹*Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia.*

**Corresponding Author: sitijamilatun@che.uad.ac.id*

ABSTRAK

Peningkatan populasi dan aktivitas industri telah menyebabkan akumulasi limbah yang signifikan, menciptakan tantangan lingkungan yang mendesak. Pirolisis, sebagai proses termokimia yang menguraikan bahan organik pada suhu tinggi (300 °C hingga 800 °C) tanpa oksigen, menawarkan solusi berkelanjutan dengan mengolah limbah menjadi produk bernilai tinggi seperti biochar, bio-oil, dan gas pirolisis. Proses ini melibatkan beberapa tahap, termasuk persiapan bahan baku, pemanasan bertahap untuk menghindari dekomposisi yang tidak terkontrol, dan pemisahan produk akhir. Variasi jenis biomassa, seperti kayu, limbah pertanian, atau plastik, serta kondisi operasi seperti suhu, laju pemanasan, dan waktu tinggal, secara signifikan mempengaruhi komposisi dan kuantitas produk. Misalnya, suhu yang lebih tinggi cenderung meningkatkan produksi gas pirolisis, sementara suhu yang lebih rendah mendukung pembentukan biochar. Biochar memiliki manfaat sebagai penyerap karbon dan perbaikan tanah, sedangkan bio-oil dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif dan sumber senyawa kimia yang bernilai. Gas pirolisis, yang kaya akan hidrogen dan karbon monoksida, memiliki potensi untuk menghasilkan energi melalui pembakaran atau konversi lebih lanjut. Meskipun pirolisis menunjukkan potensi besar dalam pengelolaan limbah, tantangan seperti pembentukan kokas, optimasi pemisahan produk, dan pengurangan emisi sampingan memerlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian yang berfokus pada peningkatan efisiensi, pemanfaatan hasil produk secara optimal, dan penerapan teknologi pirolisis pada skala industri dapat memberikan solusi praktis untuk mendukung keberlanjutan lingkungan serta mengatasi tantangan limbah global yang semakin meningkat.

Kata kunci: Biochar; Bio-oil; Gas pirolisis; Limbah; Pirolisis.

ABSTRACT

Population growth and industrial activities have led to significant waste accumulation, creating urgent environmental challenges. Pyrolysis, as a thermochemical process that decomposes organic matter at high temperatures (300 °C to 800 °C) in the absence of oxygen, offers a sustainable solution by converting waste into high-value products such as biochar, bio-oil, and pyrolysis gas. The process involves several stages, including raw material preparation, gradual heating to avoid uncontrolled decomposition, and separation of the final products. Variations in the type of biomass, such as wood, agricultural waste, or plastic, as well as operating conditions such as temperature, heating rate, and residence time, significantly affect the composition and quantity of the products. For example, higher temperatures tend to increase the production of pyrolysis gas, while lower temperatures favor the formation of biochar. Biochar has benefits as a carbon sink and soil amendment, while bio-oil can be used as an alternative fuel and a source of valuable chemical compounds. Pyrolysis gas, which is rich in hydrogen and carbon monoxide, has the potential to generate energy through combustion or further conversion. Although pyrolysis shows great potential in waste management, challenges such as coke formation, product separation optimization, and reduction of by-product emissions require further research. Research focused on improving efficiency, optimizing product utilization, and implementing

pyrolysis technology on an industrial scale can provide practical solutions to support environmental sustainability and address the growing global waste challenge.

Keyword: Biochar; Bio-oil; Pyrolysis gas; Waste; Pyrolysis.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan populasi global, urbanisasi, dan aktivitas industri telah menyebabkan produksi limbah yang semakin tinggi setiap tahunnya (Piechota & Igliński, 2021). Volume sampah yang terus bertambah ini tidak hanya menciptakan masalah lingkungan, seperti polusi dan degradasi tanah, tetapi juga memperparah perubahan iklim akibat peningkatan emisi gas rumah kaca dari pembusukan limbah organik di tempat pembuangan akhir (Aini et al., 2022; Idris et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan limbah yang tidak hanya mengurangi volume sampah tetapi juga berpotensi menghasilkan energi atau produk bernilai tinggi sebagai solusi yang lebih berkelanjutan. Salah satu teknologi yang menarik perhatian dalam hal ini adalah pirolisis (Rangel et al., 2023).

Pirolisis adalah proses termokimia di mana material organik, seperti sampah biomassa atau sampah plastik, diuraikan pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Dalam proses ini, limbah padat terkonversi menjadi produk-produk yang terdiri dari biochar (padat), bio-oil (cair), dan bio-gas (gas) (Mierzwa-Hersztek et al., 2019). Pirolisis menjadi pilihan yang menarik karena kemampuannya untuk memanfaatkan berbagai jenis sampah sebagai bahan baku, serta fleksibilitas dalam mengoptimalkan produk sesuai kebutuhan. Proses ini memungkinkan transformasi limbah menjadi bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat pembuangan sampah (Gonnella et al., 2022).

Setiap produk dari pirolisis memiliki aplikasi yang beragam dan bernilai tinggi. Biochar, sebagai residu padat dari proses pirolisis, memiliki potensi sebagai pembenah tanah yang dapat menyerap polutan dan memperbaiki struktur tanah. Sementara itu, bio-oil dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif atau sebagai bahan baku industri kimia untuk menghasilkan senyawa bernilai tinggi (R. Liu et al., 2022). Produk gas, seperti syngas, dapat dimanfaatkan langsung untuk pembangkit listrik atau sebagai bahan baku untuk menghasilkan gas sintetis dan hidrogen. Dengan mengembangkan aplikasi produk-produk hasil pirolisis secara optimal, proses ini berpotensi memberikan solusi yang lebih terintegrasi dalam mengelola limbah, mengurangi polusi, dan menyediakan sumber energi yang lebih ramah lingkungan (Baudry et al., 2018).

Tujuan dari artikel ini adalah untuk menyajikan penelitian terkini mengenai proses pirolisis biomassa limbah dalam produksi energi. Artikel ini menjelaskan mekanisme proses pirolisis serta komposisi dan karakteristik dari fraksi yang dihasilkan, yaitu gas pirolisis, bio-oil, dan biochar. Dengan demikian, pemahaman lebih mendalam mengenai proses pirolisis sampah dan aplikasi produk yang dihasilkan akan memperluas potensi teknologi ini sebagai pendekatan yang layak dan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah serta pemanfaatan sumber daya alternatif.

