

Inovasi Teknologi Pengolahan Sampah Organik Menjadi Energi Terbarukan

Nur Ilman Ilyas *¹

¹ Universitas Pelita Bangsa

*e-mail: nurilmanilyas@pelitabangsa.ac.id

Abstrak

Sampah organik merupakan komponen terbesar timbulan sampah di Indonesia dan memiliki potensi tinggi sebagai sumber energi biomassa terbarukan. Ketergantungan pada landfill menyebabkan peningkatan emisi dan beban TPA, sehingga diperlukan inovasi teknologi pengolahan yang mampu mengonversi sampah organik menjadi energi bernilai guna. Penelitian ini menganalisis kinerja teknologi waste-to-energy berbasis sampah organik, meliputi biogas, biobriket, dan refuse derived fuel (RDF), melalui kajian literatur terarah dan analisis komparatif hasil penelitian lokal lima tahun terakhir. Parameter yang dievaluasi mencakup karakteristik bahan baku, efisiensi proses, kualitas energi, serta potensi reduksi volume sampah. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi biogas efektif untuk skala rumah tangga dan komunal, sedangkan biobriket dan RDF memiliki nilai kalor lebih tinggi serta relevan untuk sektor industri. Sintesis temuan menegaskan bahwa integrasi multi-teknologi sesuai konteks wilayah berpotensi memperkuat transisi energi terbarukan sekaligus meningkatkan kinerja pengelolaan sampah berkelanjutan.

Kata kunci: Sampah Organik, Energi Terbarukan, Biogas, Biobriket, RDF

Abstract

Organic waste represents the largest fraction of municipal solid waste in Indonesia and holds strong potential as a renewable biomass energy source. Reliance on landfilling increases emissions and landfill burden, indicating the need for technological innovation capable of converting organic waste into useful energy. This study analyzes the performance of organic-waste-based waste-to-energy technologies, including biogas, biobriquettes, and refuse derived fuel (RDF), through a directed literature review and comparative analysis of local research published over the past five years. The evaluated parameters include feedstock characteristics, process efficiency, energy quality, and potential waste-volume reduction. The findings indicate that biogas technology is effective at household and community scales, while biobriquettes and RDF demonstrate higher calorific values and stronger relevance for industrial applications. The synthesis confirms that context-specific multi-technology integration has the potential to strengthen the renewable-energy transition while simultaneously improving the performance of sustainable waste-management systems.

Keywords: Organic Waste, Renewable Energy, Biogas, Biobriquette, RDF

PENDAHULUAN

Sampah organik merupakan fraksi terbesar dalam komposisi timbulan sampah di Indonesia dan memberi kontribusi signifikan terhadap beban pengelolaan sampah di berbagai wilayah perkotaan. Dominasi fraksi organik ini menyebabkan akumulasi volume sampah yang cukup besar di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), terutama karena sebagian besar sistem pengelolaan sampah di Indonesia masih bertumpu pada skema pengumpulan-pengangkutan-pembuangan. Ketergantungan pada sistem pembuangan akhir berbasis landfill tidak hanya menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca melalui proses dekomposisi anaerob, tetapi juga menimbulkan persoalan lingkungan dan kesehatan masyarakat, seperti pencemaran air lindi, bau, serta potensi penyebaran vektor penyakit.

Selain itu, kapasitas lahan TPA yang terbatas di sejumlah daerah mendorong terjadinya penumpukan sampah dan mempercepat usia operasional TPA. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pendekatan pengelolaan sampah tidak dapat lagi sekadar berorientasi pada pembuangan, melainkan harus bergeser menuju pemanfaatan nilai material sampah sebagai sumber energi dan sumber daya alternatif (Huvito & Lianto, 2025). Studi pada pengembangan fasilitas pengolahan sampah organik berbasis energi terbarukan di kawasan Bantargebang menunjukkan bahwa

integrasi pendekatan desain, lingkungan, dan inovasi teknologi dapat memperkuat efisiensi pengelolaan sampah sekaligus menghasilkan nilai tambah energi (Huvito & Lianto, 2025).

Di sisi lain, dominasi sampah organik justru membuka peluang pengembangan biomassa sebagai sumber energi terbarukan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa limbah organik rumah tangga, pasar, maupun limbah pertanian memiliki karakteristik kimia dan biologis yang memungkinkan untuk dikonversi menjadi energi melalui berbagai pendekatan teknologi, terutama teknologi biogas (Agustin et al., 2023; Aqilah et al., 2023). Pemanfaatan biogas dari sampah organik tidak hanya berkontribusi pada pengurangan timbulan sampah yang masuk ke TPA, tetapi juga mendukung penyediaan energi alternatif bagi rumah tangga dan komunitas, terutama di wilayah yang belum sepenuhnya terjangkau infrastruktur energi modern (Agustin et al., 2023). Dengan demikian, pengolahan sampah organik berbasis biogas memiliki potensi ganda, yaitu sebagai instrumen mitigasi lingkungan sekaligus sebagai solusi penyediaan energi bersih pada level masyarakat.

Analisis teknis yang dilakukan Rahmat et al. (2023) menunjukkan bahwa konversi sampah organik menjadi biogas memiliki potensi efisiensi energi yang cukup tinggi, terutama pada sistem biodigester berskala kecil hingga menengah (Rahmat et al., 2023). Hal ini mengindikasikan bahwa teknologi biogas relevan untuk diterapkan tidak hanya sebagai solusi pengurangan limbah, tetapi juga sebagai strategi diversifikasi energi bagi masyarakat. Meski demikian, keberhasilan pemanfaatan biogas sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, desain reaktor, serta manajemen operasional teknologi yang diterapkan (Rahmat et al., 2023). Variasi komposisi sampah organik, tingkat kelembaban, dan kualitas pengolahan menjadi faktor yang menentukan stabilitas produksi gas, sehingga diperlukan pendekatan teknis yang adaptif terhadap kondisi lapangan.

Selain biogas, pengembangan briket biomassa dari sampah organik juga menjadi alternatif pengolahan yang potensial. Penelitian Saragih et al. (2020) menunjukkan bahwa biobriket berbasis sampah organik memiliki nilai kalor yang kompetitif sebagai sumber energi terbarukan dan dapat dikembangkan sebagai substitusi sebagian bahan bakar konvensional (Saragih et al., 2020). Teknologi briket pada dasarnya memanfaatkan residu organik kering melalui proses karbonisasi dan pemadatan, sehingga tidak hanya meningkatkan nilai guna residu yang sebelumnya tidak termanfaatkan, tetapi juga memperluas pilihan model konversi energi berbasis sampah. Dengan karakteristiknya yang relatif sederhana dan mudah diadaptasi, teknologi ini memiliki peluang diterapkan pada skala rumah tangga, usaha mikro, maupun komunitas.

