

Analisis Potensi Energi Biogas dari Limbah Sapi untuk Mendorong Transisi Energi Berkelanjutan

Fathia Az Zahra¹, Nita Nurdiana^{2*}, Emidiana³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Indonesia
azzahrafathia22@gmail.com¹, nurdiana78@univpgri-palembang.ac.id^{2*}, emidiana@univpgri-palembang.ac.id³

Received 08 Agustus 2025 | Revised 17 Juni 2026 | Accepted 14 Juli 2026

ABSTRAK

Transisi energi dari sumber fosil ke energi terbarukan menjadi langkah strategis dalam mengatasi krisis energi dan dampak perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi limbah kotoran sapi sebagai sumber energi listrik berbasis biogas di Peternakan Duta Lembu Farm, Sumatera Selatan. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui observasi lapangan, wawancara, studi literatur, serta perhitungan teoritis mengenai volume biogas, energi listrik yang dihasilkan, pengurangan emisi gas rumah kaca, dan manfaat ekonominya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 210 kg kotoran sapi per hari mampu menghasilkan 6,3 m³ biogas, setara dengan 6,77 kWh/hari atau 203,1 kWh/bulan. Energi tersebut dapat memenuhi kebutuhan listrik ± 13 rumah tangga sederhana atau menyalakan 90 lampu Light Emitting Diode (LED), sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 157,5 kg CO₂/hari. Dari sisi ekonomi, pemanfaatan biogas berpotensi menghemat biaya listrik Rp293.276,4 per bulan dengan waktu balik modal sekitar 20 bulan. Dengan demikian, pemanfaatan biogas dari limbah sapi terbukti layak secara teknis, ekonomis, dan lingkungan sebagai solusi energi terbarukan yang berkelanjutan.

Kata kunci: Biogas, Kotoran Sapi, Energi Terbarukan, Emisi Rumah Kaca, Efisiensi Energi.

The transition from fossil fuels to renewable energy is a strategic step in addressing the energy crisis and the impacts of climate change. This study aims to analyze the potential of cow dung waste as a source of biogas-based electricity at Duta Lembu Farm, South Sumatra. The research employed a quantitative approach through field observations, interviews, literature review, and theoretical calculations of biogas volume, electricity generation, greenhouse gas emission reduction, and economic benefits. The results show that 210 kg of cow dung per day can produce 6.3 m³ of biogas, equivalent to 6.77 kWh/day or 203.1 kWh/month. This energy is sufficient to supply electricity for approximately 13 households or power 90 LED lamps, while also reducing greenhouse gas emissions by 157.5 kg CO₂/day. Economically, the utilization of biogas can save electricity costs of about Rp293,276.4 per month with a payback period of around 20 months. Thus, biogas utilization from cow dung is proven to be technically, economically, and environmentally feasible as a sustainable renewable energy solution.

Keywords: Biogas, Cow Dung, Renewable Energy, Greenhouse Gas Emissions, Energy Efficiency.

I. PENDAHULUAN

Transisi energi menjadi salah satu agenda strategis global dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan beralih menuju sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, seperti energi surya, angin, air, dan biomassa. Peralihan ini dinilai penting untuk mengatasi krisis energi, mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan ketahanan energi, serta mendukung pembangunan berkelanjutan (Bogdanov et al., 2021; Khoshnevisan et al., 2022; Arshad et al., 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi energi terbarukan yang semakin efisien serta penurunan biaya produksi energi menjadi faktor utama yang mempercepat implementasi transisi energi di berbagai negara. Selain itu, dukungan kebijakan pemerintah, regulasi lingkungan, serta kerja sama internasional turut mendorong peningkatan pemanfaatan energi terbarukan, terutama di negara berkembang.

