

ANALISIS KONSEP FISIKA PADA TEKNOLOGI BIODIGESTER UNTUK PERTANIAN

Anisa Suci Galuh Rosida¹, Hilma Alifatur Rofida², Kendid Mahmudi³

230210102062@unej.ac.id¹, 230210102066@unej.ac.id², kendidmahmudi.fkip@unej.ac.id³

Universitas Jember

ABSTRAK

Indonesia, sebagai negara agraris, memerlukan perhatian serius dalam upaya meningkatkan hasil pertanian. Salah satu solusi yang dapat ditempuh adalah dengan pemanfaatan pupuk yang dapat menyuburkan tanaman tanpa merusak kesuburan tanah, seperti pupuk kompos yang dihasilkan melalui teknologi biodigester. Biodigester sendiri berguna sebagai teknologi pertanian yang ramah lingkungan yaitu menghasilkan biogas pupuk organik yang diolah dari limbah peternakan, limbah pertanian, dan limbah organik rumah tangga. Hal tersebut mendukung sistem pertanian yang bersih, hemat energi dan berkelanjutan. Biodigester merupakan sistem yang menggabungkan proses fisik dan biologis, di mana prinsip-prinsip fisika memainkan peran penting dalam mendukung kinerja dan efisiensi penguraian bahan organik. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui konsep fisika apa saja yang pada teknologi biodigester. Metode penelitian yang digunakan adalah metode studi literatur, yaitu dengan mengumpulkan informasi dari jurnal ilmiah, buku, dan laporan penelitian sebelumnya.

Kata Kunci: Biodigester, Limbah Organik, Pupuk Kompos, Konsep Fisika.

ABSTRACT

Indonesia, as an agricultural country, requires serious attention in efforts to increase agricultural output. One solution that can be taken is to utilize fertilizers that can fertilize plants without damaging soil fertility, such as compost produced through biodigester technology. Biodigester itself is useful as an environmentally friendly agricultural technology, namely producing organic fertilizer biogas processed from livestock waste, agricultural waste, and household organic waste. This supports a clean, energy-efficient and sustainable agricultural system. Biodigester is a system that combines physical and biological processes, where the principles of physics play an important role in supporting the performance and efficiency of organic material decomposition. The purpose of this study is to determine what physics concepts are in biodigester technology. The research method used is the literature study method, namely by collecting information from scientific journals, books, and previous research reports.

Keywords: *Biodigester, Organic Waste, Compost Fertilizer, Physics Concept.*

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara agraris yang penduduknya sebagian besar bekerja pada sektor pertanian. Dengan demikian, ketersediaan pupuk tentunya membutuhkan perhatian yang besar agar dapat meningkatkan hasil pertanian yang berkualitas. Namun, pemakaian pupuk kimia yang berlebihan dalam jangka panjang, justru dapat merusak kesuburan tanah dan memberikan dampak negatif terhadap kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pupuk ramah lingkungan seperti pupuk kompos yang tidak merusak kesuburan tanah tetapi juga membantu tanaman agar tumbuh menjadi hasil panen yang berkualitas. Salah satu teknologi yang dapat dilakukan dalam menghasilkan pupuk kompos adalah teknologi biodigester. Selain dapat mengolah limbah organik menjadi pupuk kompos, teknologi ini juga membantu untuk meningkatkan kemajuan sektor pertanian Indonesia dengan prinsip memanfaatkan kembali sumber daya lokal.

Biodigester merupakan teknologi yang memanfaatkan proses anaerobik untuk mengubah limbah organik menjadi bioenergi, yang berupa biogas dan pupuk organik. Dalam sistem ini, bahan organik diuraikan oleh mikroorganisme melalui proses anaerob,

menghasilkan metana (CH_4) dan gas karbon dioksida (CO_2) sebagai komponen utama biogas. (Ahmad, A. M., et.al., 2024). Anaerobik Digester (AD) adalah suatu proses alami di mana mikroorganisme mengurai bahan organik tanpa menggunakan oksigen. Biodigester (tangki tertutup tempat terjadinya AD) adalah sistem ekologi kompleks tempat berbagai mikroorganisme bekerja sama untuk menghasilkan biogas (campuran metana dan karbon dioksida). Biodigester digunakan untuk menghasilkan energi dan pupuk dari limbah organik, seperti limbah makanan, sisa tanaman, dan kotoran hewan (Ortiz, R. et.al., 2024).