Pada skala yang lebih besar, pengolahan sampah menjadi refuse derived fuel (RDF) mulai berkembang sebagai bagian dari skema waste-to-energy nasional. Produksi RDF dinilai mampu mengurangi volume timbulan sampah sekaligus menyediakan bahan bakar alternatif bagi sektor industri, khususnya industri semen (Maulidayanti et al., 2024). Studi Prariesta et al. (2023) juga menegaskan bahwa penggunaan RDF memiliki implikasi terhadap pengurangan emisi pembakaran sekaligus mendukung transisi energi yang lebih berkelanjutan di sektor industri (Prariesta et al., 2023). Dengan demikian, RDF menjadi salah satu instrumen penting dalam mendorong sinergi pengelolaan sampah dan kebijakan energi, terutama pada level tata kelola perkotaan dan industri.

Berdasarkan perkembangan tersebut, terlihat bahwa inovasi teknologi pengolahan sampah organik memiliki peran strategis dalam dua dimensi sekaligus, yaitu pengurangan beban lingkungan dan penyediaan sumber energi terbarukan. Namun, setiap teknologi memiliki karakteristik, konteks penerapan, serta skala operasional yang berbeda mulai dari skala rumah tangga, komunitas, hingga industri. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang tidak hanya memotret potensi teknis masing-masing teknologi, tetapi juga menganalisis kinerja, kesesuaian konteks, serta peluang integrasinya dalam sistem pengelolaan sampah.

Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis inovasi teknologi pengolahan sampah organik menjadi energi terbarukan melalui pendekatan komparatif terhadap teknologi biogas, biobriket, dan RDF berbasis temuan empiris penelitian lokal lima tahun terakhir. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada penguatan landasan

ilmiah, memperjelas arah pengembangan teknologi, serta menghasilkan rekomendasi penerapan yang adaptif terhadap kebutuhan pengelolaan sampah dan transisi energi berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Sampah Organik dan Energi Terbarukan

Sampah organik merupakan fraksi limbah yang berasal dari material hayati seperti sisa makanan, limbah dapur, dedaunan, limbah pasar, dan residu pertanian, yang secara alami mudah terdegradasi secara biologis. Karakteristik kimiawi sampah organik umumnya memiliki kadar air tinggi, kandungan bahan organik mudah menguap, serta potensi energi biomassa yang dapat dikonversi melalui proses biologis maupun termal. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa karakteristik tersebut menjadikan sampah organik sebagai salah satu sumber biomassa potensial untuk pengembangan energi terbarukan, terutama melalui proses fermentasi anaerob dan teknologi biogas (Damayanti et al., 2021).

Dalam konteks sistem energi nasional, biomassa diposisikan sebagai salah satu pilar energi terbarukan yang dapat mendukung diversifikasi sumber energi dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Prospek pemanfaatan biogas sebagai energi alternatif dinilai relevan baik untuk skala rumah tangga, komunal, maupun sektor kecil-menengah, karena mampu menyediakan sumber energi substitusi sekaligus mengurangi beban penanganan sampah organik (Ermawati et al., 2023). Kajian literatur lain menegaskan bahwa teknologi biogas dari limbah organik memiliki nilai strategis tidak hanya dari aspek teknis, tetapi juga dari perspektif keberlanjutan lingkungan dan efisiensi pengelolaan limbah (Fauziah & Hidayatullah, 2023).

Dengan demikian, sampah organik tidak lagi dipandang sebagai residu tanpa nilai, melainkan sebagai sumber daya biomassa yang dapat diintegrasikan dalam pengembangan sistem energi terbarukan dan pengelolaan sampah berkelanjutan.

Teknologi Konversi Sampah Organik Menjadi Energi

1. Teknologi Biogas (Anaerobic Digestion)

Teknologi biogas merupakan proses konversi material organik melalui fermentasi anaerob yang menghasilkan campuran gas dengan kandungan utama metana. Proses ini berlangsung melalui beberapa tahapan reaksi biologis, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis, yang dipengaruhi oleh komposisi bahan, suhu operasi, dan waktu tinggal reaktor. Pemanfaatan sampah organik rumah tangga dan limbah ternak sebagai bahan baku biogas terbukti mampu menyediakan sumber energi untuk kebutuhan domestik sehari-hari serta mengurangi timbulan limbah (Damayanti et al., 2021).

Berbagai program pelatihan dan pendampingan masyarakat menunjukkan bahwa penerapan biodigester skala rumah tangga dan komunal tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga memproduksi pupuk cair sebagai produk samping yang bernilai ekonomi (Hasanudin et al., 2022; Saptaji et al., 2021). Implementasi biodigester pada lingkungan pendidikan juga memberikan hasil yang positif, di mana pengolahan limbah organik rumah tangga menghasilkan suplai biogas sekaligus pupuk organik cair yang dimanfaatkan dalam kegiatan pembelajaran lingkungan dan praktik kewirausahaan siswa (Setiyono & Sulanjari, 2024). Dari aspek teknis, pemrosesan limbah organik dan kotoran ternak pada reaktor biogas terbukti meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah sekaligus memberikan manfaat energi langsung bagi pengguna (Sastrawan et al., 2024). Pengembangan rancangan reaktor bahkan telah diarahkan pada aplikasi spesifik, termasuk sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan bermotor skala eksperimental (Pranata et al., 2020).

Secara umum, kinerja teknologi biogas dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, rasio pencampuran, desain reaktor, serta kapasitas operasional, sehingga diperlukan pendekatan rekayasa yang adaptif terhadap kondisi lokal.

2. Briket Bio-Arang dan Biobriket dari Sampah Organik

Teknologi briket bio-arang merupakan proses densifikasi biomassa organik kering melalui pengeringan, karbonisasi, dan pemadatan, sehingga menghasilkan bahan bakar padat

dengan nilai kalor lebih tinggi dan kestabilan pembakaran yang lebih baik. Studi mengenai biobriket berbasis sampah organik menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan memiliki karakteristik nilai kalor yang kompetitif serta dapat dikembangkan sebagai sumber energi alternatif substitusi bahan bakar konvensional (Fitriana & Febrina, 2021).

Selain itu, pengolahan sampah organik menjadi biobriket tidak hanya meningkatkan nilai guna residu organik kering, tetapi juga memperluas opsi konversi energi untuk daerah dengan keterbatasan akses teknologi biogas (Saragih et al., 2020). Pengembangan teknologi ini dinilai relevan untuk skala rumah tangga dan usaha kecil, karena sederhana, ekonomis, dan memiliki potensi penerapan luas.