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar namun pemanfaatannya masih belum optimal adalah biogas (Sarker et al., 2023; Dhungana et al., 2022). Biogas merupakan gas hasil dekomposisi bahan organik melalui proses anaerobik yang menghasilkan metana (CH₄) sebagai komponen utama, disertai karbon dioksida (CO₂), hidrogen sulfida (H₂S), dan uap air (H₂O) (Annur et al., 2020). Kandungan metana dalam biogas berkisar antara 50–70%, sehingga memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memasak, penerangan, maupun pembangkit listrik skala kecil. Pemanfaatan biogas tidak hanya memberikan manfaat sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga mampu mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah organik yang tidak dikelola dengan baik.

Pemanfaatan biogas di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, khususnya pada wilayah yang masih bergantung pada energi fosil sebagai sumber utama energi listrik. Provinsi Sumatera Selatan merupakan

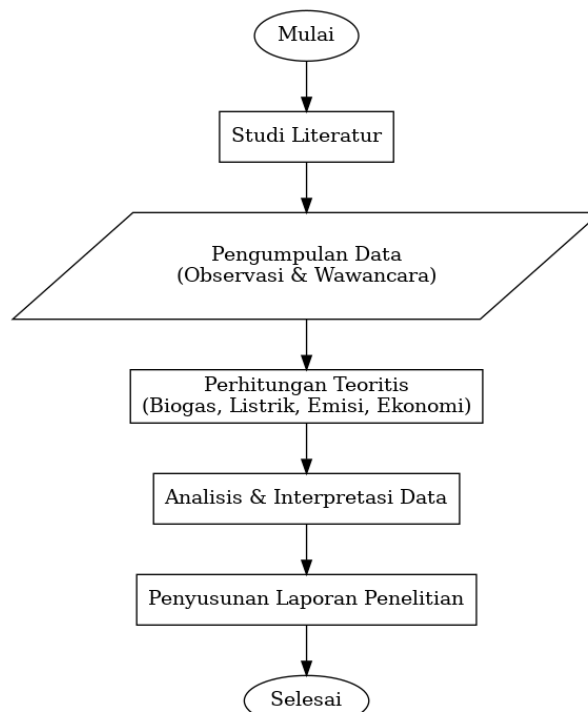
salah satu wilayah yang memiliki potensi biomassa cukup besar, terutama dari sektor peternakan dan pertanian. Namun demikian, pemanfaatan limbah organik sebagai sumber energi terbarukan masih relatif terbatas. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam tidak hanya mempercepat deplesi sumber daya energi, tetapi juga meningkatkan emisi gas rumah kaca yang berdampak terhadap pemanasan global dan degradasi lingkungan (Villadsen et al., 2019).

Sektor peternakan sapi di Sumatera Selatan menghasilkan limbah kotoran ternak dalam jumlah besar dan berkelanjutan yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi biogas (Roubik et al., 2016; Roubik & Mazancová, 2020). Selain limbah peternakan, limbah pertanian dan hasil samping perikanan juga memiliki prospek yang menjanjikan sebagai sumber energi biomassa (Nugraha & Rahmawati, 2023). Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah kotoran ternak dapat menghasilkan emisi metana dalam jumlah signifikan yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (Agar et al., 2022; Yıldırım, 2026). Oleh karena itu, pengolahan limbah ternak menjadi biogas tidak hanya berfungsi sebagai solusi penyediaan energi alternatif, tetapi juga sebagai upaya mitigasi emisi gas rumah kaca dan pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi produksi energi listrik dari biogas berbasis limbah kotoran sapi di Duta Lembu Farm, Sumatera Selatan. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi manfaat ekonomi pemanfaatan biogas serta mengestimasi potensi pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pengolahan limbah peternakan menjadi energi terbarukan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan terintegrasi yang mengombinasikan analisis teknis potensi energi, analisis ekonomi, dan estimasi reduksi emisi gas rumah kaca pada peternakan sapi skala kecil yang belum banyak dikaji sebelumnya. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah serta dasar pertimbangan dalam pengembangan energi biogas berbasis limbah peternakan di tingkat regional.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk mengukur potensi produksi biogas (Sihotang, 2023) dari limbah kotoran sapi serta menghitung manfaat ekonomi dan lingkungan yang dihasilkan. Pendekatan kuantitatif dipilih karena mampu merepresentasikan data dalam bentuk numerik serta memungkinkan untuk dilakukan perhitungan matematis dan analisis statistik guna menguji hubungan antar variabel (Sihotang, 2023).



