

## Potensi Konversi Limbah Organik dengan Metode Pirolisis Menjadi *Biochar*, *Syngas* dan *Bio-Oil*: Tinjauan Literatur Sistematis

Reni Masrida\*<sup>1</sup>, Wahyu Kartika<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, UBJ, Jakarta, Indonesia

e-mail: \*<sup>1</sup>[reni.masrida@ubharajaya.ac.id](mailto:reni.masrida@ubharajaya.ac.id), [renimasrida.2024@student.uny.ac.id](mailto:renimasrida.2024@student.uny.ac.id),  
[wahyu.kartika@dsn.ubharajaya.ac.id](mailto:wahyu.kartika@dsn.ubharajaya.ac.id)

### Abstract

Indonesia has a major challenge in organic waste management, with household waste being the main component. Pyrolysis methods offer a promising solution to address this problem by converting organic waste into valuable products such as biochar, syngas, and bio-oil. This article analyzes the potential of pyrolysis methods in managing organic waste in Indonesia, including the physicochemical characteristics and applications of pyrolysis products. A systematic literature study was used to review various sources related to organic waste treatment. Pyrolysis is the thermal decomposition of organic materials under oxygen-poor conditions at high temperatures (300-700°C), producing biochar, bio-oil, and syngas. This method provides a more environmentally friendly alternative to incineration and landfilling, with a wide range of potential applications for the resulting products.

**Keywords :** Biochar, Syngas, Bio-Oil, Pyrolysis, household and environmental waste

### Abstrak

Indonesia menghadapi tantangan besar dalam pengelolaan limbah organik, dengan limbah rumah tangga menjadi komponen utama. Metode pirolisis menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah ini dengan mengubah limbah organik menjadi produk bernilai seperti *biochar*, *syngas*, dan *bio-oil*. Artikel ini menganalisis potensi metode pirolisis dalam mengelola limbah organik di Indonesia, termasuk karakteristik fisikokimia dan aplikasi produk-produk pirolisis. Studi literatur sistematis digunakan untuk meninjau berbagai sumber terkait pengolahan limbah organik. Pirolisis adalah dekomposisi termal material organik dalam kondisi minim oksigen pada suhu tinggi (300-700°C), menghasilkan *biochar*, *bio-oil*, dan *syngas*. Metode ini menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pembakaran dan penimbunan, dengan potensi aplikasi yang luas untuk produk-produk yang dihasilkan.

**Kata Kunci:** *Biochar*, *Syngas*, *Bio-Oil*, *Pirolisis*, limbah rumah tangga dan lingkungan

### PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara dengan populasi yang besar dan tingkat konsumsi yang terus meningkat, menghadapi tantangan signifikan dalam pengelolaan limbah terutama limbah rumah tangga berupa limbah organik yang menjadi komponen utama. Diperkirakan bahwa Indonesia merupakan salah satu penyumbang sampah makanan terbesar di dunia, dengan rata-rata produksi mencapai sekitar 300 kg/orang/tahun (Listiana et al., 2024). Secara keseluruhan, limbah organik mendominasi komposisi sampah di Indonesia, menyumbang lebih dari 70% dari total volume sampah yang dihasilkan (Singh et al., 2017). Penumpukan limbah organik dalam jumlah besar di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Proses dekomposisi anaerobik limbah organik menghasilkan emisi gas rumah kaca yang kuat seperti metana dan amonia, yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pencemaran udara. Selain itu, air lindi (*leachate*) yang dihasilkan dari TPA dapat mencemari air tanah dan tanah di sekitarnya, sementara keberadaan limbah organik yang tidak terkelola juga dapat menjadi tempat berkembang biaknya vektor penyakit yang membahayakan kesehatan masyarakat (Singh et al., 2017).

Metode pengelolaan limbah konvensional yang umum diterapkan di Indonesia, seperti penimbunan di TPA dan pembakaran terbuka, memiliki berbagai keterbatasan dan dampak negatif. Penimbunan memerlukan lahan yang luas dan semakin sulit diperoleh, serta menghasilkan emisi gas berbahaya. Pembakaran terbuka, di sisi lain, menghasilkan polutan udara yang dapat merusak kualitas

udara dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk mengidentifikasi dan mengadopsi solusi pengelolaan limbah organik yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan, yang dapat mengurangi volume limbah yang dibuang ke TPA dan meminimalkan dampak negatifnya terhadap lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemerintah dan berbagai komunitas di Indonesia telah menunjukkan peningkatan kesadaran dan inisiatif dalam mengatasi masalah limbah organik. Berbagai program dan pendekatan telah diuji coba, termasuk metode biologis seperti pengomposan dan pemanfaatan larva maggot (*Black Soldier Fly*) untuk biokonversi limbah organik (Singh et al., 2017). Inisiatif-inisiatif ini menunjukkan adanya potensi dan kesadaran di tingkat lokal terhadap solusi inovatif pengelolaan limbah organik, yang dapat menjadi landasan untuk implementasi teknologi yang lebih maju seperti pirolisis.

