Vol. 5 No. 4 (2026) - November, pp 3173-3181 https://doi.org/10.59025/5nxkj584

Jurnal Masyarakat Madani Indonesia
e-ISSN: 2829-6702
https://syadani.onlinelibrary.id/

Pemanfaatan Biogas Kotoran Sapi sebagai Energi Terbarukan dan Bioslurry untuk Mendukung Pertanian Berkelanjutan pada Kelompok Tani Sidomulyo Pekon Mataram

Agus Apriyanto[1], Adam Wisnu Murti[1], Fauzi Ibrahim[1], Retno Wahyudi[1], Feny Setiawan[1], Rafly Alfatir[1]

[1]*Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Indonesia*

INFO ARTIKEL

Diserahkan: 11/08/2026
Direvisi: 10/09/2026
Diterima: 19/09/2026
Diterbitkan: 27/09/2026

***Kata Kunci*:**

Biogas,
Bioslurry,
Energi terbarukan,
Kotoran sapi,
Pemberdayaan petani

ABSTRAK

Kelompok Tani Sidomulyo di Pekon Mataram, Kecamatan Gadingrejo, Kabupaten Pringsewu, beranggotakan 38 orang yang mengelola pertanian dan peternakan sapi skala rumah tangga. Kegiatan pengabdian ini bertujuan menerapkan teknologi biogas kotoran sapi sebagai sumber energi terbarukan, meningkatkan kapasitas operator kelompok, serta mengoptimalkan pemanfaatan bioslurry untuk mendukung pertanian berkelanjutan. Metode pelaksanaan menggunakan pendekatan partisipatif melalui sosialisasi, pelatihan, penerapan teknologi, pendampingan, dan evaluasi menggunakan pre-test dan post-test, lembar observasi keterampilan, serta logbook operasional. Hasil menunjukkan satu unit digester fixed dome berkapasitas 10–12 m³ beroperasi dengan pengumpanan 70 kg kotoran sapi per hari, menghasilkan biogas rata-rata 2,0 m³ per hari dan bioslurry 50 liter per hari. Pengetahuan peserta meningkat 58,6%, seluruh operator inti kompeten, penggunaan LPG berkurang 30%, dan bioslurry dimanfaatkan pada lahan 1 ha dengan penurunan penggunaan pupuk kimia 25%. Program menunjukkan kontribusi dalam pengelolaan limbah ternak, peningkatan kemandirian energi rumah tangga, dan penguatan sistem pertanian terpadu berbasis ekonomi sirkular.

Corresponding author email:
agusapriyanto@polinela.ac.id

Copyright@ Author (2026). Published by Alesha Media Digital. This is an open access article under the CC BY SA license. All writings published in this journal are personal views of the author and do not represent the views of this journal and the author's affiliated institutions.

1. PENDAHULUAN

Sektor peternakan menghasilkan pangan dan pendapatan bagi masyarakat perdesaan, tetapi juga menghasilkan limbah organik yang harus dikelola secara tepat. Kotoran sapi mengandung bahan organik yang dapat dikonversi melalui proses pencernaan anaerob menjadi biogas dan digestat. Pemanfaatan ini mengubah limbah dari sumber pencemaran menjadi energi dan bahan penyubur tanah, sehingga sejalan dengan pendekatan ekonomi sirkular pada usaha tani-peternakan [1]. Keberhasilan proses dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, rasio karbon terhadap nitrogen, suhu, pH, waktu tinggal, beban organik, aktivitas mikroba, dan kestabilan operasi [2].

Teknologi biogas relevan untuk wilayah perdesaan yang memiliki pasokan kotoran ternak harian. Pencernaan anaerob dapat menurunkan beban organik limbah, menangkap metana yang sebelumnya terlepas ke atmosfer, dan menghasilkan energi yang dapat digunakan untuk memasak. Pada saat yang sama, digestat atau bioslurry masih mengandung unsur hara dan bahan organik yang dapat dikembalikan ke lahan pertanian [3]. Biogas umumnya mengandung metana dan karbon dioksida sebagai komponen utama, disertai sejumlah kecil uap air dan hidrogen sulfida; karena itu instalasi perlu dilengkapi saluran gas, katup pengaman, perangkap air, dan prosedur pemeriksaan kebocoran [4].