3. Refuse Derived Fuel (RDF) Berbasis Fraksi Organik

Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan produk bahan bakar padat yang dihasilkan dari proses pemilahan, pengeringan, pencacahan, dan pemadatan fraksi sampah termasuk fraksi organik kering, untuk digunakan sebagai bahan bakar substitusi. Studi evaluatif pada fasilitas RDF menunjukkan bahwa proses produksi RDF tidak hanya efektif dalam mengurangi volume sampah, tetapi juga menghasilkan bahan bakar alternatif dengan nilai kalor yang memadai untuk kebutuhan industri (Kurniawan et al., 2024).

Pengembangan RDF juga diposisikan sebagai bagian dari strategi pemanfaatan limbah perkotaan menuju energi terbarukan pada skala regional dan kawasan industri (Atmika & Suryawan, 2022). Dari perspektif tata kelola, RDF dipandang sebagai instrumen percepatan ekonomi sirkular, terutama ketika diintegrasikan dengan sektor industri semen melalui skema co-processing dan co-firing (Maghfuri & Nugroho, 2024).

Dengan demikian, RDF berperan tidak hanya sebagai inovasi teknologi pengolahan sampah, tetapi juga sebagai bagian dari transformasi sistem energi dan ekonomi daerah.

Inovasi Teknologi Pengolahan Sampah Organik di Indonesia

Inovasi teknologi pengolahan sampah organik di Indonesia berkembang dalam dua ranah utama, yaitu rekayasa fasilitas dan model pemberdayaan masyarakat. Pada tataran desain dan infrastruktur, pengembangan fasilitas pengolahan sampah organik berbasis pendekatan biofilik dan energi terbarukan menunjukkan bahwa integrasi arsitektur, lingkungan, dan sistem pengolahan dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan limbah sekaligus menciptakan ruang edukatif bagi masyarakat (Huvito & Lianto, 2025).

Pada sisi sosial-komunitas, berbagai program pengabdian dan pendampingan warga menekankan pentingnya transfer pengetahuan, pelatihan teknis pengoperasian biodigester, serta penguatan kapasitas masyarakat dalam pengelolaan sampah organik berbasis energi (Hasanudin et al., 2022; Saptaji et al., 2021). Inisiatif lain juga mendorong pengembangan produk turunan seperti eco-enzyme sebagai bentuk inovasi fermentasi organik yang memiliki manfaat ekologis dan ekonomi (Budiyanto et al., 2022).

Dari perspektif kebijakan, kajian prospektif menunjukkan bahwa pemanfaatan biogas dan RDF berpotensi menjadi bagian dari strategi transisi energi daerah sekaligus penguatan sistem ekonomi sirkular (Ermawati et al., 2023; Maghfuri & Nugroho, 2024). Hal ini menegaskan bahwa inovasi teknologi tidak dapat dilepaskan dari dukungan kelembagaan, regulasi, dan keberlanjutan ekosistem implementasi.

Kerangka Konseptual Penelitian

Kerangka konseptual penelitian ini disusun dengan memadukan temuan empiris dan landasan teoretis terkait pemanfaatan sampah organik sebagai sumber energi terbarukan. Secara umum, hubungan konseptual dirumuskan melalui tiga komponen utama, yaitu:

1. Input: karakteristik sampah organik meliputi jenis bahan, kadar air, dan potensi energi biomassa;
2. Proses: penerapan teknologi konversi yang mencakup biogas, biobriket, dan RDF beserta parameter kinerja teknisnya;
3. Output: kualitas energi yang dihasilkan, efisiensi pengurangan volume sampah, serta dampak lingkungan-sosial yang ditimbulkan.

Kerangka ini menempatkan penelitian pada posisi evaluatif-komparatif, yaitu menganalisis kesesuaian penerapan setiap teknologi berdasarkan konteks skala, potensi energi, dan kontribusi terhadap sistem pengelolaan sampah berkelanjutan, sebagaimana ditekankan dalam kajian biogas dan RDF sebelumnya (Ermawati et al., 2023; Kurniawan et al., 2024; Rahmat et al., 2023).

Kerangka tersebut menjadi dasar analisis pada bagian hasil dan pembahasan, sekaligus sebagai pijakan penyusunan rekomendasi integrasi teknologi pengolahan sampah organik dalam sistem energi terbarukan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan desain kajian literatur terarah (*systematic directed literature review*) yang dipadukan dengan analisis komparatif terhadap temuan empiris penelitian lokal lima tahun terakhir terkait inovasi teknologi pengolahan sampah organik menjadi energi terbarukan. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti memetakan perkembangan kajian ilmiah secara sistematis sekaligus mengevaluasi kecenderungan temuan teknis pada berbagai konteks penerapan teknologi biogas, biobriket, dan refuse derived fuel (RDF). Kajian literatur dilakukan secara terstruktur mulai dari identifikasi topik penelitian, penentuan kata kunci, seleksi sumber, validasi relevansi, hingga proses ekstraksi data. Sumber data penelitian diperoleh melalui penelusuran artikel jurnal nasional terindeks yang dapat diakses dalam format PDF penuh. Basis penelusuran mencakup jurnal-jurnal bidang teknik lingkungan, energi terbarukan, teknologi persampahan, serta pengabdian masyarakat yang relevan dengan praktik implementasi teknologi waste-to-energy.

Proses seleksi artikel dilakukan menggunakan seperangkat kriteria inklusi yang dirumuskan untuk memastikan kesesuaian temuan dengan tujuan penelitian. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel secara eksplisit mengkaji pengolahan sampah organik sebagai sumber energi, (2) memuat parameter teknis seperti karakteristik bahan baku, nilai kalor, komposisi metana, efisiensi proses, atau reduksi volume sampah, (3) terbit dalam rentang lima tahun terakhir sehingga mencerminkan perkembangan inovasi teknologi terkini, dan (4) memiliki relevansi konteks penerapan di Indonesia, baik pada skala rumah tangga, komunitas, maupun industri. Artikel yang bersifat konseptual umum tanpa temuan empiris, tidak menampilkan data teknis yang dapat dibandingkan, atau tidak terkait langsung dengan proses konversi energi dikeluarkan dari tahapan analisis.

