

Review: Metode Konversi Termokimia Pada Limbah Biomassa Menjadi Biofuel

Rimadina Sukmasuci Lestari^{1*}, Farrah Fadhillah Hanum¹, Siti Jamilatun¹

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

**Corresponding Author: 2407054006@webmail.uad.ac.id*

ABSTRAK

Biofuel adalah jenis bahan bakar yang dihasilkan dari bahan organik, seperti tanaman dan limbah hewan. Biofuel dapat berupa cair (seperti biodiesel dan bioetanol) atau gas (seperti biogas) dan digunakan sebagai alternatif untuk bahan bakar fosil. Proses produksi biofuel melibatkan konversi biomassa melalui berbagai metode konversi termokimia dan biologis. Artikel ini membahas metode konversi termokimia yang digunakan untuk mengubah limbah biomassa menjadi biofuel. Dengan meningkatnya kebutuhan energi terbarukan dan pengurangan dampak lingkungan, konversi limbah biomassa menjadi biofuel menjadi alternatif yang menjanjikan. Metode yang diulas meliputi penerapan metode konversi termokimia seperti torefaksi, pirolisis, gasifikasi, dan transesterifikasi, masing-masing dengan keunggulan dan tantangan tersendiri. Karena itu, akan dibahas juga mengenai komposisi dan sifat sumber daya biomassa yang berbeda seperti bahan baku lignoselulosa, tanaman biji minyak, limbah padat perkotaan, limbah makanan dan kotoran hewan. Menjelaskan sifat-sifat biofuel yang berbeda seperti biochar, bio-oil, bio-crude oil, syngas dan biodiesel.

Kata kunci: Biofuel; Gasifikasi; Pirolisis; Torefaksi; Transesterifikasi.

ABSTRACT

Biofuel is a type of fuel produced from organic materials, such as plants and animal waste. Biofuels can be in liquid (such as biodiesel and bioethanol) or gaseous (such as biogas) form and are used as an alternative to fossil fuels. The biofuel production process involves the conversion of biomass through various thermochemical and biological conversion methods. This article discusses the thermochemical conversion methods used to convert biomass waste into biofuels. With the increasing demand for renewable energy and reducing environmental impacts, the conversion of biomass waste into biofuels is a promising alternative. The methods reviewed include the application of thermochemical conversion methods such as torrefaction, pyrolysis, liquefaction, gasification, and transesterification, each with its own advantages and challenges. Therefore, the composition and properties of different biomass resources such as lignocellulosic feedstocks, oilseed crops, municipal solid waste, food waste and animal waste will be discussed. The properties of different biofuels such as biochar, bio-oil, bio-crude oil, syngas and biodiesel will be explained.

Keywords: Biofuel; Gasification; Pyrolysis; Torrefaction; Transesterification.

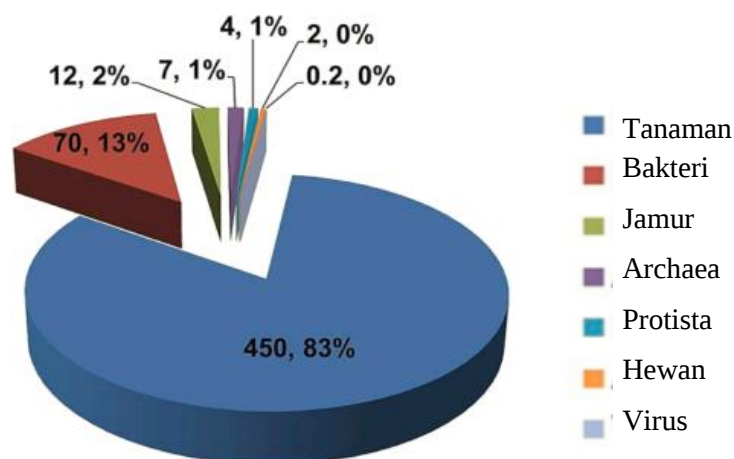
1. PENDAHULUAN

Dengan meningkatnya konsumsi energi, emisi gas rumah kaca yang semakin tinggi, permintaan bahan bakar fosil yang terus meningkat, dan lonjakan harga bahan bakar, muncul kebutuhan mendesak untuk beralih ke energi terbarukan. Limbah biomassa, termasuk tanaman biji minyak, bahan lignoselulosa, mikroalga, tanaman energi, pupuk kandang, limbah makanan, dan fraksi organik dari limbah padat kota, memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi dan produk bernilai tambah melalui berbagai teknologi konversi. Beberapa contoh proses termokimia adalah pirolisis, gasifikasi, torefaksi, karbonisasi, transesterifikasi dan proses katalitik, sedangkan proses fermentasi, biometanasi dan enzimatik banyak digunakan teknologi biologis untuk konversi biomassa (Lee et al., 2019). Dalam metode konversi biologis, residu biomassa mengalami hidrolisis secara kimia dan enzimatis untuk

melepaskan komponen yang dapat difermentasi. Selanjutnya, mikroorganisme bertanggung jawab untuk mengolah komponen tersebut menjadi produk bernilai tinggi seperti biofuel dan biokimia. Di sisi lain, dalam proses konversi termokimia, bahan baku diuraikan secara termal, memisahkan komponen organik dari bahan yang dapat difermentasi (seperti sakarida) dan komponen yang tidak dapat difermentasi (seperti lignin), untuk menghasilkan biofuel dan blok bangunan biokimia. Jika dibandingkan dengan konversi biologis, metode termokimia memiliki laju reaksi yang lebih cepat berkat penggunaan suhu, tekanan, dan katalis yang tinggi.

Komposisi dan karakteristik biomassa sangat mempengaruhi parameter proses, laju reaksi serta hasil dan kualitas produk konversi (Idris et al., 2024). Sifat utama biomassa dapat ditentukan melalui komposisi proksimat dan ultimat (Xing et al., 2019). Komposisi proksimat diukur melalui kadar air, abu, karbon tetap dan zat terbang. Sebaliknya, komposisi akhir meliputi karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen. Abu termasuk bahan mineral yang tersisa sebagai residu setelah pembakaran. Kandungan abu yang lebih tinggi dapat menjadi tantangan untuk pembentukan aglomerasi dan menyebabkan sintering dan korosi selama konversi termokimia, terutama dalam pembakaran, pirolisis, gasifikasi dan co-firing (Namkung et al., 2019). Selain itu, kadar air yang lebih tinggi dalam biomassa menghasilkan input energi yang lebih besar untuk mengeringkan bahan baku sebelum konversi termokimia dan mengurangi nilai kalor produk biofuel. Nilai kalor produk konversi dapat ditingkatkan dengan kadar air, oksigen, dan abu yang lebih rendah (Güleç et al., 2022).