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan memahami konsep - konsep fisika apa saja yang ada dalam prinsip kerja teknologi biodigester seperti termodinamika, tekanan hidrostatis, mekanika fluida, dan gas ideal. konsep - konsep tersebut memiliki peran penting dalam mengonversi limbah menjadi energi yang koefisien dan berkelanjutan. Dengan memahami konsep - konsep tersebut, diharapkan mendapat gambaran yang lebih jelas bagaimana biodigester bekerja untuk menghasilkan pupuk kompos yang bermanfaat dalam sektor pertanian. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis bagaimana konsep fisika berperan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pada pemanfaatan teknologi biodigester di sektor pertanian di Indonesia.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode studi literatur (library research), yaitu pengumpulan data dan analisis informasi dari berbagai sumber yang relevan, seperti jurnal ilmiah, buku teks fisika terapan, dan laporan penelitian sebelumnya. Data dikumpulkan melalui telaah dokumen mengenai prinsip kerja biodigester dan teori-teori fisika yang mendasarinya. Fokus utama dari penelitian ini adalah pada aplikasi konsep fisika dalam teknologi biodigester. Analisis dilakukan secara kualitatif dengan mengaitkan prinsip-prinsip fisika yang relevan, seperti hukum termodinamika, hukum gas ideal, tekanan hidrostatis, serta dinamika fluida. Studi ini juga menjelaskan manfaat biodigester terhadap aspek pertanian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sumber daya energi terbarukan menjadi sorotan perdebatan perubahan iklim karena memiliki jejak karbon yang sangat rendah. Sebagai negara yang kaya akan sumber daya bahan baku, Indonesia memiliki potensi besar untuk memanfaatkan biogas sebagai sumber energi terbarukan. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan gas metana dalam biogas serta nilai kalori yang signifikan, menjadikannya pilihan yang menjanjikan untuk masa depan energi yang berkelanjutan. Biogas bisa menjadi salah satu alternatif energi yang lebih ekonomis dibandingkan dengan sumber energi lainnya, dan dapat diproduksi melalui penggunaan reaktor biogas (Rahim et.al., 2023).



Alat Biodigester
(Sumber: harianmerapi.com)

Biodigester merupakan teknologi yang memanfaatkan proses anaerobik untuk mengubah limbah organik menjadi bioenergi dalam bentuk biogas. Melalui penggunaan biodigester, bahan organik akan diuraikan oleh mikroorganisme secara anaerob, yang pada akhirnya menghasilkan metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) sebagai komponen utama biogas. (Ahmad, et.al., 2024). Anaerobik Digester (AD) merupakan sebuah proses alami di mana mikroorganisme memecah bahan organik tanpa menggunakan oksigen. Biodigester (tangki tertutup tempat terjadinya AD) adalah sistem ekologi kompleks tempat berbagai mikroorganisme bekerja sama untuk menghasilkan biogas (campuran metana dan karbon dioksida).

Biomassa, khususnya kotoran hewan adalah sumber energi terbarukan yang dapat dibakar langsung untuk mendapatkan energi panas atau diolah kembali menjadi biogas menggunakan biodigester anaerobik (Sibanda, et.al., 2024). Biodigester digunakan untuk menghasilkan energi dan pupuk dari limbah organik, seperti limbah makanan, sisa tanaman, dan kotoran hewan (Ortiz, et.al., 2024). Menurut Sosa-Oliver (2020), pada proses AD terdapat dua produk utama yang diperoleh yaitu biogas dan juga pupuk hayati untuk tanaman. Digester atau disgestat pada hal ini mengacu pada bahan padat-cair yang diperoleh pada proses akhirnya. Bahan organik (OM) yang dihasilkan oleh proses ini memiliki konsentrasi yang tinggi sehingga sangat ideal untuk digunakan sebagai pupuk dalam bidang pertanian. Teknologi biodigester dapat menjadi teknologi yang menjanjikan dalam membentuk pertanian berkelanjutan dan pengelolaan limbah organik secara efisien (Wibowo, et.al., 2024). Pupuk kompos dapat menjadi alternatif untuk mengurangi kebutuhan pupuk kimia yang menjadi salah satu penyebab kerusakan lingkungan dan mengurangi emisi karbon penyebab perubahan iklim. Dengan demikian, pemanfaatan pupuk hayati sangat dianjurkan untuk mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan serta mengurangi dampak perubahan iklim. (Retno, R. et.al., 2025).



