

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Kotoran Sapi Di Desa Tanjung Baringin Simarulak Kabupaten Padang Lawas

Rimbawati^{1*}, Partaonan Harahap², Dultudes Mangopo³

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Cenderawasih, Jayapura, Papua, Indonesia

*Email: rimbawati@umsu.ac.id

ABSTRACT

This study explores the feasibility of developing a Biogas Power Plant (PLTBg) utilizing cow manure as a renewable energy source in Tanjung Baringin Simarulak Village, Padang Lawas Regency, North Sumatra. The site, which hosts a government-managed cattle breeding center, generates a significant amount of organic waste that poses environmental challenges. Given the increasing demand for clean energy and the need to mitigate greenhouse gas emissions, biogas emerges as a promising alternative. The research adopts a descriptive approach with feasibility analysis, incorporating technical, financial, environmental, and social perspectives. Field observations and interviews with stakeholders, combined with secondary data, form the basis for evaluating project viability. The study estimates daily biogas production of approximately 75 m³ from 100 cows, which can generate around 120 kWh of electricity per day. Financial analysis shows a positive Net Present Value (NPV), an Internal Rate of Return (IRR) of 17.5%, a Profitability Index (PI) of 1.39, and a Payback Period (PBP) of 4.1 years. The findings indicate that the project is technically and economically feasible. It also offers environmental benefits by reducing methane emissions and turning waste into valuable energy and fertilizer. Socially, the project has the potential to reduce household energy costs and create new job opportunities in rural communities. Therefore, this biogas project is strongly recommended as a sustainable model for renewable energy development in Indonesia's agricultural regions.

Keywords: Biogas, renewable energy, cow manure, PLTBg, rural electrification, waste-to-energy, North Sumatra

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi dan populasi. Salah satu pendekatan yang strategis adalah pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Sumatera Utara, sebagai salah satu provinsi dengan sektor peternakan yang berkembang pesat, khususnya sapi potong, menyimpan potensi besar untuk memanfaatkan limbah ternak sebagai sumber energi alternatif. Data tahun 2020 menunjukkan bahwa Sumatera Utara memproduksi 22.021 ton daging sapi, menempati peringkat ke-8 nasional, namun kebutuhan konsumsi masyarakat belum sepenuhnya terpenuhi.

Desa Tanjung Baringin Simarulak, yang terletak di Kecamatan Barumun Selatan, Kabupaten Padang Lawas, merupakan lokasi strategis dengan pusat pembibitan sapi potong milik Dinas Ketahanan Pangan dan Peternakan Provinsi Sumatera Utara. Aktivitas peternakan intensif di desa ini menghasilkan limbah kotoran sapi dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan bila tidak dikelola dengan baik. Berdasarkan data FAO, sektor peternakan menyumbang hingga 18% emisi gas rumah kaca global, menjadikannya salah satu penyebab utama perubahan iklim. Salah satu gas utama yang dihasilkan dari limbah ternak adalah metana (CH₄), yang memiliki potensi pemanasan global 25 kali lebih besar dari karbon dioksida (CO₂), namun juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses fermentasi anaerob.

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) menjadi solusi yang menjanjikan dalam menjawab kebutuhan energi pedesaan dan sekaligus menanggulangi permasalahan limbah peternakan. Kajian ini bertujuan untuk menilai kelayakan teknis, finansial, dan lingkungan dari pengembangan PLTBg berbasis kotoran sapi di Desa Tanjung Baringin Simarulak serta memberikan rekomendasi implementatif untuk mendukung transisi energi terbarukan di wilayah Sumatera Utara.

Kebutuhan akan energi di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan percepatan pembangunan infrastruktur di berbagai daerah. Ketergantungan terhadap energi fosil seperti batu bara,

minyak bumi, dan gas alam menjadi tantangan utama dalam pembangunan berkelanjutan karena selain ketersediaannya terbatas, sumber energi tersebut juga memiliki dampak lingkungan yang serius seperti polusi udara, pencemaran tanah, dan kontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, pengembangan energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui menjadi sebuah keniscayaan dalam strategi transisi energi nasional.

