

Teknologi Konversi Waste to Energy: Tinjauan Proses dan Perkembangan Terkini

M. Idris¹, Martomo Setyawan^{1*}, Erna Astuti¹, Totok Eka Suharto¹, Firman²

¹Departemen Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Jend. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, 55166, Indonesia

²Departemen Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Makassar, Jl. Perintis Kemerdekaan, Tamalanrea Indah, Tamalanrea, Makassar, 90245, Indonesia

*Corresponding Author: martomo.setyawan@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Permintaan energi global yang meningkat pesat seiring pertumbuhan populasi telah menyebabkan peningkatan jumlah sampah yang dihasilkan. Pada tahun 2023, jumlah sampah global yang dihasilkan mencapai 2,1 miliar ton, sehingga diperlukan pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Teknologi Waste-to-Energy (WtE) menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi kedua permasalahan tersebut dengan mengkonversi berbagai jenis sampah menjadi energi terbarukan. Artikel ini bertujuan mengeksplorasi teknologi konversi sampah menjadi energi, mencakup metode termokimia, biokimia, dan kimia, serta menganalisis efisiensi dan dampak lingkungannya. Konversi termokimia meliputi pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis, mampu menghasilkan panas, syngas, dan bio-oil dari sampah padat dengan efisiensi berbeda-beda. Pembakaran langsung menggunakan suhu 850-1.200°C, gasifikasi pada suhu 800-1.200°C, dan pirolisis terjadi pada suhu 300-800°C. Konversi biokimia melalui *anaerobic digestion* dan fermentasi fokus pada pengolahan sampah organik menjadi biogas dan *biofuel*. Konversi kimia menggunakan limbah minyak dengan proses transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel dapat meminimalkan 60–70% biaya proses dibanding dengan menggunakan bahan baku lain. Setiap teknologi memiliki keunggulan spesifik tergantung karakteristik sampah dan kondisi operasional. Tantangan utama meliputi optimalisasi efisiensi proses, pengurangan emisi, dan keberlanjutan ekonomi. Penelitian mendatang perlu difokuskan pada pengembangan teknologi purifikasi, katalis yang lebih efisien, dan integrasi multiteknologi. Oleh karena itu, WtE memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi global menuju sistem rendah karbon, dengan kemampuan mengurangi volume sampah sambil menghasilkan energi terbarukan.

Kata kunci: Energi terbarukan; Keberlanjutan; Pengelolaan sampah; Teknologi konversi; Waste-to-Energy.

ABSTRACT

The rapid increase in global energy demand along with population growth has led to an increase in the amount of waste generated. By 2023, the amount of global waste generated will reach 2.1 billion tons, necessitating sustainable waste management. Waste-to-Energy (WtE) technologies offer innovative solutions to address both issues by converting various types of waste into renewable energy. This article aims to explore waste-to-energy conversion technologies, including thermochemical, biochemical, and chemical methods, and analyze their efficiency and environmental impacts. Thermochemical conversion includes combustion, gasification, and pyrolysis, capable of producing heat, syngas, and bio-oil from solid waste with varying efficiencies. Direct combustion uses temperatures of 850-1,200°C, gasification at 800-1,200°C, and pyrolysis occurs at temperatures of 300-800°C. Biochemical conversion through *anaerobic digestion* and fermentation focuses on the processing of organic waste into biogas and *biofuel*. Chemical conversion using waste oil with a transesterification process to produce biodiesel can minimize 60–70% of process costs compared to using other raw materials. Each technology has specific advantages depending on the characteristics of the waste and the operational conditions. Key challenges include optimizing process efficiency, reducing emissions, and economic sustainability. Future research should focus on developing purification technologies, more efficient catalysts, and multi-technology integration. Therefore, WtE has great potential in supporting the global

energy transition towards a low-carbon system, with the ability to reduce waste volume while producing renewable energy.

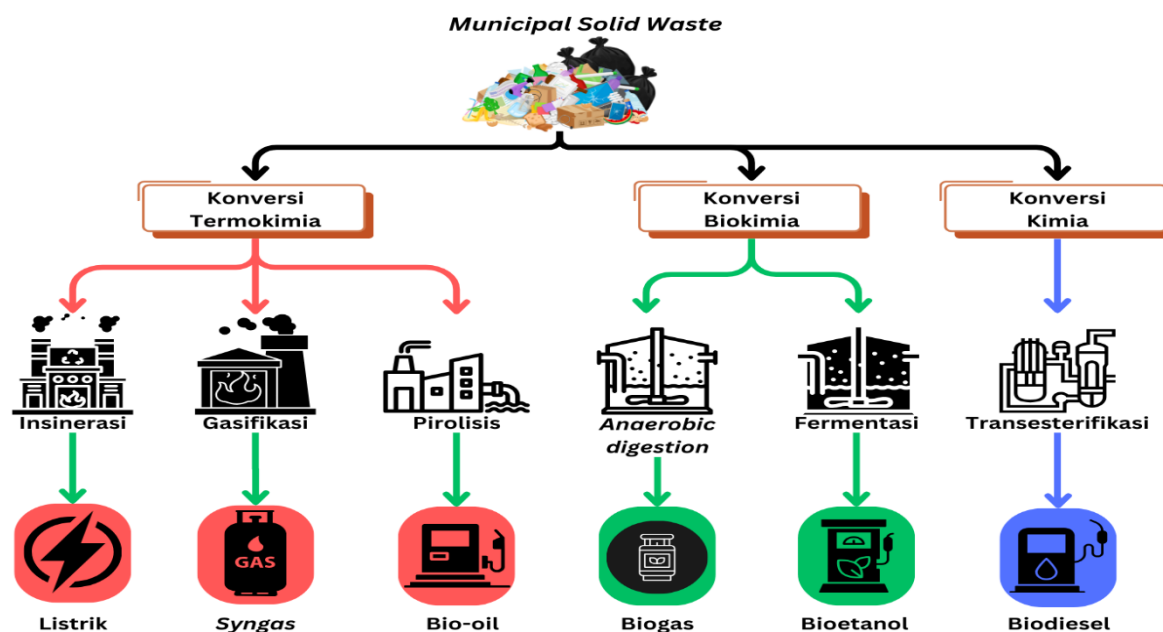
Keywords: *Renewable energy; Sustainability; Waste management; Conversion technologies; Waste-to-Energy.*

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi dunia meningkat pesat dalam satu abad terakhir seiring peningkatan jumlah populasi dunia yang mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar fosil (Klinghoffer et al., 2013; Sharma et al., 2020). Hal tersebut berdampak pada peningkatan jumlah sampah yang dihasilkan. Pada tahun 2023, jumlah sampah yang dihasilkan mencapai 2,1 miliar ton (Lisbona et al., 2023). Dengan jumlah sampah yang sangat besar maka diperlukan pengolahan sampah yang sesuai agar terciptanya suatu proses yang berkelanjutan secara lingkungan (Wienchol et al., 2020). Oleh karena itu, pasokan energi dan pengelolaan sampah merupakan tantangan besar yang harus dihadapi manusia saat ini (Idris et al., 2024). Meningkatnya penggunaan energi terbarukan dalam bauran energi dan pengolahan sampah yang tepat akan membantu pembangunan berkelanjutan (Lisbona et al., 2023).