Metode pirolisis menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan limbah organik di Indonesia. Pirolisis didefinisikan sebagai proses dekomposisi termokimia material organik melalui pemanasan pada suhu tinggi (umumnya antara 300 hingga 700°C) dalam lingkungan tanpa atau minim oksigen. Proses ini mampu mengkonversi berbagai jenis limbah organik, termasuk limbah pertanian, kehutanan, makanan, dan peternakan, menjadi tiga produk utama yang bernilai: biochar (padat), syngas (gas), dan bio-oil (cair) (*ApplicationOfBiocharInAgriculturalSystems\_031124L-G.Pdf*, n.d.)

Pirolisis menawarkan alternatif pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pembakaran yang menghasilkan emisi polutan berbahaya dan penimbunan yang menghasilkan metana (6673eef9af815833da3b7031\_biochar Process Explain How It Works (1), n.d.). Teknologi ini juga sangat relevan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana limbah organik diubah menjadi sumber daya yang dapat digunakan kembali dalam berbagai aplikasi, sehingga mengurangi ketergantungan pada sumber daya primer. Artikel ini bertujuan untuk menganalisis potensi metode pirolisis dalam mengelola dan memanfaatkan limbah organik, memberikan rekomendasi yang komprehensif untuk pengembangan dan implementasi teknologi pirolisis limbah organik di Indonesia sebagai bagian dari strategi pengelolaan limbah yang berkelanjutan, serta mengevaluasi keberlanjutan dan manfaat lingkungan dari teknologi pirolisis dibandingkan dengan metode pengelolaan limbah lainnya yang umum digunakan di Indonesia. Ruang lingkup artikel ini mencakup *review* mengenai karakteristik fisikokimia dan potensi aplikasi dari produk-produk pirolisis (*biochar*, *syngas*, dan *bio-oil*) yang dihasilkan dari berbagai jenis limbah organik.

## METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan metode kualitatif dengan menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR) yaitu dengan menelaah sumber bacaan yang ada hubungannya dengan kajian yang dibahas, serta dengan menggunakan studi dokumen hasil-hasil penelitian sebelumnya yang ada hubungannya dengan pengolahan limbah organik. Pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri buku-buku bacaan, *web page*, jurnal ilmiah yang terbit di google scholar, scopus ai, serta perpustakaan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Mengenal Metode Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi termal material organik (berbasis karbon) yang terjadi pada suhu tinggi, biasanya dalam rentang 300 hingga 700°C, dalam lingkungan yang kekurangan atau tanpa oksigen. Proses ini melibatkan pemutusan ikatan kimia dalam material organik, menghasilkan tiga jenis produk utama: produk padat (*biochar*), produk cair (*bio-oil* atau *tar*), dan produk gas (*syngas* atau gas pirolisis). Perbedaan utama antara pirolisis dan insinerasi adalah tidak adanya oksigen dalam proses pirolisis, yang mencegah terjadinya pembakaran sempurna. Pirolisis juga berbeda dari gasifikasi yang melibatkan oksigen terbatas atau uap air. Prinsip dasar pirolisis yang membedakannya dari proses termal lainnya adalah kondisi anaerobik atau minim oksigen. Berikut ini beberapa metode pirolisis yang digunakan berdasarkan kondisi operasi dan produk yang dihasilkan:

- **Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*):** Dilakukan dengan laju pemanasan yang rendah (< 20 °C/menit) dan waktu tinggal yang relatif lama (> 1 jam) pada suhu antara 300 hingga 700 °C. Produk utama yang dihasilkan adalah biochar dengan hasil yang tinggi (25-35% berat). Jenis pirolisis ini sangat cocok untuk produksi biochar yang digunakan sebagai penyubur tanah dan

untuk sequestrasi karbon jangka panjang.

- **Pirolisis Cepat (*Fast Pyrolysis*):** Menggunakan laju pemanasan yang sangat cepat ( $> 200$  °C/menit) dan waktu tinggal uap yang singkat ( $< 10$  menit) pada suhu antara 400 hingga 800 °C.<sup>6</sup> Produk utama yang dihasilkan adalah bio-oil dengan hasil yang tinggi (60-70% berat), bersama dengan biochar (15-25%) dan syngas (10-15%) sebagai produk samping. Fokus utama dari pirolisis cepat adalah produksi bahan bakar cair.
- **Pirolisis Kilat (*Flash Pyrolysis*):** Melibatkan laju pemanasan yang ekstrem ( $> 1000$  °C/detik) dengan waktu tinggal uap yang sangat singkat ( $< 2$  detik) pada suhu antara 900 hingga 1300 °C, biasanya menggunakan partikel bahan baku yang sangat kecil. Produk utama yang dihasilkan adalah gas dan bio-oil dengan hasil yang tinggi.
- **Jenis Pirolisis Lain:** *Torrefaction*, *Hydrothermal Carbonization* (HTC), *Microwave-Assisted Pyrolysis* (MAP), *Co-pyrolysis*, dan *Autothermal Pyrolysis* juga merupakan variasi dari metode pirolisis yang digunakan untuk tujuan dan jenis bahan baku yang spesifik.