Salah satu sumber energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi biogas. Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerob terhadap bahan organik seperti limbah pertanian, limbah rumah tangga, dan kotoran hewan. Gas ini mengandung metana (CH_4) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memasak, penerangan, dan pembangkitan listrik. Selain ramah lingkungan, pemanfaatan biogas juga mendukung upaya pengelolaan limbah dan peningkatan ketahanan energi di tingkat lokal, terutama di wilayah pedesaan yang belum sepenuhnya terjangkau jaringan listrik nasional.

Sektor peternakan, khususnya peternakan sapi, merupakan salah satu penyumbang utama limbah organik berupa kotoran hewan yang sangat potensial untuk diolah menjadi biogas. Berdasarkan laporan Food and Agriculture Organization (FAO), sektor peternakan secara global menyumbang sekitar 18% emisi gas rumah kaca, melebihi kontribusi dari sektor transportasi. Gas metana yang dihasilkan dari proses dekomposisi kotoran ternak di tempat terbuka merupakan gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global lebih dari 25 kali lipat dibandingkan karbon dioksida (CO_2). Dengan demikian, pengolahan kotoran ternak melalui sistem biogas tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga berperan dalam pengurangan emisi dan pencemaran lingkungan.

Sumatera Utara merupakan salah satu provinsi dengan potensi besar dalam sektor peternakan, terutama dalam pengembangan sapi potong. Pada tahun 2020, produksi daging sapi di Sumatera Utara mencapai 22.021 ton, menempati peringkat ke-8 secara nasional. Meskipun demikian, tingkat konsumsi masyarakat terhadap daging sapi jauh melebihi angka produksi, sehingga provinsi ini masih mengandalkan pasokan dari daerah lain. Untuk mengatasi kesenjangan ini, Pemerintah Provinsi Sumatera Utara melalui Dinas Ketahanan Pangan dan Peternakan telah membentuk dan mengembangkan pusat pembibitan sapi potong di beberapa wilayah, salah satunya adalah di Desa Tanjung Baringin Simarulak, Kecamatan Barumon Selatan, Kabupaten Padang Lawas.

Desa Tanjung Baringin Simarulak dipilih sebagai lokasi pembibitan karena memiliki karakteristik geografis dan sosial yang mendukung pengembangan peternakan sapi skala menengah hingga besar. Dengan populasi sapi yang cukup tinggi, desa ini menghasilkan limbah kotoran dalam jumlah yang besar setiap harinya. Namun, hingga kini belum terdapat sistem pengolahan limbah yang terintegrasi dan efisien, sehingga kotoran tersebut berisiko mencemari lingkungan sekitar, baik melalui pencemaran air tanah, bau tidak sedap, maupun penyebaran penyakit zoonosis.

Melihat kondisi tersebut, maka perlu dirancang sebuah sistem pengolahan limbah yang tidak hanya menyelesaikan persoalan lingkungan, tetapi juga memberikan nilai tambah secara ekonomi dan energi. Salah satu solusi yang layak untuk diterapkan adalah pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berbasis kotoran sapi. Teknologi ini telah terbukti efektif di berbagai negara, termasuk India, Tiongkok, dan beberapa negara Eropa, terutama dalam konteks pengelolaan limbah peternakan di wilayah rural. Di Indonesia sendiri, potensi pengembangan PLTBg sangat besar, namun implementasinya masih terbatas pada pilot project dan inisiatif skala kecil.

Pembangunan PLTBg di Desa Tanjung Baringin Simarulak tidak hanya bertujuan untuk menghasilkan energi listrik dari sumber lokal yang terbarukan, tetapi juga menjadi model percontohan bagi desa-desa lain dalam memanfaatkan potensi limbah peternakan secara terpadu. Sistem ini akan menggabungkan teknologi fermentasi anaerob, pemurnian gas, pembangkit energi, dan distribusi listrik ke masyarakat sekitar. Selain itu, residu dari proses fermentasi yang disebut digestat dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik untuk pertanian lokal, sehingga menciptakan sirkulasi ekonomi berbasis bioenergi.