Pemilahan sampah sebagai sektor energi atau produk sampingan merupakan strategi inovatif yang memiliki potensi transformatif dalam mengatasi tantangan lingkungan dan energi global. Konsep *Waste to Energy* (WtE) tidak hanya menawarkan solusi komprehensif untuk pengurangan volume sampah, tetapi juga berpotensi menjamin akses energi bagi seluruh penduduk dunia, terutama di wilayah berkembang (Santos et al., 2019). Meskipun demikian, implementasi konsep ini masih menghadapi sejumlah kendala signifikan, termasuk kompleksitas pengumpulan sampah, tantangan teknologi pra-pengolahan, dan efisiensi konversi yang belum optimal (Lisbona et al., 2023). Keterbatasan dalam sistem logistik, infrastruktur teknologi, dan tingginya biaya investasi awal menjadi penghalang utama pengembangan skala besar. Namun, dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkelanjutan, diharapkan berbagai tantangan tersebut dapat diatasi secara bertahap melalui penelitian interdisipliner, inovasi teknologi konversi, dan pengembangan material baru (Jamilatun et al., 2023; Shovon et al., 2024). Pendekatan komprehensif ini tidak hanya akan mendorong terciptanya jalur WtE yang layak secara ekonomi, tetapi juga mendukung transisi menuju perekonomian berbasis energi terbarukan, yang pada akhirnya berkontribusi signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan dan ketahanan energi global (Jamilatun et al., 2023; Kothari et al., 2010).

Jumlah, komposisi, dan karakteristik sampah berbeda-beda di setiap negara tergantung pada laju pertumbuhan penduduk, pendapatan, arus urbanisasi, metode pengumpulan, dan gaya hidup (Kaza et al., 2018). Berdasarkan komposisi sampah tersebut, beberapa alternatif pengolahan dapat dilakukan. Bahan yang tidak mudah terbakar seperti logam dan kaca didaur ulang jika memiliki nilai ekonomis atau dibuang ke tempat pembuangan sampah. Bahan mudah terbakar dengan nilai kalor rendah hingga tinggi seperti plastik, kertas, kain, dan kayu diubah menjadi energi dengan teknologi WtE. Nilai kalor bahan yang mudah terbakar dapat ditingkatkan dengan langkah pemadatan energi. Bahan yang kering atau kadar airnya rendah diproses secara termal, sedangkan bahan dengan kadar air tinggi seperti sisa makanan, sampah pekarangan, dan kayu diproses secara biokimia (Idris et al., 2024; Lisbona et al., 2023; Traven, 2023). Tempat pembuangan sampah merupakan pilihan terakhir dan hanya digunakan setelah sampah sudah berkurang, baik dengan cara mendaur ulang atau mengubahnya melalui teknologi WtE (Jamilatun et al., 2023). Adapun skema teknologi WtE dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Teknologi konversi WtE.

Tujuan dari review paper adalah untuk mengeksplorasi berbagai teknologi konversi WtE, termasuk konversi termokimia, biokimia, dan kimia, serta menganalisis efisiensi dan dampak lingkungan dari masing-masing teknologi konversi tersebut. Pembahasan menyoroti tiga metode utama dalam konversi termokimia (pirolisis, pembakaran dan gasifikasi), konversi biokimia (*anaerobic digestion* dan fermentasi), serta konversi kimia (transesterifikasi) untuk meningkatkan efektivitas fasilitas WtE.

2. KONVERSI TERMOKIMIA

Sampah yang cocok untuk menghasilkan energi melalui proses termokimia dapat berupa: limbah peternakan seperti kotoran ternak, limbah pertanian dari ampas tebu, limbah kehutanan seperti limbah lignoselulosa, limbah industri dari industri makanan dan kertas, limbah perumahan seperti sampah padat kota (Lisbona et al., 2023). Untuk mengubah sampah menjadi energi lain, teknologi ini menggunakan panas selama proses kerjanya, dengan atau tanpa oksigen. Ini mencakup pembakaran langsung, pirolisis, dan gasifikasi (Jamilatun et al., 2023; Shovon et al., 2024). Berdasarkan proses termokimia yang digunakan, energi terbarukan yang diperoleh dapat berupa panas, gas sintetis, bio-char dan bio-oil (Aini et al., 2022). Kondisi reaksi dan produk dari proses termokimia ditunjukkan pada Tabel 1. Perbedaan utama antara ketiga proses ini adalah kondisi atmosfer (yaitu, adanya oksigen) dan suhu pengoperasian. Kualitas produk akhir bergantung pada dua parameter ini (Jamilatun et al., 2023).

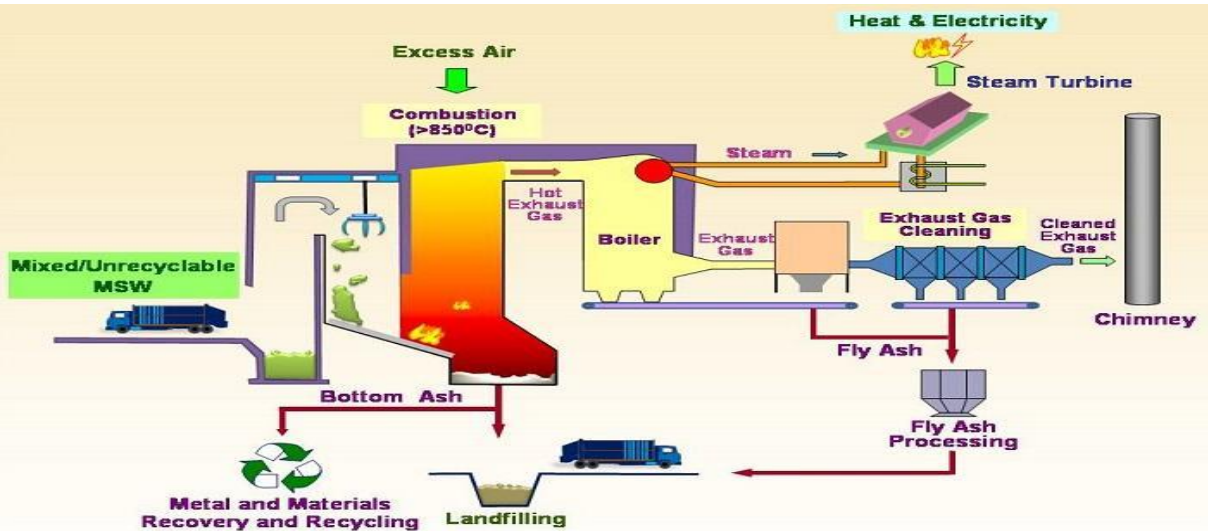
2.1. Pembakaran Langsung

Dari semua proses yang termasuk dalam kategori teknologi konversi termokimia yang tersedia untuk sampah padat, pembakaran langsung adalah cara yang paling sering diterapkan karena biayanya yang rendah (Lisbona et al., 2023). Pabrik pembakaran sampah pertama diperkenalkan pada abad ke-19 selama Revolusi Industri yang dimaksudkan untuk memusnahkan sampah. Namun hal ini berubah pada pertengahan abad ke-20, ketika harga minyak melonjak, muncullah ide teknologi sampah menjadi energi (Makarichi et al., 2018). Proses pembakaran memungkinkan transformasi energi kimia yang terkandung dalam sampah menjadi panas dengan menggunakan udara berlebih pada suhu 850-1200°C,

sehingga menghasilkan panas, abu dan gas pembakaran seperti yang ditampilkan pada gambar 2 (Idris et al., 2024).