Data yang telah terpilih kemudian dianalisis melalui tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah proses kategorisasi temuan, yaitu pengelompokan artikel berdasarkan jenis teknologi konversi (biogas, briket bio-arang, dan RDF), skala penerapan, sumber bahan baku, serta parameter kinerja energi yang diukur. Tahap kedua merupakan analisis komparatif, di mana keluaran teknologi yang dilaporkan pada berbagai penelitian dibandingkan secara tematik untuk mengidentifikasi pola keunggulan, keterbatasan teknis, variasi hasil operasional, dan kesesuaian penerapan teknologi pada masing-masing konteks wilayah. Tahap ketiga adalah sintesis temuan, yaitu proses mengintegrasikan hasil analisis komparatif dengan kerangka konseptual penelitian guna menghasilkan pemaknaan yang lebih komprehensif mengenai posisi tiap teknologi dalam sistem pengelolaan sampah dan transisi energi terbarukan.

Validitas temuan diperkuat melalui proses cross-checking antarartikel, triangulasi argumentatif antara hasil teknis, dimensi sosial, dan implikasi kebijakan, serta pemeriksaan konsistensi parameter pada berbagai studi yang dianalisis. Selain itu, interpretasi hasil kajian dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan perbedaan skala penelitian, variasi metode pengujian, serta heterogenitas karakteristik bahan baku pada masing-masing lokasi studi. Melalui pendekatan analisis yang sistematis, reflektif, dan berbasis evidensi ini, penelitian diharapkan mampu menghadirkan gambaran yang utuh dan kontekstual mengenai potensi integrasi multi-teknologi pengolahan sampah organik sebagai bagian dari penguatan sistem energi terbarukan dan pengelolaan sampah berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sampah Organik yang Diolah

Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa komposisi sampah rumah tangga di Indonesia didominasi oleh fraksi organik seperti sisa makanan, sayuran, buah-buahan, dedaunan, limbah dapur, serta residu pasar tradisional. Pada sejumlah daerah perkotaan, proporsi fraksi organik bahkan dilaporkan mencapai lebih dari separuh total timbulan sampah, sehingga memberikan kontribusi paling besar terhadap peningkatan volume sampah yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Kondisi ini tidak hanya berdampak pada kapasitas tampung TPA, tetapi juga pada biaya operasional, potensi pencemaran, dan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses pembusukan alami sampah organik.

Secara umum, sampah organik di Indonesia memiliki karakteristik fisik berupa kadar air yang tinggi, tekstur yang mudah hancur, dan kandungan bahan organik yang mudah terdegradasi. Karakteristik tersebut mencerminkan potensi biomassa yang besar, karena material organik dapat mengalami proses dekomposisi biologis yang menghasilkan energi dalam bentuk gas maupun residu yang masih bernilai guna. Dari sudut pandang energi biomassa, kondisi ini membuka peluang pemanfaatan melalui teknologi fermentasi anaerob, produksi biogas, dan konversi energi berbasis pengolahan biologis. Dengan kata lain, sifat alami material organik tidak hanya menempatkannya sebagai limbah, tetapi juga sebagai sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan secara lebih produktif.

Namun demikian, karakteristik yang sama juga menghadirkan sejumlah tantangan teknis dalam proses pengolahan. Kandungan air yang tinggi, misalnya, dapat menurunkan efisiensi proses termal seperti pembakaran langsung atau pirolisis apabila tidak melalui tahapan pengeringan terlebih dahulu. Di samping itu, keberadaan kontaminan anorganik seperti plastik, logam, kaca, atau material non-organik lainnya sering ditemukan tercampur di dalam sampah organik rumah tangga. Kontaminan tersebut dapat mengganggu proses pengomposan, menurunkan kualitas bahan baku, serta meningkatkan risiko kerusakan alat pada fasilitas pengolahan.

Oleh karena itu, sejumlah penelitian menekankan pentingnya proses pemilahan awal (source separation) dan tahapan pretreatment sebagai bagian integral dari rantai pengolahan sampah organik sebelum dikonversi menjadi energi. Proses ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi teknologi pengolahan, tetapi juga untuk memastikan bahwa material yang diproses memiliki kesesuaian karakteristik dengan jenis teknologi yang digunakan, baik pada sistem biogas, briket biomassa, maupun produksi RDF.

Temuan-temuan tersebut mengisyaratkan bahwa karakteristik sampah organik Indonesia memerlukan solusi teknologi yang adaptif dan kontekstual. Teknologi pengolahan tidak dapat dipilih hanya berdasarkan potensi energi biomassa semata, tetapi harus diselaraskan dengan sifat fisik-kimia material, pola timbulan sampah di masyarakat, serta kondisi operasional di lapangan. Dengan dasar itu, pemilihan model pengolahan tidak dapat dilakukan secara seragam pada semua wilayah, melainkan perlu mempertimbangkan perbedaan skala pengolahan, ketersediaan infrastruktur, serta tujuan akhir pemanfaatan energi dan pengurangan timbulan sampah.

Kinerja Teknologi Biogas

Kajian terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa teknologi biogas menjadi salah satu bentuk inovasi pengolahan sampah organik yang paling banyak diterapkan, terutama pada skala rumah tangga dan komunitas. Sistem biodigester yang memanfaatkan campuran sampah organik rumah tangga dan kotoran ternak terbukti mampu menghasilkan gas metana yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan memasak dan aktivitas domestik lainnya. Temuan studi implementasi biodigester pada lingkungan pendidikan juga menunjukkan bahwa pengolahan limbah organik mampu menghasilkan suplai biogas yang stabil sekaligus mendukung praktik pengelolaan sampah berbasis edukasi lingkungan (Setiyono & Sulanjari, 2024). Selain itu, residu hasil fermentasi dapat digunakan sebagai pupuk organik cair sehingga menghasilkan manfaat ganda, baik pada sektor energi maupun pertanian.

Kinerja teknologi biogas sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis, antara lain komposisi bahan baku, rasio pencampuran antara bahan padat dan cair, suhu fermentasi, serta

waktu tinggal material di dalam reaktor. Penelitian yang menguji variasi kombinasi bahan menunjukkan bahwa campuran limbah organik basah dengan kotoran ternak cenderung menghasilkan volume gas yang lebih stabil karena kandungan mikroorganisme pengurai yang lebih tinggi. Desain reaktor juga menjadi unsur penting, di mana sistem tertutup yang sederhana sekalipun dapat memberikan performa optimal apabila dikelola secara konsisten.

Di sisi lain, tantangan non-teknis masih ditemukan pada praktik implementasi di lapangan. Beberapa penelitian mencatat bahwa kegagalan pengoperasian biodigester sering kali tidak disebabkan oleh keterbatasan teknis, namun lebih pada kurangnya pemeliharaan rutin, keterbatasan pemahaman pengguna terhadap prosedur operasional, serta inkonsistensi pasokan bahan baku. Dengan demikian, keberhasilan teknologi biogas tidak hanya ditentukan oleh rancangan reaktor atau parameter teknisnya, tetapi juga oleh keberlanjutan sistem pengelolaan yang melibatkan aspek pengetahuan, budaya penggunaan, dan dukungan kelembagaan.