Menurut Bar-On et al., (2018), jumlah total biomassa di seluruh permukaan Bumi diperkirakan sekitar 550 GtC, yang sekitar 83% adalah biomassa tanaman, diikuti oleh komponen biomassa bakteri yang merupakan sekitar 13% dari total biomassa. Seperti yang terlihat pada Gambar 1, komponen biomassa lainnya termasuk hewan, jamur, protista, archaea, dan virus, yang jumlahnya kurang dari 10%. Meskipun ada kesulitan besar dalam memastikan jumlah total biomassa bakteri (Zheng et al., 2023), diperkirakan bahwa tanaman masih menjadi sumber dominan dalam hal biomassa. Produk dan turunan tanaman diyakini menempati sekitar 70% biomassa, yang sebagian besar berkayu. Mengenai definisi serta jenis pengukuran biomassa, lokasi geografis, kriteria ketidakpastian, dan apakah estimasi biomassa terkini atau tren biomassa yang ada diperlukan, tidak ada satu data biomassa yang sesuai untuk semua pengguna (Herold et al., 2019).



Gambar 1. Distribusi sumber daya biomassa di permukaan bumi berdasarkan sumbernya.

Sumber: (Bar-On et al., 2018)

2. KLASIFIKASI LIMBAH BIOMASSA

2.1. Biomassa Lignoselulosa

Biomassa lignoselulosa adalah sumber bahan baku yang berkelanjutan, ekonomis, dan netral karbon, yang umumnya terdiri dari selulosa (40–60% berat), hemiselulosa (20–40% berat), dan lignin (10–24% berat). Beberapa sumber biomassa ini meliputi sisa tanaman pertanian, biomassa kehutanan, dan tanaman energi. Limbah pertanian dihasilkan dari proses panen dan pengolahan tanaman. Meskipun biomassa kayu dapat memberikan manfaat lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam berbagai produk untuk sektor rumah tangga, industri, konstruksi, dan energi, banyak biomassa kehutanan yang masih kurang dimanfaatkan. Produksi bioenergi dari biomassa pertanian dan hutan dipengaruhi oleh variasi musiman, geografis, dan iklim, yang menentukan ketersediaan dan biaya (Singh et al., 2021).

2.2. Limbah Padat Kota

Produksi sampah padat (MSW) dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang signifikan jika tidak dikelola dengan benar. Namun, mengubah MSW menjadi produk bernilai tambah dapat membantu mengatasi masalah kekurangan energi dan mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Terdapat berbagai metode untuk membuang, mendaur ulang, atau mengonversi MSW menjadi sumber energi, seperti penimbunan, pengomposan, pencernaan anaerobik, pirolisis, dan gasifikasi (Nanda et al., 2021). Proses pembakaran 1 ton MSW dapat menghasilkan 1,3 ton emisi setara CO₂, yang sebanding dengan emisi CO₂ dari pembangkit listrik berbasis minyak (Cekirge et al., 2013).

2.3. Kotoran Hewan

Kotoran hewan adalah produk sampingan dari metabolisme dan limbah yang dihasilkan oleh ternak dan unggas. Pupuk kandang merupakan sumber yang berharga karena mengandung bahan organik dan nutrisi penting untuk pertanian. Kotoran hewan dapat dimanfaatkan melalui berbagai metode seperti pencernaan anaerobik, fermentasi gelap, fermentasi, pirolisis, gasifikasi hidrotermal, dan torefaksi (Itoh et al., 2019) untuk menghasilkan produk seperti biometana, biohidrogen, bioetanol, bio-oil, bio-minyak mentah, syngas, dan biomassa terorefaksi. Selain itu, digestate yang tersisa setelah proses pencernaan anaerobik dapat digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi biochar, bio-oil, dan syngas melalui pirolisis, dan gasifikasi.

2.4. Sampah Makanan

Penimbunan limbah makanan dapat menghasilkan emisi metana, yang merupakan gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global lebih besar dibandingkan CO₂. Di sisi lain, insinerasi atau pembakaran lebih cocok untuk biomassa yang kering. Dengan demikian, limbah makanan yang memiliki kadar kelembaban tinggi dapat menyebabkan peningkatan kebutuhan energi untuk insinerasi, yang berujung pada biaya operasional yang tinggi. Dalam kondisi seperti ini, pencernaan anaerobik limbah makanan merupakan alternatif yang lebih baik untuk memproduksi biogas (atau biometana) melalui biometanasi yang dilakukan oleh bakteri metanogenik (Ren et al., 2022).

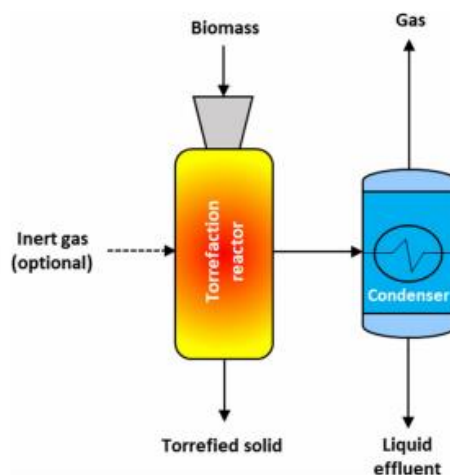
3. KONVERSI BIOMASSA MENJADI ENERGI

Konversi biomassa menjadi energi dapat dilakukan melalui dua skema utama, yaitu konversi termokimia dan konversi biokimia. Pada proses konversi termokimia melibatkan reaksi kimia yang dipicu oleh panas untuk mengubah biomassa menjadi energi. Sedangkan pada proses konversi biokimia menggunakan mikroorganisme atau enzim untuk memecah biomassa menjadi produk yang bermanfaat, terutama biofuel.