Tabel 1. Kondisi reaksi dan produk dari proses termokimia.

Parameter	Pembakaran	Gasifikasi	Pirolisis
Prinsip kerja	Menggunakan O ₂	Menggunakan sebagian O ₂	Tanpa menggunakan O ₂
Suhu operasi (°C)	850-1200	800-1200	300-800
Padat	Bottom ash, fly ash dan slag	Ash dan slag	Ash dan char
Produk Cair			bio-oil, wax, tar
Gas	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	Syngas (H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂)	Pirolisis gas (H ₂ , CO, hidrokarbon, H ₂ O, N ₂)
Referensi	(Idris et al., 2024; Kumar & Samadder, 2017; Lisbona et al., 2023)	(Fadhilla & Nazarudin, 2023; Hognert & Nilsson, 2016; Matsakas et al., 2017)	(Aini et al., 2022; Jamilatun et al., 2022)



Gambar 2. Skema WtE dengan proses pembakaran.
Sumber: (Idris et al., 2024).

Proses pembakaran secara signifikan mengurangi volume sampah dan menghasilkan energi panas yang dialirkan ke sistem boiler untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi (Lisbona et al., 2023). Uap ini kemudian diarahkan ke turbin, yang mengubah energi panas menjadi energi mekanis, dan selanjutnya ke generator yang mengkonversi energi mekanis menjadi listrik. Efisiensi konversi energi bergantung pada desain turbin dan generator (Idris et al., 2024). Gas buangan dari pembakaran melewati sistem pembersihan untuk mengurangi emisi berbahaya, menggunakan teknologi seperti elektrostatis presipitator dan scrubber untuk memenuhi standar lingkungan. Fly ash yang dihasilkan dari pembakaran dikumpulkan dan diolah untuk aplikasi seperti bahan konstruksi atau melalui proses stabilisasi untuk penanganan akhir, menjadikannya aspek penting dalam manajemen lingkungan dari proses pembakaran (Bianchini et al., 2016; Zhao et al., 2016).

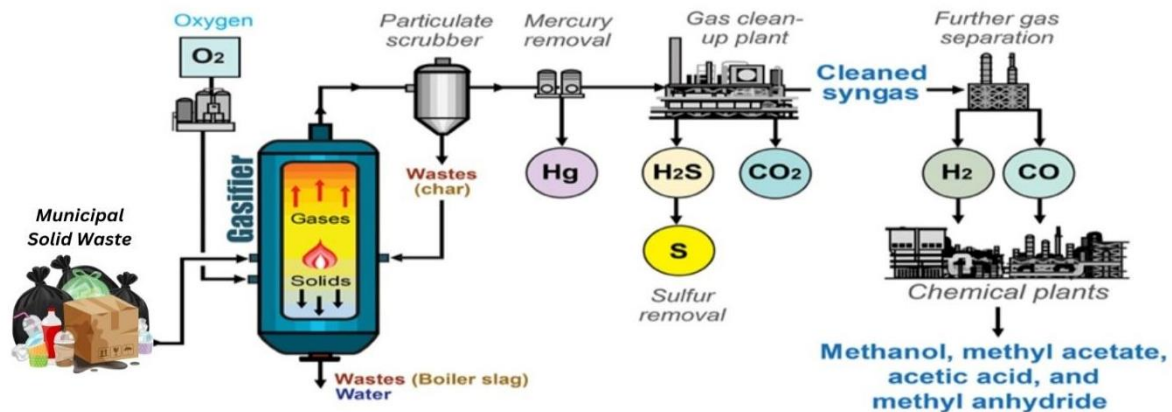
Saat ini, ada tiga kelompok utama teknologi pembakaran: (a) *moving grate*, (b) *rotary kiln* dan (c) incinerator *fluidized bed* (Makarichi et al., 2018), dimana telah digunakan di 80% pabrik WtE di seluruh dunia (Jurczyk et al., 2016). Agar dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran, sampah harus mempunyai sifat melepaskan energi panas ketika teroksidasi dengan kuat. Banyak sampah yang dapat digunakan dalam proses WtE melalui pembakaran, beberapa contohnya adalah limbah pertanian, kehutanan, kertas, dan padat perkotaan. Tergantung pada jenis sampahnya, terkadang sampah perlu menjalani proses pra-pengolahan sebelum proses pembakaran untuk menyesuaikan kadar air, ukuran partikel, atau kepadatannya (Kumar & Samadder, 2017).

Adapun emisi yang dihasilkan bergantung pada karakteristik fisik-kimia sampah, teknologi pembakaran yang digunakan, dan kondisi pengoperasian. Namun, untuk mematuhi peraturan emisi, beberapa teknologi pengurangan emisi mungkin diperlukan (Lisbona et al., 2023). Dalam waktu dekat, upaya untuk meningkatkan teknologi pembakaran akan terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi. Hal ini akan menjadikan pembakaran menjadi proses yang lebih ramah lingkungan dan akan mematuhi peraturan perundang-undangan yang semakin ketat (Lisbona et al., 2023).

2.2. Gasifikasi

Energi yang terkandung dalam sampah dapat diubah menjadi energi kimia melalui gasifikasi (Hognert & Nilsson, 2016; Jamilatun et al., 2023). Proses gasifikasi dimulai dimasukkan ke dalam reaktor gasifikasi untuk mengubah bahan baku padat menjadi gas sintesis (*syngas*) melalui pemanasan pada suhu tinggi (800-1.200°C) dengan jumlah oksigen yang terkontrol seperti yang terlihat pada gambar 3. Berbeda dengan pembakaran biasa, proses ini menghasilkan campuran gas seperti CO, H₂, dan CH₄ (Mazzoni et al., 2020; Sharma et al., 2020). Selain itu, proses gasifikasi menghasilkan char yang memiliki kandungan energi tinggi (Lisbona et al., 2023). Setelah gasifikasi, gas hasilnya dialirkan ke *scrubber* untuk membersihkan partikel padat dan kontaminan, diikuti dengan tahap *mercury removal* untuk menghilangkan merkuri dan logam berat lainnya menggunakan teknologi khusus (Matsakas et al., 2017). Selanjutnya, *gas clean up plant* menghilangkan kontaminan kimia dan sulfur untuk menghasilkan gas sintesis berkualitas tinggi, sebelum akhirnya melalui proses *gas separation* yang memisahkan komponen gas menjadi fraksi murni menggunakan teknologi membran atau *pressure swing adsorption* (PSA). Tahap akhir ini mempersiapkan gas untuk sintesis produk kimia lanjutan, memastikan produk yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan (Chanthakett et al., 2021).