Gambar 1. Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Menelaah berbagai sumber literatur dan referensi untuk mengidentifikasi permasalahan ketergantungan pada energi fosil serta potensi pemanfaatan limbah kotoran sapi sebagai sumber energi alternatif.
2. Pengumpulan Data
Data primer diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara dengan pemilik peternakan Duta Lembu Farm. Informasi yang dikumpulkan meliputi jumlah populasi sapi dan rata-rata produksi kotoran harian per ekor.
3. Perhitungan Teoritis
Menggunakan data yang dikumpulkan untuk menghitung volume biogas, potensi energi listrik, jumlah rumah dan lampu yang dapat dilayani, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta manfaat ekonomi dan waktu balik modal investasi.
4. Analisis dan Interpretasi Data
Data yang telah dihitung dianalisis untuk melihat korelasi antara massa limbah, produksi biogas, dan besarnya kontribusi terhadap kebutuhan energi dan pengurangan emisi.
5. Penyusunan Laporan Penelitian
Semua temuan dirangkum dalam laporan penelitian yang disusun secara sistematis untuk mendukung kesimpulan dan rekomendasi.

Perhitungan dilakukan untuk mengestimasi potensi produksi biogas dari limbah kotoran sapi serta konversinya menjadi energi listrik. Selanjutnya, energi listrik yang dihasilkan digunakan untuk memperkirakan kapasitas pelayanan beban listrik, potensi pengurangan emisi gas rumah kaca, dan manfaat ekonomi berupa penghematan biaya listrik serta waktu balik modal investasi biodigester. Pendekatan perhitungan ini digunakan sebagai dasar evaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan sistem biogas.

Potensi Produksi Biogas

Pendekatan perhitungan volume biogas berdasarkan massa bahan baku (M) dan nilai yield (Y) telah banyak digunakan dalam studi biogas berbasis kotoran ternak (Roubík et al., 2016; Roubík & Mazancová, 2020).

$$V_{\text{biogas}} = M \times Y \quad (1)$$

di mana V_{biogas} adalah volume biogas yang dihasilkan (m^3/hari), M adalah massa kotoran sapi (kg/hari), dan Y adalah potensi produksi biogas spesifik (m^3/kg kotoran). Nilai $Y = 0,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ mengacu pada pedoman teknis Food and Agriculture Organization (FAO), yang menyatakan bahwa kotoran sapi segar memiliki potensi produksi biogas sebesar $0,02\text{--}0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$ tergantung pada kandungan bahan organik dan kondisi digester (FAO, 2013).

Potensi Energi Listrik dari Biogas

Perhitungan konversi energi biogas menjadi energi listrik dengan mempertimbangkan nilai kalor dan efisiensi sistem mengacu pada kajian energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi berbasis biogas (Bogdanov et al., 2021; Villadsen et al., 2019).

$$E_{\text{listrik}} = \frac{V_{\text{biogas}} \times LHV_{\text{CH}_4} \times \eta}{3600} \quad (2)$$

Jumlah Lampu dan Rumah yang Dilayani

Perhitungan jumlah lampu dan rumah tangga yang dapat dilayani didasarkan pada pendekatan keseimbangan energi dan konsumsi listrik rumah tangga, sebagaimana digunakan dalam studi pemanfaatan energi terbarukan skala komunitas (Bogdanov et al., 2021; Nugraha & Rahmawati, 2023)

$$N_{\text{lampu}} = \frac{E_{\text{listrik}}}{P_{\text{lampu}} \times t} \quad (3)$$

$$N_{\text{rumah}} = \frac{E_{\text{listrik}}}{E_{\text{rt}}} \quad (4)$$

Emisi Gas Rumah Kaca

Perhitungan emisi metana dan konversi ke emisi setara CO_2 dilakukan menggunakan faktor emisi metana dan nilai *global warming potential* (GWP) sebesar 25, yang banyak digunakan dalam analisis dampak lingkungan sistem biogas (Roubík & Mazancová, 2020; Villadsen et al., 2019).

