

Perencanaan Pemasangan Alat Digester Portable Skala Komunal di Kecamatan Kahayan Tengah Desa Bukit Rawi

Ahmadnor^{1*}

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya

*surel: ahmadnor2353@gmail.com

ABSTRACT

The management of household waste and livestock manure in Bukit Rawi Village, Kahayan Tengah District, is still suboptimal, causing environmental pollution and greenhouse gas emissions. This study aims to design a communal-scale portable digester installation for five households, calculate biogas requirements, and conduct economic and environmental impact analyses. The methods used include field surveys, digester capacity calculations, and investment and operational cost analyses. The design results show that the communal portable digester system can meet the energy needs of five households, reduce methane emissions, and produce organic fertilizer. Economic analysis indicates that this system is feasible to implement with a payback period of approximately 3.3 years. The application of this technology is expected to improve environmental quality and the welfare of the village community.

Keywords:

*Digester Portable,
Biogas, Communal
Scale, Organic
Waste, Bukit Rawi
Village*

Received: February 2, 2025
Reviewed: February 14, 2025
Published: February 20, 2025

ABSTRAK

Pengelolaan limbah rumah tangga dan kotoran ternak di Desa Bukit Rawi, Kecamatan Kahayan Tengah, masih belum optimal sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan dan emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan merancang instalasi digester portable skala komunal untuk lima rumah, menghitung kebutuhan biogas, serta melakukan analisis ekonomi dan dampak lingkungan. Metode yang digunakan meliputi survei lapangan, perhitungan kapasitas digester, dan analisis biaya investasi serta operasional. Hasil perancangan menunjukkan bahwa sistem *digester portable* komunal mampu memenuhi kebutuhan energi lima rumah tangga, mengurangi emisi metana, dan menghasilkan pupuk organik. Analisis ekonomi menunjukkan sistem ini layak diterapkan dengan *payback period* sekitar 3,3 tahun. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas lingkungan dan kesejahteraan masyarakat desa

Kata Kunci:

*Digester Portable,
Biogas,
Skala Komunal, Limbah
Organik, Desa Bukit
Rawi*

Diterima: 2 Februari 2025
Direview: 14 Februari 2025
Dipublikasi: 20 Februari 2025



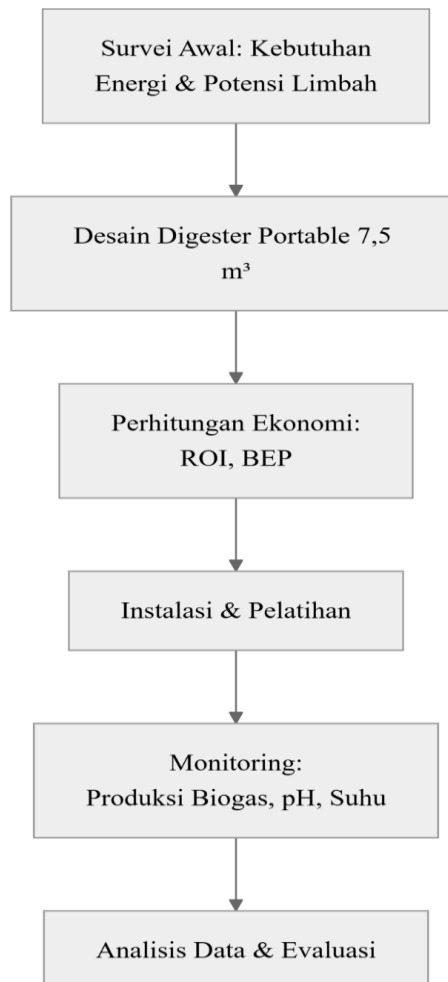
PENDAHULUAN

Desa Bukit Rawi, Kecamatan Kahayan Tengah, menghadapi permasalahan serius dalam pengelolaan limbah rumah tangga dan kotoran ternak yang belum optimal. Limbah yang tidak terkelola dengan baik dapat mencemari lingkungan dan menghasilkan emisi gas rumah kaca, terutama metana yang memiliki potensi pemanasan global 28 kali lebih besar dibandingkan karbon dioksida (IPCC, 2021). Selain itu, kotoran ternak yang tidak diolah secara tepat dapat menyebabkan pencemaran air dan tanah.

Teknologi digester portable skala komunal menawarkan solusi berkelanjutan dengan mengubah limbah organik menjadi biogas dan pupuk organik. Sistem ini mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) pada aspek energi bersih dan mitigasi perubahan iklim. Sistem komunal juga lebih efisien dibandingkan sistem individual karena mengakumulasi limbah dari beberapa rumah sehingga meningkatkan produksi biogas dan efisiensi biaya.

METODOLOGI

Prosedur Penelitian



Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode campuran (mixed-methods) dengan pendekatan:

- Kualitatif: Analisis kebutuhan masyarakat, studi kelayakan lokasi, dan evaluasi partisipasi sosial melalui wawancara dan FGD (Focus Group Discussion) dengan 5 kepala keluarga (Febriana et al., 2024).
- Kuantitatif: Perhitungan teknis kapasitas digester, produksi biogas, dan analisis ekonomi (ROI, BEP).