Berdasarkan suhu proses gasifikasi dibedakan menjadi 2 yaitu gasifikasi (800°C-1.200°C) dan gasifikasi plasma (5.000°C-15.000°C) (Hognert & Nilsson, 2016). Teknologi yang menggunakan gasifikasi adalah *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC), sedangkan proses yang menggunakan gasifikasi plasma adalah *Integrated Plasma Gasification Combined Cycle* (IPGCC). Kedua metode ini memungkinkan penangkapan karbon sehingga menghasilkan pembangkit listrik tanpa emisi CO₂ (Matsakas et al., 2017). Ada beberapa penelitian mengenai pembangkit listrik berdasarkan gasifikasi MSW dan gasifikasi plasma untuk menghasilkan tidak hanya listrik tetapi juga panas distrik dan gas hidrogen (Brunner & Rechberger, 2015; Hognert & Nilsson, 2016; Mazzoni et al., 2020).



Gambar 3. Skema WtE dengan proses gasifikasi.

Sumber: (Chanthakett et al., 2021).

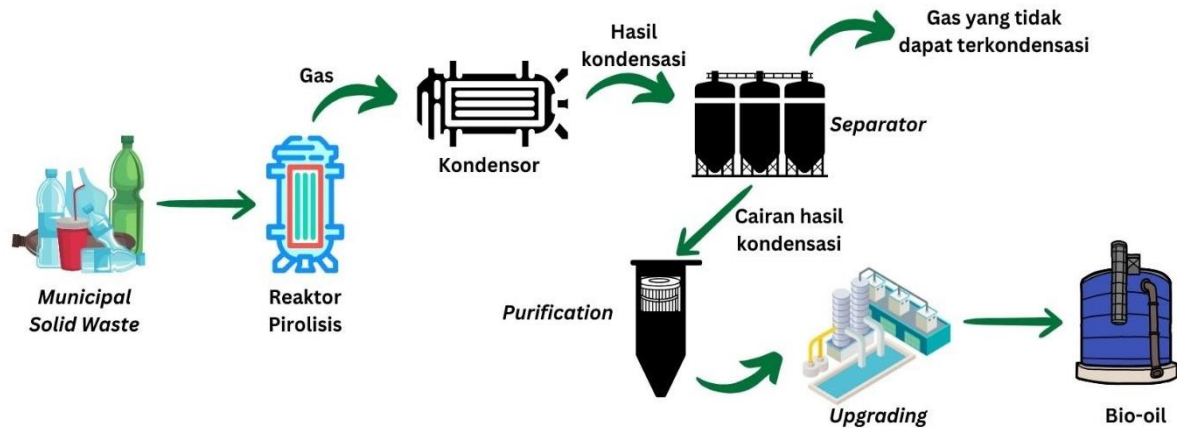
Berbagai macam sampah dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses gasifikasi, contohnya adalah studi peneliti tentang biomassa kayu (Curcio et al., 2022; Jurado et al., 2021), dan sampah padat kota (Chanthakett et al., 2021). Dalam beberapa kasus, perlakuan awal mungkin diperlukan untuk mengurangi kadar air dan menyesuaikan ukuran partikel. Kualitas bahan bakar yang digunakan, teknologi gasifikasi yang digunakan, dan kondisi pengoperasian merupakan faktor yang menentukan kualitas *syngas* yang dihasilkan (Jamilatun et al., 2023). Oleh karena itu, dalam beberapa tahun terakhir, gasifikasi berbagai jenis sampah telah dipelajari, serta pengembangan atau optimalisasi teknologi untuk gasifikasi (Curcio et al., 2022), dan pengolahan gas sintesis yang dihasilkan (Jurado et al., 2021). Studi-studi ini berfokus pada peningkatan kualitas gas sintesis dengan mengurangi tar dan senyawa lain yang tidak diinginkan dan menyesuaikan komposisi kimianya agar sesuai untuk penggunaan akhir.

2.3. Pirolisis

Pirolisis adalah proses penguraian sampah dengan memanaskan pada kondisi operasi suhu 300°C - 800°C sehingga menghasilkan tiga produk utama yaitu: bio-oil, biochar dan gas seperti yang ditampilkan pada gambar 4 (Aini et al., 2022; Jamilatun et al., 2022). Dalam proses ini sampah dipanaskan dalam sebuah reaktor pada temperatur pirolisis tanpa kehadiran oksigen (Jamilatun & Setyawan, 2012). Produk pirolisis bervariasi tergantung pada komposisi bahan baku dan parameter pirolisis, seperti suhu, laju pemanasan dan waktu ketahanan (Aini et al., 2022; Kumar & Samadder, 2017). Uap dan gas yang dihasilkan dari proses pirolisis dialirkan ke kondensor untuk didinginkan, kemudian dipisahkan dengan menggunakan separator menjadi beberapa fraksi, yaitu bio-oil, tar, dan gas. Tahap *purification* membersihkan produk dari kontaminan menggunakan metode filtrasi, sentrifugasi atau ekstraksi pelarut, sedangkan proses *upgrading* lebih lanjut meningkatkan kualitas dan nilai ekonomis produk melalui hidrdeoksigenasi, katalisis atau pemisahan fraksi (Yue et al., 2023). Produk akhir terdiri dari tiga fraksi utama: bio-oil yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau bahan baku industri kimia, biochar untuk aplikasi pertanian dan penyimpanan karbon, serta *syngas* yang dimanfaatkan untuk pembangkit listrik atau proses industri lainnya (Lisbona et al., 2023).

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan proses pirolisis untuk WtE telah difokuskan pada produksi produk yang berbeda menggunakan pirolisis lambat, pirolisis cepat, pirolisis kilat, pada penggunaan teknologi yang berbeda seperti reaktor *fixed bed* (Inayat et al., 2022), atau reaktor *fluidized bed* (Soria-Verdugo et al., 2023). Penelitian juga sedang dilakukan pada penggunaan bahan katalitik yang berbeda, seperti katalis berbasis logam, zat mikropori atau katalis reseptor, untuk meningkatkan konversi efisiensi, mengurangi penggunaan energi, meningkatkan hasil produk akhir (Yue et al., 2023).

Namun, salah satu masalah yang dikemukakan para peneliti adalah bahwa *biofuel* sangat terkontaminasi dan memerlukan pembersihan serta penggunaan metode perbaikan yang canggih sebelum digunakan. Selain itu, pirolisis sampah tidak layak secara ekonomi dan memerlukan penelitian lebih lanjut (Gandidi et al., 2017).



Gambar 4. Skema WtE dengan proses pirolisis.

Sumber: (Chanthakett et al., 2021).

Pengembangan teknologi baru dan lebih efisien menjadi tren masa depan, dan yang paling penting adalah teknologi yang akan memungkinkan industri berskala besar menjalankan operasi secara berkelanjutan dan menghindari penggunaan *batch*. Selain itu, masalah seperti regenerasi katalis memerlukan penelitian lebih lanjut tentang penggunaan katalis. Untuk menghasilkan *biofuel*, biochar, dan bioproduct berkualitas tinggi, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengelola limbah industri (Lisbona et al., 2023).