Prinsip Kerja Biodigester
(Sumber: blueflamebiodigester.com)

Dalam prinsip kerja biodigester, limbah diolah dengan proses fermentasi anaerobik dimana limbah tersebut diolah dengan mengurangi kadar oksigen. Proses ini menghasilkan pupuk berkualitas tinggi serta biogas atau gas metana, yang bisa dijadikan sumber energi alternatif (Wibowo, et.al., 2023). Teknologi biodigester memiliki beberapa bagian yaitu meliputi tabung reaktor, penampung gas metana, kran sebagai penutup, manometer U sebagai pengukur, dan selang sebagai penyalur gas (Prayoga, et.al., 2023). Pembuatan biodigester dimulai dengan pembuatan lubang sebagai tempat teknologi tersebut ditanam. Lokasi ini sebaiknya tidak terlalu jauh dari kandang ternak agar proses pengumpulan limbah dapat dilakukan secara efisien. Setelah itu, dilakukan instalasi alat dengan memasang tabung biodigester sebagai reaktor utama, diikuti dengan pemasangan pipa yang menghubungkan biodigester dengan rumah-rumah warga. Dari situlah kemudian biogas dapat dimanfaatkan

masyarakat untuk memasak atau menjadi sumber energi lainnya (Ismail, et.al., 2023).

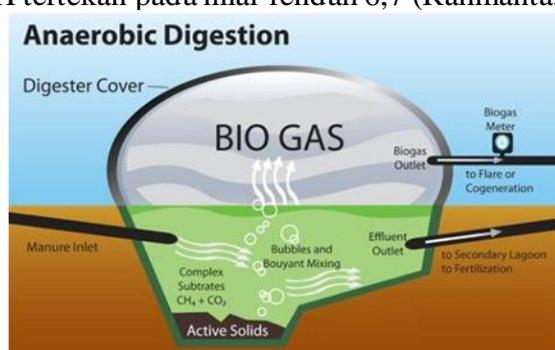
Pembuatan biodigester mini untuk mengolah sampah organik dilakukan melalui beberapa tahap. Langkah awal dalam proses ini adalah melubangi bagian atas atau penutup digester untuk membuat saluran keluarnya gas metana, dengan ukuran lubang sekitar 5 mm. Tahap kedua adalah membuat lubang untuk slurry yang merupakan limbah cair yang dihasilkan dari proses. Lubang slurry ini ditempatkan di sisi atas biodigester dan berukuran $\frac{3}{4}$ inci. Pada tahap ketiga, dilakukan pemasangan instalasi aliran gas metana menggunakan selang kompresor. Gas metana yang dihasilkan dialirkan ke dua jalur berbeda, yakni menuju ban penampung dan kompor gas, dengan alirannya dikendalikan menggunakan kran Aldo (Musafa et.al., 2023). Menurut Wibowo (2023), penggunaan biodigester dimulai dengan memasukkan limbah organik yang telah dicacah ke dalam wadah digester, kemudian dicampur dengan air atau larutan bernutrisi guna mendukung aktivitas mikroorganisme. Proses ini memungkinkan mikroorganisme untuk menguraikan limbah organik menjadi biogas dan pupuk cair. Dengan teknologi ini, limbah peternakan dapat diolah menjadi energi terbarukan berupa biogas, sementara residu limbahnya dapat dimanfaatkan sebagai pupuk kompos yang berguna untuk menyuburkan tanaman.