$$E_{CH_4} = M \times R_{CH_4} \quad (5)$$

$$E_{CO_2eq} = E_{CH_4} \times 25 \quad (6)$$

Manfaat Ekonomi

Perhitungan manfaat ekonomi berupa penghematan biaya listrik dan waktu balik modal investasi biodigester mengacu pada pendekatan analisis kelayakan ekonomi sistem energi terbarukan skala kecil (Bogdanov et al., 2021; Nugraha & Rahmawati, 2023)

$$C_{penghematan} = E_{listrik} \times P_{listrik} \quad (7)$$

$$T_{BEP} = \frac{C_{investasi}}{C_{penghematan}} \quad (8)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian lapangan dilaksanakan di Duta Lembu Farm, sebuah peternakan sapi potong yang berlokasi di Jalan Ki Anwar Mangku, Talang Karet, Kelurahan Sentosa, Provinsi Sumatera Selatan. Lokasi ini dipilih karena memiliki populasi sapi potong skala kecil yang representatif serta menghasilkan limbah kotoran sapi secara kontinu, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi biogas. Data primer diperoleh melalui wawancara langsung dengan pemilik peternakan dan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Operasional Peternakan

Parameter	Nilai
Jumlah sapi potong	14 ekor
Produksi kotoran/sapi/hari	15 kg
Total kotoran/hari	210 kg/hari

Potensi Produksi Biogas

Perhitungan potensi produksi biogas dilakukan berdasarkan jumlah kotoran sapi harian dan potensi produksi biogas spesifik. Mengacu pada FAO (2013), kotoran sapi segar memiliki rendemen biogas sebesar 0,02–0,04 m³/kg, dengan nilai rata-rata 0,03 m³/kg. Volume biogas harian dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$V_{biogas} = 210 \times 0,03 = 6,3 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa limbah kotoran sapi pada skala peternakan kecil tetap memiliki potensi produksi biogas yang berkelanjutan.

Potensi energi listrik dihitung berdasarkan nilai kalor biogas sebesar 21.500 kJ/m³, kandungan metana 60%, dan efisiensi konversi listrik sebesar 30% (IEA, 2019; Roubik et al., 2020).

Dengan menggunakan persamaan (2) – (4), besar energi listrik harian yang dihasilkan sebesar:

$$E_{listrik} = 6,3 \text{ m}^3/\text{hari} \times 21.500 \text{ kJ/m}^3 \times 0,60 \times 0,30 \text{ kJ/hari} = 24.381 \text{ kJ/hari}$$

Konversi ke satuan kWh

$$E_{listrik} (\text{kWh}) = \frac{24.381 \text{ kJ/hari}}{3.600 \text{ kJ}} = 6,77 \text{ kWh/hari}$$

Sehingga potensi energi listrik bulanan sebesar

$$E_{listrik/\text{bulan}} = 6,77 \text{ kWh/hari} \times 30 \text{ hari} = 203,1 \text{ kWh/bulan}$$

Jika energi digunakan untuk menyalakan lampu Light Emitting Diode (LED) 15 watt selama 5 jam per hari, maka kebutuhan energi per lampu Adalah

$$E_{lampu} = 15 \text{ W} \times 5 \text{ jam} = 75 \text{ Wh/hari}$$

Jumlah lampu yang dapat disuplai

$$N_{lampu} = \frac{6770}{75} = 90 \text{ lampu}$$

Produksi metana dari kotoran sapi dihitung menggunakan faktor emisi sebesar 0,03 kg CH₄/kg kotoran (FAO, 2013), banyaknya gas metana yang dihasilkan sesuai dengan persamaan (5) – (6) sebanyak

$$E_{CH_4} = 210 \text{ kg/hari} \times 0,03 \text{ kg CH}_4/\text{kg} = 6,3 \text{ kg CH}_4/\text{hari}$$