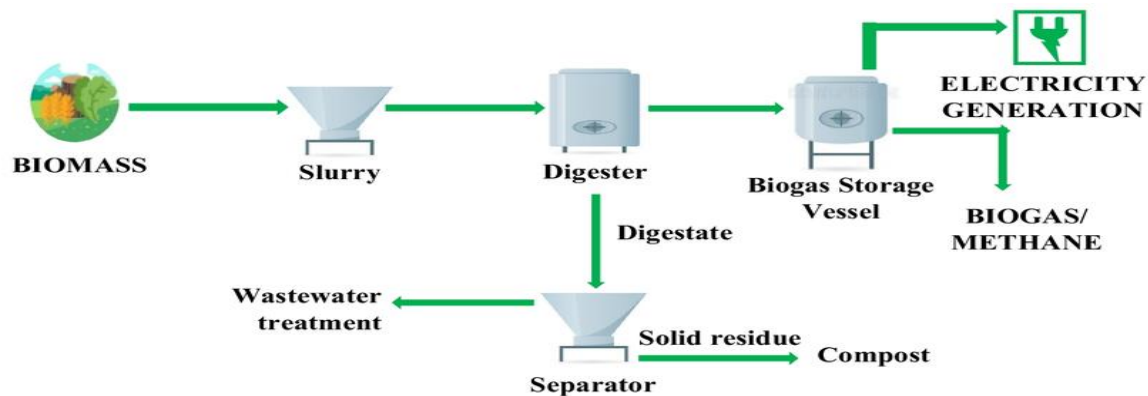
3. KONVERSI BIOKIMIA

3.1 *Anaerobic Digestion*

Sampah organik dapat diproses secara efisien melalui *anaerobic digestion* (AD) yaitu teknologi ekonomi sirkular yang signifikan untuk memitigasi emisi gas rumah kaca dan mengubah sampah menjadi biogas (50–70% CH₄) dan pupuk organik (Tessele & Van Lier, 2020). Bahan sampah organik yang paling umum digunakan untuk produksi biogas adalah *organic fraction of municipal solid waste* (OFMSW), lumpur limbah, limbah industri organik, limbah makanan dan kotoran ternak (Curry et al., 2018).

Untuk proses *anaerobic digestion* dimulai dengan pengolahan sampah menjadi *slurry*, yang kemudian dimasukkan ke dalam digester, sebuah ruang tertutup di mana mikroorganisme anaerobik memecah bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen seperti yang terlihat pada gambar 5. Selama proses ini, mikroorganisme menguraikan sampah dan menghasilkan biogas, yang terdiri terutama dari metana dan karbon dioksida (Van et al., 2020). Biogas yang dihasilkan ditampung dalam *biogas storage vessel* dan dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik atau sebagai sumber energi alternatif (Tyagi et al., 2018). *Digestate* (sisa padatan yang tidak terurai) dari dalam digester akan dipindahkan ke separator untuk memisahkan antara filtrat dan residu. *Solid residu* yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai kompos untuk meningkatkan kesuburan tanah, sementara filtrat yang diperoleh akan mengalami perlakuan lebih lanjut di *wastewater treatment* untuk menghilangkan kontaminan sebelum dibuang atau digunakan kembali. Proses ini tidak hanya menghasilkan energi terbarukan tetapi juga mengelola sampah dengan cara yang ramah lingkungan (Naran et al., 2016).

Aspek yang paling relevan untuk efisiensi dan produktivitas proses AD telah diidentifikasi antara lain: komposisi bahan baku, *co-digestion* substrat, suhu, pH, C/N, beban organik dan waktu retensi hidrolis (Curry et al., 2018). Komposisi substrat sangat bervariasi dalam produksi metana antara 0,33-450 Nm³ biogas/ton tergantung pada penggunaan limbah lignoselulosa atau tanaman gula dan pati (Tessele & Van Lier, 2020). *Co-digestion* substrat komplementer memberikan peningkatan keseimbangan makro dan mikronutrien yang meningkatkan produksi biogas dengan meningkatkan komponen *biodegradable*, menyediakan lebih banyak spesies mikroba yang dapat dicerna dan meningkatkan konsentrasi biomassa aktif (Tyagi et al., 2018). Penelitian lebih lanjut mengenai opsi *co-digestion* harus dilakukan untuk merangsang degradasi bahan organik dan memperkuat metabolisme mikroba. Perlakuan awal menghilangkan senyawa yang tidak diinginkan dan meningkatkan kemampuan biodegradasi sampah. Akhir-akhir ini, beberapa perlakuan awal dieksplorasi untuk meningkatkan produksi biogas antara 20-33% (Naran et al., 2016).



Gambar 5. Skema WtE dengan proses AD.
Sumber: (Banerjee, 2022).

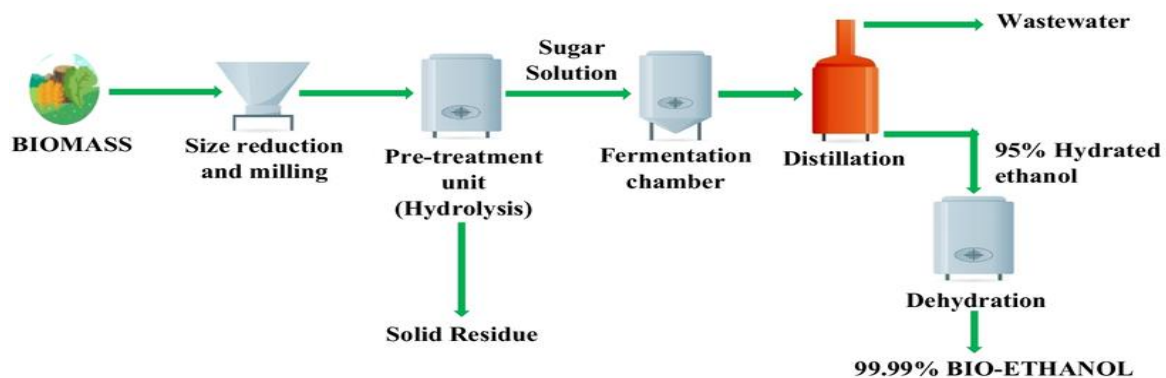
AD dianggap sebagai proses yang dapat diandalkan dan telah menjadi teknologi yang menarik dari sudut pandang pengambilan kebijakan yang akan memainkan peran utama (Sevillano et al., 2021). Proses standardisasi juga harus dipromosikan oleh pemerintah untuk meningkatkan pemanfaatan biogas rendah karbon untuk pembangkit energi (Uddin et al., 2021).