Kelompok Tani Sidomulyo berada di Pekon Mataram, Kecamatan Gadingrejo, Kabupaten Pringsewu. Kelompok yang berdiri sejak 2019 tersebut memiliki 38 anggota dengan mata pencaharian sebagai petani sekaligus peternak sapi skala rumah tangga. Kegiatan peternakan menghasilkan kotoran sapi setiap hari, tetapi sebagian besar limbah masih ditumpuk di sekitar kandang atau dibuang di lahan terbuka. Kondisi tersebut menimbulkan bau, meningkatkan populasi lalat, dan berpotensi mencemari tanah serta air. Pada sisi energi, anggota kelompok masih menggunakan LPG dan kayu bakar untuk memasak. Ketergantungan terhadap bahan bakar konvensional meningkatkan pengeluaran rumah tangga dan menimbulkan paparan asap ketika kayu bakar digunakan.



Gambar 1. Kondisi kandang dan penumpukan kotoran sapi pada mitra. (Sumber: dokumentasi pribadi, 2026)

Pengembangan biogas skala kelompok dapat menyediakan energi yang lebih terdesentralisasi dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Pengalaman di berbagai negara menunjukkan bahwa keberlanjutan instalasi biogas tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan konstruksi, tetapi juga oleh akses bahan baku, ketersediaan air, kemampuan operator, layanan perawatan, manfaat ekonomi, dan kelembagaan pengelola [5]-[7]. Program pengabdian yang menerapkan biogas berbasis kotoran sapi juga menunjukkan pentingnya pelatihan penggunaan dan pemeliharaan agar teknologi tetap beroperasi setelah tim pelaksana meninggalkan lokasi [8], [9].



Gambar 2. Penggunaan Kayu bakar dan LPG untuk memasak oleh mitra. (Sumber: dokumentasi pribadi, 2026)

Berdasarkan analisis situasi, permasalahan prioritas mitra meliputi belum tersedianya instalasi pengolahan kotoran sapi, keterbatasan pengetahuan tentang proses fermentasi, belum adanya operator dan prosedur pemeliharaan, ketergantungan terhadap LPG atau kayu bakar, serta belum optimalnya pemanfaatan bioslurry.

Berbeda dengan kegiatan terdahulu yang umumnya berfokus pada pembangunan unit biogas atau edukasi energi alternatif, program ini menerapkan pendekatan integratif melalui empat komponen utama, yaitu penerapan digester biogas skala kelompok, penguatan kapasitas operator melalui SOP dan logbook, pemanfaatan bioslurry sebagai input pertanian, serta pembentukan mekanisme kelembagaan untuk menjaga keberlanjutan operasi setelah pendampingan berakhir. Oleh karena itu, keberhasilan program tidak hanya dinilai dari keberadaan instalasi, tetapi juga dari kemampuan mitra dalam mengoperasikan, memelihara, dan memanfaatkan hasil samping teknologi secara mandiri.

2. METODE PELAKSANAAN

Kegiatan dilaksanakan di lokasi Kelompok Tani Sidomulyo, Pekon Mataram, Kecamatan Gadingrejo, Kabupaten Pringsewu. Pendekatan yang digunakan adalah partisipatif, pendidikan masyarakat, pelatihan, difusi teknologi, dan pendampingan. Mitra dilibatkan dalam identifikasi masalah, penentuan lokasi digester, penyediaan bahan baku, pekerjaan pendukung instalasi, praktik pengoperasian, pembentukan tim pengelola, pencatatan produksi gas, dan evaluasi manfaat.

Tahap pertama adalah sosialisasi dan pemetaan kondisi awal. Tim melakukan observasi kandang, wawancara dengan pengurus dan anggota, serta pencatatan sumber energi rumah tangga. Data awal meliputi jumlah anggota, pola pemeliharaan sapi, lokasi timbunan kotoran, perkiraan ketersediaan bahan baku, penggunaan LPG dan kayu bakar, serta kesiapan lahan untuk instalasi. Pada tahap ini ditetapkan lokasi digester yang dekat dengan sumber kotoran, aman dari lalu lintas, tidak tergenang, dan memungkinkan penyaluran bioslurry.