Pilihan metode pirolisis dengan melakukan rekayasa terhadap kondisi operasi akan memungkinkan menghasilkan produk sesuai dengan yang paling diinginkan berdasarkan jenis limbah organik yang digunakan dan tujuan aplikasinya. Parameter operasi pirolisis memiliki peran penting dalam menentukan hasil dan kualitas produk. Temperatur merupakan faktor utama, dimana pada temperature rendah menghasilkan lebih banyak *biochar* dan temperatur tinggi akan meningkatkan produksi gas dan *bio-oil*. Laju pemanasan yang cepat mendukung produksi *bio-oil* dalam pirolisis cepat. Waktu tinggal, atau lama material berada dalam reaktor pada suhu tinggi memberikan pengaruh kepada tingkat dekomposisi dan jenis produk yang dominan. Ukuran partikel bahan baku dimana dalam hal ini ukuran yang lebih kecil akan memberikan efek perpindahan panas yang lebih efisien. Penggunaan katalis jika diperlukan dapat meningkatkan laju reaksi dan selektivitas produk. Selain itu, tekanan operasi (atmosferik, vakum, atau tinggi) juga mempengaruhi hasil dan komposisi produk, sehingga perlu diupayakan untuk mengoptimalkan parameter penting ini dengan merancang proses pirolisis yang efisien dan menghasilkan produk dengan karakteristik yang diinginkan.

### Potensi Limbah Organik di Indonesia sebagai Bahan Baku Pirolisis

Indonesia memiliki sumber daya limbah organik yang sangat melimpah dan beragam, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pirolisis. Sebagai negara agraris, Indonesia menghasilkan limbah pertanian dengan volume yang sangat besar setiap tahunnya, termasuk jerami padi, sekam, tongkol jagung, ampas tebu, dan berbagai residu tanaman lainnya yang merupakan sumber biomassa lignoselulosa yang potensial. Limbah kehutanan seperti serbuk gergaji, potongan kayu, ranting, dan residu industri pengolahan kayu lainnya yang kaya akan lignin dan selulosa juga tersedia dalam jumlah signifikan. Populasi yang besar dan tingkat konsumsi yang tinggi, terutama di wilayah perkotaan, menghasilkan sampah makanan dari rumah tangga, restoran, pasar, dan industri pengolahan makanan yang juga sangat signifikan dijadikan sebagai bahan baku untuk proses pirolisis dan akan memberikan peluang untuk mempercepat reduksi limbah rumah tangga yang belum dapat dikelola dengan baik di beberapa kota besar di Indonesia. Limbah peternakan seperti kotoran sapi, ayam, dan hewan ternak lainnya juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pirolisis, meskipun karakteristiknya berbeda karena kandungan nutrisi dan abu yang lebih tinggi, selain itu limbah biomassa lain seperti alga dan lumpur tinja juga berpotensi untuk diolah melalui pirolisis. Ketersediaan limbah organik yang melimpah di seluruh Indonesia memastikan adanya pasokan bahan baku yang berkelanjutan untuk pengembangan industri pirolisis. Sebagai gambaran umum untuk teknologi pirolisis dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Teknologi Pirolisis yang Berkembang dengan Berbagai Kelebihan dan Kekurangannya

Pyrolysis method	Conditions & yield	Scalability, efficiency, environmental impact, limitations and barriers*
Slow pyrolysis	Temp: 300–700 °C; Heating rate: 1–10 °C·min <sup>-1</sup> ; Residence time: > 1 h; Bio-oil: ~30%; Biochar: ~35%; Gases: ~35%	Adaptable to various scales; High biochar yield, efficient carbonization; Low emissions if designed properly, but high energy use, long processing times, feedstock quality variability; High costs, infrastructure investment, feedstock consistency
Fast pyrolysis	Temp: 400–800 °C; Heating rate: 20–200 °C·min <sup>-1</sup> ; Residence time: < 10 min; Bio-oil: ~50%; Biochar: ~20%; Gases: ~30%	Scalable from small to large; High bio-oil yield, rapid decomposition; Sustainable but high energy consumption, advanced combustion required; Lower biochar yield, feedstock consistency, heat transfer challenges
Flash pyrolysis	Temp: 900–1300 °C; Heating rate: > 1000 °C·s <sup>-1</sup> ; Residence time: < 10 s; Bio-oil: ~75%; Biochar: ~12%; Gases: ~13%	Suitable for various scales; Efficient conversion, minimal by-products; Reduces dependence on non-renewables, bio-oil needs refining; Expensive equipment, complex by-product separation, high capital cost
Microwave pyrolysis	Temp: 300–600 °C; Heating rate: 15–30 min; Bio-oil: ~15%; Biochar: ~50%; Gases: ~35%	Scalable from laboratory to industrial; Fast heating, efficient biochar production; Reduced energy consumption, higher product quality; Low yield, expensive equipment, scaling issues, uniform heating challenges
Co-pyrolysis	Temp: 300–1200 °C; Heating rate and residence time vary; Bio-oil: ~32%; Biochar: ~40%; Gases: ~28%	Adaptable scalability; Enhances biochar yield with mixed feedstocks; Reduces waste and emissions; Feedstock variability, complex equipment; Scaling challenges, quality control, by-product separation
Hydrothermal carbonization	Temp: 220–240 °C; Pressure: 2–10 MPa; Residence time: 1–72 h; Bio-oil: ~25%; Hydrochar: ~65%; Gases: ~10%	Mostly batch systems, pilot scale; High carbon conversion, low energy use; Reduces waste, mitigates GHG; Longer processing, feedstock variability; Scale-up challenges, reactor design issues
Autothermal pyrolysis	Pre-heat temp: ~450 °C, Heating rate: ~10 °C·min <sup>-1</sup> ; Residence time: ~10 min; Bio-oil: ~50%; Biochar: ~30%; Gases: ~20%	Flexible scalability; Self-sustained thermal process, energy-efficient; Lower carbon footprint, promotes circular economy; Complex reactor design, supplemental energy needs, energy balance and scaling challenges