3.2 Fermentasi

Fermentasi dan AD adalah proses serupa yang melibatkan penguraian bahan organik melalui mikroorganisme (Lee et al., 2022). Namun, AD terjadi di lingkungan bebas oksigen, sedangkan fermentasi dapat terjadi dengan ada atau tidak adanya oksigen (Akkoyunlu et al., 2021). Komposisi hasil proses ini akan bergantung pada katalis yang digunakan, substrat organik (gula, pati, selulosa) dan kondisi pengoperasian (Lisbona et al., 2023). Skema dari proses fermentasi ditampilkan pada gambar 6, yang dimulai dengan memasukkan sampah organik ke dalam unit *size reduction and milling*, di mana bahan dipotong dan dihaluskan menjadi ukuran partikel yang lebih kecil untuk meningkatkan luas permukaan dan mempermudah proses selanjutnya. Setelah itu, bahan masuk ke *pre-treatment unit (Hydrolysis)*, di mana enzim atau perlakuan kimia memecah struktur kompleks bahan organik menjadi molekul sederhana yang lebih mudah dicerna. Selanjutnya, bahan dipindahkan ke *fermentation chamber*, di mana mikroorganisme khusus mengurai bahan organik dalam kondisi anaerob, menghasilkan biogas atau produk fermentasi lainnya. Proses dilanjutkan dengan *distillation*, di mana campuran dipisahkan berdasarkan titik didih berbeda untuk memperoleh produk yang diinginkan.

Tahap terakhir adalah *dehydration*, di mana kandungan air dihilangkan untuk meningkatkan kualitas dan stabilitas bioetanol atau bahan bakar lainnya (Banerjee, 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, fermentasi anaerobik mikroba telah menjadi teknologi yang menjanjikan untuk mencapai hasil produksi bioalkohol dan hidrogen yang tinggi bersama dengan asam organik lainnya. Tergantung pada kebutuhan cahaya untuk mikroorganisme (bakteri, ragi, dan jamur), fermentasi dapat diklasifikasikan menjadi: *dark fermentation* dan *photo fermentation* (Osman et al., 2020). *Dark fermentation* dilakukan dalam kondisi anaerobik gelap, dimana pemecahan bahan baku organik selulosa menghasilkan produksi alkohol dan hidrogen biologis bersama dengan asam organik (Rizwan et al., 2019). Minat khusus diamati pada *hyperthermophilic bacteria* (*Thermo-togaceae*) yang memetabolisme gula kompleks menjadi *bioethanol* dan hidrogen melalui *dark fermentation* (Esercizio et al., 2021). *Photo fermentation* memanfaatkan bakteri fotosintetik yang juga menghasilkan bioalkohol dan hidrogen dari bahan organik di bawah sinar matahari dan kondisi anaerobik (Mona et al., 2020). Baru-baru ini, integrasi kedua proses fermentasi telah diusulkan untuk meningkatkan hasil produksi bioalkohol dan hidrogen (Lisbona et al., 2023).



Gambar 6. Skema WtE dengan proses fermentasi.

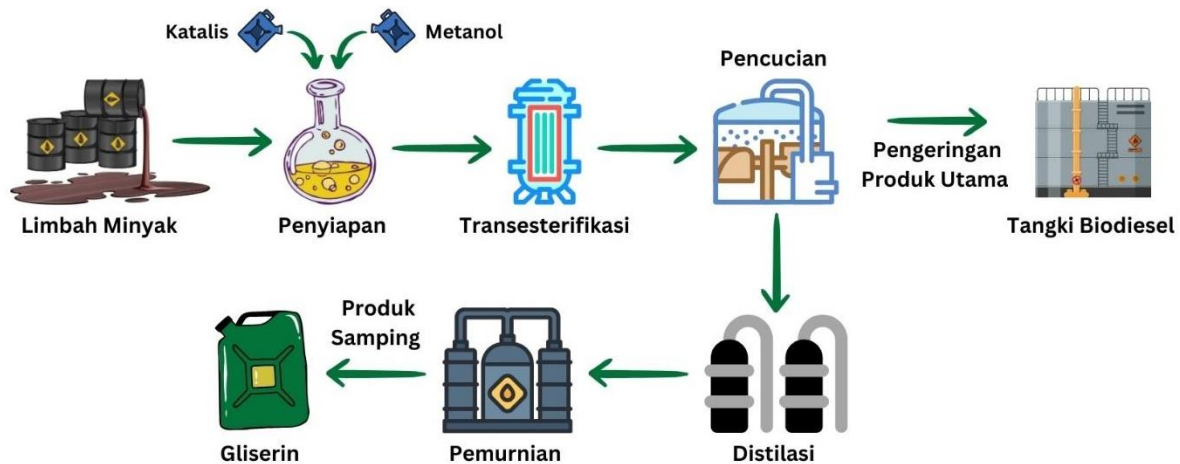
Sumber: (Banerjee, 2022).

Teknologi baru lainnya di bidang fermentasi yang meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya, dan meningkatkan keberlanjutan termasuk (i) elektrolisis mikroba (Lee et al., 2022), yang meningkatkan hasil *biofuel* sehingga mengurangi jumlah karbon dioksida yang dilepaskan, (ii) biologi sintetik (McCarty & Ledesma-Amaro, 2019), yang melibatkan penerapan rekayasa genetika untuk merancang mikroorganisme spesifik yang ditingkatkan untuk jenis sampah tertentu, (iii) *solid-state fermentation* (Ge et al., 2017), yang diberi makan oleh substrat padat, seperti limbah pertanian atau produk sampingan pemrosesan makanan, mengurangi penanganan cairan dan peningkatan efisiensi, atau (iv) bioreaktor membran (Akkoyunlu et al., 2021), yang menggunakan membran untuk memisahkan mikroorganisme dari kaldu fermentasi, meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemrosesan hilir.

4. KONVERSI KIMIA

Salah satu metode konversi kimia yang paling umum untuk menghasilkan biodiesel sebagai produk energi dari limbah minyak adalah transesterifikasi. Dengan proses esterifikasi, limbah minyak dapat digunakan sebagai alternatif yang berkelanjutan untuk menggantikan bahan bakar fosil (Simsek & Uslu, 2020). Adapun skema proses pembuatan biodiesel disajikan pada gambar 7, dimulai dengan penyiapan bahan baku limbah minyak yang telah disaring dan dipanaskan untuk mengurangi viskositas. Limbah minyak kemudian dicampurkan dengan metanol dan katalis (misalnya NaOH) dalam reaktor. Campuran tersebut selanjutnya memasuki proses transesterifikasi, di mana terjadi reaksi kimia yang mengubah

trigliserida menjadi *fatty acid methyl ester* (FAME) atau *fatty acid ethyl ester* (FAEE) melalui pemanasan dan pengadukan intensif (Olubunmi et al., 2020). Setelah reaksi selesai, campuran dipisahkan dan biodiesel dicuci dengan air untuk menghilangkan sisa katalis dan kotoran, kemudian dikeringkan hingga menghasilkan biodiesel berkualitas. Produk samping dari pencucian, yang mengandung gliserol, air, dan sisa bahan kimia, dialirkan ke unit distilasi untuk dipisahkan. Melalui proses distilasi dan pemurnian lanjutan, akan menghasilkan gliserol sebagai produk samping (Mateos et al., 2021).



Gambar 7. Skema WtE dengan proses transesterifikasi.

Sumber: (Supraja et al., 2020).

Limbah minyak berpotensi untuk digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel karena ketersediaan yang melimpah sehingga dapat mengatasi masalah pembuangan limbah minyak (Idris et al., 2024). Proses transesterifikasi untuk produksi biodiesel dari limbah minyak dapat meminimalkan 60–70% biaya proses dibanding dengan menggunakan bahan baku lain (Maneerung et al., 2016). Transesterifikasi bahan berbasis limbah minyak dapat terjadi secara katalitik atau tanpa katalis (Febriani et al., 2024). Tabel 2 menunjukkan berbagai parameter reaksi transesterifikasi limbah minyak yang berkaitan dengan penelitian.