Dalam perencanaan dan implementasinya, pembangunan PLTBg memerlukan kajian teknis yang matang, termasuk identifikasi potensi bahan baku (jumlah dan kualitas kotoran sapi), kapasitas digester yang diperlukan, sistem konversi energi yang tepat, serta desain jaringan distribusi listrik yang sesuai dengan kebutuhan dan kondisi geografis desa. Kajian teknis ini menjadi landasan dalam menentukan spesifikasi alat dan sistem, merancang prosedur operasional standar, serta memperkirakan kebutuhan pemeliharaan dan pelatihan bagi masyarakat pengguna.

Selain aspek teknis, pengembangan PLTBg juga harus mempertimbangkan aspek sosial dan budaya masyarakat setempat. Keterlibatan aktif masyarakat dalam proses perencanaan, pelaksanaan, dan pemanfaatan hasil energi sangat penting untuk memastikan keberlanjutan proyek. Program edukasi dan pelatihan harus diberikan secara terstruktur untuk membangun kesadaran dan kapabilitas masyarakat dalam mengelola sistem energi berbasis biogas secara mandiri. Di sisi lain, pemerintah daerah juga perlu memberikan dukungan regulasi, insentif, dan fasilitasi akses terhadap teknologi dan pendanaan.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menyusun rancangan sistem PLTBg yang sesuai dengan kondisi lokal Desa Tanjung Baringin Simarulak. Kajian ini difokuskan pada aspek teknis perancangan, mulai dari desain digester, sistem pemurnian gas, unit pembangkit, hingga distribusi energi. Penelitian ini juga berupaya mengidentifikasi potensi dampak lingkungan dan sosial dari penerapan sistem tersebut, serta merumuskan strategi pengelolaan limbah yang efisien dan berkelanjutan.

Melalui pendekatan ini, diharapkan proyek PLTBg tidak hanya menjadi solusi teknis semata, tetapi juga sebagai instrumen pemberdayaan masyarakat dan transformasi energi di tingkat desa. Dengan memanfaatkan potensi lokal dan teknologi tepat guna, pembangunan sistem energi berbasis biogas diharapkan dapat mendukung tercapainya tujuan pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya dalam bidang energi bersih dan terjangkau (SDG 7), produksi dan konsumsi yang bertanggung jawab (SDG 12), serta aksi terhadap perubahan iklim (SDG 13).

Oleh karena itu, pendahuluan ini menegaskan bahwa pembangunan PLTBg di Desa Tanjung Baringin Simarulak merupakan langkah strategis dalam mewujudkan desa mandiri energi yang bersih, efisien, dan inklusif. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata terhadap pemanfaatan energi terbarukan di tingkat akar rumput, sekaligus menjawab persoalan lingkungan akibat limbah peternakan yang selama ini belum tertangani secara optimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara deskriptif dengan pendekatan studi kelayakan proyek, mencakup aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Lokasi penelitian berpusat di Desa Tanjung Baringin Simarulak, Kecamatan Barumun Selatan, Kabupaten Padang Lawas. Lokasi ini dipilih karena memiliki fasilitas peternakan sapi skala menengah yang dikelola oleh pemerintah provinsi dan menghasilkan limbah organik dalam jumlah signifikan.

Pelanggan Perusahaan Listrik Negara di Kabupaten Padang Lawas sebanyak 49.781 pelanggan dengan jumlah listrik yang dijual sebanyak 56.641.314 kWh dan nilai penjualan energi sebesar Rp. 46.247.383.866,-. Tabel berikut merupakan pengguna jasa Perusahaan Listrik Negara di Kabupaten Padang Lawas. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan fokus pada perancangan teknis sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berbasis kotoran sapi di Desa Tanjung Baringin Simarulak, Kabupaten Padang Lawas. Lokasi ini dipilih karena memiliki unit peternakan sapi potong berskala menengah yang menghasilkan limbah organik dalam jumlah signifikan, sehingga layak dijadikan basis perancangan sistem biogas terapan.