Sumber : (Loc & Phuong, 2025)

Tabel 1 diatas memberikan gambaran secara umum bahwa dengan metode pirolisis dapat memberikan berbagai produk dengan mengendalikan kondisi operasi akan tetapi masing-masing metode di atas juga memiliki kekurangan dan kelebihan. Komposisi kimia limbah organik di Indonesia sangat bervariasi tergantung dari jenis dan sumber limbah tersebut berasal. Limbah pertanian umumnya kaya akan selulosa (37-50%), hemiselulosa (20-30%), dan lignin (10-25%), dengan kandungan abu yang rendah.<sup>52</sup> Limbah kayu memiliki kandungan selulosa (40-50%), hemiselulosa (20-30%), dan lignin (25-35%) yang lebih seimbang (Awad et al., 2024). Limbah makanan memiliki kandungan air yang sangat tinggi (hingga 90%), serta proporsi karbohidrat, protein, dan lemak yang bervariasi. Kandungan abu dalam limbah makanan juga dapat bervariasi tergantung pada jenis makanan. Pemahaman mendalam tentang komposisi kimia dari berbagai jenis limbah organik di Indonesia sangat penting untuk merancang dan mengoperasikan reaktor pirolisis secara efektif. Komposisi bahan baku akan secara langsung mempengaruhi hasil dan kualitas *biochar*, *syngas*, dan *bio-oil* yang dihasilkan. Analisis komposisi sangat diperlukan yang akan memungkinkan optimasi parameter operasi pirolisis untuk setiap jenis limbah.

### Biochar dari Pirolisis Limbah Organik

Biochar adalah material padat yang kaya akan karbon, memiliki struktur berpori, dan sangat stabil secara kimia. Material ini memiliki luas permukaan yang sangat tinggi, yang berkisar antara 15 hingga

700 m<sup>2</sup>/g atau lebih, tergantung pada bahan baku dan kondisi pirolisis. Kapasitas tukar kation (KTK) biochar umumnya tinggi, memungkinkannya untuk menahan dan melepaskan nutrisi dalam tanah. pH biochar biasanya bersifat basa, dengan nilai pH dapat berkisar antara 7 hingga 12, tergantung pada bahan baku dan suhu pirolisis. Kandungan nutrisi dalam biochar, seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), bervariasi tergantung pada jenis limbah organik yang digunakan sebagai bahan baku (Devi & Rawat, 2021). Biochar dari kotoran hewan cenderung memiliki kandungan nutrisi yang lebih tinggi. Struktur pori dan sifat permukaan biochar dapat dimodifikasi melalui pemilihan parameter operasi pirolisis (suhu, waktu tinggal) dan melalui proses aktivasi kimia atau fisik.

Biochar yang dihasilkan dari pirolisis limbah organik dapat diaplikasikan di berbagai bidang seperti: bidang pertanian, biochar digunakan sebagai penyubur tanah karena kemampuannya meningkatkan retensi air dan nutrisi, terutama pada tanah berpasir. Biochar juga meningkatkan aerasi dan struktur tanah, memfasilitasi pertumbuhan akar dan aktivitas mikroba yang menguntungkan. Selain itu, biochar meningkatkan ketersediaan nutrisi penting bagi tanaman terutama untuk unsur N, P, K dan mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian, yang pada akhirnya dapat meningkatkan hasil panen, terutama pada tanah yang kurang subur. Sifat basa biochar juga membantu menstabilkan pH tanah, terutama pada tanah asam. Ditinjau dari aspek lingkungan, biochar berperan penting dalam sequestrasi karbon karena merupakan bentuk karbon yang stabil dan dapat menyimpan karbon dalam tanah selama ratusan hingga ribuan tahun, membantu mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer. Biochar juga memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi, sehingga dapat digunakan dalam remediasi lingkungan untuk menyerap polutan organik dan anorganik dalam tanah dan air, termasuk logam berat dan pestisida. Selain diaplikasikan ke tanah, biochar juga berpotensi digunakan sebagai bahan baku untuk material konstruksi, media filter air dan udara, adsorben untuk menghilangkan bau, bahan tambahan dalam pakan ternak, dan bahkan dalam produksi energi sebagai bahan bakar padat. Konduktivitas listrik biochar juga membuka peluang untuk aplikasi dalam baterai dan superkapasitor.