Berdasarkan tabel 2, menunjukkan parameter reaksi transesterifikasi limbah minyak dari berbagai penelitian, yang bertujuan untuk menghasilkan biodiesel. Berbagai jenis limbah minyak, seperti minyak goreng bekas dan minyak goreng restoran, diolah menggunakan katalis yang berbeda, termasuk lipase, KOH, NaOH, Fe/Silica, dan Clay/CaO. Perbandingan molar alkohol terhadap minyak bervariasi, dengan rasio yang lebih tinggi umumnya menghasilkan yield biodiesel yang lebih baik. Suhu reaksi berkisar antara 25°C hingga 65°C, dan waktu reaksi bervariasi dari 0,5 hingga 10 jam. Kondisi optimal untuk menghasilkan yield biodiesel tertinggi, yaitu 99,73%, dicapai dengan menggunakan Fe/Silica sebagai katalis pada suhu 60°C selama 1,5 jam. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan katalis yang tepat dan pengaturan kondisi reaksi yang optimal sangat penting untuk meningkatkan efisiensi produksi biodiesel dari limbah minyak.

Tabel 2. Parameter reaksi transesterifikasi limbah minyak dari berbagai penelitian.

Limbah Minyak	Katalis	Perbandingan molar alkohol dan minyak	Suhu reaksi (°C)	Waktu reaksi (jam)	Yield biodiesel (%)	Referensi
<i>Sunflower waste cooking oil</i>	Lipase dari <i>Araujia sericifera</i> (0,05%)	0.2:1	25	10	90-98	(Mateos et al., 2021)
Minyak goreng bekas	KOH (1.28%)	6.08:1	52,5	0,67	93,23	(Carmona-Cabello et al., 2019)
Minyak goreng bekas	NaOH (2%)	5:1	65	0,5	94,6	(Supraja et al., 2020)
Minyak goreng restoran	Fe/Silica (1.2%)	6:1	60	1,5	99,73	(Olubunmi et al., 2020)
Minyak goreng bekas	Clay/CaO (9.6%)	1:1,94	54,97	1,24	97,16	(Maneerung et al., 2016)

5. KESIMPULAN

Teknologi WtE menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi masalah sampah sekaligus menyediakan energi terbarukan. Berbagai teknologi WtE, termasuk pembakaran, gasifikasi, pirolisis, *anaerobic digestion*, fermentasi, dan transesterifikasi, telah dikembangkan untuk mengubah berbagai jenis sampah menjadi energi seperti panas, *syngas*, bio-oil, biogas, dan biodiesel. Setiap teknologi memiliki keunggulan tersendiri, tergantung pada jenis sampah dan proses yang digunakan. Konversi termokimia, seperti pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis, efektif dalam menghasilkan energi dari sampah padat. Sedangkan konversi biokimia, seperti *anaerobic digestion* dan fermentasi, lebih cocok untuk sampah organik, dengan biogas dan *biofuel* sebagai produk utama. Konversi kimia, khususnya transesterifikasi, memungkinkan produksi biodiesel dari limbah minyak goreng sehingga dapat meminimalkan 60–70% biaya proses dibanding dengan menggunakan bahan baku lain. Pengembangan teknologi WtE di masa depan berfokus pada peningkatan efisiensi proses, pengurangan emisi, dan pemanfaatan sampah secara optimal untuk mencapai target energi terbarukan. WtE berpotensi besar untuk mendukung upaya global dalam menciptakan energi yang ramah lingkungan dan membantu mengurangi dampak negatif sampah terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, N. A., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. (2022). Pengaruh Tipe Biomassa pada Produk Pirolisis : A Review. *Agroindustrial Technology Journal*, 6(1), 89–101. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i1.7559>
- Akkoyunlu, B., Daly, S., & Casey, E. (2021). Membrane bioreactors for the production of value-added products: Recent developments, challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125793>
- Arbib, Z., de Godos, I., Ruiz, J., & Perales, J. A. (2017). Optimization of pilot high rate algal ponds for simultaneous nutrient removal and lipids production. *Science of the Total Environment*, 589, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.206>
- Banerjee, N. (2022). Biomass to Energy — an Analysis of Current Technologies, Prospects, and

- Challenges. *BioEnergy Research*, 16(2), 683–716. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10500-7>
- Bianchini, A., Cento, F., Golferà, L., Pellegrini, M., & Saccani, C. (2016). Performance analysis of different scrubber systems for removal of particulate emissions from a small size biomass boiler. *Biomass and Bioenergy*, 92, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.005>
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2015). Waste to energy - key element for sustainable waste management. *Waste Management*, 37, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.003>
- Carmona-Cabello, M., Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., & Dorado, M. P. (2019). Optimization of solid food waste oil biodiesel by ultrasound-assisted transesterification. *Fuel*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115817>
- Chanthakett, A., Arif, M. T., Khan, M. M. K., & Oo, A. M. T. (2021). Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste. *Journal of Environmental Management*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112661>
- Curcio, A., Rodat, S., Vuillerme, V., & Abanades, S. (2022). Design and validation of reactant feeding control strategies for the solar-autothermal hybrid gasification of woody biomass. *Energy*, 254.
- Curry, R., Pérez-Camacho, M. N., Brennan, R., Wilkinson, S., Cromie, T., Foster, P., Smyth, B., Orozco, A., Groom, E., Murray, S., Hanna, J. A., Kelly, M., Burke, M., Black, A., Irvine, C., Rooney, D., Glover, S., McCullough, G., Foley, A., & Ellis, G. (2018). Quantification of anaerobic digestion feedstocks for a regional bioeconomy. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 171(4), 94–103. <https://doi.org/10.1680/jwarm.17.00014>
- Esercizio, N., Lanzilli, M., Vastano, M., Landi, S., Xu, Z., Gallo, C., Nuzzo, G., Manzo, E., Fontana, A., & D'Ippolito, G. (2021). Fermentation of biodegradable organic waste by the family thermotogaceae. *Resources*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/resources10040034>
- Fadhilla, P. N., & Nazarudin, S. (2023). Peranan Gasifikasi Batubara Menjadi Dimetil Eter (DME) dalam Bauran Energi Baru dan Kontribusinya pada Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(2), 83–96. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17420>
- Febriani, A. V., Idris, M., & Hakim, L. (2024). Tranformasi Minyak Jelantah menjadi Renewable Energy Dalam Perspektif Al Islam dan Kemuhammadiyah. *Jurnal Kemuhammadiyah dan Integrasi Ilmu*, 2(2), 193-202.
- Foroutan, R., Esmaeili, H., Mousavi, S. M., Hashemi, S. A., & Yeganeh, G. (2019). The physical properties of biodiesel-diesel fuel produced via transesterification process from different oil sources. *Physical Chemistry Research*, 7(2), 415–424. <https://doi.org/10.22036/pcr.2019.173224.1600>
- Gandidi, I. M., Susila, M. D., & Pambudi, N. A. (2017). Production of valuable pyrolytic oils from mixed Municipal Solid Waste (MSW) in Indonesia using non-isothermal and isothermal experimental. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 357–361. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.003>
- Ge, X., Vasco-Correa, J., & Li, Y. (2017). Solid-State Fermentation Bioreactors and Fundamentals. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Bioprocesses, Bioreactors and Controls* (pp. 381–402). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00013-6>
- Hognert, J., & Nilsson, L. (2016). The small-scale production of hydrogen, with the co-production of electricity and district heat, by means of the gasification of municipal solid waste. *Applied Thermal Engineering*, 106, 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.185>