2. METODOLOGI

Review ini dilakukan dengan melakukan pencarian literatur yang relevan melalui database ilmiah seperti Scopus, PubMed, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan meliputi "pirolisis", "biochar", "bio-oil" dan "gas pirolisis". Artikel yang dipilih adalah artikel yang relevan dengan topik, diterbitkan dalam jurnal ilmiah bereputasi. Data yang diperoleh dari artikel-artikel tersebut kemudian disintesis dan dianalisis untuk mengidentifikasi proses pirolisis biomassa limbah dalam produksi energi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Proses Pirolisis

Pirolisis merupakan proses termokimia yang melibatkan dekomposisi bahan organik pada suhu tinggi (300 °C hingga 800 °C) tanpa kehadiran oksigen (Rangel et al., 2023). Proses pirolisis biomassa terdiri dari langkah-langkah berikut: penerimaan dan penyimpanan bahan baku biomassa (misalnya, pencacahan, pengeringan), pirolisis aktual dalam bioreaktor yang sesuai, pemisahan residu padat (abu dan karbonisasi), pendinginan dan kondensasi uap, dan pengumpulan Bio oil. Sebelum kondensasi, uap pirolitik dapat direformasi secara katalitik untuk mencapai selektivitas untuk produk yang diinginkan. Bagian dari produk gas dapat dibakar untuk mendapatkan panas untuk perlakuan awal bahan baku (misalnya, pengeringan) (Gonnella et al., 2022).

Hampir tidak mungkin untuk mendefinisikan dengan jelas mekanisme pirolisis untuk semua jenis sampah (M. Hu et al., 2022). Sampah adalah sekelompok bahan dengan keragaman yang luas dalam hal jenis. Oleh karena itu, mekanisme pirolisis berbagai limbah telah menjadi subjek dari banyak penelitian dan karya ilmiah (Y. Liu et al., 2018). Cara termudah untuk memahami mekanisme pirolisis dapat disajikan dalam contoh limbah kayu. Mekanisme pirolisis limbah kayu pada tingkat pemanasan rendah, yaitu pada kondisi yang umum digunakan dalam sistem produksi biochar, meliputi tahapan-tahapan berikut:

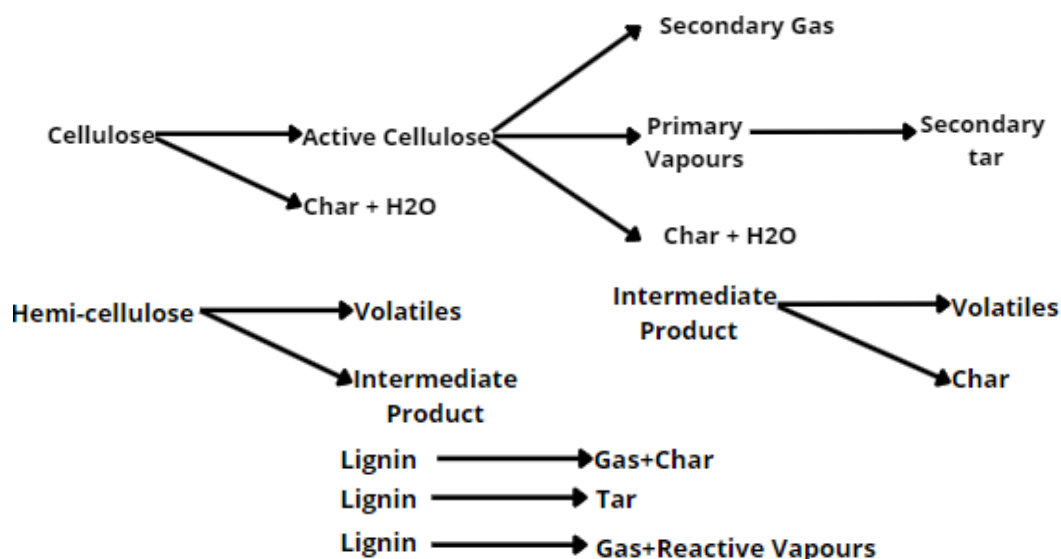
1. Ketika suhu kayu naik dari 105°C ke 120°C, air yang tidak terikat secara kimiawi pada bahan organik kayu (air yang terserap) akan dilepaskan, dengan peningkatan suhu lebih lanjut dari 245°C ke 265°C.
2. Air yang terikat secara kimiawi dalam struktur selulosa dan pelepasan CO₂, CO, dan sejumlah kecil asam asetat yang mengembun serta uap metanol juga mulai mengeluarkan sejumlah kecil tar kayu.
3. Di atas 265°C hingga 275°C, prosesnya menjadi eksotermis, dengan pelepasan kuat metanol, asam asetat, aseton, hidrokarbon yang lebih ringan, ter kayu, dan sejumlah kecil hidrogen, dan jumlah CO₂ dan CO yang dilepaskan menurun.
4. Pada suhu di atas 400°C, bahan organik yang tersisa di aromatisasi, menghasilkan pembentukan lapisan grafit semu, dan transformasi kayu menjadi biochar (arang) secara praktis selesai (Kan et al., 2020).

Proses pirolisis terutama mencakup bahan limbah dari pengolahan makanan, pertanian, dan kehutanan. Oleh karena itu, sumber bahan baku terdiri dari biomassa kayu (ranting, serpihan, serutan, kulit kayu, dan batang tanaman berkayu), biomassa agrikultur (lucerne, giant miscanthus, millet, jerami sereal, residu buah, cangkang biji kelapa sawit, ampas tebu, sisa makanan), biomassa air (ganggang, biomassa hewani (misalnya: limbah pengolahan unggas)), lumpur limbah, dan limbah dari industri kertas (Jamilatun et al., 2022; Stančín et al., 2021).

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh (Rizal et al., 2020) menunjukkan bahwa pirolisis limbah serbuk gergaji kayu dapat menghasilkan produk berupa bio-oil dan biochar. Dalam eksperimen ini, 3,6 kg serbuk gergaji kayu dipanaskan pada suhu 500 °C selama 8 jam, menghasilkan 1,14 kg bio-oil dan 1,54 kg biochar. Komposisi kimia dari serbuk gergaji kayu menunjukkan bahwa hemiselulosa, selulosa, dan lignin memiliki proporsi masing-masing 17,54%, 39,97%, dan 25,59%

Pada proses pirolisis kayu, memungkinkan tiga komponen utama penyusun kayu: lignin, hemiselulosa, dan selulosa akan mengalami dekomposisi yang disebabkan oleh panas seperti yang disajikan dalam gambar 1 (Zou et al., 2022). Dekomposisi mereka terjadi pada tingkat suhu yang berbeda: hemiselulosa, 200-260°C; selulosa, 240-350°C; lignin, 280-500°C. Jalannya penguraian juga bergantung pada atmosfer reaksi, tekanan, dan komposisi bahan masukan. Biasanya, peningkatan

tekanan dan laju pemanasan yang rendah menghasilkan peningkatan efisiensi arang (dalam hal ini, biochar) (Phuakpunk et al., 2022).