Proses konversi termokimia melibatkan dekomposisi termal bahan organik untuk menghasilkan energi panas atau bahan bakar minyak atau gas. Proses ini berguna untuk limbah yang mengandung persentase bahan organik non-biodegradable yang tinggi dan kadar air yang rendah. Konversi termokimia, ditandai dengan suhu yang lebih tinggi dan tingkat konversi, paling cocok untuk bahan baku kelembaban rendah dan umumnya kurang selektif untuk produk.

3.1. Torefaksi

Torefaksi adalah teknologi termokimia yang bersih dan menjanjikan, sering digunakan sebagai pretreatment termal untuk sumber daya biomassa (Sarker et al., 2021). Proses ini terbukti meningkatkan kinerja konversi termokimia, seperti pirolisis, dan gasifikasi, dengan cara menghilangkan kelembapan dan mengurangi sebagian komponen biomassa (Basu et al., 2014). Torefaksi mendapatkan perhatian besar tidak hanya karena biomassa terorefaksi memiliki sifat yang lebih baik, tetapi juga karena teknologi terkait hampir siap untuk dipasarkan. Beberapa keunggulan biomassa terorefaksi dibandingkan biomassa mentah meliputi hidrofobisitas yang lebih tinggi, kemampuan menggiling yang lebih baik, nilai kalor yang lebih tinggi, serta kadar air yang rendah dan sifat pelet yang optimal (Sarker et al., 2021). Proses torefaksi juga meningkatkan persentase karbon dan mengurangi kandungan oksigen, yang pada gilirannya meningkatkan nilai kalor biomassa.



Gambar 2. Representasi proses dari torefaksi biomassa

Gambar 2 menggambarkan diagram alir dari proses torefaksi yang umum. Torefaksi adalah proses pengeringan bahan baku pada suhu sekitar 200–300 °C dalam suasana inert. Rentang suhu ini menentukan jenis torefaksi yang dapat diklasifikasikan sebagai ringan (200–235 °C), sedang (235–275 °C), dan berat (275–300 °C) (Chen et al., 2015). Proses ini juga dapat dipahami sebagai pemanasan bertahap biomassa dalam kondisi tanpa oksigen. Selama torefaksi, zat-zat yang mudah menguap akan berpindah ke kondensor sebagai uap panas untuk dikondensasi. Produk cair yang dihasilkan dari proses ini mengandung air dan asam karboksilat, serta jejak aldehida, keton, eter, ester, dan alkohol (Acharya et al., 2015). Tabel 1 merangkum beberapa studi penting tentang torefaksi limbah biomassa menjadi bahan bakar padat.

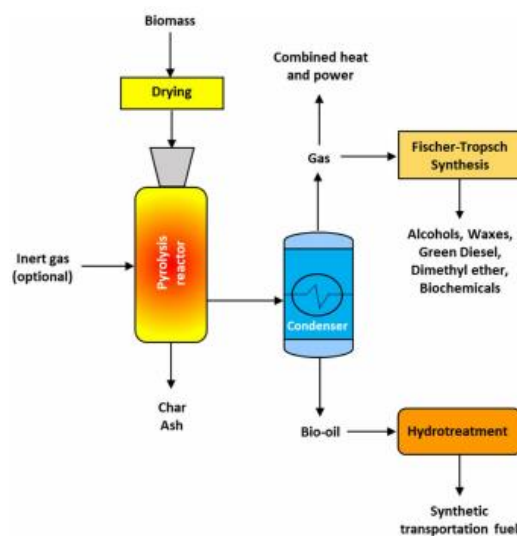
Tabel 1. Ringkasan studi penting mengenai torefaksi limbah biomassa

Bahan Baku	Suhu (°C)	Waktu Tinggal (menit)	Hasil Pengamatan	Referensi
<i>Akasia Nilotika</i> (Babul)	225 - 300	15 - 60	- Memiliki efisiensi penyisihan O₂ dan C pepadatan diperkuat sebesar 40% dan 52%, masing-masing pada 300 t dalam 30 menit. - Peningkatan 42% nilai kalor lebih tinggi jika dibandingkan dengan biomassa di dalamnya bentuk mentah diamati.	Singh et al., 2020

			- Sifat fisik air mengalami peningkatan. Selama proses tersebut karbon aromatik keseluruhan dan aromatisitas kondensat cair ditambah.	
Pinewood, Miscanthus, dan jerami gandum	250- 300	45	- Neraca massa berkisar dari 96 wt.% sampai 103 wt.%. - Beberapa spesies terkondensasi diidentifikasi termasuk gula anhidrat, terpen dan terpenoid. - Jenis biomassa bersama dengan suhu mempengaruhi hasil spesies terkondensasi.	Le Than et al., 2015
Jerami kedelai, jerami jagung, jerami padi dan sekam padi	300	-	- Meningkatnya kemampuan mengalir biomassa tanah dengan torefaksi. - Sekam padi memiliki daya alir tertinggi, sedangkan jerami padi paling sedikit.	Xu et al., 2019
Oat, willow, dan kotoran unggas	200-300	15-45	- Memiliki produk torefied hingga 42% lebih banyak nilai kalor jika dibandingkan dengan biomassa yang tidak diolah. - Hasil massa bervariasi dari 42% hingga 91%, sedangkan hasil energi bervariasi sebesar 49%. Semua produk menampilkan karakteristik hidrofobik	Acharya dan Dutta, 2016

3.2. Pirolisis

Dalam pirolisis, bahan organik dalam biomassa menjalani reaksi dekomposisi termokimia yang tidak dapat diubah kembali, menghasilkan biofuel. Proses pemanasan yang cepat dan waktu tinggal uap yang singkat menyebabkan kondensasi cepat dari uap hidrokarbon yang mudah menguap menjadi bio-oil. Sebaliknya, pirolisis yang dilakukan dengan laju pemanasan yang lambat menghasilkan lebih banyak biochar, karena karbonisasi biomassa berlangsung lebih lambat akibat waktu tinggal uap yang lebih lama (Zaimes et al., 2015).



Gambar 3. Representasi proses dari pirolisis biomassa.