Pupuk kompos organik tersebut dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia yang sebenarnya cukup berbahaya untuk kesuburan tanah apabila digunakan secara terus menerus. Biogas yang dihasilkan oleh produk ini merupakan gabungan dari gas metana (CH_4) dan CO_2 . Penggunaan biogas dapat mencegah pelepasan gas metana yang terkandung dalam limbah ke atmosfer (Sari et.al., 2022). Hal tersebut dapat membantu bumi untuk mencegah pemanasan global dan perubahan iklim yang disebabkan oleh gas metana itu sendiri. Pupuk kandang secara signifikan meningkatkan C terlarut dalam air panas dibandingkan dengan kontrol. Aktivitas dehidrogenase meningkat secara signifikan pada semua perlakuan dibandingkan dengan kontrol (T. Šimon dan A. Czako, 2024). Dalam pemanfaatan teknologi ini, terdapat kotoran ternak yang sangat disarankan dalam digunakan sebagai bahan baku, yaitu kotoran sapi. Produksi metana (CH_4) dari limbah sapi tergolong tinggi jika dibandingkan dengan limbah organik dari ruminansia lain, menjadikannya sumber bahan baku yang efisien dalam proses fermentasi anaerob. Ternak ruminansia merupakan ternak mamalia yang memiliki sistem pencernaan khusus dengan lambung yang terdiri dari empat bilik, yaitu rumen, retikulum, omasum, dan abomasum. Data menunjukkan bahwa sapi merupakan sumber dominan emisi CH_4 dalam subsektor peternakan di Indonesia, dengan kontribusi mencapai 65,12% dari emisi ruminansia dan 58,84% dari total emisi metana peternakan. Kotoran sapi mengandung bakteri metanogenik yang mendukung proses fermentasi dan memungkinkan proses pengolahan menggunakan biodigester dapat berlangsung dengan cepat. Sebagai langkah mitigasi terhadap emisi gas dari kotoran sapi, dilakukan pemrosesan limbah menjadi biogas sebagai sumber energi alternatif dan sekaligus sebagai bahan baku pupuk kompos (Rosyadah, et.al., 2023).



Limbah Pertanian
(Sumber: Bobo.ID)

Selain limbah peternakan yang mengandung gas metana, pemanfaatan teknologi ini juga dapat digunakan dengan memanfaatkan limbah pertanian seperti jerami dan juga limbah sisa makanan seperti buah dan sayur. Namun meski begitu, limbah ternak tetap menjadi komponen utama dalam memanfaatkan teknologi biodigester. Jerami dipersiapkan dengan cara dipotong sepanjang kurang lebih 5 cm, kemudian dicampurkan ke dalam biodigester bersama limbah ternak dan bahan lainnya untuk mendukung proses pengolahan lebih lanjut (Katjo et.al., 2020). Selain jerami, limbah makanan juga dapat digunakan sebagai bahan pendukung dalam pemanfaatan teknologi biodigester ini. Limbah makanan (FW) memiliki kandungan nutrisi yang tinggi dan telah menarik perhatian dunia sebagai substrat ideal untuk pemulihan bioenergi melalui pencernaan anaerobik (AD) (Khune et.al., 2023). Perlakuan khusus diperlukan dalam pengolahan sampah buah sebagai substrat biodigester, karena mikroorganisme metanogen sangat rentan terhadap adanya inhibitor yang terkandung dalam sampah tersebut. Komposisi substrat terdiri dari campuran buah jeruk, apel dan melon dan dicampur dengan kotoran sapi dengan perbandingan tertentu. Persentase substrat buah ditingkatkan secara bertahap guna memberikan waktu bagi kelompok mikroba dalam biodigester untuk beradaptasi terhadap perubahan kadar inhibitor yang terkandung dalam sampah buah. Pemantauan dilakukan pada pH, volume harian biogas dan kadar metana, TS dan VS umpan dan effluen yang mencerminkan kinerja mikroba acidogen, acetogen dan metanogen. Kadar metana rata-rata yang dihasilkan adalah 62,15%, dengan nilai tertinggi mencapai 75,63% pada komposisi umpan S1. Waktu aklimatisasi setiap periode komposisi umpan bervariasi antara 14 hingga 65 hari. Sampai dengan komposisi campuran buah 35% (S5) atau ekuivalen kadar limonen 44,44 ppm parameter kestabilan pH tertekan pada nilai rendah 6,7 (Rahmanta, 2025).



Proses Anaerobic Digestion
(Sumber: blueflamebiodigester.com)

Pada teknologi biodigester ini, terdapat beberapa konsep fisika yang membantu teknologi tersebut beroperasi, diantaranya yaitu termodinamika, tekanan hidrostatis, fluida, dan gas ideal. Konsep tekanan hidrostatis sendiri membantu perancang untuk menentukan seberapa besar kapasitas slurry yang dapat ditampung oleh biodigester itu sendiri. Slurry adalah campuran lumpur atau zat semi cair yang dihasilkan dari proses pengolahan anaerobik limbah ternak menggunakan biodigester. Residu yang pertama kali keluar merupakan slurry pertama setelah waktu resensi. Kemudian, sisa pengolahan kotoran inilah yang digunakan sebagai pupuk kompos yang baik untuk tanaman karena terjadi penurunan COD (Chemical Oxygen Demand) sehingga membuat kotoran mengandung lebih sedikit bakteri patogen sehingga aman untuk pemupukan (Dewantara, et.al., 2024). Suhu dan temperatur adalah faktor krusial dalam produksi biogas melalui biodigester, di mana konsep termodinamika berperan penting dalam proses tersebut.