Gambar 1. Mekanisme dekomposisi (A) selulosa, (B) hemiselulosa, dan (C) lignin (Gouws et al., 2022; Phuakpunk et al., 2022)

Pirolisis biomassa lignoselulosa sudah sering dilakukan. Diketahui bahwa komponen lignoselulosa terurai untuk menghasilkan zat lain, yaitu selulosa dan hemiselulosa, membentuk produk yang mudah menguap, sedangkan lignin membentuk residu padat. Mikroalga telah menjadi terkenal karena mereka memiliki banyak keuntungan dibandingkan bahan baku lignoselulosa: mikroalga memiliki efisiensi produksi yang lebih tinggi, tidak bersaing dengan produk pertanian tradisional karena dapat ditanam di tanah terlantar atau tanah pembuangan limbah, dan sangat kaya akan minyak, yang terkadang mencakup lebih dari 60% bahan kering pada beberapa spesies alga (Jamilatun et al., 2019).

Lignin adalah polimer kompleks yang mengandung gugus fungsi oksigen, seperti karboksil, metoksi, hidroksil, dan karbonil, dan kandungan metoksi yang tinggi dapat menghambat pembentukan biochar pada suhu pirolisis tinggi. Pada suhu 400–800°C, lignin terurai menjadi fenol dan produk lain seperti metana dan methanol (Gouws et al., 2022). Model kinetik Coats-Redfern menunjukkan bahwa laju reaksi orde pertama paling sesuai untuk pirolisis lignin. Pirolisis limbah tanaman adalah opsi yang menjanjikan untuk memperoleh bahan kimia (Elkhalifa et al., 2022). Pirolisis selulosa menghasilkan levoglukosa yang kemudian terkonversi menjadi furan, sedangkan hemiselulosa terurai menjadi senyawa seperti formaldehida dan asam asetat. Lignin menghasilkan guaiakol melalui reaksi dekarbonisasi dan demetilasi. Logam alami dalam biomassa, seperti Ca_2^+ dan Mg_2^+ , memiliki aktivitas katalitik yang mempengaruhi produk pirolisis. Pembentukan senyawa volatil mencapai puncaknya pada suhu 410–433°C, sementara dehidrasi dan pembentukan gugus aromatik mulai terjadi pada suhu 250°C. Pada suhu 500°C, sebagian besar gugus oksigen hilang.

Tabel 1 menyajikan data karakterisasi masing-masing jenis pirolisis. Komposisi produk pirolisis bervariasi tergantung pada komposisi kimiawi biomassa dan kondisi dimana proses pirolisis berlangsung. Selain itu, pirolisis cepat atau flash digunakan untuk memaksimalkan proses produksi gas atau Bio-oil. Ketika pirolisis cepat digunakan, waktu tinggal pada suhu akhir berkisar antara 0,5–5 detik, dan ukuran partikel kurang dari 1 mm. Sebaliknya, untuk pirolisis kilat, waktu tinggal pada suhu akhir kurang dari 0,5 detik, dan biochar berbentuk debu. Tabel 1 juga menunjukkan pirolisis yang dilakukan

dalam ruang hampa udara (pirolisis vakum), uap (hidro-pirolisis), dan atmosfer metana (pirolisis metana).

Tabel 1. Karakteristik masing-masing jenis pirolisis

Type Pirolisis	Durasi pemanasan	Kecepatan	Temperatur (°C)	Produk	Referensi
Pirolisis lambat	3-4 hari	Sangat lambat.	400	Arang	(Zihan et al., 2022)
Lambat	Jam/hari	Lambat.	400	Arang, gas	(Zihan et al., 2022)
Pirolisis Vakum	2-30s	Sedang.	400	Minyak	(Zihan et al., 2022)
Pirolisis metana	<10 s	Sedang.	700	Bahan kimia	(Zihan et al., 2022)
Hidro pirolisis	<10 s	Sedang.	500	Minyak	(Zihan et al., 2022)
Konvensional	5-30 menit	Lambat.	600	Minyak arang, gas	(Homagain et al., 2014)
Menengah	10 menit	Menengah.	300-450	Arang	(Ahmad et al., 2014)
Cepat	0,5-5 s	Sangat cepat.	300-1000	Minyak, gas	(Uddin et al., 2018)
Cairan flash	<1 s	Cepat.	650	Arang, minyak dan gas	(Zihan et al., 2022)
Flash gas	<1 s	Cepat.	650	Bahan kimia, gas	(Zihan et al., 2022)
Ultra-flash	<0,5 s	Sangat cepat.	1000	Bahan kimia, gas	(Zihan et al., 2022)

3.2 Produksi Biochar ,Bio-oil dan Gas Dari Proses Pirolisis Biomassa

Pirolisis memiliki potensi besar untuk mendukung keberlanjutan di berbagai sektor. Salah satu produknya, biochar, dapat menyimpan karbon hingga 1 gigaton CO₂ per tahun secara global dan meningkatkan hasil panen hingga 25–40% di tanah marjinal dengan memperbaiki retensi air dan nutrisi. Bio-oil, dengan nilai kalor sekitar 16–19 MJ/kg, berfungsi sebagai alternatif bahan bakar fosil dan mampu menggantikan hingga 30% konsumsi bahan bakar di pembangkit listrik tertentu. Potensi produksi bio-oil secara global dari limbah biomassa diperkirakan mencapai 60 juta ton per tahun. Gas pirolisis, yang kaya hidrogen dan karbon monoksida, memiliki nilai kalor 4–15 MJ/m³ dan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik atau industri dengan efisiensi hingga 85%

dalam sistem terintegrasi. Limbah plastik, salah satu masalah lingkungan utama, juga dapat diolah melalui pirolisis dengan tingkat konversi 70–90% menjadi bio-oil, menghasilkan bahan bakar setara diesel dengan nilai kalor sekitar 40 MJ/kg. Dengan jumlah limbah plastik global mencapai 400 juta ton per tahun, potensi bio-oil yang dapat dihasilkan mencapai 200 juta ton. Di negara seperti China dan India, pirolisis limbah ban telah menghasilkan hingga 100.000 ton bio-oil dan karbon hitam per tahun, sementara di Eropa, pirolisis biomassa diperkirakan dapat menyumbang hingga 10% energi terbarukan pada 2030. Data ini menunjukkan bahwa dengan optimalisasi teknologi, pirolisis dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengelola limbah, menghasilkan energi, dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