Gambar 3 menunjukkan diagram alir dari proses pirolisis. Pirolisis adalah metode perengkahan termal biomassa pada suhu antara 300–700 °C tanpa kehadiran oksigen, yang menghasilkan bio-oil, biochar, dan gas yang tidak dapat terkondensasi (H₂, CH₄, CO, dan CO₂). Bio-oil terdiri dari dua fase: fase organik dan fase berair. Fase organik bio-oil mengandung tar dan senyawa berat yang kaya hidrokarbon, yang dapat dimanfaatkan untuk memproduksi bahan bakar transportasi yang lebih bersih. Proses peningkatan bio-oil, baik secara katalitik maupun non-katalitik, diperlukan untuk menghilangkan senyawa oksigen, nitrogen, dan sulfur, yang dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar dan menyebabkan emisi NO_x dan SO_x saat pembakaran (Kumar et al., 2021). Fase berair dari bio-oil mengandung berbagai komponen, termasuk air, ester, eter, aldehida, keton, fenol, alkohol, asam, dan senyawa biokimia lainnya (Singh et al., 2021). Fase gas, yang terutama terdiri dari H₂ dan CO, dapat diubah menjadi hidrokarbon cair melalui proses sintesis katalitik Fischer-Tropsch. Tabel 2 merangkum beberapa studi penting tentang pirolisis limbah biomassa menjadi bahan bakar padat.

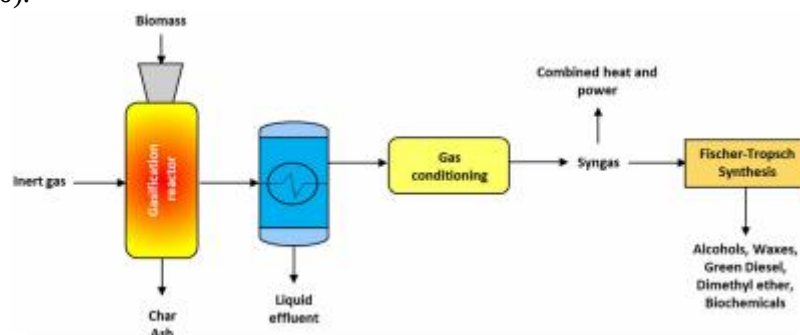
Tabel 2. Ringkasan studi penting mengenai pirolisis limbah biomassa

Bahan Baku	Suhu (°C)	Katalisator	Hasil Pengamatan	Referensi
Cemara Hinoki	350-600	Tidak ada katalisator	- Hasil Biochar mencapai struktur mikro pada 500 °C - Hasil biochar menurun dari 33% berat pada 350°C hingga 20% berat pada 600 °C	Yu et al., 2019
Kayu pinus, kulit kacang dan jerami padi	300-700	K ₂ CO ₃	- Kayu pinus memiliki efek katalitik tertinggi diikuti oleh kulit kacang tanah dan jerami padi. - Fraksi cairan dalam kayu pinus dan kulit kacang menurun drastis, sedangkan Jerami padi menunjukkan penurunan yang paling kecil.	Fan et al., 2020
Willow, ampas tebu, tanaman Ugu dan	500	10% berat Ni/AlO ₃	- Hasil rendaman CH₄ dari hemiselulosa dan selulosa adalah lebih tinggi dibanding yang diperoleh dari lignin - Menambahkan penggunaan katalis pada hasil CH₄	Jafar et al., 2020
Biomassa batang bambu dan kacang gude	400-600	Tidak ada katalis	- Memiliki hasil dan karakteristik biochar dari kedua biomassa secara signifikan dipengaruhi oleh komposisi biomassa - Menghasilkan kandungan lignin yang lebih tinggi di biomassa bambu dibandingkan dengan yang berasal dari batang gude	Sahoo et al., 2021
Sisa makanan, kulit kanola dan kulit gandum	300-600	Tidak ada katalis	- Menghasilkan biochar tertinggi dari oat hull (29,1 berat.%) diikuti oleh canola hull (28,8 berat.%), dan sisa makanan (28,4 berat %) - Biochar suhu tinggi juga menunjukkan peningkatan aromatisitas karbon dan stabilitas termal. - Bahan kimia fenolik dan aromatik ditemukan dalam bio-oil yang diproduksi pada suhu yang lebih tinggi.	Patra et al., 2021

3.3. Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses termokimia yang berpotensi mengubah bahan karbon menjadi syngas (Makwana et al., 2019). Proses ini memungkinkan penggunaan berbagai bahan baku untuk menghasilkan produk gas seperti H_2 , CO , CO_2 , dan CH_4 , serta arang. Dari syngas, berbagai bentuk energi dapat dihasilkan, termasuk panas, listrik, biofuel, biometana, bahan kimia, dan hidrogen (Centi et al., 2020).

Sementara gasifikasi termal pada batubara dan biomassa kompleks dilakukan pada suhu tinggi (800–1200 °C), gasifikasi hidrotermal dapat beroperasi pada suhu yang lebih rendah (400–700 °C). Selain produk gas utama, gasifikasi juga menghasilkan cairan terkondensasi yang kaya akan air dan senyawa biokimia. Karena suhu yang lebih tinggi, pembentukan tar menjadi terbatas, sehingga proses pembersihan dan pemulihan gas lebih sederhana (Makwana et al., 2019). Suhu tinggi dalam gasifikasi juga mempercepat laju reaksi, didukung oleh reaksi endotermik seperti pergeseran air-gas, metanasi, dan reformasi uap, yang mengarah pada dekomposisi biomassa menjadi gas yang lebih murni. Syngas dapat diubah menjadi bahan bakar bersih dan produk bernilai tambah melalui katalisis Fischer-Tropsch (dos Santos et al., 2020).



Gambar 4. Representasi proses dari gasifikasi biomassa

Tabel 3. merangkum beberapa studi penting tentang gasifikasi limbah biomassa menjadi bahan bakar padat.