Potensi ekonomi biochar cukup menjanjikan karena penggunaan biochar dapat mengurangi kebutuhan dan biaya pupuk kimia sintetis bagi petani, sekaligus menciptakan peluang pasar baru untuk produk biochar sebagai penyubur tanah organik yang ramah lingkungan. Terdapat potensi lain sebagai pendapatan tambahan melalui penjualan kredit karbon untuk sequestrasi karbon yang dicapai oleh aplikasi biochar. Ditinjau dari pengelolaan limbah padat domestik, penggunaan pirolisis untuk menghasilkan biochar dapat mengurangi volume limbah organik yang masuk ke TPA, sehingga berpotensi mengurangi biaya pengelolaan limbah. Pengembangan industri biochar juga berpotensi mendorong pertumbuhan ekonomi lokal dan menciptakan lapangan kerja baru dalam produksi, dan distribusi.

### **Syngas dari Pirolisis Limbah Organik**

*Syngas*, atau gas sintesis, yang dihasilkan dari pirolisis limbah organik merupakan campuran gas yang terdiri dari karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H<sub>2</sub>) dalam berbagai rasio, selain itu, *syngas* juga dapat mengandung karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), nitrogen (N<sub>2</sub>), uap air (H<sub>2</sub>O), dan sejumlah kecil hidrokarbon lain serta spesies reaktif seperti H<sub>2</sub>S dan tar. Komposisi *syngas* sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan baku limbah organik yang digunakan dan parameter operasi pirolisis seperti suhu, laju pemanasan, dan waktu tinggal. *Syngas* yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa atau limbah sering kali mengandung tar dan kotoran lain yang perlu dihilangkan sebelum digunakan dalam aplikasi tertentu (Alex Tabibi, n.d.). Tabel 2 menyajikan komposisi umum dari *syngas*.

Tabel 2 Komposisi *Syngas*

Komposisi	Formula	%
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	25-35
Carbon Monoxide	CO	35-40
Hydrogen	H <sub>2</sub>	20-40

Methane	CH <sub>4</sub>	0-15
Nitrogen	N <sub>2</sub>	2-5

Sumber : (Zhao et al., 2019)

*Syngas* dari pirolisis limbah organik bersifat mudah terbakar dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui berbagai cara seperti sebagai bahan bakar langsung untuk menghasilkan panas dalam boiler industri dan rumah tangga, sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik baik dalam turbin gas maupun mesin pembakaran internal, terutama dalam sistem pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) penggunaan skala kecil hingga menengah yang sering kali dikonfigurasi sebagai *combined heat and power* (CHP) untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan. *Syngas* juga dapat diubah menjadi bahan bakar cair sehingga lebih mudah disimpan dan diangkut, seperti metanol, etanol, diesel sintesis, dan bahkan bahan bakar penerbangan, melalui proses kimia lanjutan seperti sintesis Fischer-Tropsch (Alex Tabibi, n.d.). *Syngas* yang kaya akan hidrogen juga dapat diproses lebih lanjut untuk menghasilkan hidrogen murni, yang merupakan sumber energi bersih yang penting untuk berbagai aplikasi, termasuk dalam sel bahan bakar untuk kendaraan listrik dan pembangkit listrik stasioner. Limbah organik dengan proses pirolisis juga dapat dikonversi menjadi bahan baku untuk industri kimia, seperti sebagai bahan dasar untuk produksi metanol, yang merupakan prekursor penting untuk berbagai bahan kimia lain seperti asam asetat dan formaldehida. Aplikasi lain dari *syngas* merupakan bahan baku utama dalam produksi amonia melalui proses Haber-Bosch, yang sangat penting untuk pembuatan pupuk nitrogen, juga bisa dimanfaatkan dalam proses hidrogenasi di kilang minyak.

Efisiensi produksi *syngas* dari pirolisis limbah organik sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan parameter operasi proses pirolisis. Pirolisis cepat yang dijalankan pada suhu tinggi dan dengan waktu tinggal yang singkat umumnya menghasilkan lebih banyak *syngas* dibandingkan dengan pirolisis lambat. Penggunaan katalis dalam proses pirolisis akan meningkatkan efisiensi konversi *biomassa* menjadi *syngas* dan akan mempengaruhi komposisi gas yang dihasilkan, seperti halnya akan meningkatkan rasio hidrogen terhadap karbon monoksida. Pra-perlakuan bahan baku seperti pengeringan yang bertujuan untuk mengurangi kadar air dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan proses gasifikasi *syngas* (Alex Tabibi, n.d.), sehingga untuk memaksimalkan potensi *syngas* sebagai sumber energi dan bahan baku kimia, penting untuk mengoptimalkan parameter operasi pirolisis berdasarkan karakteristik limbah organik yang digunakan.