Proses pirolisis biomassa sangat dipengaruhi oleh laju pemanasan, suhu proses, dan komposisi bahan bakar. Suhu rendah dan laju pemanasan rendah ($<50^{\circ}\text{C}/\text{menit}$) meningkatkan produksi Biochar, dengan laju optimal $5^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ untuk hasil arang tertinggi. Pirolisis lambat, yang digunakan selama ribuan tahun, memanaskan biomassa hingga sekitar 500°C dengan waktu tinggal uap 5-30 menit, menghasilkan arang dan cairan akibat reaksi sekunder. Sementara itu, pirolisis cepat dengan suhu $450\text{--}900^{\circ}\text{C}$ dan waktu tinggal kurang dari 2 detik menghasilkan produk cair yang lebih tinggi (hingga 75%), cocok untuk produksi bahan bakar nabati. Jenis gas pembawa, seperti CO_2 , N_2 , dan Ar, mempengaruhi hasil pirolisis (Igliński et al., 2023). CO_2 menghasilkan residu padat yang lebih sedikit dan konsentrasi asam asetat tertinggi, sedangkan gas argon menghasilkan lebih banyak senyawa asam pada suhu tinggi. Ukuran partikel biomassa juga mempengaruhi hasil, dengan partikel kecil menghasilkan lebih banyak H_2 dan CO. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa proses pirolisis yang dikombinasikan dengan gasifikasi meningkatkan kandungan H_2 dan efisiensi energi. Pirolisis juga menghasilkan Bio-oil, yang berpotensi diolah lebih lanjut menjadi bahan bakar nabati generasi kedua. Tantangan utamanya adalah pembentukan kokas pada suhu tinggi, terutama karena kandungan lignin pirolitik (PL) dalam bio-oil. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan pemisahan dan konversi lignin menjadi produk bernilai tinggi seperti fenol, bahan bakar, dan resin (Mariyam et al., 2022).

3.3 Biochar

Biochar memiliki aplikasi praktis di bidang pertanian di seluruh dunia dan telah digunakan selama berabad-abad. Dalam beberapa tahun terakhir, minat terhadap biochar telah meningkat, karena dapat digunakan dalam banyak aplikasi industri dan lingkungan (Al-Rumaihi et al., 2022). Biochar dicirikan oleh sifat fisikokimia yang menguntungkan seperti porositas yang berkembang secara signifikan, porositas yang tinggi, dan kandungan karbon organik yang stabil dan zat mineral yang tinggi. Biochar dapat digunakan dengan sukses:

- 1) Dalam proses pengomposan sebagai bahan struktural atau aditif pengurang ammonia.
- 2) Dalam bioenergi sebagai bahan bakar terbarukan.
- 3) Untuk penyerapan karbon di dalam tanah.
- 4) Untuk produksi pupuk organik.
- 5) Untuk menghilangkan polutan dari larutan air, air limbah industri, kota, dan gas proses.
- 6) Untuk remediasi tanah yang terkontaminasi senyawa organik dan anorganik.
- 7) Untuk mengurangi pencemaran air tanah dan air permukaan dengan mempertahankan unsur hara di dalam tanah.
- 8) Untuk memperbaiki sifat-sifat tanah pertanian

(Li et al., 2020)

Duan et al (2021) mengoptimasi suhu pirolisis kulit kacang tanah. Biochar yang diperoleh dimodifikasi dengan HCl untuk mendapatkan struktur pori dan sifat permukaan biochar yang lebih baik. Penelitian ini menunjukkan bahwa kulit kacang tanah dapat digunakan secara luas sebagai bahan baku dan katalis untuk produksi bahan kimia, tentunya dengan nilai tambah yang tinggi. Tabel 2 merangkum

karakteristik biochar (karbon aktif) dari biomassa mentah dengan berbagai metode preparasi (Li et al., 2020).

Salah satu studi tentang pirolisis biomassa yang dilakukan oleh (Mierzwa-Hersztek et al., 2019) pada jerami miskantus dan serbuk gergaji, yang menghasilkan biochar dengan nilai kalor masing-masing 26,6 MJ/kg dan 23,4 MJ/kg. Biochar ini dapat mengurangi emisi amonia dalam pengomposan dan memperbaiki struktur tanah dengan meningkatkan porositas, kapasitas air, dan mempercepat proses biodegradasi (Karhu et al., 2011). Selain itu, biochar dari lumpur limbah memiliki potensi sebagai bahan bakar berkualitas untuk industri semen dan energi, dengan nilai kalor sekitar 17 MJ/kg, lebih baik daripada lumpur kering (Duan et al., 2021).

Penggunaan biochar dari berbagai substrat, seperti jerami, pupuk kandang, dan bambu, juga efektif untuk menghilangkan residu farmasi (misalnya sulfametoksazol), logam berat seperti timbal dan kromium, serta pestisida seperti atrazin dari limbah (P. Zhang et al., 2013). Kontaminasi tanah oleh zat organik dan anorganik yang semakin meluas memerlukan solusi remediasi in situ yang murah dan efektif. Biochar dapat menyerap polutan dua kali lebih cepat dibandingkan bahan organik alami, sekaligus meremajakan ekosistem tanah dan merangsang pertumbuhan tanaman (Luo et al., 2021).

Tabel 2. karakteristik biochar (karbon aktif) dari biomassa mentah dengan berbagai metode preparasi

Biomassa	Agent	Suhu(°C)	Waktu (menit)	Permukaan ($\frac{M^2}{g}$)	Micropore Volume (Cm^3/g)	Referensi
Bungkil minyak kedelai	K_2CO_3	600	60	643	0.272	(Pan et al., 2013)
Bungkil minyak kedelai	KOH	600	60	600	0.213	(Pan et al., 2013)
Bungkil minyak kedelai	KOH	800	60	619	0.143	(Pan et al., 2013)
Jerami jelai	Uap	700	60	552	0.2304	(Köseoğlu & Akmil-Başar, 2015)
Jerami jelai	Uap	800	60	534	0.2186	(Tay et al., 2009)
Jerami jelai	CO_2	700	60	211	0.0830	(Saygili & Güzel, 2016)
Kulit jeruk	K_2CO_3	700	60	477	0.21	(Duan et al., 2021)
Kulit jeruk	K_2CO_3	950	60	1352	0.22	(Duan et al., 2021)
Kulit jeruk	$ZnCl_2$	700	60	822	0.09	(Duan et al., 2021)