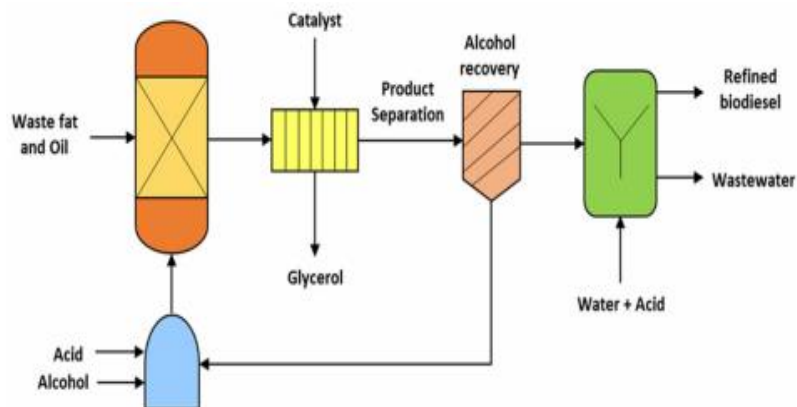
Tabel 3. Ringkasan studi penting mengenai gasifikasi limbah biomassa

Bahan Baku	Suhu (°C)	Katalisator	Hasil Pengamatan	Referensi
Serpihan kayu willow terfluidisasi	600-850	Tidak ada katalis	- Stabilitas termal yang tinggi dan efisiensi konversi karbon yang tinggi dari chip willow diamati.	Hai et al., 2019
Batang kapas, batang jagung dan jerami	700-850	Tanah liat Marly, kalsium hidroksida, dolomit, dan debu tungku semen	- Batang kapas menyumbang persentase gas yang lebih besar dibandingkan jerami padi dan batang jagung - $Ca(OH)_2$ dan debu kiln semen efektif dalam meningkatkan hasil gas dan penurunan hasil tar dan arang	Hamad et al., 2016
Poplar serpihan kayu	300-600	Ru/karbon aktif, Ni/karbon aktif, KOH, Dolomit, Trona dan Boraks	- Ru/karbon aktif memiliki aktivitas terbaik untuk meningkatkan hasil H_2 - KOH menghasilkan hasil gas yang tinggi dan hasil residu yang rendah. - Semua katalis terlepas dari jenis mereka meningkatkan hasil gasifikasi.	Gokkaya et al., 2019

MSW dan limbah kertas	800-950	K ₂ CO ₃ , Li ₂ CO ₃ , Rb ₂ CO ₃ , CaCO ₃ , CsCO ₃ , CaSO ₄ dan Na ₂ CO ₃	-	Aktivitas katalitik ditingkatkan dengan menggunakan CaCO ₃ , Li ₂ CO ₃ dan Na ₂ CO ₃ masingmasing untuk gasifikasi lumpur limbah, kertas bekas dan MSW	Vamvuka et al., 2012
-----------------------	---------	--	---	---	----------------------

3.4. Transesterifikasi

Transesterifikasi adalah proses di mana minyak non-makanan bereaksi dengan alkohol (metanol dan etanol) untuk menghasilkan biodiesel. Alkohol yang digunakan dalam proses ini mudah diperoleh dan harganya terjangkau. Proses transesterifikasi diketahui dapat menurunkan viskositas minyak non-makanan dan memfasilitasi konversi trigliserida menjadi ester yang lebih mudah larut dalam solar (Singh et al., 2020). Gambar 5 menunjukkan diagram alir proses produksi biodiesel melalui transesterifikasi. Limbah lemak dan minyak dicampur dengan alkohol untuk menghasilkan metil ester dan metanol. Metil ester kemudian dapat dikonversi secara katalitik menjadi gliserol dan biodiesel. Campuran biodiesel dan metanol selanjutnya dapat dipisahkan dan digunakan kembali, sementara metil ester dapat diubah secara katalitik menjadi gliserol dan biodiesel (Rezania et al., 2019).



Gambar 5. Representasi proses dari transesterifikasi limbah lemak dan minyak

Biodiesel dapat diproduksi menggunakan katalis asam dan basa, baik dalam bentuk homogen maupun heterogen. Katalis homogen sering digunakan dalam reaksi kimia karena aktivitasnya yang tinggi. Namun, kesulitan dalam pemulihan katalis homogen setelah digunakan dapat meningkatkan biaya operasi proses (Idris et al., 2024). Di sisi lain, katalis heterogen lebih mudah untuk dipulihkan dan didaur ulang (Avhad et al., 2015). Selain itu, katalis asam padat tipe Brønsted (seperti bahan yang mengandung asam sulfonat) dan tipe Lewis (seperti oksida sulfat campuran) sering menggabungkan asam mineral dan katalis basa heterogen. Meskipun demikian, produksi sabun selama transesterifikasi dengan katalis heterogen menjadi tantangan dalam pemurnian dan pemisahan produk (Veljkovic et al., 2015). Tabel 4 merangkum beberapa pekerjaan penting pada konversi limbah minyak menjadi biodiesel melalui transesterifikasi.

Tabel 4. Ringkasan studi penting mengenai transesterifikasi limbah biomassa

Bahan Baku	Suhu (°C)	Katalisator	Hasil Pengamatan	Referensi
Minyak kedelai	50	NaOH	- Laju reaksi sangat dipengaruhi oleh pemuatan katalis, laju reaksi, rasio minyak-metanol dan suhu.	Bashiri and Pourbeiram, 2016
Lumpur limbah basah	70-160	H ₂ SO ₄	- Persentase biodiesel yang tinggi diperoleh menyiratkan bahwa proses hidrotermal dapat merangsang transfer lipid dari bahan baku ke pelarut pemisah.	Hu et al., 2020
Minyak goreng bekas pemanas	45-55	CaO dan Clay	- Katalis dapat digunakan kembali hingga 5 kali. - Tingkat konversi 97% diperoleh pada kondisi optimal seperti suhu 55°C, itu rasio minyak-ke-metanol 1,94, pembuatan katalis 9,6% berat, konsentrasi toluena 16,1% berat, dan waktu reaksi 74 menit.	Mohadesi et al., 2022
Minyak goreng bekas	55	NaOH	- Pencampuran biodiesel dengan diesel komersial adalah metode yang efektif untuk mengurangi viskositasnya untuk penggunaan langsung pada mesin diesel	Duti et al., 2016
Biomassa dari ragi berminyak	65-110	H ₂ SO ₄	- Kondisi optimal untuk transesterifikasi melibatkan suhu 50 °C dengan waktu reaksi selama 8 jam, waktu sonikasi 5 menit, 100 ml methanol, 10 ml kloroform, 1 ml/g katalis dan 4 g biomassa.	Katre et al., 2018

4. PRODUK UTAMA BIOFUEL

4.1. Biochar

Biochar, yang merupakan produk sampingan dari pirolisis dan torefaksi suhu tinggi, kaya akan karbon dan dapat diproduksi dari berbagai bahan baku seperti sisa tanaman, biomassa kayu, dan limbah padat lainnya. Komposisi biochar terutama terdiri dari karbon dan fraksi mineral yang lebih kecil, tergantung pada sumber bahan bakunya. Penelitian menunjukkan bahwa hasil biochar berbanding terbalik dengan suhu pirolisis; dengan kata lain, suhu yang lebih rendah menghasilkan biochar dengan hasil yang lebih tinggi, konduktivitas listrik yang baik, dan kapasitas pertukaran kation yang lebih tinggi, meskipun memiliki tingkat volatilitas yang lebih tinggi (Nanda et al., 2016). Di sisi lain, biochar yang dihasilkan pada suhu tinggi memiliki luas permukaan dan kandungan karbon yang lebih tinggi.