Secara keseluruhan, teknologi biogas menunjukkan kinerja yang efektif pada skala kecil hingga menengah, terutama di wilayah dengan dominasi limbah organik basah dan ketersediaan sumber bahan baku yang berkelanjutan. Hal ini menegaskan bahwa biogas memiliki posisi strategis sebagai solusi energi sekaligus sebagai instrumen pengurangan timbulan sampah organik.

Kinerja Teknologi Briket Bio-Arang / Biobriket

Pengolahan sampah organik melalui teknologi briket bio-arang memberikan alternatif yang berbeda dibandingkan teknologi biogas karena berorientasi pada produksi energi padat melalui proses termal. Teknologi ini memanfaatkan residu organik kering seperti ranting, serbuk biomassa, limbah daun, sekam, atau sisa bahan organik non-basah yang tidak optimal jika diproses melalui fermentasi anaerob. Proses karbonisasi yang dilakukan pada suhu tertentu mengubah material organik menjadi arang biomassa dengan kandungan karbon yang lebih tinggi, kemudian dilanjutkan dengan proses pemadatan menggunakan bahan pengikat agar membentuk struktur briket yang kompak. Hasil kajian menunjukkan bahwa briket yang dihasilkan dari campuran serbuk biomassa, residu organik kering, dan bahan pengikat tertentu memiliki kualitas pembakaran yang kompetitif dan lebih stabil dibandingkan residu organik dalam bentuk aslinya. Hal ini menjadikan biobriket sebagai bentuk peningkatan nilai tambah (*value-added product*) dari limbah organik kering yang sebelumnya tidak termanfaatkan secara optimal.

Kinerja briket bio-arang dipengaruhi oleh beberapa parameter teknis utama, antara lain kadar air bahan, suhu dan lama proses karbonisasi, ukuran partikel, serta tekanan pemadatan saat pencetakan. Nilai kalor yang lebih tinggi umumnya dicapai ketika kadar air bahan rendah dan proses karbonisasi menghasilkan struktur pori arang yang lebih homogen. Sebaliknya, kadar air yang tinggi menyebabkan briket lebih sulit menyala, menghasilkan asap lebih banyak, serta menurunkan efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, tahapan pengeringan awal menjadi faktor penting dalam menjamin kualitas produk briket. Selain itu, penggunaan bahan pengikat yang tepat berpengaruh pada kekuatan mekanik briket, kemudahan distribusi, dan kestabilan bentuk selama penyimpanan.

Dibandingkan dengan teknologi biogas, proses pembuatan briket relatif lebih sederhana karena tidak memerlukan sistem reaktor tertutup, kontrol biologis, atau pengaturan kondisi fermentasi. Teknologi ini dapat dikembangkan dengan peralatan sederhana dan skala produksi yang fleksibel, mulai dari skala rumah tangga hingga unit produksi komunitas. Kondisi tersebut menjadikan biobriket sebagai alternatif yang sesuai untuk wilayah yang memiliki sumber residu organik kering melimpah, kondisi iklim yang mendukung proses pengeringan alami, serta keterbatasan akses terhadap teknologi konversi energi yang lebih kompleks.

Dari perspektif penggunaan energi, briket biomassa banyak dimanfaatkan untuk kebutuhan yang memerlukan bahan bakar padat seperti pengeringan hasil pertanian, pembakaran tungku rumah tangga, usaha kecil berbasis makanan, maupun aktivitas pengolahan produk tradisional. Keunggulan lain yang dicatat adalah kemudahan penyimpanan, daya tahan bentuk, serta kemudahan distribusi karena produk tidak mudah terurai atau membusuk seperti sampah organik basah. Dengan karakteristik tersebut, pengembangan biobriket berpotensi

mendorong terbentuknya rantai nilai ekonomi lokal melalui model produksi berbasis komunitas, kelompok usaha mikro, atau koperasi pengelola sampah.

Meskipun demikian, penerapan teknologi briket tetap memerlukan dukungan aspek teknis dan kelembagaan. Standarisasi kualitas produk, terutama terkait nilai kalor, kadar abu, dan emisi asap, perlu diperkuat agar produk briket dapat bersaing secara fungsional dengan bahan bakar padat lain. Di sisi lain, kapasitas produksi dan kesinambungan pasokan bahan baku perlu dikelola secara sistematis untuk menjaga keberlanjutan usaha. Dengan demikian, teknologi briket bio-arang memiliki prospek yang kuat sebagai solusi energi alternatif berbasis sampah organik kering, namun keberhasilannya tetap bergantung pada penguatan manajemen produksi, peningkatan kapasitas pelaku, serta dukungan kebijakan yang mendorong pengembangan rantai nilai biomassa berkelanjutan.

Kinerja RDF dan Kontribusinya terhadap Sistem Energi

Pada skala perkotaan dan industri, teknologi refuse derived fuel (RDF) berkembang sebagai salah satu instrumen strategis dalam pengelolaan sampah sekaligus penyediaan bahan bakar substitusi bagi sektor berenergi tinggi, khususnya industri semen. Berbeda dengan teknologi pengolahan berbasis biologis, RDF menekankan proses pemilahan, pengeringan, pencacahan, dan pemadatan fraksi sampah termasuk fraksi organik kering, untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik nilai kalor yang stabil. Studi evaluatif pada fasilitas RDF menunjukkan bahwa kualitas bahan bakar yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh keberhasilan proses pemilahan awal dan pengendalian kadar air, karena kedua aspek tersebut menentukan homogenitas material serta konsistensi nilai kalor untuk kebutuhan proses co-processing di industri semen.

Penggunaan RDF dinilai memberikan kontribusi pada dua dimensi strategis sekaligus. Pada dimensi persampahan, RDF mampu menurunkan volume sampah yang masuk ke TPA serta memperpanjang umur layanan fasilitas pengolahan akhir. Sementara pada dimensi energi, RDF berperan sebagai substitusi parsial bahan bakar fosil khususnya batubara, sehingga mendukung upaya penurunan konsumsi energi berbasis fosil di sektor industri. Hal ini sejalan dengan arah kebijakan transisi energi dan pengembangan ekonomi sirkular, di mana sampah tidak hanya dipandang sebagai residu, tetapi direposisi sebagai sumber daya energi alternatif yang memiliki nilai ekonomi.