Gambar 3. Kegiatan sosialisasi. (Sumber: dokumentasi pribadi, 2026)

Tahap kedua adalah perancangan dan penerapan teknologi. Digester dirancang dengan tipe fixed dome berkapasitas 10-12 m^3 untuk menerima sekitar 60-80 kg kotoran sapi yang dicampur air dengan perbandingan mendekati 1:1 setiap hari. Sistem terdiri atas bak pencampur, pipa inlet, ruang digester, kubah penampung gas, pipa gas, perangkap air, katup pengaman, kompor biogas, pipa outlet, dan bak bioslurry. Pemilihan material serta integritas struktur perlu diperiksa untuk mencegah retak, korosi, kebocoran, dan masuknya udara. Prinsip perancangan mengikuti kebutuhan kestabilan proses dan keselamatan unit konversi energi [11].



Gambar 4. Reaktor biogas kotoran sapi tipe *fixed dome*. (Sumber: dokumentasi pribadi, 2026)

Tabel 1. Spesifikasi rancangan instalasi biogas

Parameter	Spesifikasi
Tipe reaktor	: Fixed dome/kubah tetap
Volume digester	: 10-12 m^3
Bahan baku	: Kotoran sapi dan air
Kapasitas pengumpanan	: Sekitar 60-80 kg kotoran sapi/hari dan 60-80 liter air/hari
Sistem operasi	: Anaerob; suhu mesofilik 30-38 °C
pH operasi	: 6,8-7,5
Waktu tinggal hidraulik	: 15-20 hari
Target produksi biogas	: 1,5-2 m^3/hari
Komponen utama	: Bak pencampur, inlet, digester, pipa gas, katup pengaman, water trap, kompor, outlet, dan bak bioslurry

Tahap ketiga adalah start-up dan pelatihan. Bahan baku dicampur sampai homogen, kemudian dimasukkan secara bertahap untuk membangun populasi mikroorganisme anaerob. Pelatihan mencakup prinsip pembentukan biogas, pengumpanan, pemeriksaan pH, pengamatan tekanan, pembuangan kondensat, pengujian kebocoran dengan larutan sabun, penggunaan kompor, penanganan kondisi darurat, dan perawatan rutin. Anggota juga dilatih mengolah bioslurry menjadi pupuk organik cair atau bahan kompos. Materi pelatihan diberikan melalui penjelasan singkat, demonstrasi, praktik berulang, dan penilaian kinerja peserta.

Tahap keempat adalah pendampingan manajemen. Kelompok membentuk tim pengelola yang bertugas mengatur jadwal pengumpulan kotoran, pengumpanan, pemeriksaan instalasi, penggunaan gas, dan pemanfaatan bioslurry. Tim menyediakan logbook harian berisi massa bahan baku, volume air, waktu pengumpanan, tekanan atau volume gas, lama pemakaian kompor, kondisi alat, jumlah bioslurry, serta tindakan perawatan. Pencatatan ini diperlukan karena perubahan beban organik, suhu, dan waktu tinggal dapat memengaruhi hasil gas dan kestabilan proses [12] [13].



Gambar 5. Pelatihan dan Penerapan Teknologi Biogas. (Sumber: dokumentasi pribadi, 2026)

Tahap kelima adalah evaluasi. Pengetahuan peserta dinilai menggunakan pre-test dan post-test. Keterampilan dinilai melalui lembar observasi pengoperasian yang memuat kemampuan menyiapkan campuran, melakukan pengumpanan, memeriksa kebocoran, mengoperasikan kompor, membuang kondensat, dan membersihkan area kerja. Kinerja teknologi dinilai melalui pencatatan bahan baku, volume biogas, lama nyala kompor, produksi bioslurry, frekuensi gangguan, dan konsumsi LPG sebelum serta sesudah program. Dampak lingkungan dinilai secara deskriptif melalui perubahan bau, kebersihan area kandang, dan penanganan timbunan kotoran. Keberlanjutan dinilai dari keberadaan SOP, tim operator, jadwal perawatan, dan konsistensi logbook selama sekurang-kurangnya tiga bulan.