- 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.
- Inayat, A., Rocha-Meneses, L., Ghenai, C., Abdallah, M., Shanableh, A., Al-Ali, K., Alghfeli, A., & Alsuwaidi, R. (2022). Co-pyrolysis for bio-oil production via fixed bed reactor using date seeds and plastic waste as biomass. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101841>
- 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 & Technology*, 7(3), 565–582. <https://doi.org/10.xxxxx/ijost.vXiX>
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., & Setyawan, M. (2023). Technical, Economic, and Environmental Review of Waste to Energy Technologies from Municipal Solid Waste. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 581–593. <https://doi.org/10.14710/jil.21.3.581-593>
- Jamilatun, S., & Setyawan, M. (2012). Kondensasi Asap Pirolisis Tempurung Kelapa Menjadi Asap Cair (Liquid Smoke) Berbasis pada Luas Transfer Perpindahan Panas. *Symposium in Industrial Technology*, 25–32.
- Jurado, L., Papaefthimiou, V., Thomas, S., & Roger, A. C. (2021). Upgrading syngas from wood gasification through steam reforming of tars over highly active Ni-perovskite catalysts at relatively low temperature. *Applied Catalysis B: Environmental*, 299, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120687>
- Jurczyk, M., Mikus, M., & Dziedzic, K. (2016). Flue gas cleaning in municipal waste-to-energy plants part I. *Infrastruktura i Ekologia Terenow Wiejskich*. <https://doi.org/10.14597/infraeco.2016.4.1.086>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Klinghoffer, N. B., Themelis, N. J., & Castaldi, M. J. (2013). Waste to energy (WTE): An introduction. *Waste to Energy Conversion Technology*, 1–14. <https://doi.org/10.1533/9780857096364.1.3>
- Kothari, R., Tyagi, V. V., & Pathak, A. (2010). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 9, pp. 3164–3170). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.005>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Lee, H.-S., Xin, W., Katakojwala, R., Mohan, V., & Tabish, N. M. D. (2022). Microbial electrolysis cells for the production of biohydrogen in dark fermentation – A review. *Bioresource Technology*, 363.
- Lisbona, P., Pascual, S., & Pérez, V. (2023). Waste to energy: Trends and perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100494>
- Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. anan. (2018). The evolution of waste-to-energy incineration: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 91, pp. 812–821).

Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>

- Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y., & Wang, C. H. (2016). Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Conversion and Management*, 123, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.071>
- Mateos, P. S., Navas, M. B., Morcelle, S. R., Ruscitti, C., Matkovic, S. R., & Briand, L. E. (2021). Insights in the biocatalyzed hydrolysis, esterification and transesterification of waste cooking oil with a vegetable lipase. *Catalysis Today*, 372, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.09.027>
- Matsakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2017). Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. *Electronic Journal of Biotechnology*, 26, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004>
- Mazzoni, L., Janajreh, I., Elagroudy, S., & Ghenai, C. (2020). Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge. *Energy*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117001>
- McCarty, N. S., & Ledesma-Amaro, R. (2019). Synthetic Biology Tools to Engineer Microbial Communities for Biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 37(2), 181–197. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.002>
- Mona, S., Kumar, S. S., Kumar, V., Parveen, K., Saini, N., Deepak, B., & Pugazhendhi, A. (2020). Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): A review. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138481>
- Naran, E., Toor, U. A., & Kim, D. J. (2016). Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization and methane production. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.011>
- Olubunmi, B. E., Karmakar, B., Aderemi, O. M., G., A. U., Auta, M., & Halder, G. (2020). Parametric optimization by Taguchi L9 approach towards biodiesel production from restaurant waste oil using Fe-supported anthill catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104288>
- Osman, A. I., Deka, T. J., Baruah, D. C., & Rooney, D. W. (2020). Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 8383–8401. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00965-x/Published>
- Rizwan, M., Shah, S. H., Mujtaba, G., Mahmood, Q., Rashid, N., & Shah, F. A. (2019). Ecofuel feedstocks and their prospect. In *Advanced Biofuels: Applications, Technologies and Environmental Sustainability* (pp. 3–16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00001-5>
- Santos, R. E. dos, Santos, I. F. S. dos, Barros, R. M., Bernal, A. P., Tiago Filho, G. L., & Silva, F. das G. B. da. (2019). Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*, 231, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>
- Sevillano, C. A., Pesantes, A. A., Peña Carpio, E., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2021). Anaerobic digestion for producing renewable energy-the evolution of this technology in a new uncertain scenario. *Entropy*, 23(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/e23020145>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total*

- Environment*, 713, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Shovon, S. M., Akash, F. A., Rahman, W., Rahman, M. A., Chakraborty, P., Hossain, H. M. Z., & Monir, M. U. (2024). Strategies of managing solid waste and energy recovery for a developing country – A review. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24736>
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020). Comparative evaluation of the influence of waste vegetable oil and waste animal oil-based biodiesel on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118613>
- Soria-Verdugo, A., Cano-Pleite, E., Passalacqua, A., & Fox, R. O. (2023). Effect of particle shape on biomass pyrolysis in a bubbling fluidized bed. *Fuel*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127365>
- Supraja, K. V., Behera, B., & Paramasivan, B. (2020). Optimization of process variables on two-step microwave-assisted transesterification of waste cooking oil. *Sustainable Industrial and Environmental Bioprocesses*, 27, 27244–27255.
- Tessele, F., & Van Lier, J. B. (2020). Anaerobic digestion and the circular economy. *Water E-Journal*, 5(3).
- Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>
- Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., & Ng, W. J. (2018). Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 93, pp. 380–399). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051>
- Uddin, M. N., Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Djavanroodi, F., Hazrat, M. A., Show, P. L., Ahmed, S. F., & Chu, Y. M. (2021). Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.627093>
- Van, D. P., Fujiwara, T., Tho, B. L., Toan, P. P. S., & Minh, G. H. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1–17.
- Verma, P., & Sharma, M. P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063–1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054>
- Wienchol, P., Szlęk, A., & Ditaranto, M. (2020). Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities. *Energy*, 198, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117352>
- Yue, W., Ma, X., Yu, Z., Liu, H., Li, M., & Lu, X. (2023). Ni-CaO bifunctional catalyst for biomass catalytic pyrolysis to produce hydrogen-rich gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169.
- Zhao, B., Su, Y., Liu, D., Zhang, H., Liu, W., & Cui, G. (2016). SO₂/NO_x emissions and ash formation from algae biomass combustion: Process characteristics and mechanisms. *Energy*, 113, 821–830. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.107>