### **Bio-Oil dari Pirolisis Limbah Organik**

*Bio-oil* yang dihasilkan dari pirolisis *biomassa*, termasuk limbah organik dengan fasa berupa cairan kental berwarna coklat tua hingga hitam dengan bau yang menyengat, menyerupai asap cair. Komposisinya sangat kompleks, terdiri dari campuran air (15-35% berat), senyawa organik teroksidasi seperti asam karboksilat, aldehida, keton, ester, fenol, dan lignin pirolitik, serta sejumlah kecil senyawa hidrokarbon. *Bio-oil* bersifat asam dengan nilai pH biasanya berkisar antara 2 hingga 4, yang membuatnya korosif terhadap beberapa material (Kabir et al., 2023). Viskositas *bio-oil* cenderung tinggi dan dapat meningkat seiring dengan penyimpanan karena terjadinya polimerisasi dan reaksi-reaksi lain (Kabir et al., 2023). Nilai kalor *bio-oil* umumnya lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil, biasanya sekitar setengah hingga dua pertiganya, karena kandungan oksigen dan air yang tinggi. *Bio-oil* tidak mudah bercampur dengan bahan bakar hidrokarbon konvensional karena sifatnya yang polar. Gambar 1 menjelaskan profil *bio-oil* dari proses pirolisis.



Gambar 1 Bio-oil dari Proses Pirolisis Temperatur Tinggi  
Sumber: (Zhao et al., 2019)

Mengingat karakteristik *bio-oil* yang kurang ideal untuk aplikasi bahan bakar langsung, diperlukan proses peningkatan kualitas (*upgrading*) untuk meningkatkan nilai kalor, stabilitas, dan mengurangi keasaman serta viskositasnya. Perbaikan karakteristik *bio-oil* yang dihasilkan dapat dilakukan dengan metode deoksigenasi, yang bertujuan untuk menghilangkan kandungan oksigen yang tinggi dalam *bio-oil*. Proses ini dapat dilakukan melalui *hydrotreating* (HDT), dimana *bio-oil* direaksikan dengan hidrogen bertekanan tinggi menggunakan katalis berbasis logam transisi seperti NiMo atau CoMo untuk menghilangkan oksigen dalam bentuk air. Metode lain adalah *catalytic cracking* (CC), yang menggunakan katalis seperti *zeolit* untuk memecah molekul-molekul besar dalam *bio-oil* menjadi senyawa yang lebih ringan dan menghilangkan oksigen dalam bentuk air dan CO<sub>2</sub>. Perlu diperhatikan bahwa keasaman *bio-oil* dapat dikurangi melalui esterifikasi, yaitu reaksi dengan alkohol (biasanya metanol atau etanol) menggunakan katalis asam untuk mengubah asam karboksilat menjadi ester (Zhao et al., 2019). Emulsifikasi, yaitu pencampuran *bio-oil* dengan bahan bakar fosil seperti diesel menggunakan surfaktan, juga dapat meningkatkan stabilitas dan memungkinkan penggunaan dalam mesin diesel yang dimodifikasi.

*Bio-oil* dari limbah organik memiliki potensi aplikasi yang cukup luas, bisa sebagai bahan bakar maupun sebagai sumber bahan kimia. Pada sektor energi, *bio-oil* bisa dimanfaatkan langsung sebagai bahan bakar dalam boiler industri dan *furnace* untuk menghasilkan panas, akan tetapi diperlukan *pre-treatment* agar kualitasnya *bio-oil* dapat digunakan sebagai bahan bakar transportasi dalam mesin diesel dan turbin gas, atau sebagai komponen campuran dengan bahan bakar fosil. *Bio-oil* juga mengandung berbagai senyawa kimia organik yang dapat diekstraksi dan digunakan sebagai bahan baku untuk produksi bahan kimia bernilai tambah, seperti fenol, asam asetat, furfural, dan gliserol. Komponen-komponen ini juga dapat diolah lebih lanjut untuk menghasilkan monomer yang digunakan dalam produksi plastik dan polimer. *Bio-oil* juga berpotensi sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel generasi kedua melalui proses *upgrading*.

### Analisis Keberlanjutan dan Manfaat Lingkungan

Berdasarkan uraian di atas terkait pemanfaatan pirolisis, limbah organik dengan proses pirolisis menawarkan sejumlah manfaat keberlanjutan dan lingkungan dibandingkan dengan metode pengelolaan limbah lainnya. Jika penggunaan pirolisis dapat dimanfaatkan secara efektif akan memberikan efek terhadap TPA, yaitu dapat mengurangi volume limbah organik SECARA SIGNIFIKAN yang perlu dikirim ke TPA, sehingga memperpanjang masa pakai TPA dan mengurangi kebutuhan lahan. Pirolisis menghindari emisi metana, gas rumah kaca yang jauh lebih kuat daripada CO<sub>2</sub>, yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik limbah organik di TPA. Residu padat dari pirolisis, biochar, juga dapat memiliki aplikasi yang bermanfaat, termasuk potensi untuk digunakan sebagai penutup TPA.