Suhu berperan dalam mendegradasi bahan organik menjadi gas metana yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme. Produksi biogas dapat meningkat secara

signifikan ketika mikroorganisme bekerja lebih aktif dan efisien pada suhu mesofilik (20-40°C), dengan suhu optimal sekitar 35°C. Indonesia yang merupakan negara dengan iklim tropis dapat membantu alat ini bekerja tanpa tambahan sistem pemanas karena sudah mendapatkan panas alami dari alam itu sendiri, namun adanya sistem tambahan ini juga dianjurkan untuk menjaga stabilitas suhu. Karena apabila suhu tersebut tidak stabil, akan terjadi kegagalan sistem dan memperlambat produksi gas, karena kinerja mikroba yang turun. Oleh karena itu, biodigester dibangun di tempat yang akan mendapat sinar matahari yang cukup serta menggunakan bahan yang mampu menahan suhu, hal ini akan membuat proses pembentukan biogas akan lebih konsisten dan dapat digunakan untuk kebutuhan energi rumah tangga (Apriandi, et.al., 2021).

Alat yang digunakan untuk mencampur biogas dan udara mengimplementasikan prinsip-prinsip mekanika fluida dalam proses kerjanya. Prinsip kerja dari alat pencampur biogas ini menerapkan sifat laminar dari fluida dengan menggunakan persamaan kontinuitas dan azas Bernoulli sehingga perbedaan tekanan biogas saat menuju ruang bakar dapat dihitung. Perbedaan tekanan biogas pada sistem pencampuran mengarahkan alirannya ke ruang pembakaran, sehingga memungkinkan terjadinya konversi energi dari energi mekanik biogas menjadi energi listrik yang dapat digunakan sebagai sumber penerangan (Lasmi, et.al., 2015). Dalam teknologi biodigester, konsep fisika fluida berperan penting dalam memastikan efisiensi dan keberhasilan proses produksi biogas. Salah satu konsep utama adalah aliran fluida, di mana campuran bahan organik dan air harus mengalir dengan pola tertentu di dalam reaktor. Berdasarkan kecepatan dan viskositasnya, aliran ini dapat diklasifikasikan sebagai laminar atau turbulen, yang dapat dianalisis menggunakan bilangan Reynolds. Aliran yang terlalu cepat dapat menyebabkan gangguan dalam proses fermentasi, sementara aliran yang terlalu lambat dapat menyebabkan endapan. Selain itu, tekanan hidrostatis dalam cairan mempengaruhi distribusi fluida dan akumulasi gas di bagian atas reaktor. Prinsip-prinsip tekanan cairan diterapkan untuk mengatur aliran masuk dan keluar serta untuk melakukan pengukuran terhadap volume gas yang dihasilkan.

Dalam implementasi teknologi biodigester, model gas ideal dimanfaatkan sebagai dasar teoritis untuk mengevaluasi sifat-sifat biogas yang terbentuk selama proses penguraian material organik. Gas ideal merupakan model yang mengasumsikan bahwa gas tersusun atas partikel-partikel mikroskopis yang bergerak secara acak, tidak saling berinteraksi, dan memiliki volume partikel yang dapat diabaikan. Dalam konteks ini, biogas yang terbentuk — terutama metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) — diasumsikan mengikuti perilaku gas ideal guna mempermudah perhitungan parameter fisika seperti tekanan, volume, dan temperatur di dalam ruang biodigester. Volume spesifik dari biogas yang dihasilkan dihitung berdasarkan persamaan gas ideal, dengan asumsi bahwa biogas terdiri murni dari gas metana (CH₄), yaitu: $P.V=m.R.T$ dalam hal ini, P menyatakan tekanan biogas (dalam satuan Pascal), V menunjukkan volume biogas (dalam meter kubik), m merupakan massa biogas (dalam kilogram), R adalah konstanta gas untuk metana sebesar 519,64 Nm/kg·K, dan T menunjukkan temperatur biogas (dalam Kelvin) (Apriandi, et.al., 2021).