Gambar 1. Gedung PT. PLN

Pengumpulan data dilakukan melalui metode observasi lapangan, pengukuran langsung terhadap volume produksi kotoran sapi harian, serta dokumentasi kondisi geografis dan infrastruktur lokasi. Wawancara dilakukan dengan pengelola peternakan dan tokoh masyarakat guna memahami karakteristik operasional peternakan serta potensi dukungan sosial terhadap pemanfaatan biogas. Langkah-langkah perancangan dimulai dengan identifikasi kebutuhan energi lokal dan volume kotoran sapi sebagai bahan baku utama. Berdasarkan data produksi kotoran, dilakukan estimasi potensi produksi biogas menggunakan koefisien standar sebesar $0,03 \text{ m}^3$ per kilogram kotoran sapi segar. Hasil estimasi ini menjadi dasar dalam menentukan kapasitas digester dan unit pendukung lainnya.

Selanjutnya, pemilihan jenis digester dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi, durabilitas, serta kesesuaian dengan kondisi sosial-teknis masyarakat. Digester tipe kubah tetap (*fixed dome*) dipilih sebagai solusi optimal karena struktur permanennya cocok untuk penggunaan jangka panjang di daerah pedesaan. Rancangan sistem juga mencakup unit pemurnian biogas untuk mengurangi kandungan H_2S dan kelembaban gas, guna meningkatkan efisiensi pembakaran pada genset. Dalam tahap akhir, dilakukan pemetaan distribusi listrik lokal berdasarkan kapasitas output energi yang dirancang, serta perencanaan pengelolaan residu digester sebagai pupuk organik. Semua perancangan didasarkan pada prinsip teknologi tepat guna dan keberlanjutan, dengan mempertimbangkan kemudahan replikasi dan kemampuan perawatan oleh masyarakat setempat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) di Desa Tanjung Baringin Simarulak dilakukan dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku, efisiensi sistem, kemudahan operasional, dan kemampuan adaptasi masyarakat terhadap teknologi. Sumber utama bahan baku berasal dari kotoran sapi yang dihasilkan oleh pusat pembibitan ternak milik pemerintah daerah, dengan jumlah populasi sekitar 100 ekor sapi. Setiap ekor sapi menghasilkan rata-rata 25 kg kotoran per hari, sehingga total limbah organik yang tersedia mencapai sekitar 2.500 kg/hari. Dari estimasi tersebut, diperkirakan produksi biogas harian mencapai $\pm 75 \text{ m}^3$ dengan asumsi konversi biogas $0,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ kotoran sapi. Volume ini menjadi dasar dalam merancang kapasitas *digester* serta sistem pendukung lainnya.

Desain Digester

Jenis digester yang dipilih adalah tipe kubah tetap (*fixed dome*) berbahan beton, karena lebih tahan lama dan cocok untuk skala komunitas pedesaan. Kapasitas digester yang dirancang adalah 50 m^3 , sesuai dengan volume harian bahan baku dan mempertimbangkan waktu retensi selama 25–30 hari. Digester dilengkapi dengan saluran masuk bahan baku (*inlet*), saluran keluaran lumpur (*outlet*), serta pipa penyalur gas (*gas pipe*) yang terhubung ke unit pemurnian.

Pemilihan Jenis Digester

Jenis digester yang digunakan dalam perancangan sistem ini adalah digester tipe kubah tetap (fixed dome). Digester ini berbentuk hemisfer atau kubah dengan ruang penyimpanan gas terintegrasi di bagian atas reaktor. Pilihan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis dan sosial:

- Tahan lama dan kokoh: Dibangun dengan beton bertulang, digester tipe ini tahan terhadap korosi dan kerusakan mekanik, menjadikannya ideal untuk penggunaan jangka panjang.
- Biaya pemeliharaan rendah: Karena tidak memiliki bagian bergerak, sistem ini minim perawatan dan cocok untuk pengoperasian oleh masyarakat pedesaan.
- Konstruksi permanen: Sesuai untuk proyek berbasis komunitas yang bersifat berkelanjutan.