Kulit kastanye	H ₃ PO ₄	750	20	1138	0.424	(Wnetrzak et al., 2014)
Kulit kastanye	H ₃ PO ₄	850	20	1413	0.562	(Wnetrzak et al., 2014)
Tomat	ZnCl ₂	400	60	648	0.086	(Agrafioti et al., 2014)
Tomat	ZnCl ₂	600	60	1093	0.129	(Agrafioti et al., 2014)
Tomat	ZnCl ₂	800	60	492	0.058	(Agrafioti et al., 2014)

Penggunaan biochar juga membantu penyimpanan karbon dalam tanah dalam jangka panjang. Penambahan 13,5 Mg/ha biochar ke tanah dapat menyimpan karbon selama dua abad, dengan stabilitas kimiawi yang bertahan ribuan tahun. Jika 10% biomassa dunia diubah menjadi biochar, dapat menyerap hingga 4,8 GtC/tahun, atau sekitar 20% dari pertumbuhan karbon atmosfer tahunan (Sait et al., 2022).

3.4 Bio-oil/Liquid smoke

Bio-oil juga disebut sebagai minyak nabati, cairan pirolisis atau tar, *Liquid smoke*, atau minyak kayu (Terry et al., 2021). Bio oil sendiri, sebagai produk kondensasi dari zat-zat yang mudah menguap, adalah cairan organik berwarna coklat tua, yang dalam komposisinya mengandung sejumlah besar air (biasanya 15-35% berat) dan berbagai senyawa organik seperti alkohol, asam, keton, aldehida, eter, fenol, ester, gula, furan, alkena, senyawa nitrogen, dan juga partikel-partikel kecil yang bersifat padat (Idris et al., 2024). Oleh karena itu, sebelum diaplikasikan pada mesin, perlu dilakukan pemurnian minyak pirolisis/Bio-oil. Saat ini, produksi bahan bakar transportasi cair dari Bio-oil dimungkinkan berkat teknologi perengkahan katalitik dan pemrosesan hidro bertekanan yang telah dikembangkan. Aplikasi potensial dari minyak pirolisis adalah penggunaannya untuk produksi senyawa kimia yang berharga, termasuk perasa makanan atau fenol untuk produksi resin, pupuk, dan bahan tambahan farmasi.

Tabel 3. Daftar senyawa kimia yang terdapat dalam bio-oil hasil pirolisis (Zihan et al., 2022)

Komponen	Kandungan bio oil (%)
Aldehida hidroksia asetat	0.9-13.0
Aldehida format	0.1-3.3.
Aseton	2.8
Asam asetat	0.5-12.0
Asam format	0.3-9.1
Asetaldehida	0.1-8.5
Alkohol 2,6-dimetiloksifenol	0.7-4.8
Etanedial	0.9-4.6
Eugenol	0.1-2.3
Etilen glikol	0.7-2.0

Fenol	0.1-3.8
Furfuryl	0.1-5.2
Fruktosa	0.7-2.9
Glukosa	0.4-1.3
Hidroksiaseton	0.7-7.4
Isoeugenol	0.1-7.2
1,4-dihidroksibenzena	0.1-1.9
Selobiosa	0.6-3.2
1,6-anhidroglukofuran	3.1
Levoglucosan	0.4-1.4

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menggunakan katalis dalam proses pirolisis guna meningkatkan kualitas produk cair yang dihasilkan, terutama dengan cara menghilangkan oksigen (O₂). Hal ini bertujuan agar produk cair tersebut dapat menjadi alternative pengganti bahan bakar fosil. Beberapa oksida logam yang digunakan sebagai katalis dalam penelitian ini antara lain Al₂O₃, SiO₂, ZnO, K₂O, MgO, CaO, dan La₂O₃.

Tabel 4 merangkum sifat-sifat *Bio-oil* yang diperoleh dengan metode peningkatan yang berbeda. Hasil tertinggi (86,87%) biofuel ditemukan untuk pirolisis cangkang kelapa sawit pada suhu 700 °C, dengan durasi proses 20 menit, dan dengan adanya katalis Amberlyst15.

Tabel 4. Sifat-sifat *bio-oil* yang diperoleh melalui berbagai metode peningkatan.

Bahan Baku	Kondisi Reaksi	Katalis	Hasil Minyak (%)	Referensi
Ampas tebu	300W	NiO, CuO, CaO, MgO	13.95–18.95	(Kuan et al., 2013)
Ampas tebu	493-532 °C	Karbon aktif	18.4–35	(Mushtaq et al., 2015)
Batang jagung	300°C, 4 h, 12,5 Mpa H ₂	Ru/C	54,4	(Zheng et al., 2006)
Biji Martynia annua	650°C, 3 h	-	30,77% dari BTE	(Kumar et al., 2021)
Cangkang kelapa sawit	300 °C, 20 min	Amberlyst15	86.87	(Cheng et al., 2014)
Cangkang kelapa sawit	180-720 W	(18,8–91,2%), CaO, MgO, CuO	16.43–36.75	(H. Liu et al., 2014)
Jerami gandum	340°C, 1,6 h, 8 Mpa H ₂	NiW/AC	18.2	(Boscagli et al., 2017)
Jerami gandum	340°C, 1,6 h, 8 Mpa H ₂	Ni/T ₁ O ₂	76,8	(Capunitan & Capareda, 2014)
Kulit kacang tanah	3-30 °C/min, 30-800°C	Termite hill	max. 57	(Nisar et al., 2022)
Kayu poplar	350 °C, 90 min	Pd/C	23.6	(Kim et al., 2014)
Kayu beech	450°C, 4 h, 35 Mpa H ₂	Ru/C	60	(Wildschut et al., 2009)

Kayu pinus	350°C, 4 h, 14 Mpa H_2	$NiMo/S_1O_2 - Al_2O_3A = \pi r^2$	42.4	(Yin et al., 2017)
Kotoran babi	400 °C, 30 min, 0.69 MPa H_2	Zeolit yang sudah dimodifikasi	45	(Tian et al., 2011)
Lumpur limbah	330-1200 °C	Grafit Karbon aktif (35%, 55%, 75%),	7.16–49.79	(Faisal et al., 2014)
Limbah makanan	300-600 W	Fe_2HAl_3 , $MnO_2, CuCl_2$	10–36	(Wang et al., 2018)
Limbah pertanian	400-600 °C	S_1C	14.56–31.86	(Al-Rumaihi et al., 2022)
Limbah daun jagung	300-450°C, constant flow rate of nitrogen	-	57–73% solar pecahan	(Amer et al., 2021)
Sekam padi	465 °C, 30 min	$SO_4^{2-} / -Zr_2O_2$	56	(Weerachanchai et al., 2012)

Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, biochar dan bio-oil memiliki potensi besar. Biochar dapat menyimpan karbon dalam tanah selama lebih dari 100 tahun dan berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biochar dapat mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 1.1 gigaton CO₂ per tahun jika diterapkan secara luas di sektor pertanian. Di sisi lain, bio-oil dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang menggantikan bahan bakar fosil. Dengan konversi bio-oil menjadi biodiesel atau bahan bakar cair lainnya melalui teknologi perengkahan katalitik dan pemrosesan hidro bertekanan, potensi pengurangan emisi karbon dapat mencapai 80% dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional. Sebagai contoh aplikasi sukses dari bio-oil dalam industri energi, penelitian dari (Febriyanti et al., 2019) ditunjukkan bahwa cangkang kelapa sawit dapat diolah menjadi bio-oil dengan yield mencapai 62,55% pada suhu 400 °C. Bio-oil ini diuji sebagai bahan bakar alternatif dalam mesin pembakaran dan menunjukkan performa yang menjanjikan. Selain itu, proyek yang dilakukan oleh Ensyn Group menunjukkan bahwa bio-oil dari kayu dapat digunakan dalam pembangkit listrik dengan efisiensi tinggi serta sebagai bahan baku untuk produksi bahan kimia berharga seperti fenol untuk resin dan pupuk.

Dengan demikian, pengembangan teknologi pemurnian dan aplikasi bio-oil tidak hanya mendukung keberlanjutan energi tetapi juga berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim secara signifikan.

3.5 Gas Pirolisis

Gas yang diperoleh dalam proses pirolisis terutama mengandung CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, dan C₂H₆ serta sejumlah kecil gas seperti NH₃, C₃H₈, sulfur oksida, nitrogen oksida, dan alkohol dengan angka karbon rendah. Nilai energi khas gas pirolitik adalah 10 hingga 20 MJ/m³. Sebelum penggunaan praktis gas pirolisis, diperlukan penghilangan komponen yang tidak diinginkan seperti tar, debu, aerosol, uap air, NH₃, HCN, dan H₂S (X. Hu & Gholizadeh, 2019).

Gas pirolisis memiliki banyak aplikasi potensial, seperti aplikasi langsung untuk produksi panas atau listrik (misalnya, pembakaran gas pada pengapian busi dan mesin diesel). Selain itu, gas yang diperoleh sering digunakan untuk reaktor pirolisis pengumpanan otomatis yang beroperasi dalam sistem kontinu untuk pemanasan awal gas inert di dalam ruangan, atau dapat berperan sebagai gas pembawa dalam reaktor unggun terfluidisasi pirolisis (Igliński et al., 2023).

Salah satu studi kasus yang menunjukkan aplikasi sukses dari gas pirolisis adalah penelitian yang dilakukan oleh (Naimah & Aidha, 2017) mengenai pemanfaatan gas hasil proses pirolisis limbah plastik polyethylene (PE) sebagai bahan bakar. Dalam penelitian tersebut, gas hasil pirolisis diuji dengan dua metode: kondensor dan tangki air. Hasilnya menunjukkan bahwa metode tangki air menghasilkan kualitas gas terbaik dengan nilai kalor mencapai 1548,42 BTU/ft³. Gas tersebut digunakan sebagai bahan bakar kompor dan terbukti dapat menyalakan lampu 25 Watt serta berpotensi untuk digunakan dalam mesin genset. Penelitian ini mendukung program pemerintah dalam menangani pencemaran lingkungan dan menyediakan energi baru.

Selain itu, metana, dan yang terpenting, biometana, merupakan pembawa energi yang penting dan masa depan. (Duan et al., 2021) mengusulkan pendekatan baru untuk sintesis langsung gas kaya metana dari pirolisis buluh yang dilakukan di bawah tekanan atmosfer. Katalis Ni yang tertanam dalam biokarbon tebu digunakan. Ditemukan bahwa katalis nikel yang didukung oleh biochar berkinerja lebih baik daripada katalis tebu yang didukung oleh biochar dari air laut. Terlihat bahwa hal ini dipengaruhi oleh dispersi Ni yang homogen, permukaan spesifik yang besar, dan interaksi Ni-biochar yang sesuai.

4. KESIMPULAN

Proses pirolisis merupakan metode termokimia yang efektif untuk mengubah bahan organik menjadi produk bernilai tinggi seperti biochar, bio-oil, dan gas pirolisis melalui dekomposisi pada suhu tinggi (300 °C hingga 800 °C) tanpa kehadiran oksigen. Proses ini melibatkan beberapa tahap, mulai dari penerimaan bahan baku hingga pemisahan dan pengumpulan produk akhir. Komposisi produk pirolisis sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, suhu, dan laju pemanasan yang digunakan. Biochar dikenal sebagai bahan penyerap karbon dan memiliki aplikasi dalam pertanian untuk meningkatkan kesuburan tanah, sementara bio-oil berpotensi digunakan sebagai bahan bakar nabati dan sumber senyawa kimia berharga. Gas pirolisis, yang kaya akan hidrogen dan karbon monoksida, dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi. Pirolisis memainkan peran penting dalam mencapai tujuan keberlanjutan dengan mengurangi limbah organik dan menghasilkan energi terbarukan. Menurut beberapa penelitian, biochar dapat menyimpan karbon dalam tanah selama lebih dari 100 tahun, membantu mitigasi perubahan iklim. Bio-oil dapat menggantikan hingga 20% dari penggunaan bahan bakar fosil dalam beberapa aplikasi industri, sedangkan gas pirolisis dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan efisiensi tinggi. Data kuantitatif menunjukkan bahwa biochar dapat menyimpan hingga 50% dari berat awal biomassa sebagai karbon, yield bio-oil dapat mencapai 45% pada suhu 600 °C dari limbah tandan kosong kelapa sawit, dan yield gas dapat mencapai 29,86% pada suhu 500 °C.