Dengan nilai *Global Warming Potential* (GWP) metana sebesar 25 (IPCC, 2014), maka emisi setara

$$E_{CO_2eq} = 6,3 \text{ kg CH}_4/\text{hari} \times 25 = 157,5 \text{ kg CO}_2/\text{hari}$$

Sesuai dengan persamaan (7) – (8), dengan tarif listrik PLN sebesar Rp1.444/kWh, potensi penghematan biaya listrik per bulan

$$\text{Biaya} = 203,1 \times 1.444 = \text{Rp}293.276,4/\text{bulan}$$

Jika asumsi biaya investasi biodigester sebesar Rp5.894.000, maka lama waktu balik modal

$$\text{Payback Period} = \frac{5.894.000}{293.276,4} \approx 20,09 \text{ bulan}$$

Pembahasan

Produksi biogas secara langsung dipengaruhi oleh jumlah dan karakteristik limbah organik yang tersedia, khususnya limbah kotoran sapi sebagai substrat utama biodigester. Berdasarkan hasil observasi di Duta Lembu Farm, terdapat 14 ekor sapi potong dengan rata-rata produksi kotoran sebesar 15 kg/ekor/hari, sehingga total limbah yang dihasilkan mencapai 210 kg/hari. Jumlah tersebut menunjukkan potensi yang cukup signifikan dalam menyediakan bahan baku biogas secara berkelanjutan. Efisiensi produksi biogas dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kualitas pakan ternak, kandungan bahan organik, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N ratio), kondisi kesehatan ternak, serta manajemen pemeliharaan dan sistem digester yang digunakan (Dhungana et al., 2022; Schott et al., 2022; Eliasson et al., 2023). Faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap tingkat biodegradabilitas limbah dan efektivitas proses fermentasi anaerobik dalam menghasilkan gas metana. Semakin optimal kondisi fermentasi yang berlangsung di dalam digester, maka semakin besar volume biogas yang dapat dihasilkan.

Dengan asumsi produksi biogas sebesar 0,03 m³/kg kotoran, volume biogas yang dihasilkan pada penelitian ini mencapai 6,3 m³/hari. Hasil tersebut sebanding dengan penelitian Roubík dan Mazancová (2020) di wilayah Sumatra yang melaporkan produksi biogas berkisar antara 5–8 m³/hari pada peternakan dengan jumlah ternak dan karakteristik limbah yang relatif serupa. Selain itu, Khoshnevisan et al. (2022) menyatakan bahwa kotoran sapi memiliki potensi yang cukup stabil sebagai substrat biogas karena kandungan bahan organiknya yang tinggi dan tersedia secara kontinu. Kesamaan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan biogas pada peternakan sapi skala kecil di Sumatera Selatan memiliki potensi yang realistis dan layak diterapkan secara teknis apabila dikelola dengan baik.

Biogas yang dihasilkan mengandung sekitar 60% metana dengan nilai kalor rata-rata sebesar 21.500 kJ/m³. Dengan asumsi efisiensi konversi listrik sebesar 30%, potensi energi listrik yang dihasilkan mencapai 24.381 kJ/hari atau setara dengan 6,77 kWh/hari. Nilai efisiensi tersebut tergolong konservatif dan sesuai dengan karakteristik generator biogas skala kecil yang umumnya masih memiliki keterbatasan pada sistem pembakaran, kualitas gas, serta kestabilan beban listrik (Villadsen et al., 2019; Sarker et al., 2023). Efisiensi konversi energi berpotensi meningkat apabila dilakukan pemurnian biogas untuk meningkatkan kandungan metana, optimalisasi sistem biodigester, serta penggunaan generator dengan teknologi yang lebih modern dan efisien. Menurut Arshad et al. (2022), peningkatan kualitas sistem pemanfaatan biogas dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi pembangkitan listrik dan keberlanjutan energi di wilayah pedesaan.