Dibandingkan dengan pembakaran (*insinerasi*), pirolisis umumnya menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara yang lebih rendah, terutama jika prosesnya dioptimalkan, selain itu pirolisis menghasilkan produk-produk bernilai seperti biochar, syngas, dan bio-oil, bukan hanya abu yang seringkali memerlukan penanganan lebih lanjut. Pirolisis juga memiliki fleksibilitas yang lebih besar dalam jenis limbah organik yang dapat diolah, termasuk beberapa jenis yang mungkin kurang

cocok untuk pembakaran karena kandungan air atau komposisi lainnya. Pirolisis umumnya merupakan proses yang lebih cepat dibandingkan pengomposan. Pirolisis juga memiliki fleksibilitas yang lebih besar dalam jenis limbah organik yang dapat diolah, termasuk limbah yang mungkin tidak ideal untuk pengomposan seperti limbah berlemak atau berminyak.<sup>7</sup> Menariknya, biochar yang dihasilkan dari pirolisis dapat digunakan sebagai aditif dalam proses pengomposan untuk meningkatkan kualitas kompos dan mengurangi emisi gas ammonia (*Ex Situ Soil Remediation Technology*, n.d.).

Salah satu manfaat lingkungan dari pirolisis limbah organik adalah potensinya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Biochar yang dihasilkan merupakan bentuk karbon yang stabil dan dapat menyimpan karbon dalam tanah selama jangka waktu yang sangat panjang (sekuestrasi karbon), sehingga mencegah pelepasan CO<sub>2</sub> ke atmosfer. Selain itu, Syngas dan *bio-oil* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil untuk produksi energi (listrik, panas) dan bahan bakar transportasi, sehingga mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dari pembakaran bahan bakar fosil. Penggunaan biochar dalam pertanian juga dapat mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia berbasis nitrogen, yang produksinya menghasilkan emisi gas rumah kaca seperti N<sub>2</sub>O. Terakhir, pengalihan limbah organik dari TPA ke proses pirolisis secara signifikan dapat menghindari emisi metana, yang merupakan gas rumah kaca yang jauh lebih kuat daripada CO<sub>2</sub>.

### Studi Kasus dan Implementasi Teknologi Pirolisis Limbah Organik di Indonesia dan Tingkat Global

Implementasi teknologi pirolisis limbah organik skala besar di Indonesia masih relatif terbatas, namun terdapat peningkatan minat dan penelitian dalam beberapa tahun terakhir (Cahyono, 2023). Beberapa penelitian telah mengeksplorasi potensi pirolisis untuk mengolah limbah pertanian seperti jerami padi dan sekam padi menjadi biochar untuk aplikasi tanah (Cahyono, 2023). Mengingat Indonesia adalah negara agraris dengan produksi limbah pertanian yang melimpah, terdapat potensi besar untuk mengimplementasikan teknologi pirolisis di kawasan-kawasan dengan produksi limbah organik yang tinggi, seperti kawasan pertanian intensif, wilayah perkotaan dengan populasi padat, dan kawasan industri pengolahan makanan.

Di tingkat global, teknologi pirolisis limbah organik telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam berbagai aplikasi. Di Eropa dan Amerika Utara, proyek-proyek telah berhasil menghasilkan biochar dari limbah pertanian dan kehutanan untuk digunakan sebagai penyubur tanah dan dalam aplikasi remediasi lingkungan (Mark Hertsgaard, n.d.). Beberapa perusahaan telah berhasil mengkomersialkan produksi *bio-oil* dari biomassa dan limbah organik sebagai bahan bakar alternatif untuk pembangkit listrik dan bahkan sebagai bahan bakar transportasi setelah proses upgrading (International Energy Agency, n.d.). Teknologi pirolisis juga semakin banyak digunakan untuk mengolah limbah plastik dan sampah kota menjadi bahan bakar dan bahan kimia, menunjukkan fleksibilitasnya dalam menangani berbagai jenis limbah organik dan anorganik (Islam et al., 1970). Pengalaman global ini memberikan wawasan dan pembelajaran berharga untuk potensi implementasi di Indonesia.

Teknologi pirolisis limbah organik selain menawarkan banyak manfaat, implementasinya juga menghadapi sejumlah tantangan. Biaya investasi awal untuk pembangunan pabrik pirolisis, termasuk reaktor dan peralatan pendukung, bisa sangat tinggi (Frolov, 2021), selain itu, ketersediaan infrastruktur pengumpulan, pemilahan, dan pengolahan limbah organik yang efisien dan terorganisir masih menjadi kendala di banyak daerah di Indonesia. Mengoptimalkan OPTIMALISASI proses pirolisis untuk berbagai jenis limbah organik dengan karakteristik yang berbeda memerlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut agar mencapai hasil dan kualitas produk yang diinginkan. Pengembangan pasar untuk produk-produk pirolisis seperti biochar, syngas, dan *bio-oil* di Indonesia masih belum sepenuhnya terbentuk dan memerlukan upaya pemasaran dan edukasi yang lebih intensif. Regulasi dan kebijakan yang secara spesifik mendukung pengembangan dan implementasi teknologi pirolisis limbah organik mungkin juga belum memadai atau perlu diselaraskan untuk mendorong investasi dan adopsi teknologi ini.<sup>8</sup>