4.2. Minyak Mentah Bio

Minyak bio-mentah adalah produk cair kaya energi yang dihasilkan melalui proses termokimia, seperti pencairan hidrotermal. Namun, minyak bio-mentah yang dihasilkan dari metode tersebut memiliki beberapa sifat tidak diinginkan, termasuk kadar air yang tinggi, keasaman yang tinggi, dan kecenderungan korosi yang signifikan. Sifat-sifat ini perlu diatasi sebelum minyak bio-mentah dapat digunakan di kilang untuk pemrosesan lebih lanjut atau sebagai bahan bakar komersial dalam sektor transportasi (Chand et al., 2019).

4.3. Bio-Oil

Bio-oil adalah produk utama yang dihasilkan dari pirolisis biomassa. Karakteristik dan komposisi bio-oil dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti waktu tinggal, suhu, laju pemanasan, dan jenis biomassa yang digunakan (Zhang et al., 2022). Sebagian besar bio-oil terdiri dari air, yang biasanya mencapai 30-40% dari berat total (Salehi et al., 2011). Kehadiran air ini berkaitan dengan kandungan uap air dalam biomassa serta proses dehidrasi dan dekarboksilasi yang terjadi selama pirolisis (Gupta et al., 2019).

4.4. Syngas

Syngas adalah produk utama dari proses gasifikasi biomassa, terdiri dari campuran gas seperti H_2 , CO_2 , CO , dan CH_4 . Sebagai perantara penting dalam industri kimia, syngas dapat digunakan untuk memproduksi bahan bakar transportasi dan bahan kimia ramah lingkungan (Vamvuka et al., 2012). Selain itu, syngas juga dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik (Adnan et al., 2020). Hidrogen, yang merupakan komponen utama syngas, telah muncul sebagai sumber energi terbarukan yang ideal karena sifatnya yang luar biasa. Hidrogen digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk sel bahan bakar, sintesis bahan kimia, obat-obatan, ruang angkasa, aplikasi maritim, metalurgi, dan perangkat listrik.

4.5. Biodiesel

Biodiesel diakui sebagai salah satu biofuel berkelanjutan yang penting. Salah satu faktor kunci dalam produksi biodiesel secara industri adalah rendahnya biaya bahan baku, yaitu minyak non-edible serta limbah lemak dan minyak. Biodiesel lebih diutamakan dibandingkan bensin dan solar konvensional karena sifatnya yang tidak beracun, dapat terurai secara hayati, serta memiliki kadar aromatik dan belerang yang rendah. Dengan karakteristik ini, biodiesel atau campurannya dapat memberikan performa yang lebih baik dibandingkan bahan bakar solar ultra rendah (Alam et al., 2022). Di banyak negara, campuran biodiesel B20, yang terdiri dari 6–20% biodiesel dalam bahan bakar diesel fosil, umum digunakan. Fraksi rendah biodiesel dalam campuran B20 membuatnya cocok digunakan langsung pada berbagai kendaraan diesel di seluruh dunia tanpa memerlukan modifikasi mesin.

4.6. Bioethanol

Konversi bahan lignoselulosa menjadi bioetanol mendapat perhatian penting karena bioetanol dapat digunakan untuk mensubstitusi bahan bakar bensin untuk keperluan transportasi. Bahan lignoselulosa, termasuk dari ampas tebu terdiri atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pabrik gula juga dapat membangun sarana dan prasarana yang memfasilitasi pemanfaatan hasil samping pabrik gula berupa ampas tebu dan molasse untuk produksi bioetanol. Bioetanol memiliki karakteristik yang lebih baik dibandingkan dengan bensin karena dapat meningkatkan efisiensi pembakaran (Hambali et al. 2007) dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Costello dan Chum 1998; DiPardo 2000; Kompas 2005; Hambali et al. 2007)

4.7. Bio-Briket

Bio-briket adalah bahan bakar padat yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih sumber biomassa, yang sengaja digabungkan untuk menambah sifat bahan biomassa agar dapat digunakan secara efisien sebagai bahan bakar (Vaish et al., 2022). Biobriket berasal dari sisa bahan organik dan telah melalui proses pemampatan (Vivek et al., 2019; Pradana & Bunyamin, 2021; Setiawan et al., 2022) yang menyebabkan lignin dalam biomassa terlepas sehingga mengikat bahan-bahan tersebut menjadi suatu briket keras yang mirip dengan kayu atau arang (Vaish et al., 2022).

4.8. Bio-Avtur

Bioavtur atau disebut *greenavtur* merupakan bahan bakar penerbangan alternatif yang berasal dari sumber energi terbarukan, khususnya bahan hayati seperti minyak tumbuhan, alga, dan lemak hewani. Untuk menghasilkan bioavtur, bahan organik harus diubah dalam fase cair melalui konversitermokimia. Pemanfaatan bioavtur telah diatur berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2015 untuk menurunkan emisi

karbon pada sektor penerbangan dengan mencampurkan biomaterial pada bahan bakar avtur (Ruswin dan Adirizky, 2022).