Untuk meningkatkan efektivitas proses pirolisis dan kontribusinya terhadap keberlanjutan, saran untuk penelitian kedepan mencakup optimalisasi suhu dan waktu proses untuk memaksimalkan yield produk, pengembangan katalisator untuk meningkatkan efisiensi konversi biomassa menjadi bio-oil, serta analisis dampak lingkungan dari penggunaan produk pirolisis dalam berbagai aplikasi. Dengan langkah-langkah ini, potensi pirolisis sebagai solusi pengelolaan limbah dan sumber energi terbarukan dapat dimaksimalkan, berkontribusi pada keberlanjutan global dan mitigasi perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrafiotti, E., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E. (2014). Arsenic and chromium removal from water using biochars derived from rice husk, organic solid wastes and sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 133, 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.007>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

- Aini, N. A., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. (2022). Pirolisis Biomassa: Review. *Agroindustrial Technology Journal*, 6(1), 89. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i1.7559>
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(May), 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
- Amer, M. W., Aljariri Alhesan, J. S., Ibrahim, S., Qussay, G., Marshall, M., & Al-Ayed, O. S. (2021). Potential use of corn leaf waste for biofuel production in Jordan (physio-chemical study). *Energy*, 214, 118863. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118863>
- Baudry, G., Macharis, C., & Vallée, T. (2018). Can microalgae biodiesel contribute to achieve the sustainability objectives in the transport sector in France by 2030? A comparison between first, second and third generation biofuels though a range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. *Energy*, 155(July), 1032–1046. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.038>
- Boscagli, C., Raffelt, K., & Grunwaldt, J. D. (2017). Reactivity of platform molecules in pyrolysis oil and in water during hydrotreatment over nickel and ruthenium catalysts. *Biomass and Bioenergy*, 106, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.013>
- Capunitan, J. A., & Capareda, S. C. (2014). Hydrotreatment of corn stover bio-oil using noble metal catalysts. *Fuel Processing Technology*, 125, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.029>
- Cheng, D., Wang, L., Shahbazi, A., Xiu, S., & Zhang, B. (2014). Catalytic cracking of crude bio-oil from glycerol-assisted liquefaction of swine manure. *Energy Conversion and Management*, 87, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.084>
- Duan, D., Feng, Z., Dong, X., Chen, X., Zhang, Y., Wan, K., Wang, Y., Wang, Q., Xiao, G., Liu, H., & Ruan, R. (2021). Improving bio-oil quality from low-density polyethylene pyrolysis: Effects of varying activation and pyrolysis parameters. *Energy*, 232, 121090. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121090>
- Elkhalifa, S., Mariyam, S., Mackey, H. R., Al-Ansari, T., McKay, G., & Parthasarathy, P. (2022). Pyrolysis Valorization of Vegetable Wastes: Thermal, Kinetic, Thermodynamics, and Pyrogas Analyses. *Energies*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/en15176277>
- Faisal, M., Channa, A. S., Mat, R., & Ani, F. N. (2014). Microwave assisted pyrolysis of waste biomass resources for bio-oil production. *Applied Mechanics and Materials*, 554, 307–311. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.554.307>
- Febriyanti, F., Fadila, N., Susandy, A., Yazid Bindar, S., Irawan, A., Sanjaya, A. S., & Bindar, Y. (2019). Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil Dan Gas Dengan Metode Pirolisis Utilization of Empty Fruit Bunches Waste Into Bio-Char, Bio-Oil and Gases With Pyrolysis Method. *Jurnal Chemurgy*, 03(2), 12–17.
- Gonnella, G., Ischia, G., Fambri, L., & Fiori, L. (2022). Thermal Analysis and Kinetic Modeling of Pyrolysis and Oxidation of Hydrochars. *Energies*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15030950>
- Gouws, S. M., Carrier, M., Bunt, J. R., & Neomagus, H. W. J. P. (2022). Lumped chemical kinetic modelling of raw and torrefied biomass under pressurized pyrolysis. *Energy*, 253, 115199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115199>
- Homagain, K., Shahi, C., Luckai, N., & Sharma, M. (2014). Biochar-based bioenergy and its environmental impact in Northwestern Ontario Canada: A review. *Journal of Forestry Research*, 25(4), 737–748. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0522-6>
- Hu, M., Ye, Z., Zhang, Q., Xue, Q., Li, Z., Wang, J., & Pan, Z. (2022). Towards understanding the

- chemical reactions between KOH and oxygen-containing groups during KOH-catalyzed pyrolysis of biomass. *Energy*, 245, 123286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123286>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, 39(x), 109–143. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- Idris, M., Setyawan, M., & Mufrodi, Z. (2024). Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihan Energi : A Review. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024, April*. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/22490/10451>
- Idris, M., Setyawan, M., & Suharto, T. E. (2024). Effect of Flow Rate Ratio of Air and Waste Cooking Oil on Combustion Temperature and Furnace Efficiency. *Eksergi*, 22(1), 25-32.
- Igliński, B., Kujawski, W., & Kielkowska, U. (2023). Pyrolysis of Waste Biomass: Technical and Process Achievements, and Future Development—A Review. *Energies*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/en16041829>
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Amelia, S., Ma'arif, A., Hakika, D. C., & Mufandi, I. (2022). Experimental Study on The Characterization of Pyrolysis Products from Bagasse (Saccharum Officinarum L.): Bio-oil, Biochar, and Gas Products. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 7(3), 565–582. <https://doi.org/10.17509/ijost.v7i3.51566>
- Jamilatun, S., Setyawan, M., Mufandi, I., & Budiman, A. (2019). Potensi Produk Cair (Oil Phase dan Water Phase) Pirolisis Mikroalga Sebagai Pengawet Makanan. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 6(2), 83. <https://doi.org/10.26555/chemica.v6i2.14813>
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T., He, J., Kumar, R., & Lu, Q. (2020). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(July), 110305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110305>
- Kim, T. S., Oh, S., Kim, J. Y., Choi, I. G., & Choi, J. W. (2014). Study on the hydrodeoxygenative upgrading of crude bio-oil produced from woody biomass by fast pyrolysis. *Energy*, 68, 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.004>
- Köseoğlu, E., & Akmil-Başar, C. (2015). Preparation, structural evaluation and adsorptive properties of activated carbon from agricultural waste biomass. *Advanced Powder Technology*, 26(3), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.02.006>
- Kuan, W. H., Huang, Y. F., Chang, C. C., & Lo, S. L. (2013). Catalytic pyrolysis of sugarcane bagasse by using microwave heating. *Bioresource Technology*, 146, 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.079>
- Kumar, R. S., Sivakumar, S., Joshuva, A., Deenadayalan, G., & Vishnuvardhan, R. (2021). Bio-fuel production from *Martynia annua* L. seeds using slow pyrolysis reactor and its effects on diesel engine performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, 217, 119327. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119327>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 312(May), 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- Liu, H., Ma, X., Li, L., Hu, Z. F., Guo, P., & Jiang, Y. (2014). The catalytic pyrolysis of food waste by microwave heating. *Bioresource Technology*, 166, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.020>
- Liu, R., Liu, G., Yousaf, B., Niu, Z., & Abbas, Q. (2022). Novel investigation of pyrolysis mechanisms and kinetics for functional groups in biomass matrix. *Energy*, 153, 111761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111761>