Tabel 2. Kondisi awal dan intervensi program

Aspek	Kondisi awal	Intervensi
Pengelolaan limbah	Kotoran ditumpuk atau dibuang terbuka	Instalasi biogas dan jadwal pengumpulan bahan baku
Energi rumah tangga	Bergantung pada LPG dan kayu bakar	Pemanfaatan biogas untuk memasak
Kapasitas teknis	Belum memahami operasi digester	Pelatihan dan praktik sesuai SOP
Kelembagaan	Belum ada pengelola teknologi	Tim operator dan logbook kelompok
Residu proses	Belum ada pemanfaatan sistematis	Bioslurry untuk pupuk organik

3. HASIL & PEMBAHASAN

3.1 Kesesuaian Teknologi dengan Kondisi Mitra

Hasil analisis menunjukkan bahwa bahan baku utama tersedia secara berulang karena anggota kelompok memelihara sapi setiap hari. Keberadaan aktivitas pertanian juga membuka jalur pemanfaatan bioslurry. Kombinasi peternakan, kebutuhan energi rumah tangga, dan lahan pertanian membuat model biogas-bioslurry lebih sesuai dibandingkan pendekatan yang hanya berfokus pada pembuangan limbah. Tipe fixed dome dipilih karena konstruksinya relatif permanen, tidak memiliki penampung gas bergerak, dan dapat ditempatkan di bawah permukaan tanah. Suhu tanah membantu mengurangi fluktuasi temperatur, meskipun pemeriksaan retak dan kebocoran harus menjadi bagian penting dari pemeliharaan.

Kapasitas digester 10-12 m^3 dirancang untuk bahan baku dari sekitar 10-15 ekor sapi, bergantung pada produksi kotoran aktual dan konsistensi pengumpulan. Pengumpanan harian menjaga aliran proses lebih stabil dibandingkan pengisian tidak teratur. Namun, kapasitas nominal tidak otomatis menjamin target produksi gas. Komposisi bahan, kadar air, suhu, pH, waktu tinggal, dan akumulasi padatan dapat memengaruhi pembentukan metana. Oleh sebab itu, operator perlu menghindari perubahan pengumpanan yang mendadak dan mencatat setiap gangguan.

3.2 Peningkatan Pengetahuan dan Keterampilan

Pelatihan dirancang untuk mengubah peran anggota dari pengguna pasif menjadi operator teknologi. Indikator keterampilan tidak hanya berupa kemampuan menyalakan kompor, tetapi mencakup seluruh rangkaian operasi yang aman. Peserta harus mampu menimbang atau memperkirakan bahan baku, membuat campuran homogen, melakukan pengumpanan tanpa memasukkan benda asing, memeriksa sambungan pipa, membuang air kondensat, mengenali penurunan tekanan, serta menghentikan penggunaan apabila tercium bau gas. Pendekatan ini penting karena inovasi biogas yang tidak disertai pengetahuan perawatan sering berhenti digunakan setelah mengalami gangguan kecil.

Evaluasi pengetahuan menunjukkan skor rata-rata peserta meningkat dari 58 pada pre-test menjadi 92 pada post-test. Berdasarkan perbandingan kedua skor tersebut, peningkatan pengetahuan mencapai 58,6%, sehingga melampaui indikator minimal 40%. Penilaian praktik terhadap operator inti juga menunjukkan tingkat kompetensi 100%. Seluruh operator mampu menyiapkan campuran bahan baku, melakukan pengumpanan, memeriksa sambungan pipa dan kebocoran, membuang kondensat, mengoperasikan kompor, serta menerapkan

prosedur keselamatan tanpa bantuan langsung. Hasil ini menunjukkan bahwa metode demonstrasi, praktik berulang, dan pendampingan lapangan efektif membangun kemampuan operasional mitra.

3.3 Kinerja Energi dan Efisiensi Ekonomi

Hasil monitoring operasional menunjukkan pengumpanan dapat dipertahankan pada 70 kg kotoran sapi per hari. Pada kondisi operasi stabil, instalasi menghasilkan biogas rata-rata 2,0 m^3 per hari dan dimanfaatkan secara rutin oleh lima rumah tangga anggota. Pemanfaatan biogas menurunkan penggunaan LPG sebesar 30% per bulan, yang merupakan indikator keberhasilan program. Capaian tersebut menunjukkan bahwa biogas mampu menjadi substitusi energi rumah tangga yang nyata, meskipun belum sepenuhnya menggantikan LPG. Konsistensi pengumpanan, pengendalian kebocoran, dan pembuangan kondensat menjadi faktor utama dalam mempertahankan kontinuitas gas.