5. KESIMPULAN

Energi dapat disimpan dalam bentuk bio-oil, biodiesel, syngas, hidrogen, biochar, bioethanol, bio-briket dan bio-avtur. Artikel ini mengkategorikan biomassa menjadi biomassa pertanian dan kehutanan, tanaman energi, tanaman biji minyak, limbah makanan, limbah padat perkotaan, dan kotoran hewan. Sumber limbah ini dapat diubah menjadi biofuel melalui teknologi termokimia seperti torefaksi, pirolisis, gasifikasi, dan transesterifikasi. Torefaksi menghasilkan biomassa torefied dengan kadar air lebih rendah dan nilai pemanasan lebih tinggi. Pirolisis menghasilkan bio-oil dan bio-minyak mentah dari perengkahan termal bahan organik. Gasifikasi menghasilkan syngas, campuran H_2 , CO , CO_2 , dan CH_4 dalam kondisi inert atau hidrotermal. Biochar, sebagai produk sampingan dari pirolisis dan gasifikasi, memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dan sifat yang dapat ditingkatkan pada suhu tinggi. Biodiesel dihasilkan melalui transesterifikasi asam lemak dalam limbah minyak nabati dan lemak hewani. Kualitas dan efisiensi biofuel dipengaruhi oleh komposisi biomassa dan kondisi proses. Produk biofuel ini dapat menggantikan bahan bakar fosil atau digunakan sebagai campuran untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B., Dutta, A., & Minaret, J. (2015). A review of comparative studies on dry and wet torefaction. *Energy Technology Review*, 12, 26–37. <https://doi.org/10.1002/etr.2330>
- Adnan, M. A., Xiong, Q., Muraza, O., & Hossain, M. M. (2020). Gasifikasi mikroalga basah untuk menghasilkan syngas kaya H_2 dan listrik: Sebuah studi termodinamika mempertimbangkan analisis exergi. *Renewable Energy*, 147, 2195–2205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.066>
- Alam, S. S., Churkunti, H., & Depcik, C. (2022). Perbandingan bahan bakar plastik bekas, biodiesel minyak jelantah, dan solar ultra-low sulfur menggunakan kerangka Well-to Exhaust. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 5857–5876. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04220-3>
- Avhad, M. R., & Marchetti, J. M. (2015). Tinjauan tentang kemajuan terbaru dalam bahan katalitik untuk produksi biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 696–718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.026>
- Bar-On, Y.M., Phillips, R., Milo, R., (2018). Distribusi biomassa di bumi. *Prosiding Natl. Jurnal Ilmu Pengetahuan Acad.* 115, 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>
- Bashiri, H., & Pourbeiram, N. (2016). Production of biodiesel through transesterification of soybean oil: A Monte Carlo kinetic study. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.006>
- Basu, P., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., Rao, S., Dhungana, A., & Acharya, B. (2014). Experimental and theoretical investigation of torefaction of large wet wood particles. *Bioresource Technology*, 159, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.022>
- Cekirge, H. M., & Raza, S. A. (2013). Assessment of the potential contribution of waste-to-energy facilities to electricity demand in Saudi Arabia. *Energy Policy*, 75, 402–406. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.014>
- Centi, G., & Perathoner, S. (2020). Chemistry and energy beyond fossil fuels: A perspective on the role of syngas from waste sources. *Catalysis Today*, 342, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.07.012>

- Chand, R., Borugadda, V. B., Qiu, M., & Dalai, A. K. (2019). Mengevaluasi potensi peningkatan bahan bakar nabati: Analisis komprehensif tentang bio-mentah dan bio residu dari pencairan hidrotermal biomassa pertanian. *Applied Energy*, 254, 113679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113679>
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). Recent advances in biomass torefaction, densification, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.019>
- Costello, R. and H. Chum. 1998. Biomass, bioenergy and carbon management. p. 11–17. In D. Wichert (Ed.). *Bioenergy '98: Expanding Bioenergy Partnerships*. Omni Press, Madison.
- Duti, I. J., Maliha, M., & Ahmed, S. (2016). Production of biodiesel from used cooking oil and its process simulation. *Journal of Modern Science and Technology*, 4, 50–62.
- Fan, H., Chang, X., Wang, J., & Zhang, Z. (2020). Catalytic pyrolysis of agricultural and forestry waste in a fixed-bed reactor using K₂CO₃ as a catalyst. *Waste Management Research*, 38, 78–87. <https://doi.org/10.1177/0734242X19888465>
- Gökkaya, D. S., Çokkuvvetli, T., Melengkung, L. M., Yuksel, M., & Balistik, L. (2019). Hydrothermal gasification of poplar wood chips using alkali, mineral, and metalcontaining activated carbon catalysts. *Journal of Supercritical Fluids*, 152, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104542>
- Gupta, S., Gupta, G. K., & Mondal, M. K. (2019). Pirolisis lambat dari kulit kenari yang diolah secara kimiawi untuk produk berharga: Pengaruh parameter proses dan analisis produk mendalam. *Energy*, 181, 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.086>
- Hai, I. U., Sher, F., Yaqoob, A., & Liu, H. (2019). Assessment of biomass energy potential for willow SRC wood chips in a pilot-scale fluidized bed gasifier. *Fuel*, 258, 116143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116143>
- Hamad, M. A., Radwan, A. M., Heggo, D. A., & Moustafa, T. (2016). Production of hydrogen rich gas from catalytic biomass gasification. *Renewable Energy*, 85, 1290–1300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.018>
- Hambali, E., S. Mujdalipah, A.H. Tambunan, A.W. Pattiwiri, dan R. Hendroko. 2007. *Teknologi Bioenergi*. Agromedia Pustaka, Jakarta
- Hu, W., Zhou, X., Tan, J., Hou, J., Xie, Y., Wang, X., Wang, Y., & Zhang, Y. (2020). In situ transesterification of wet waste sludge via hydrothermal process: Biodiesel production and residue utilization. *Bioenergy Biomass*, 141, 105715. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105715>
- 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.
- Itoh, T., Iwabuchi, K., Maemoku, N., Sasaki, I., & Taniguro, K. (2019). A new torefaction system using spontaneous heating of livestock manure under high pressure. *Waste Management*, 85, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.026>
- Jafar, M. M., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2020). Catalytic pyrolysis-hydrogenation of cellulose hemicellulose-lignin and agricultural biomass waste for synthetic natural gas production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 145, 104753. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104753>