Walaupun demikian, kinerja RDF tidak terlepas dari sejumlah prasyarat teknis dan kelembagaan. Kualitas RDF dipengaruhi oleh komposisi material, derajat pencampuran fraksi organik dan anorganik kering, kadar air, serta ketersediaan fasilitas prapengolahan seperti drying unit, shredder, dan sistem pemilahan mekanis. Selain itu, keberlanjutan operasional RDF sangat bergantung pada stabilitas pasokan sampah, kejelasan skema kemitraan antara pemerintah daerah dan industri, serta regulasi yang mengatur standar mutu bahan bakar alternatif. Dengan kata lain, RDF tidak hanya membutuhkan kesiapan teknologi, tetapi juga ekosistem tata kelola yang terintegrasi mulai dari pemilahan di hulu, proses produksi, hingga pemanfaatan di sektor industri.

Temuan kajian juga menegaskan bahwa peran RDF bersifat sistemik, karena berada pada titik temu antara kebijakan pengelolaan sampah, kebutuhan energi industri, dan agenda pengurangan emisi. Posisi ini membedakan RDF dari biogas dan briket biomassa yang cenderung beroperasi pada skala rumah tangga dan komunitas. RDF justru bekerja pada level kota dan kawasan industri, di mana dampak pengurangannya terhadap volume sampah dan konsumsi bahan bakar fosil bersifat lebih luas dan struktural.

Dengan demikian, RDF dapat dipandang sebagai teknologi pengolahan sampah organik-anorganik terpilah yang memiliki nilai strategis dalam sistem pengelolaan sampah modern. Selain berfungsi sebagai solusi teknis konversi sampah menjadi bahan bakar alternatif, RDF juga bertindak sebagai penghubung kebijakan lintas sektor antara persampahan, energi industri, dan ekonomi sirkular yang berpotensi memperkuat transformasi sistem energi dan keberlanjutan lingkungan dalam jangka panjang.

Dimensi Sosial dan Inovasi Pengelolaan

Hasil kajian menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan teknologi pengolahan sampah organik tidak hanya ditentukan oleh faktor teknis, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh dimensi sosial, partisipasi masyarakat, dan dukungan kelembagaan. Pengoperasian teknologi seperti biodigester, briket biomassa, maupun RDF memerlukan komitmen kolektif dari pengguna, pengelola lingkungan, dan pemangku kepentingan lokal. Pada tingkat komunitas, program pelatihan, pendampingan teknis, serta sosialisasi berkelanjutan terbukti meningkatkan kapasitas warga dalam memahami prosedur operasional, manajemen pemilahan sampah organik, serta pemanfaatan produk energi yang dihasilkan. Kehadiran proses pembelajaran sosial tersebut mendorong munculnya rasa memiliki (*sense of ownership*), yang selanjutnya memperkuat tanggung jawab bersama terhadap keberlanjutan sistem.

Partisipasi aktif warga menjadi prasyarat penting bagi keberlanjutan pengoperasian teknologi, terutama untuk memastikan ketersediaan bahan baku, kedisiplinan pemilahan, dan perawatan rutin terhadap unit pengolahan. Pengalaman di berbagai program implementasi menunjukkan bahwa teknologi yang dioperasikan secara kolektif, baik pada skala lingkungan, sekolah, maupun kelompok masyarakat, cenderung memiliki tingkat keberlangsungan yang lebih baik dibandingkan sistem yang dijalankan secara individual. Hal ini disebabkan karena proses pengelolaan tidak hanya bersandar pada kapasitas teknis operator, tetapi juga pada nilai-nilai kolaborasi, kerja gotong royong, dan mekanisme pengawasan sosial yang berkembang di dalam komunitas.

Pada konteks RDF dan pengolahan skala kota, penelitian menunjukkan bahwa dukungan pemerintah daerah, kemitraan dengan sektor industri, serta kejelasan skema pembiayaan memainkan peran besar dalam membangun penerimaan sosial dan legitimasi kebijakan. RDF tidak hanya dipandang sebagai inovasi teknis, tetapi juga sebagai bagian dari agenda penguatan ekonomi sirkular, sehingga keberadaannya memerlukan komunikasi publik yang efektif dan transparan. Ketika masyarakat memahami manfaat ekonomi, lingkungan, dan peluang kerja yang dihasilkan dari fasilitas pengolahan berbasis energi, tingkat penerimaan terhadap infrastruktur dan sistem operasional cenderung meningkat, sekaligus menekan resistensi sosial terhadap proyek pengelolaan sampah.

Di sisi lain, inovasi pengelolaan sampah organik secara bertahap mengalami pergeseran orientasi, dari pendekatan rekayasa teknis semata menuju pendekatan yang berlandaskan pemberdayaan masyarakat dan pembangunan kapasitas sosial. Pengolahan sampah tidak hanya diposisikan sebagai aktivitas pengurangan limbah, tetapi juga sebagai ruang pembelajaran lingkungan, media penguatan ekonomi lokal, serta sarana pembentukan perilaku produksi dan konsumsi yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, dimensi sosial bukanlah elemen pendukung yang bersifat tambahan, melainkan komponen yang melekat dalam desain, implementasi, dan keberlanjutan teknologi pengolahan sampah organik berbasis energi.

Sintesis dan Implikasi Kebijakan

Sintesis hasil kajian memperlihatkan bahwa ketiga model teknologi, yaitu biogas, biobriket, dan refuse derived fuel (RDF), memiliki karakteristik, keunggulan, serta skala penerapan yang berbeda namun bersifat saling melengkapi dalam sistem pengelolaan sampah organik berbasis energi. Biogas menunjukkan efektivitas tinggi pada pengolahan sampah organik basah dengan kadar air tinggi, terutama pada skala rumah tangga dan komunitas, karena proses fermentasi anaerob relatif mudah diadaptasikan pada level mikro hingga menengah. Berbeda dengan itu, biobriket lebih sesuai untuk residu organik kering dan biomassa padat yang melalui proses pengeringan dan karbonisasi, sehingga menghasilkan bahan bakar padat bernilai kalor tinggi dan stabil untuk penggunaan domestik maupun usaha kecil.

Sementara itu, RDF memiliki peran strategis pada skala kota dan industri sebagai bagian dari sistem energi substitusi yang terintegrasi dengan sektor industri energi-intensif, khususnya melalui skema co-processing pada industri semen dan manufaktur. Perbedaan skala, orientasi energi, dan karakteristik proses ini menunjukkan bahwa setiap teknologi tidak berdiri sebagai alternatif yang saling meniadakan, melainkan sebagai komponen yang dapat dirangkai dalam satu

rantai pengolahan yang adaptif terhadap konteks wilayah.