Manfaat ekonomi dipengaruhi oleh kontinuitas gas dan biaya pemeliharaan. Berdasarkan asumsi harga LPG rumah tangga yang digunakan mitra, penurunan konsumsi LPG sebesar 30% memberikan estimasi penghematan sekitar Rp90.000–Rp120.000 per rumah tangga per bulan, bergantung pada pola pemakaian aktual. Nilai tersebut menunjukkan bahwa manfaat ekonomi mulai dirasakan oleh mitra, meskipun analisis ekonomi jangka panjang masih memerlukan pencatatan biaya investasi, operasional, dan umur layanan instalasi secara lebih rinci.

3.4 Pemanfaatan Bioslurry dan Produktivitas Pertanian

Instalasi menghasilkan bioslurry rata-rata 50 liter per hari. Pemanfaatan digestat biogas sebagai pupuk organik sejalan dengan berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa bioslurry memiliki potensi sebagai sumber unsur hara dan bahan pembenah tanah apabila dikelola sesuai karakteristik aplikasinya [14][15]. Residu tersebut dimanfaatkan sebagai pupuk organik pada lahan anggota seluas 1,0 ha.

Bioslurry sebaiknya tidak langsung dinilai sebagai pupuk siap pakai tanpa pengamatan. Kelompok perlu memeriksa bau, konsistensi, keberadaan bahan yang belum terurai, dan respons tanaman. Untuk pupuk cair, aplikasi dapat diawali dengan pengenceran dan uji pada petak kecil. Fraksi padat dapat dikeringanginkan atau dikomposkan lebih lanjut. Pencatatan dosis, luas lahan, pertumbuhan tanaman, dan pengurangan pupuk kimia diperlukan agar manfaat pertanian dapat dibuktikan.

3.5 Partisipasi, Kelembagaan, dan Keberlanjutan

Partisipasi masyarakat menjadi faktor penentu karena instalasi skala kelompok memerlukan pembagian tugas dan manfaat. Berdasarkan hasil wawancara dengan pengurus kelompok, mitra menyampaikan bahwa keberadaan biogas membantu mengurangi ketergantungan terhadap pembelian LPG dan membuat pengelolaan kotoran sapi menjadi lebih terarah. Salah satu anggota operator menyatakan bahwa teknologi ini mudah diterapkan setelah mendapatkan pelatihan, terutama karena terdapat pembagian tugas dan pencatatan operasional. Temuan tersebut menunjukkan bahwa aspek sosial dan kelembagaan menjadi faktor penting dalam mempertahankan keberlanjutan teknologi.

Keunggulan program terletak pada integrasi penyelesaian masalah limbah, penyediaan energi, dan pemanfaatan pupuk organik dalam satu sistem. Seluruh indikator utama mencapai target maksimal: instalasi beroperasi, pengumpanan mencapai 70 kg per hari, produksi biogas 2,0 m^3 per hari, produksi bioslurry 50 liter per hari, pengetahuan meningkat 58,6%, kompetensi operator mencapai 100%, penggunaan LPG turun 30%, dan pupuk kimia turun 25%. Keterbatasan program tetap terdapat pada kebutuhan pengumpanan harian, ketersediaan air, pemeriksaan kebocoran, dan disiplin kelembagaan. Peluang pengembangan meliputi perluasan jaringan pemanfaatan gas, pengujian mutu bioslurry, pengemasan pupuk organik, dan integrasi dengan demplot pertanian.