Energi listrik sebesar 6,77 kWh/hari memiliki implikasi praktis yang cukup signifikan dalam mendukung kebutuhan energi masyarakat pedesaan. Jika digunakan untuk menyalakan lampu LED berdaya 15 watt selama 5 jam per hari, energi tersebut mampu menyuplai hingga 90 unit lampu setiap hari. Dalam konteks rumah tangga dengan konsumsi listrik rendah, potensi energi tersebut dapat memenuhi kebutuhan penerangan sekitar 12–13 rumah tangga sederhana per bulan. Hasil ini menunjukkan bahwa biogas tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga berperan dalam meningkatkan akses energi, ketahanan energi lokal, dan kualitas hidup masyarakat pedesaan melalui penyediaan energi yang lebih mandiri dan berkelanjutan (Bogdanov et al., 2021).

Dari sisi lingkungan, pemanfaatan biogas memberikan manfaat yang signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Limbah kotoran sapi berpotensi menghasilkan sekitar 6,3 kg CH₄ per hari yang apabila

dilepaskan langsung ke atmosfer dapat meningkatkan efek pemanasan global secara signifikan. Dengan menggunakan faktor Global Warming Potential (GWP) metana sebesar 25, pemanfaatan biogas pada penelitian ini mampu mengurangi emisi setara CO₂ sebesar 157,5 kg/hari. Temuan ini sejalan dengan penelitian Agar et al. (2022) dan Yildirim (2026) yang menyatakan bahwa pemanfaatan limbah ternak sebagai sumber energi biogas merupakan salah satu strategi efektif dalam mitigasi perubahan iklim dan pengurangan jejak karbon sektor peternakan. Selain itu, pengolahan limbah melalui biodigester juga mampu mengurangi pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah organik yang tidak terkelola dengan baik.

Secara ekonomi, pemanfaatan biogas juga menunjukkan tingkat kelayakan yang cukup baik (Mazurkiewicz, 2022; Arshad et al., 2022). Dengan tarif listrik PLN sebesar Rp1.444,70/kWh, potensi penghematan biaya listrik mencapai Rp293.276,4 per bulan. Dengan asumsi biaya investasi biodigester skala rumah tangga sebesar ±Rp5.894.000, maka periode pengembalian modal diperkirakan tercapai dalam waktu sekitar 20,09 bulan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Roubik et al. (2016) dan Nugraha dan Rahmawati (2023) yang menyatakan bahwa sistem biogas skala kecil di wilayah agraris Indonesia umumnya memiliki payback period kurang dari dua tahun sehingga layak diterapkan dari sisi ekonomi. Selain memberikan penghematan biaya energi, pemanfaatan biogas juga berpotensi meningkatkan nilai tambah limbah peternakan serta mendukung pengembangan ekonomi sirkular berbasis energi terbarukan.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan potensi teknis, lingkungan, dan ekonomi yang menjanjikan, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Perhitungan yang dilakukan masih berbasis pada pendekatan teoritis dan data literatur tanpa verifikasi eksperimental melalui pengoperasian biodigester secara langsung di lapangan. Selain itu, variasi faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, waktu retensi, serta kualitas pakan ternak yang dapat memengaruhi produksi biogas belum dianalisis secara rinci. Oleh karena itu, penelitian lanjutan melalui pengujian biodigester skala nyata dan pengamatan jangka panjang sangat diperlukan untuk mengonfirmasi hasil penelitian serta menghasilkan model pengelolaan biogas yang lebih optimal dan aplikatif pada peternakan sapi skala kecil.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kotoran sapi di Duta Lembu Farm berpotensi besar sebagai sumber energi terbarukan. Dari 210 kg kotoran sapi per hari dapat dihasilkan 6,3 m³ biogas/hari, yang setara dengan 6,77 kWh/hari atau 203,1 kWh/bulan energi listrik. Energi ini mampu memenuhi kebutuhan ±13 rumah tangga sederhana atau menyalakan 90 lampu LED. Selain manfaat energi, pemanfaatan biogas juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 157,5 kg CO₂/hari dan menghemat biaya listrik sekitar Rp293.276,4 per bulan. Dengan waktu balik modal ±20 bulan, biogas terbukti layak secara teknis, lingkungan, dan ekonomis sebagai solusi energi alternatif di sektor peternakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agar, D. A., Athanassiadis, D., & Pavelka, B. J. (2022). The CO₂ cutting cost of biogas from humanure and livestock manure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102381>
- Annur, S., Kusmasari, W., & Wulandari, R. (2020). Pengembangan biogas dari sampah untuk energi listrik dan bahan bakar kompor di TPA Cilowong, Kota Serang, Provinsi Banten. *Jurnal Teknik Kimia*, 6(2), 45–53.
- Arshad, M., Ansari, A. R., Qadir, R., Tahir, M. H., Nadeem, A., Mehmood, T., Alhumade, H., & Khan, N. (2022). Green electricity generation from biogas of cattle manure: An assessment of potential and feasibility in Pakistan. *Frontiers in Energy Research*, 10, 911485. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.911485>
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa, L. D. S. N. S., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
- Dhungana, B., Lohani, S. P., & Marsolek, M. (2022). Anaerobic co-digestion of food waste with livestock manure at ambient temperature: A biogas-based circular economy and sustainable development goals. *Sustainability*, 14(6), 3307. <https://doi.org/10.3390/su14063307>