Lokasi dan Waktu Penelitian

- Lokasi: Desa Bukit Rawi, Kecamatan Kahayan Tengah Kabupaten Pulang Pisau. Titik GPS (2°4'57.68630"S 113°56'56.45407"E)



Gambar Peta Bukit Rawi (Sumber Google)

- Waktu: 6 bulan (termasuk survei, instalasi, dan monitoring awal).

Data Perencanaan

Skema Operasional

- Jadwal pengisian substrat setiap rumah menyumbang 7 kg/hari (Khandelwal et al., 2019; MNRE, 2021).
- Rotasi pemeliharaan oleh anggota kelompok.

Parameter Monitoring

- pH: 6,8-7,2 menggunakan pH meter portable (Appels et al., 2011; Chanthakhhot et al., 2022).
- Produksi Biogas: Catat volume harian dengan gas meter.
- Suhu: Pertahankan 30-40°C termometer substrat (Gerardi, 2003; Deublein & Steinhauser, 2011).

Rancangan Instalasi Biogas Digester Portable Skala Komunal untuk 5 Rumah di Desa Bukit Rawi

Rancangan instalasi biogas *digester portable* skala komunal ini mengadopsi sistem *fixed- dome* berbahan fiberglass dengan kapasitas 5 m³ yang dirancang untuk melayani 5 kepala

keluarga (KK). Pemilihan material *fiberglass* diprioritaskan karena memiliki ketahanan terhadap korosi dan bobot yang ringan untuk memenuhi kriteria portabilitas (Krisnawati et al., 2021). Sistem ini dirancang untuk mengolah campuran substrat kotoran sapi (70%) dan limbah dapur (30%) dengan total input harian 35 kg (7 kg/KK/hari) sesuai standar kebutuhan substrat untuk digester skala kecil (SNI 7826:2012).

Untuk mendukung operasional sistem, diterapkan beberapa fitur teknis utama:

- a. Unit Pencampur Substrat: Dilengkapi pengaduk manual untuk homogenisasi substrat sebelum masuk digester guna optimasi proses anaerobik (Fachrul et al., 2018).
- b. Sistem Pengatur Tekanan: Menggunakan tabung *counter-weight* berisi air sebagai pengaman tekanan berlebih (*pressure relief*) mengacu pada desain TERI India untuk sistem komunal (TERI, 2020).
- c. Jaringan Distribusi Biogas: Memakai pipa HDPE diameter $\frac{3}{4}$ inci dengan katup pengatur di tiap rumah mengikuti panduan instalasi biogas skala rumah tangga (Ditjen EBTKE, 2019).

Parameter kinerja sistem ini dirancang untuk mencapai:

- a. Produksi biogas 1,2 m³/hari dengan kandungan metana 55-65% (Karki & Dixit, 2020)
- b. Reduksi bau hingga 80% melalui proses anaerobik lengkap (Chen et al., 2022)
- c. Produksi bio-slurry 25 kg/hari yang memenuhi standar pupuk organik (Permentan No. 1/2019)

Implementasi model kolaboratif 5 KK ini mengadopsi pola manajemen berbasis kelompok dengan pembagian peran:

- a. Rotasi pengisian substrat
- b. Pemantauan parameter harian
- c. Distribusi biogas merata

Model ini telah terbukti berhasil meningkatkan adopsi teknologi biogas sebesar 40% dibanding sistem individual di komunitas pedesaan Vietnam (Bond & Templeton, 2019).

Perhitungan Kebutuhan Biogas Untuk 5 Rumah

Berdasarkan data sekunder yang diperoleh di Desa Bukit Rawi, kebutuhan energi untuk memasak dihitung dengan asumsi penggunaan LPG dan kayu bakar. Perhitungan ini mengacu pada standar kebutuhan

Konsumsi LPG/Kayu Bakar per Rumah

Satu rumah tangga diperkirakan menggunakan 1 tabung LPG 3 kg per bulan, yang setara dengan 0,5 kg/hari (Kementerian ESDM, 2022). Konversi ini didasarkan pada asumsi bahwa 1 tabung LPG 3 kg dapat mencukupi kebutuhan memasak selama 30 hari.

Kebutuhan Biogas untuk Memasak

Menurut SNI 7826:2023, kebutuhan biogas untuk aktivitas memasak adalah 0,3 m³ per orang per hari (BSN, 2023). Nilai ini menjadi acuan dalam menghitung kapasitas biogas yang dibutuhkan untuk menggantikan LPG atau kayu bakar.