- Katre, G., Raskar, S., Zinjarde, S., Kumar, V. R., Kulkarni, B. D., & RaviKumar, A. (2018). Optimization of in situ transesterification steps for biodiesel production using *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 grown on waste cooking oil. *Energy*, 142, 944–952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.034>
- Kumar, R., & Strezov, V. (2021). Thermochemical production of bio-oil: A review of downstream processing technologies for bio-oil upgrading, hydrogen production, and high-value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110152>
- Lê Thanh, K., Commandré, J. M., Valette, J., Volle, G., & Meyer, M. (2015). Detil identifikasi dan kuantifikasi dari condensablespecies yang dilepaskan selama torefaksi biomassa lignoselulosa. *Proses Bahan Bakar Technol.*, 139, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.04.022>
- Lee, S. Y., Sankaran, R., Kunyah, K. W., Tan, C. H., Krishnamoorthy, R., Chu, D. T., & Show, P. L. (2019). Waste to bioenergy: A review of recent conversion technologies. *BMC Energy*, 1, 4. <https://doi.org/10.1186/s42500-019-0004-5>
- Makwana, J. P., Pandey, J., & Mishra, G. (2019). Meningkatkan sifat gas produsen menggunakan gasifikasi suhu tinggi sekam padi dalam fluidized bed gasifier (FBG) skala pilot. *Renewable Energy*, 130, 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.008>
- Mohadesi, M., Aghel, B., Gouran, A., & Razmehgir, M. H. (2022). Transesterification of waste cooking oil using Clay/CaO as a solid base catalyst. *Energy*, 242, 122536. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122536>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfill technology: A review. *Chemical Engineering Letters*, 19, 1433–1456. <https://doi.org/10.1016/j.clepro.2021.02.011>
- Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2016). Biochar sebagai sumber daya hayati yang luar biasa untuk energi, agronomi, penyerapan karbon, karbon aktif, dan material khusus. *Waste and Biomass Valorization*, 7(1), 201–235. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9640-6>
- Patra, B. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). Slow pyrolysis of agro-food waste and physicochemical characterization of biofuel products. *Chemosphere*, 285, 131431. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131431>
- Pradana, W., & Bunyamin, A. (2021). Pemanfaatan Kayu Kaliandra Dan Limbah Teh Sebagai Bahan Baku Biobriket. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 25(1), 114–119. <https://doi.org/10.25077/jtpa.25.1.46-51.2021>
- Ren, Y., Wang, C., Dia, Z., Qin, Y., & Li, Y. Y. (2022). Enhanced lipid biomethanation through high solids co-digestion with food waste: Biogas production and lipid degradation demonstrated by long-term continuous operation. *Bioresource Technology*, 348, 126750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126750>
- Ruswin, N. D., & Adirizky, A. (2022). Prarancangan Pabrik Bioavtur Dari Cpo Kapasitas 5.213. 000 Kiloliter/Tahun.
- Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar from slow pyrolysis of gude stem and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101>
- Santos, R. G., & Alencar. (2020). Produksi syngas turunan biomassa melalui proses gasifikasi dan konversi katalitiknya menjadi bahan bakar dengan sintesis Fischer-Tropsch: Tinjauan.

- International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 18114–18132.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.151>
- Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). A review of torefaction technology for enhancing lignocellulosic biomass into solid biofuel. *BioEnergy Research*, 14(2), 645–669.
<https://doi.org/10.1007/s12155-021-10215-2>
- Setiawan, I. M. P., Mardawati, E., & Nurliasari, D. (2022). Pengaruh Temperatur Pengeringan Serta Dimensi Biobriket Tempurung Kelapa Terhadap Kualitas dan Kelayakan Ekonominya. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 26(2), 175–182.
- Singh, A., Nanda, S., Guayaquil-Sosa, J. F., & Berruti, F. (2021). Pyrolysis of Miscanthus and characterization of value-added bio-oil and biochar products. *Bioresource Technology Reports*, 99, S55–S68. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100209>
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. (2020). Ulasan tentang bahan baku, proses produksi, dan hasil untuk berbagai generasi biodiesel. *Fuel*, 262, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>
- Singh, S., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2020). Torefaction of *Acacia nilotica*: Distribusi oksigen dan mekanisme pemadatan karbon berdasarkan analisis mendalam terhadap produk padat, cair, dan gas. *Bahan Bakar Energi*, 34, 12586–12597.
<https://doi.org/10.1016/j.bfa.2020.12586>
- Rezania, S., Oryani, B., Taman, J., Hasemi, B., Yadav, K. K., Kwon, E. E., Hur, J., & Cho, J. (2019). Tinjauan tentang transesterifikasi sumber non-makanan untuk produksi biodiesel dengan fokus pada aspek ekonomi, sifat bahan bakar, dan aplikasi produk sampingan. *Energy Conversion and Management*, 201, 112155.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112155>
- Vaish, S., Kaur, G., Sharma, N. K., & Gakkhar, N. (2022). Estimation for Potential of Agricultural Biomass Sources as Projections of Bio-Briquettes in Indian Context. *Sustainability*, 14(5077), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su14095077>
- Vamvuka, D., Karouki, E., Sfakiotakis, S., & Salatino, P. (2012). Gasifikasi arang limbah biomassa oleh karbon dioksida melalui termogravimetri—Pengaruh katalis. *Fuel Science and Technology*, 184, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.049>
- Veljkovic, V. B., Bankovic-Ilic, I. B., & Stamenkovic, O. S. (2015). Pemurnian biodiesel mentah yang diperoleh dengan transesterifikasi yang dikatalisis secara heterogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 500–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.142>
- Vivek, C. P., Rochak, P. V., Suresh, P. S., & Raghavendra Ravi Kiran, K. (2019). Comparison Study on Fuel Briquettes Made of Eco-Friendly Materials for Alternate Source of Energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 577(012183), 1–8.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012183>
- Xu, G., Li, M., & Lu, P. (2019). Investigasi eksperimental pada sifat aliran biomassa yang berbeda dan bubuk biomassa torefied. *Bioenergi Biomassa*, 122, 63–75.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.001>
- Yu, S., Taman, J., Kim, M., Ryu, C., & Park, J. (2019). Characterization of biochar and by products from slow pyrolysis of hinoki cypress. *Bioresource Technology Reports*, 6, 217–222.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.08.002>
- Zaimes, G. G., Soratana, K., Mengeras, C. L., Landis, A. E., & Khanna, V. (2015). Biofuel from fast pyrolysis of perennial grass: A life cycle assessment of energy consumption and

greenhouse gas emissions. *Environmental Science & Technology*, 49(17), 10007–10018.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01703>

Zhang, T., Cao, D., Feng, X., Zhu, J., Lu, X., Mu, L., & Qian, H. (2022). Machine learning prediksi karakteristik bio-oil secara kuantitatif berkaitan dengan komposisi biomassa dan kondisi pirolisis. *Fuel*, 312, 122812. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122812>