Biodigester memberikan berbagai manfaat penting bagi sektor pertanian, terutama dalam menciptakan pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu manfaat utamanya adalah menghasilkan pupuk organik berupa residu padat dan cair yang kaya akan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Pupuk organik yang dihasilkan dari biodigester dapat memperbaiki kualitas tanah, meningkatkan kesuburan, dan menjaga keberlanjutan lingkungan pertanian. Dengan menggunakan biodigester, petani dapat menghemat biaya produksi dengan menghasilkan pupuk organik sendiri dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia (Anugrah, et.al., 2023). Biodigester juga berfungsi sebagai solusi pengelolaan limbah organik pertanian, seperti kotoran hewan, sisa panen, dan limbah sayuran, melalui

proses yang higienis, sehingga dapat mengurangi potensi pencemaran lingkungan dan menekan risiko penyebaran patogen. Biogas tidak hanya berfungsi sebagai alternatif bahan bakar fosil, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca serta pengelolaan limbah organik (Saputra, et.al., 2024). Proses anaerobik dalam biodigester juga dapat menurunkan emisi gas rumah kaca, khususnya gas metana yang dihasilkan dapat ditangkap dan dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Gas metana yang dihasilkan dari proses biodigester juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada peralatan atau mesin-mesin pertanian. Dengan kata lain, pemanfaatan biodigester tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan produktivitas sektor pertanian, tetapi juga mendukung terciptanya sistem pertanian yang ramah lingkungan, hemat energi, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Teknologi biodigester merupakan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah organik ramah lingkungan. Melalui proses anaerobik, limbah organik seperti kotoran ternak dapat diubah menjadi biogas yang berguna sebagai sumber energi terbarukan serta pupuk organik yang kaya nutrisi. Proses ini melibatkan berbagai konsep fisika seperti termodinamika, tekanan hidrostatis, mekanika fluida, dan gas ideal untuk mendukung efisiensi sistem. Konsep tekanan hidrostatis digunakan untuk mengatur kapasitas dan kestabilan slurry dalam reaktor. Konsep termodinamika berperan krusial dalam mempertahankan suhu optimal, yaitu sekitar 35°C, guna mendukung aktivitas mikroorganisme dalam proses dekomposisi bahan organik menjadi gas metana. Prinsip-prinsip mekanika fluida diterapkan dalam desain sistem aliran slurry dan pencampuran biogas guna memastikan efisiensi aliran serta mengoptimalkan proses fermentasi anaerob. Sementara itu, konsep gas ideal memungkinkan perhitungan volume dan tekanan biogas secara teoritis, sehingga mempermudah pengukuran dan pengelolaan hasil gas yang terbentuk. Pemahaman serta penerapan prinsip-prinsip fisika memungkinkan optimalisasi teknologi biodigester sebagai solusi energi terbarukan yang efisien dan berwawasan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. M., Sugiarto, Y., Putra, R. R., & Ulinuha, A. R. I. (2024). Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Jumlah Ternak Terhadap Biodigester untuk Ketahanan dan Kemandirian Pertanian Berkelanjutan. *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems*, 12(1), 62-74.
- Anugrah, D. S. B., Widawati, E., Wijaya, U., Marcella, M., Sinanu, J. D., Wawo, Y. L. K., ... & Likun, K. E. P. (2023). Pemberdayaan Masyarakat Dusun Cigadog Melalui Penyuluhan Manfaat Limbah Kotoran Sapi Menjadi Biogas dan Teknologi Biodigester. *I-Com: Indonesian Community Journal*, 3(3), 1380-1389.
- Apriandi, N. (2021). Analisa biodigester polyethylene skala rumah tangga dengan memanfaatkan limbah organik sebagai sumber penghasil biogas. *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial*, 17(1), 23-29.
- Dewantara, B. Y., Karyatanti, I. D. P., Winarno, I., Rahmatullah, D., dan Mauludina, N. U. (2024). Potensi Pemanfaatan Kotoran Sapi untuk Bahan Bakar PLT Biogas Di Kecamatan Bluto Desa Kapedi. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(2).
- Ismail, I., Nusri, A. Z., Asmini, A., Herdiansyah, H., & Arismanza, A. (2023). Penerapan Teknologi Mesin Pencacah Sampah dan Biodigester untuk Pembuatan Pupuk Organik dan Biogas. *Prima Abdika: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(4), 465-472.
- Katjo, M. B., dan Sutikno (2020). Pemanfaatan Limbah Pertanian (Jerami Padi) Dan Feses Sapi Menjadi Biogas. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(1), 27-34.
- Khune, S., Otieno, B., Kabuba, J., Ochieng, G., & Osifo, P. (2023) Pilot scale study of anaerobic treatment of food waste using ambient and solar heated digesters. *International Journal of Sustainable Energy*.