- Eliasson, K. A., Singh, A., Isaksson, S., & Schnürer, A. (2023). Co-substrate composition is critical for enrichment of functional key species and for process efficiency during biogas production from cattle manure. *Microbial Biotechnology*, 16(2), 350–371. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14194>
- Khoshnevisan, B., Tsapekos, P., Zhang, Y., Valverde-Pérez, B., Angelidaki, I., & Rafiee, S. (2022). Biogas and methane production from livestock manure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112510. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112510>
- Mazurkiewicz, J. (2022). Analysis of the energy and material use of manure as a fertilizer or substrate for biogas production during the energy crisis. *Energies*, 15(23), 8867. <https://doi.org/10.3390/en15238867>
- Nugraha, T. A., & Rahmawati, A. (2023). Examining biogas potential from rotting fruits for advanced waste management, environmental conservation, and sustainable energy generation. *The Journal of Indonesia Sustainable Development Planning*, 4(3), 284–298. <https://doi.org/10.46456/jisdep.v4i3.312>
- Roubík, H., & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. *Environmental Development*, 33, 100505. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100505>
- Roubík, H., Mazancová, J., Banout, J., & Verner, V. (2016). Addressing problems at small-scale biogas plants: A case study from central Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2784–2792. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.114>
- Sarker, S., Lamb, J. J., Hjelme, D. R., & Lien, K. M. (2023). A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. *Applied Sciences*, 13(4), 2140. <https://doi.org/10.3390/app13042140>
- Schott, C., Cunha, J. R., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. (2022). Innovation in valorization of cow manure: Higher hydrolysis, methane production and increased phosphorus retention using UASB technology. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140294>
- Sihotang, H. (2023). Metode penelitian kuantitatif. Pusat Penerbitan dan Pencetakan Buku Perguruan Tinggi Universitas Kristen Indonesia Jakarta. <https://doi.org/10.31219/osf.io/9fkbr>
- Villadsen, S. N. B., Fosbøl, P. L., Angelidaki, I., Woodley, J. M., Nielsen, L. P., & Møller, P. (2019). The potential of biogas: The solution to energy storage. *ChemSusChem*, 12(10), 2147–2153. <https://doi.org/10.1002/cssc.201900100>
- Yıldırım, R. (2026). From livestock manure to renewable energy: Multicriteria assessment of carbon footprint and environmental impacts. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 22(2), 495–508. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf157>