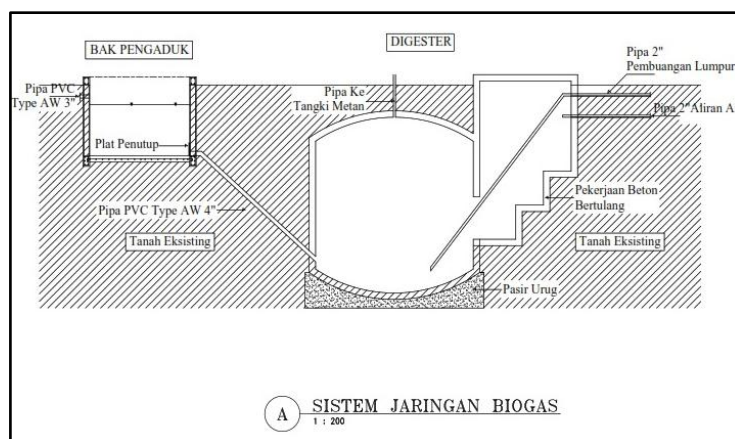
Kapasitas dan Volume

Digester dirancang dengan kapasitas **50 m³**, yang dihitung berdasarkan:

- Volume kotoran sapi harian: Dengan populasi ±100 ekor sapi dan rata-rata produksi 25 kg kotoran/ekor/hari, tersedia ±2.500 kg kotoran segar setiap hari.
- Koefisien pemuatan bahan (loading rate): Digester dirancang dengan mempertimbangkan waktu retensi (*Hydraulic Retention Time / HRT*) selama 25–30 hari, yang artinya seluruh bahan baku akan berada dalam reaktor selama periode tersebut untuk memastikan fermentasi anaerob berlangsung optimal.
- Volume efektif digester dihitung sebagai:

$$\begin{aligned} \text{Volume Digester} &= \text{Debit Harian Bahan Baku} \times \text{Waktu Retensi} \\ &= 2.500 \text{ kg/hari} \times 0,001 \text{ m}^3/\text{kg} \times 25 \text{ hari} = 62,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Namun karena efisiensi proses dan faktor keamanan, kapasitas digester dibulatkan menjadi **50 m³** dengan asumsi pengolahan sebagian kotoran dan manajemen pemuatan bertahap.



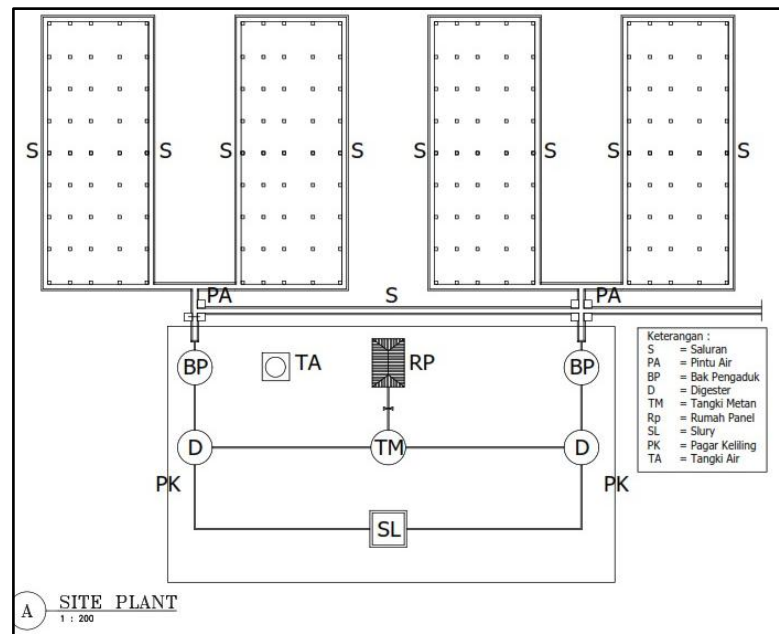
Gambar 2. Sistem Jaringan Biogas

Sistem Pemurnian Biogas

Sebelum biogas digunakan untuk pembangkitan listrik, perlu dilakukan pemurnian untuk menghilangkan kandungan air dan gas pengotor seperti H₂S. Sistem pemurnian sederhana menggunakan *scrubber* berisi larutan besi hidroksida dan *filter* berbahan zeolit atau arang aktif digunakan untuk mengurangi korosivitas gas dan meningkatkan efisiensi pembakaran.