Berdasarkan keseluruhan temuan tersebut, pendekatan tunggal dalam pengolahan sampah organik dinilai tidak lagi memadai, terutama pada wilayah yang memiliki variasi timbunan, komposisi bahan baku, serta struktur sosial yang beragam. Strategi yang lebih relevan adalah penerapan model multi-teknologi yang dirancang secara selektif sesuai kondisi lokal, ketersediaan bahan baku, kapasitas teknis operator, serta kebutuhan energi yang ingin dicapai. Integrasi teknologi dapat dilakukan melalui pembagian peran: biogas untuk pengolahan residu organik basah pada tingkat rumah tangga dan komunitas, biobriket untuk pemanfaatan residu organik kering yang dapat diproduksi secara terdesentralisasi, dan RDF untuk penanganan fraksi organik kering campuran dalam skala kota yang terhubung dengan industri. Pendekatan integratif ini berpotensi memberikan dampak ganda, yaitu pengurangan timbunan sampah yang signifikan sekaligus peningkatan kontribusi sektor persampahan terhadap agenda transisi energi terbarukan dan ekonomi sirkular.

Dari perspektif kebijakan, hasil kajian menegaskan pentingnya dukungan regulasi yang tidak hanya mengatur aspek teknis pengelolaan sampah, tetapi juga mendorong integrasi sektor persampahan dengan sistem energi daerah dan industri. Kerangka kelembagaan perlu diperkuat melalui kejelasan peran pemerintah daerah, operator fasilitas, komunitas, dan mitra industri, termasuk dalam aspek pembagian tanggung jawab operasional, pengelolaan risiko, dan pengawasan mutu produk energi. Selain itu, skema pembiayaan yang berkelanjutan seperti kemitraan pemerintah-swasta, insentif bagi pemanfaatan bahan bakar alternatif, dan dukungan pendanaan inovasi menjadi elemen kunci agar implementasi teknologi tidak terhenti pada tahap proyek percontohan.

Penguatan tata kelola juga perlu diarahkan pada pengembangan standar kualitas teknologi, mekanisme monitoring kinerja, serta penyusunan model implementasi berbasis wilayah yang mempertimbangkan karakteristik sosial, teknis, dan ekonomi setempat. Dengan demikian, inovasi teknologi pengolahan sampah organik tidak hanya hadir sebagai solusi teknis jangka pendek, tetapi berkembang menjadi instrumen strategis dalam pembangunan energi berkelanjutan, pengurangan emisi, dan penguatan ekonomi sirkular di tingkat daerah maupun nasional.

KESIMPULAN

Simpulan

Hasil kajian secara keseluruhan menegaskan bahwa sampah organik memiliki peran strategis dalam pengembangan energi terbarukan melalui penerapan berbagai teknologi waste-to-energy. Karakteristik material organik yang memiliki kandungan air dan volatile solids tinggi menjadikan teknologi biogas sebagai salah satu opsi yang paling sesuai untuk skala rumah tangga dan komunitas. Produksi biogas tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi substitusi bagi kebutuhan domestik, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan timbunan sampah, penurunan beban TPA, serta pengurangan emisi lingkungan. Selain itu, residu hasil fermentasi dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik sehingga menciptakan nilai tambah dalam bentuk manfaat ganda bagi sektor energi dan pertanian.

Pada saat yang sama, teknologi briket bio-arang menunjukkan keunggulan spesifik dalam menghasilkan bahan bakar padat dengan nilai kalor yang lebih tinggi dan kestabilan pembakaran yang baik. Teknologi ini dinilai relevan untuk usaha kecil, aktivitas produksi skala lokal, dan daerah dengan ketersediaan residu biomassa kering. Sementara itu, refuse derived fuel (RDF) menempati posisi berbeda sebagai teknologi yang berkontribusi pada level sistemik, yakni pada skala kota dan industri. RDF memiliki peran penting sebagai substitusi sebagian bahan bakar fosil dalam kerangka ekonomi sirkular dan strategi transisi energi yang berorientasi pada pengurangan emisi dan efisiensi sumber daya.

Dari perspektif sosial dan kelembagaan, keberhasilan implementasi ketiga teknologi tersebut tidak dapat dilepaskan dari faktor partisipasi masyarakat, kapasitas operator, kontinuitas pendampingan teknis, serta dukungan regulasi dan kebijakan daerah. Temuan kajian menunjukkan bahwa setiap teknologi memiliki karakteristik, skala penerapan, dan tujuan energi yang berbeda, sehingga pendekatan berbasis satu teknologi tidak memadai. Pendekatan multi-

teknologi yang disesuaikan dengan kondisi wilayah, potensi bahan baku, serta kebutuhan energi lokal dipandang lebih mampu memperkuat kinerja pengelolaan sampah sekaligus meningkatkan kontribusi terhadap pengembangan energi terbarukan secara berkelanjutan. Integrasi selektif antara biogas, biobriket, dan RDF menjadi strategi yang potensial untuk mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang adaptif, efisien, dan berorientasi masa depan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dicermati dalam menafsirkan hasil kajian. Pertama, analisis dilakukan melalui sintesis literatur sehingga sebagian besar temuan bersumber pada data sekunder dan hasil penelitian terdahulu, bukan pada pengukuran eksperimental langsung. Kondisi ini membatasi ruang verifikasi terhadap parameter teknis tertentu. Kedua, variasi karakteristik sampah organik di berbagai wilayah Indonesia belum sepenuhnya terwakili karena perbedaan pola konsumsi, budaya pengelolaan sampah, serta kondisi lingkungan, sehingga generalisasi temuan perlu dilakukan secara kontekstual sesuai karakteristik daerah. Ketiga, sebagian besar penelitian yang dianalisis masih berada pada skala pilot, laboratorium, atau komunitas terbatas, sehingga reliabilitas teknologi pada skala industri dan sistem kota jangka panjang belum sepenuhnya teruji. Keterbatasan tersebut membuka peluang bagi penelitian lanjutan dengan pendekatan yang lebih aplikatif, integratif, dan berbasis pengukuran empiris.

Rekomendasi

Berdasarkan temuan kajian, beberapa rekomendasi dapat diajukan untuk pengembangan teknologi dan kebijakan. Pada tataran teknis, diperlukan optimalisasi desain reaktor biogas yang lebih adaptif terhadap variasi bahan baku, peningkatan standarisasi kualitas dan emisi pembakaran briket bio-arang, serta penguatan sistem kontrol mutu dan rantai pasok pada fasilitas RDF. Pada tingkat implementasi, integrasi teknologi perlu diarahkan secara terencana sesuai tipologi wilayah: biogas untuk skala rumah tangga dan komunitas dengan dominasi limbah organik basah, briket untuk usaha kecil berbasis biomassa kering, dan RDF untuk sektor industri yang memiliki kapasitas penyerapan bahan bakar substitusi yang stabil.