Peluang pengembangan teknologi pirolisis limbah organik di Indonesia sangat besar meskipun terdapat tantangan dalam implementasinya. Potensi bahan baku limbah organik yang melimpah dan berkelanjutan merupakan aset yang signifikan.<sup>11</sup> Teknologi pirolisis dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap target energi terbarukan nasional dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar

fosil. Pengembangan industri pirolisis limbah organik juga dapat menciptakan peluang bisnis baru dan lapangan kerja di berbagai sektor, mulai dari pengumpulan limbah hingga produksi dan aplikasi produk pirolisis. Aplikasi biochar dalam pertanian memiliki potensi untuk meningkatkan produktivitas lahan, mengurangi biaya pupuk, dan meningkatkan kesejahteraan petani. Adanya dukungan dan komitmen dari pemerintah terhadap pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan pengembangan teknologi hijau menciptakan lingkungan yang kondusif untuk pertumbuhan industri pirolisis (Frolov, 2021).

## **KESIMPULAN DAN SARAN**

Metode pirolisis menunjukkan potensi yang sangat besar untuk mengkonversi limbah organik yang melimpah di Indonesia menjadi produk-produk bernilai seperti *biochar*, *syngas*, dan *bio-oil*. Produk-produk ini memiliki berbagai aplikasi yang bermanfaat di sektor pertanian, energi, dan industri kimia, serta berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan dan ekonomi. Implementasi teknologi pirolisis dapat membantu Indonesia mengatasi masalah pengelolaan limbah organik yang semakin mendesak, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan menciptakan sumber daya terbarukan. Peluang pengembangan teknologi pirolisis di Indonesia sangat menjanjikan mengingat ketersediaan bahan baku dan dukungan pemerintah terhadap solusi pengelolaan limbah yang berkelanjutan meskipun terdapat tantangan dalam implementasinya.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- 6673eef9af815833da3b7031\_biochar process explain how it works (1). (n.d.).
- Alex Tabibi. (n.d.). *Pyrolysis: Transforming Waste Materials into Valuable Resources*. January 30, 2024. <https://green.org/2024/01/30/pyrolysis-transforming-waste-materials-into-valuable-resources/>
- ApplicationOfBiocharInAgriculturalSystems\_031124L-G.pdf*. (n.d.).
- Awad, M. I., Makkawi, Y., & Hassan, N. M. (2024). Yield and Energy Modeling for Biochar and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents. *ACS Omega*, 9(16), 18654–18667. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646>
- Cahyono, M. S. (2023). *Pyrolysis Process of Organic Waste into Bio-Oil as an Alternative Fuel*. 5(1), 1–7.
- Devi, M., & Rawat, S. (2021). A comprehensive review of the pyrolysis process: From carbon nanomaterial synthesis to waste treatment. *Oxford Open Materials Science*, 1(1), 1–30. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itab014>
- Ex Situ Soil Remediation Technology*. (n.d.). 2020. <https://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-25.html>
- Frolov, S. M. (2021). Organic Waste Gasification: A Selective Review. *Fuels*, 2(4), 556–650. <https://doi.org/10.3390/fuels2040033>
- International Energy Agency. (n.d.). Applications for Utilisation of Liquids Produced by Fast Pyrolysis of Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 1–7.
- Islam, M. S., Miah, M. Y., Ismail, M., Jamal, M. S., Banik, S. K., & Saha, M. (1970). Production of Bio-Oil from Municipal Solid Waste by Pyrolysis. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 45(2), 91–94. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v45i2.5703>
- Kabir, E., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11(December), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- Listiana, I., Kuswanto, E., & Hoya, A. L. (2024). *Utilization of Maggot Larvae (Hermetia illucens) for Processing Food Waste at the UIN Raden Intan Lampung Canteen*. 13(2), 511–516. <https://doi.org/10.14421/biomedich.2024.132.511-516>
- Loc, N. X., & Phuong, D. T. M. (2025). Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 12(1), 148–172. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597>

Mark Hertsgaard. (n.d.). *As Uses of Biochar Expand, Climate Benefits Still Uncertain*.  
[https://e360.yale.edu/features/as\\_uses\\_of\\_biochar\\_expand\\_climate\\_benefits\\_still\\_uncertain](https://e360.yale.edu/features/as_uses_of_biochar_expand_climate_benefits_still_uncertain)

Singh, B., Shen, Q., Arbestain, M. C., Dolk, M. M., & Camps-Arbestain, M. (2017). *Chapter 3. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential Biochar ageing effects on N and P dynamics: Mechanisms and controlling factors* View project *Soils in the global agenda-ITPS-GSP?FAO View project 3 Biochar pH, electrical conductivity and li. March*, 23–38.  
<https://www.researchgate.net/publication/319206365>

Zhao, J. J., Shen, X. J., Domene, X., Alcañiz, J. M., Liao, X., & Palet, C. (2019). Comparison of biochars derived from different types of feedstock and their potential for heavy metal removal in multiple-metal solutions. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46234-4>