Konversi Energi (Genset Biogas)

Biogas yang telah dimurnikan dialirkan ke mesin pembakaran (*engine*) berbasis *internal combustion* yang telah dimodifikasi untuk bahan bakar biogas. Genset yang digunakan memiliki kapasitas ±20 kW, disesuaikan dengan volume biogas harian dan kebutuhan daya lokal. Sistem kontrol otomatis ditambahkan untuk mempermudah pengoperasian oleh masyarakat.



Gambar 3. Site Plant

Jaringan Distribusi Listrik Lokal

Listrik yang dihasilkan dari genset disalurkan melalui panel distribusi ke sejumlah rumah tangga dan fasilitas umum di sekitar lokasi peternakan. Sistem distribusi menggunakan jaringan tegangan rendah (220V) dengan pengamanan MCB dan grounding sistem untuk keselamatan pengguna.

Residu dan Pengelolaan Limbah

Sisa dari proses fermentasi di dalam digester berupa *slurry* dimanfaatkan sebagai pupuk organik cair dan padat. Sistem pemisah padat-cair digunakan untuk memisahkan fraksi pupuk padat yang dapat dikeringkan dan digunakan langsung oleh petani lokal. Perancangan sistem ini mengedepankan prinsip keberlanjutan, kemudahan pemeliharaan, dan efisiensi energi lokal. Semua komponen didesain untuk dapat dibangun dengan teknologi sederhana dan bahan baku lokal agar mudah direplikasi di desa-desa lain.

Tabel 1 Data Potensi Biogas Terhadap Energi Listrik Berdasarkan Massa Kotoran Sapi

Banyak Sapi	Data Spesifikasi	Banyak Kotoran	
		10 Kg/Hari	20 Kg/Hari
100 Ekor	Produksi Kotoran Sapi (PKS)	1000 kg/Hari	2000 kg/Hari
	Potensi Biogas (Bg)	20 m ³ /Hari	40 m ³ /Hari
	Potensi Gas Metana (KM)	10,44 m ³ /Hari	20,88 m ³ /Hari
	Energi Listrik Yang Dihasilkan (E)	116,61 kWh	233,24 kWh
	Daya Yang Dihasilkan Selama 24 Jam (P)	4,85 kW	9,71 kW
	Volume Kerja Digester (VGS+Vf)	30.000 kg	60.000 kg
	Volume Ukuran Tangki Digester (V)	83,33 m ³	166,66 m ³
	Total Kotoran / Massa Jenis Air (Q)	66,664 m ³	133,32 m ³
	Ruang Penampungan Gas (Vc)	12,5 m ³	25 m ³
	Ruang Penampungan Lumpur (Vs)	37,5 m ³	75 m ³
	Ruang Penyimpanan Gas (VGS)	71,87 m ³	143,75 m ³
	Nilai Volume Ruang Fermentasi (Vf)	60 m ³	118,77 m ³
200 Ekor	Produksi Kotoran Sapi (PKS)	2000 kg/Hari	4000 kg/Hari
	Potensi Biogas (Bg)	40 m ³ /Hari	80 m ³ /Hari