Tabel 3. Indikator dan capaian program

Indikator	Kondisi awal	Target Kegiatan	Hasil aktual
Instalasi biogas	Belum tersedia	1 unit digester 10-12 m³	1 unit digester 10-12 m³ terbangun, lolos uji kebocoran, dan beroperasi (100% tercapai)
Bahan baku terolah	Ditumpuk/dibuang terbuka	Minimal 50-70 kg/hari	70 kg/hari diolah secara rutin (100% dari batas atas target)
Produksi biogas	Belum ada	1,5-2 m³/hari	2,0 m³/hari (100% dari batas atas target)
Bioslurry	Belum ada	40-50 liter/hari	50 liter/hari (100% dari batas atas target)
Peningkatan pengetahuan	Belum pernah dilatih	Minimal 40%	Skor rata-rata meningkat dari 58 menjadi 92 atau naik 58,6% (melampaui target)
Peserta kompeten mengoperasikan	Belum ada operator	Minimal 80% peserta inti	100% operator inti kompeten berdasarkan lembar observasi (melampaui target 80%)
Pengguna biogas	0 rumah tangga	Minimal 5 rumah tangga	5 rumah tangga memanfaatkan biogas secara rutin (100% tercapai)
Pengurangan LPG	0%	25-30% per bulan	Penggunaan LPG turun 30% per bulan (100% dari batas atas target)
Pemanfaatan bioslurry	Belum dilakukan	0,5-1 ha lahan	Bioslurry digunakan pada lahan 1,0 ha (100% dari batas atas target)
Pengurangan pupuk kimia	Belum terukur	Minimal 20%	Penggunaan pupuk kimia turun 25% (melampaui target 20%)
Keberlanjutan	Belum ada SOP/tim	SOP, tim pengelola, operasi stabil 3 bulan	SOP tersedia; tim pengelola 5 orang terbentuk; operasi stabil 3 bulan; logbook terisi lengkap

Secara keseluruhan, seluruh indikator mencapai atau melampaui target proposal. Capaian maksimum pada aspek teknis ditunjukkan oleh operasi digester yang stabil selama tiga bulan, bahan baku terolah 70 kg per hari, produksi biogas 2,0 m³ per hari, dan produksi bioslurry 50 liter per hari. Pada aspek pemberdayaan, kenaikan pengetahuan 58,6% dan kompetensi operator 100% menunjukkan bahwa transfer teknologi tidak hanya menghasilkan infrastruktur, tetapi juga kemampuan pengelolaan mandiri. Pada aspek ekonomi dan pertanian, penurunan LPG 30% dan pupuk kimia 25% memperlihatkan adanya efisiensi pengeluaran rumah tangga serta input budidaya. Keberadaan SOP, tim pengelola lima orang, dan logbook yang terisi lengkap menjadi dasar keberlanjutan program setelah pendampingan berakhir.

4. KESIMPULAN

Penerapan teknologi biogas kotoran sapi pada Kelompok Tani Sidomulyo berhasil membangun model pengelolaan limbah ternak terpadu yang menghubungkan energi terbarukan, pemberdayaan operator, dan pemanfaatan bioslurry untuk pertanian berkelanjutan. Program menunjukkan bahwa keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh pembangunan instalasi, tetapi juga oleh kemampuan mitra dalam mengoperasikan, memelihara, dan mengembangkan manfaat teknologi secara mandiri. Indikator capaian menunjukkan adanya peningkatan kapasitas pengelola, pengurangan ketergantungan energi konvensional, serta pemanfaatan residu sebagai input pertanian. Keberlanjutan program direkomendasikan melalui penguatan SOP, evaluasi berkala kualitas bioslurry, perluasan pengguna gas, dan pengembangan kelembagaan ekonomi kelompok berbasis produk turunan biogas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Lampung melalui pendanaan DIPA Pengabdian kepada Masyarakat sesuai Kontrak Nomor. 167.13/DST/PL15.8/PM/2026, Pemerintah Pekon

Mataram, serta pengurus dan anggota Kelompok Tani Sidomulyo atas dukungan, partisipasi, dan penyediaan lokasi kegiatan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada mahasiswa yang membantu survei, dokumentasi, instalasi, pelatihan, dan monitoring program.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Rodrigues et al., "Animal manure in the context of renewable energy and value-added products: A review," Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, vol. 196, Art. no. 109660, 2024, doi: 10.1016/j.cep.2023.109660.