- Liu, Y., Li, K., Guo, J., & Zhenming Xu. (2018). Impact of the operating conditions on the derived products and the reaction mechanism in vacuum pyrolysis treatment of the organic material in waste integrated circuits. *Journal of Cleaner Production*, 197(Part 1), 1488–1497. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.236>
- Mariyam, S., Shahbaz, M., Al-Ansari, T., & , Hamish. R Mackey a, G. M. (2022). A critical review on co-gasification and co-pyrolysis for gas production. *Energy*, 161, 112349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112349>
- Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Jewiarz, M., & Dziedzic, K. (2019). Assessment of energy parameters of biomass and biochars, leachability of heavy metals and phytotoxicity of their ashes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(4), 786–800. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00832-6>
- Mushtaq, F., Abdullah, T. A. T., Mat, R., & Ani, F. N. (2015). Optimization and characterization of bio-oil produced by microwave assisted pyrolysis of oil palm shell waste biomass with microwave absorber. *Bioresource Technology*, 190, 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.055>
- Naimah, S., & Aidha, N. N. (2017). Karakteristik Gas Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik Polietilena (PE) dengan Menggunakan Katalis Residue Catalytic Cracking (RCC). *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 39(1), 31. <https://doi.org/10.24817/jkk.v39i1.2750>
- Nisar, J., Ahmad, A., Ali, G., Rehman, N. U., Shah, A., & Shah, I. (2022). Enhanced Bio-Oil Yield from Thermal Decomposition of Peanut Shells Using Termite Hill as the Catalyst. *Energies*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/en15051891>
- Pan, J., Jiang, J., & Xu, R. (2013). Adsorption of Cr(III) from acidic solutions by crop straw derived biochars. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(10), 1957–1965. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60305-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60305-2)
- Phuakpunk, K., Chalermssinsuwan, B., & Assabumrungrat, S. (2022). Pyrolysis kinetic parameters investigation of single and tri-component biomass: Models fitting via comparative model-free methods. *Energy*, 182, 494–507. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.011>
- Piechota, G., & Igliński, B. (2021). Biomethane in Poland—Current Status, Potential, Perspective and Development. *Energies*, 14(6), 1–32. <https://doi.org/10.3390/en14061517>
- Rangel, M. do C., Mayer, F. M., Carvalho, M. da S., Saboia, G., & de Andrade, A. M. (2023). Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Biomass (Switzerland)*, 3(1), 31–63. <https://doi.org/10.3390/biomass3010003>
- Rizal, W. A., Suryani, R., Wahono, S. K., Anwar, M., Prasetyo, D. J., Amdani, R. Z., Suwanto, A., & Februanata, N. (2020). Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Kayu Campuran : Parameter Proses dan Analisis Produk Asap Cair. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 14(2), 353. <https://doi.org/10.26578/jrti.v14i2.6606>
- Saygili, H., & Güzel, F. (2016). High surface area mesoporous activated carbon from tomato processing solid waste by zinc chloride activation: Process optimization, characterization and dyes adsorption. *Journal of Cleaner Production*, 113, 995–1004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.055>
- Stančin, H., Mikulčić, H., Manić, N., Stojiljković, D., Vujanović, M., Wang, X., & Duić, N. (2021). Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis. *Energy*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121592>
- Tay, T., Ucar, S., & Karagöz, S. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 481–485. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.011>

- Terry, L. M., Li, C., Chew, J. J., Aqsha, A., How, B. S., Loy, A. C. M., Chin, B. L. F., Khaerudini, D. S., Hameed, N., Guan, G., & Sunarso, J. (2021). Bio-oil production from pyrolysis of oil palm biomass and the upgrading technologies: A review. *Carbon Resources Conversion*, 4(June), 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.10.002>
- Tian, Y., Zuo, W., Ren, Z., & Chen, D. (2011). Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety. *Bioresource Technology*, 102(2), 2053–2061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.082>
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11113115>
- Wang, Y., Zeng, Z., Tian, X., Dai, L., Jiang, L., Zhang, S., Wu, Q., Wen, P., Fu, G., Liu, Y., & Ruan, R. (2018). Production of bio-oil from agricultural waste by using a continuous fast microwave pyrolysis system. *Bioresource Technology*, 269, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.067>
- Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C., & Tangsathitkulchai, M. (2012). Effect of reaction conditions on the catalytic esterification of bio-oil. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29(2), 182–189. <https://doi.org/10.1007/s11814-011-0161-y>
- Wildschut, J., Mahfud, F. H., Venderbosch, R. H., & Heeres, H. J. (2009). Hydrotreatment of Fast Pyrolysis Oil Using Heterogeneous Noble-Metal Catalysts Jelle. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 10324–10334.
- Wnietrzak, R., Leahy, J. J., Chojnacka, K. W., Saeid, A., Novotny, E., Jensen, L. S., & Kwapinski, W. (2014). Influence of pig manure biochar mineral content on Cr(III) sorption capacity. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 89(4), 569–578. <https://doi.org/10.1002/jctb.4159>
- Yin, W., Venderbosch, R. H., He, S., Bykova, M. V., Khromova, S. A., Yakovlev, V. A., & Heeres, H. J. (2017). Mono-, bi-, and tri-metallic Ni-based catalysts for the catalytic hydrotreatment of pyrolysis liquids. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(3), 361–376. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0267-5>
- Zheng, J. lu, Zhu, X. feng, Guo, Q. xiang, & Zhu, Q. shi. (2006). Thermal conversion of rice husks and sawdust to liquid fuel. *Waste Management*, 26(12), 1430–1435. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.011>
- Zihan, L., A, P. L., A, C. C., Wang, X., Song, J., A, S. F., & Pang, S. (2022). Influence of metal chloride modified biochar on products characteristics from biomass catalytic pyrolysis. *Energy*, 250(123776). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123776>
- Zou, J., Hu, H., Xue, Y., Li, C., Li, Y., Yellezuome, D., He, F., Zhang, X., Rahman, M. M., & Cai, J. (2022). Exploring kinetic mechanisms of biomass pyrolysis using generalized logistic mixture model. *Energy*, 258, 115522. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115522>