Banyak Sapi	Data Spesifikasi	Banyak Kotoran	
		10 Kg/Hari	20 Kg/Hari
300 Ekor	Potensi Gas Metana (KM)	20,88 m ³ /Hari	41,76 m ³ /Hari
	Energi Listrik Yang Dihasilkan (E)	233,22 kWh/Hari	466,45 kWh/Hari
	Daya Yang Dihasilkan Selama 24 Jam (P)	9,71 kW	19,43 kW
	Volume Kerja Digester (VGS+Vf)	60.000 kg	120.000 kg
	Volume Ukuran Tangki Digester (V)	166,66 m ³	333,33 m ³
	Total Kotoran / Massa Jenis Air (Q)	133,33 m ³	266,66 m ³
	Ruang Penampungan Gas (Vc)	8,33 m ³	16,66 m ³
	Ruang Penampungan Lumpur (Vs)	25 m ³	49,99 m ³
	Ruang Penyimpanan Gas (VGS)	47,91 m ³	95,58 m ³
	Nilai Volume Ruang Fermentasi (Vf)	118,75 m ³	250,33 m ³
	Produksi Kotoran Sapi (PKS)	3.000 kg/Hari	6.000 kg/Hari
	Potensi Biogas (Bg)	60 m ³ /Hari	120 m ³ /Hari
	Potensi Gas Metana (KM)	31,32 m ³ /Hari	62,64 m ³ /Hari
	Energi Listrik Yang Dihasilkan (E)	349,84 kWh/Hari	699,68 kWh/Hari
	Daya Yang Dihasilkan Selama 24 Jam (P)	14,57 kW	29,15 kW
	Volume Kerja Digester (VGS+Vf)	90.000 kg	180.000 kg
	Volume Ukuran Tangki Digester (V)	250 m ³	500 m ³
	Total Kotoran / Massa Jenis Air (Q)	200 m ³	400 m ³
	Ruang Penampungan Gas (Vc)	3,33 m ³	8,33 m ³
	Ruang Penampungan Lumpur (Vs)	9,99 m ³	24,9 m ³
Ruang Penyimpanan Gas (VGS)	23,33 m ³	47,89 m ³	
Nilai Volume Ruang Fermentasi (Vf)	178 m ³	356,25 m ³	

KESIMPULAN

Pembangunan PLTBg berbasis limbah kotoran sapi di Desa Tanjung Baringin Simarulak merupakan solusi energi terbarukan yang layak dan berkelanjutan. Berdasarkan hasil kajian teknis dan finansial, proyek ini menunjukkan kelayakan dengan nilai NPV positif, IRR di atas suku bunga acuan, dan masa pengembalian modal yang relatif singkat. Selain manfaat ekonomi dan teknis, proyek ini juga memberikan kontribusi nyata terhadap pelestarian lingkungan dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, proyek ini sangat direkomendasikan untuk diimplementasikan dengan dukungan dari pemerintah daerah, masyarakat, dan mitra swasta dalam rangka mendukung transisi energi bersih di Sumatera Utara.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sumatera Utara atas dukungan pendanaan penuh yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan tersebut merupakan bentuk nyata komitmen pemerintah daerah dalam mendorong pengembangan energi terbarukan di wilayah Sumatera Utara. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada segenap Pimpinan dan staf CV. BISMA KASADA yang telah memberikan kesempatan, fasilitas, dan dukungan teknis selama pelaksanaan proyek penelitian ini. Kolaborasi yang baik antara pihak akademik, pemerintah, dan dunia usaha menjadi fondasi penting dalam mewujudkan solusi inovatif berbasis energi bersih bagi masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik (BPS). "Sumatera Utara dalam Angka 2020." BPS Sumut, 2021.
- [2] Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sumatera Utara. "Dokumen Teknis Potensi EBT," 2022.
- [3] FAO. "Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options." Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