- Musafa, A., Broto, S., & Windihastuty, W. (2023). Pendampingan Masyarakat Dalam Pembuatan Biodigester Mini Skala Rumah Tangga. *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*, 7(5), 5005-5013.
- Prayoga, A., G. Wibowo, M. Lasin, L. Afisna, dan S. Amiludin. (2023). Pengaruh Perbandingan Komposisi Campuran Kotoran Sapi Dan Air Dalam Produksi Biogas Dengan Teknologi Biodigester. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 5(2), 135-140.
- Rahim, M. Z. A., Djafar, R., Djamalu, Y., & Liputo, B. (2023). Studi Eksperimen Biodigester Menggunakan Kombinasi Eceng Gondok dan Kotoran Sapi. *JTPG (Jurnal Teknologi Pertanian Gorontalo)*, 8(1), 34-38.
- Rahmanta, A. P. (2025). Strategi Operasi Biodigester Dengan Substrat Inhibitor Limonen Dan Tanin Dari Sampah Buah. *Jurnal Pertanian Agroteknologi*, 12(6), 362-372.
- Retno, R., Hanifati, R., Sutami, Evi, I., Setyo, N., Rumella, S., Haryuni. (2025). The potential of fungi bacterial biofilm, compost, and LOF compared with chemical fertilization in supporting the growth of pakcoi (*Brassica rapa var chinensis*). *EDP Sciences*.
- Rita Ortiz, Elizabeth Vicario, Kofi Acheaw Owusu, Allan Feldman, Jawaher Alsultan, Elijah Asare, Kebreab Ghebremichael & Sarina J. Ergas. (2024) A Study of the Engagement of Ghanaian High School Students in Authentic Science Using Model Biodigesters. *International Journal of Science and Mathematics Education*.
- Rosyadah, A., Sunaryo, M. ., Saffana Zahra, J. ., Ramadhani, H. K. ., Hikmiah, S. ., Apriyanti, A. A. ., Damanhuri Thoba, M. N. ., Saputra, N. I. ., Kaana Taqiyyaa, N. ., Wibisono, F. ., Husaini Tiway, M. F. ., Santoso Putra, K. D. C. ., Sunaryani, R. P. ., & Wasillah, F. . (2023). Pemanfaatan Limbah Kotoran Sapi Terhadap Pembuatan Biogas dan Pupuk Organik di Desa Madureso, Mojokerto: . *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*, 4(2), 711-720.
- Saputra, O., Khalil, F. I., & Widhiantari, I. A. (2024). Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Tekanan Gas Pada Biodigester Berbasis IoT: Analisis Waktu dan Stabilitas Koneksi ESP32 dan ESP32-S3 (Lilygo T Display S3). *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 10(4), 608-616.
- Sari, S. P., N. S. Salahuddin, Hustinawaty, Sulardi, Supiani, dan H. Suger. (2022). Peran Biodigester Biogas Dalam Mendukung Energi Bersih Di Kelompok Tani Desa Jamali, Mande, Cianjur. *Pengabdian Jurnal Kepada Masyarakat*, 2(1), 31-36.
- Sibanda, T., dan J. D. Uزابakiriho. (2024). Animal Manure as an Alternative Bioenergy Resource in Rural Sub-Saharan Africa: Present Insights, Challenges, and Prospects for Future Advancements. *Energies*, 17(8), 18-39.
- Sosa-Olivier, J. A. dan Laines Canepa, J. R. (2020). Refining of the solid fraction of sheep feces digestates from an anaerobic digester. *Ingenieria Investigacion*, 40(2), 14-21.
- T. Šimon, A. Czakó (2024). Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties. *Czech Academy of Agricultural Sciences*.
- Wibowo, H. S. (2024). Literasi energi terbarukan bagi pertanian: Studi teknologi biodigester untuk pupuk organik ramah lingkungan. *Literasiana*, 2(01).