[2] T. Gyadi, A. Bharti, S. Basack, P. Kumar, and E. Lucchi, "Influential factors in anaerobic digestion of rice-derived food waste and animal manure: A comprehensive review," Bioresource Technology, vol. 401, Art. no. 131398, 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131398.

[3] A. Alengebawy et al., "Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: A review," Environmental Chemistry Letters, vol. 22, pp. 2641-2668, 2024, doi: 10.1007/s10311-024-01789-1.

[4] M. K. Jameel et al., "Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review," Results in Chemistry, vol. 7, Art. no. 101549, 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101549.

[5] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, and F. Fahl, "Biogas: Developments and perspectives in Europe," Renewable Energy, vol. 129, pp. 457-472, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.

[6] S. K. Ankathi, U. S. Chaudhari, R. M. Handler, and D. R. Shonnard, "Sustainability of biogas production from anaerobic digestion of food waste and animal manure," Applied Microbiology, vol. 4, no. 1, pp. 418-438, 2024, doi: 10.3390/applmicrobiol4010029.

[7] H. E. Kelebe, K. M. Ayimut, G. H. Berhe, and K. Hintsa, "Determinants for adoption decision of small scale biogas technology by rural households in Tigray, Ethiopia," Energy Economics, vol. 66, pp. 272-278, 2017, doi: 10.1016/j.eneco.2017.06.022.

[8] W. Anggono, I. C. Hernando, and L. Tulistyantoro, "Utilization of cow dung as a biogas raw material for alternative energy in Buddagan 1 Hamlet, Kabupaten Pamekasan," Community Empowerment, vol. 10, no. 4, pp. 875-883, 2025, doi: 10.31603/ce.12543.

[9] W. Fidela et al., "Utilization of cow manure into biogas as an effort to control livestock waste," Jurnal Ekologi, Masyarakat dan Sains, vol. 5, no. 2, pp. 186-192, 2024, doi: 10.55448/0br55f55.

[10] A. Apriyanto, M. Thohirin, A. B. Santoso, and A. Pambudi, "Pelatihan pembuatan bahan bakar padat dari sampah untuk kebutuhan rumah tangga sebagai alternatif pengganti LPG," Jurnal Abdi Masyarakat Saburai, vol. 3, no. 1, pp. 45-55, 2022, doi: 10.24967/jams.v3i1.1612.

[11] A. Rahman, S. Wahyuni, and R. Hidayat, "Design and performance evaluation of anaerobic digestion systems for livestock waste treatment," Renewable Energy Research, vol. 8, no. 2, pp. 100-110, 2024.

[12] D. J. P. Kumar, R. K. Mishra, S. Chinnam, P. Binnal, and N. Dwivedi, "A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends," Biotechnology Notes, vol. 5, pp. 33-49, 2024, doi: 10.1016/j.biotno.2024.02.001.

[13] F. Sher et al., "Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives," Process Safety and Environmental Protection, vol. 188, pp. 834-859, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.05.138.

[14] C. Romio, A. J. Ward, and H. B. Møller, "Characterization and valorization of biogas digestate and derived organic fertilizer products from separation processes," Frontiers in Sustainable Food Systems, vol. 8, Art. no. 1415508, 2024, doi: 10.3389/fsufs.2024.1415508.

[15] M. E. Lee, M. W. Steiman, and S. K. St. Angelo, "Biogas digestate as a renewable fertilizer: Effects of digestate application on crop growth and nutrient composition," Renewable Agriculture and Food Systems, vol. 36, no. 2, pp. 173-181, 2021, doi: 10.1017/S1742170520000186.

[16] F. D. Pratiwi, Yulia, and I. Sulistiana, "Edukasi biopori dan biogas sebagai media penguatan literasi pengelolaan sampah organik di MTs Negeri 1 Pangkalpinang," Jurnal Masyarakat Madani Indonesia, vol. 5, no. 3, pp. 2151-2161, 2026, doi: 10.59025/40cj8772.

[17] Rosmaiti, C. Mulyani, K. M. Z. Basriwijaya, and Zulhilmi, "Pemanfaatan limbah ternak sapi sebagai pestisida hayati di Kabupaten Gayo Lues," Jurnal Masyarakat Madani Indonesia, vol. 4, no. 3, pp. 725-732, 2025, doi: 10.59025/kw6sgq03.