- [4] R., A. Azis Hutasuhut1, and Y. Chaniago, "Analysis of Hybrid Power Plant Technology Using Data Weather in North Sumatera," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4.7, p. 481, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.7.27364.
- [5] Krich, K. "Biogas Production Basics." *Renewable Energy World*, 2005.
- [6] Sutaryo, R. "Anaerobic Digestion of Animal Waste." *Biogas Technology Review*, 2019.
- [7] Wahyono, D. dan Sudarno. "Bakteri Penghasil Biogas dan Prospek Pengembangannya." *Jurnal Bioteknologi*, 2012.
- [8] Waskito, S. "Panduan Teknologi PLTBg Skala Peternakan." Pusat Studi Energi UGM, 2011.
- [9] A. Sanchez, R. Tual, dan S. Minnett, "Application Note Small and Medium Scale Cogeneration System (CHP)," 2017.
- [10] A. Haryanto, R. Okfrianas, dan W. Rahmawati, "Pengaruh Komposisi Subtrat dari Campuran Kotoran Sapi dan Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*) terhadap Produktivitas Biogas pada Digester Semi Kontinu," *J. Rekayasa Proses*, vol. 13, no. 1, hal. 47–56, 2019, doi: 10.22146/jrekpros.41125.
- [11] Aprizal dan Fachruddin Siregar, "Aplikasi Metoda RCM (Reliability Centered Maintenance) Untuk Optimasi Operasional dan Perawatan Pada Unit Penanganan dan Pemurnian Biogas di PLT Biogas POME (Palm Oil Mill Effluent)," *J. APTEK*, vol. 11, no. 1, hal. 59–68, 2019.
- [12] B. Hermawan, L. Qodriyah, dan C. Puspita, "Pemanfaatan Sampah Organik sebagai Sumber Biogas Untuk Mengatasi Krisis Energi Dalam Negeri," *Bandar Lampung Univ. Lampung*, 2007.
- [13] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, *Outlook energi Indonesia 2014: Pengembangan energi untuk mendukung program substitusi BBM*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2015.
- [14] C. Afrian, A. Haryanto, U. Hasanudin, dan I. Zulkarnain, "Produksi Biogas Dari Campuran Kotoran Sapi Dengan Rumput Gajah (*Pennisetum Purpureum*)," *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 6, no. 1, hal. 21–32, 2017.
- [15] C. . Umeghalu, Chukwuma, Okonkwo, dan Umeh, "Potentials for Biogas Production in Anambra State of Nigeria Using Cow Dung and Poultry Droppings," *Int. J. Vet. Sci.*, vol. 1, no. 1, hal. 26–30, 2012.
- [16] C. Polprasert, *Organic Waste Recycling -Technology and Management*. London: IWA Publishing, 2007.
- [17] Dahuri., (2001). *Pengelolaan Sumber Daya Wilayah Pesisir dan Lautan Secara Terpadu*. Jakarta: PT.Pradnya Paramita.
- [18] P. Harahap, F. I. Pasaribu, C. A. P. Siregar, and B. Oktrialdi, "Performance of Grid-Connected Rooftop Solar PV System for Households during Covid-19 Pandemic," *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 5, no. 1, pp. 26–31, 2021, doi: 10.18196/jet.v5i1.12089.
- [19] Rimbawati, M. A. Siregar, Z. Siagian, J. Riandra, P. Harahap, and B. Oktrialdi, "Lightning Arrester Design as a Security System for Photovoltaic Systems in Pematang Johar Village," *Proceeding - ELTICOM 2022 6th Int. Conf. Electr. Telecommun. Comput. Eng. 2022*, pp. 54–59, 2022, doi: 10.1109/ELTICOM57747.2022.10038261.
- [20] F. I. Pasaribu, N. Evalina, and P. Harahap, "Varistor in the Inverter Circuit Starting Energy Saver to Reduce Water Pump Electric Current," pp. 244–253, 2017.
- [21] D. Waskito, "Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Biogas dengan Pemanfaatan Kotoran Sapi di Kawasan Usaha Perternakan Sapi," Salemba, 2011
- [22] E. H. Wahyono dan N. Sudarmo, *Biogas : Energi Ramah Lingkungan*. Bogor: Yapeka, 2012
- [23] Gunawan M.P. 1997. *Tourism in Indonesia: Past, Present and Future. Planning Sustainable Tourism*. ITB. Bandung
- [24] P. Harahap, I. Nofri, and S. Lubis, "PLTS 200 Wp to Meet Energy Needs at the Taqwa Muhammadiyah Mosque, Sei Litu Village, Sawit Sebrang Langkat District," *J. Innov. Community Engagem.*, vol. 1, no. 1, pp. 60–71, 2021, doi: 10.28932/jice.v1i1.3380.