Pada tataran pengembangan ilmu dan riset, disarankan penguatan kajian berbasis analisis daur hidup (LCA), studi kelayakan ekonomi dan rantai nilai, analisis dampak lingkungan, serta pemodelan sistem energi kota yang mengintegrasikan berbagai teknologi waste-to-energy secara simultan. Selain itu, diperlukan penelitian interdisipliner yang memadukan aspek teknis, sosial, tata kelola, dan kebijakan publik agar inovasi teknologi pengolahan sampah organik tidak hanya berhenti pada skala teknis, tetapi berkembang sebagai solusi yang aplikatif, inklusif, dan berdaya saing dalam mendukung agenda pembangunan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, A. W., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Potensi Pemanfaatan Biogas Dari Sampah Organik Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 2(6), 1109–1116. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i6.2841>
- Aqilah, D. N., Yushardi, Y., & Sudarti, S. (2023). Analisis Potensi Pengelolaan Sampah Organik Sebagai Energi Alternatif Biogas Terbarukan. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 2(4), 1001–1004. <https://doi.org/10.47233/jpst.v2i4.1327>
- Atmika, I. G. N. A., & Suryawan, G. P. (2022). Pengelolaan Limbah Banten Sebagai Sumber Energi Terbarukan Dengan Teknologi RDF Berkualitas Tinggi. *Jurnal Bakti Saraswati*, 11(2), 97–106.
- Budiyanto, C. W., Yasmin, A., Fitdaushi, A. N., Rizqia, A. Q. S. Z., Safitri, A. R., Anggraeni, D. N., Farhana, K. H., Alkatiri, M. Q., Perwira, Y. Y., & Pratama, Y. A. (2022). Mengubah Sampah Organik Menjadi Eco Enzym Multifungsi: Inovasi di Kawasan Urban. *DEDIKASI: Community Service Reports*, 4(1), 31–38.
- Damayanti, A. A., Fuadina, Z. N., Azizah, N. N., Karinta, Y., & Mahardika, I. K. (2021). Pemanfaatan Sampah Organik Dalam Pembuatan Biogas Sebagai Sumber Energi Kebutuhan Hidup Sehari-

- Hari. *Eksergi: Jurnal Teknik Energi*, 17(3), 182–190. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v17i03.2803>
- Ermawati, Y., Yulistia, E., & Alamsyah, P. (2023). Prospek dan Potensi Biogas sebagai Energi Alternatif Menghadapi Krisis Energi. *UEEJ-Unbara Environmental Engineering Journal*, 03(02).
- Fauziah, L. H., & Hidayatullah, A. F. (2023). Studi literatur: pemanfaatan teknologi biogas dari limbah organik di Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 1(1), 1–18.
- Fitriana, W., & Febrina, W. (2021). Analisis Potensi Briket Bio-Arang Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 10(2), 147–154. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i2.147-154>
- Hasanudin, U., Nurdin, S. U., Indraningtyas, L., & Fadhallah, E. G. (2022). Pelatihan Pemanfaatan Sampah Organik menjadi Biogas dan Pupuk Cair. *Jurnal Pengabdian Fakultas Pertanian Universitas Lampung*, 1(1), 70–77. <https://doi.org/10.23960/jpfp.v1i1.5774>
- Huvito, N., & Lianto, F. (2025). Fasilitas Pengolahan Sampah Organik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Desain Biofilik Di Bantargebang. *Jurnal Sains, Teknologi, Urban, Perancangan, Arsitektur (Stupa)*, 7(2), 465–478. <https://doi.org/10.24912/stupa.v7i2.35554>
- Kurniawan, T. A., Yudiar, H., & Handayani, W. (2024). Evaluasi Pengolahan Sampah menjadi Refuse Derived Fuel pada TPST Mengwitani Badung, Bali. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 6(1), 94–100.
- Maghfuri, A., & Nugroho, D. W. (2024). Strategi Akselerasi Refused Derrived Fuel Kabupaten Cilacap Sebagai Penggerak Ekonomi Sirkular Di Indonesia. *Jurnal Inovasi Daerah*, 03(01), 76–90. <https://doi.org/10.566655/jid/v3i1.147>
- Maulidayanti, E. M., Yuliani, M., Robbani, M. H., Wiharja, W., Hambali, E., & Setyaningsih, D. (2024). Evaluasi Produksi Refuse-Derived Fuel (RDF) dari Sampah Perkotaan (Studi Kasus: RDF Plant di Kabupaten Cilacap). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(2), 179–189.
- Pranata, I. W. D. E., Dantes, K. R., & Wiratmaja, I. G. (2020). Rancang Bangun Reaktor Pengolah Limbah Organik Menjadi Biogas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Kendaraan Bermotor. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.23887/jptm.v8i1.27294>
- Priesta, D., Edahwati, L., & Karaman, N. (2023). Analisis Emisi dari Penggunaan Refuse Derived Fuel sebagai Bahan Bakar Alternatif di Industri Semen (Studi Kasus di PT Solusi Bangun Indonesia Cilacap). *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), 194–199.
- Rahmat, F. N., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Analysis of the Utilization of Organic Waste into Biogas Alternative. *Eksergi: Jurnal Teknik Energi*, 19(01), 32–34. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v19i01.4043>
- Saptaji, K., Fikri, M. R., Hadisujoto, I. B. S., & Harjon, A. (2021). Sosialisasi Pemanfaatan Sampah Organik Rumah Tangga Untuk Biogas Dan Pemasangan Biodigester. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Teknik*, 4(1), 11–18. <https://doi.org/10.24853/jpmt.4.1.11-18>
- Saragih, G. M., Marhadi, M., & Defriati, Y. (2020). Pengolahan Sampah Organik Menjadi Biobriket Sebagai Energi Terbarukan. *Jurnal Daur Lingkungan*, 3(2), 58–61. <https://doi.org/10.33087/daurling.v3i2.55>
- Sastrawan, S., Ridhana, F., Erita, E., & Pitriyanto, N. (2024). Teknik Pengolahan Limbah Kotoran Sapi Bali Untuk Pembuatan Biogas Di Kampung Paya Tungel Kecamatan Jagong Jeget. *Jurnal Ilmu Peternakan Dan Veteriner (JIPVET)*, 3(2), 30–40. <https://jurnal.ugp.ac.id/index.php/JIPVET>
- Setiyono, J., & Sulanjari, S. (2024). Studi Pengolahan Limbah Organik Rumah Tangga Menggunakan Biodigester Penghasil Biogas Dan Pupuk Organik Di SMK Sasmita Jaya Pamulang. *Garda: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 102–110.