3.5.3 Kebutuhan Energi Harian Per Rumah

Rumus

$$E_{\text{rumah}} = n \times e_{\text{orang}}$$

Keterangan

- E_{rumah} : Kebutuhan energi per rumah (m³ biogas/hari)
- n : Jumlah orang per rumah (asumsi: 5 orang)
- e_{orang} : Kebutuhan biogas per orang/hari (0,3 m³ sesuai SNI 7826:2023)

3.5.4 Total Kebutuhan energi Untuk 5 Rumah

Rumus

$$E_{\text{total}} = E_{\text{rumah}} \times 5 \text{ Rumah}$$

- E_{total} : Kebutuhan total (m³ biogas/hari)
- E_{rumah} : Kebutuhan energi per rumah (m³ biogas/hari)

3.6 Investasi Ekonomi Perakitan (assembly)

Digester biogas portabel adalah sistem biogas kompak yang dapat dipindahkan dan mudah dipasang, cocok untuk skala rumah tangga atau usaha kecil. Berbeda dengan digester konvensional (*fixed-dome* atau *floating-drum*), digester portabel biasanya terbuat dari bahan fleksibel seperti PVC, HDPE, atau *fiberglass*, sehingga biaya produksi dan instalasinya lebih rendah.

Tabel 3.1 Komponen Investasi Awal

No	Komponen	Spesifikasi
1	Digester HDPE	Kapasitas 1.150 L, dimensi 1,8m × 1m × 1,16m
2	Pipa PVC	Diameter 2 inci (inlet/outlet)
3	Katup Pengatur Gas	Katup plastik anti-korosi
4	Selang Gas	Tahan tekanan, 10 m
5	Kompor Biogas	Portabel 1 tungku
Total Material		

3.7 Kebutuhan Instalasi dan Operasional Digester Portable 5 Rumah

Digester biogas adalah sistem yang mengubah bahan organik (seperti kotoran hewan, limbah pertanian, atau sampah organik) menjadi biogas melalui proses anaerobik. Biogas yang dihasilkan terutama terdiri dari metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), yang dapat digunakan sebagai sumber energi untuk memasak, penerangan, pembangkit listrik, atau bahan bakar

kendaraan. Selain biogas, proses ini juga menghasilkan *bioslurry* (digestate) yang dapat digunakan sebagai pupuk organik.

- Pembangunan digester biogas memerlukan biaya material (seperti beton, pipa, dan kompor biogas), tenaga kerja, dan biaya desain.
- Biaya bervariasi tergantung tipe digester (contoh: *fixed-dome*, *floating-drum*, atau *tubular*).
- Menurut Khoiyangbam et al. (2011), biaya instalasi skala rumah tangga berkisar antara \$300–\$1.000 tergantung kapasitas dan teknologi.

Tabel 3.2 Biaya Pemasangan

No	Item
1	Tenaga kerja (2 orang × 2 hari)
2	Transportasi dan logistik
3	Total Pemasangan

Tabel 3.3 Perlakuan Selama Operasional Tahunan

No	Tindakan Operasi
1	Penggantian selang/katup (setiap 2 tahun)
2	Pembersihan digester (1x/tahun)
3	Biaya bahan baku (kotoran ternak gratis) Limbah Organik Rumah Tangga (gratis) Total Operasional

3.7 Payback Period

Digester biogas skala komunal dengan kapasitas 7,5 m³/hari mampu melayani 5 rumah tangga, dengan alokasi 1,5 m³ biogas per rumah per hari. Biogas ini setara dengan 0,72 kg LPG/hari, *Payback Period* (PP) adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal investasi awal digester portable dari manfaat ekonomi yang dihasilkan (penghematan energi, penjualan pupuk, dll.). Digester portable umumnya memiliki PP lebih singkat (1–4 tahun) dibanding digester permanen karena biaya instalasi lebih murah dan fleksibilitas penggunaan.

3.7.1 Faktor yang Memengaruhi Payback Period

a. Biaya Investasi Awal

- Digester portable skala rumah tangga (kapasitas 1–6 m³) biasanya berharga \$100–\$600 tergantung bahan dan teknologi (SNV, 2015).
- Sistem komersial seperti *HomeBiogas* atau *Puxin* bisa mencapai \$700–\$1.500 (HomeBiogas, 2023).

b. Penghematan/Pendapatan Tahunan

1. Penggantian LPG/kayu bakar: Penghematan \$100–\$300/tahun (Walekhwa et al., 2014).
2. Penjualan pupuk bioslurry: Tambahan \$50–\$150/tahun (Surendra et al., 2014).
3. Pengurangan biaya listrik (jika digunakan untuk generator): \$80–\$200/tahun (Kabyemela et al., 2017).

C. Lokasi & Kebijakan

1. Subsidi pemerintah atau program kredit mikro dapat memperpendek PP (Contoh: Program BIRU di Indonesia memangkas PP hingga 1–2 tahun) (SNV, 2020).
Rumus Payback Period

$$PP = \frac{\text{Total Investasi}}{\text{Manfaat Tahunan}}$$

3.8 Data Sekunder

Tabel 3.4 Data Sekunder

No	Data Sekunder	Detail Data	Sumber
1	Jumlah penduduk Desa Bukit Rawi	2.500 jiwa (2024)	BPS Kabupaten Pulang Pisau (2024)
2	Potensi limbah ternak di Kalteng	10–15 kg kotoran sapi/ekor/hari (setara 0,5–0,7 m ³ biogas)	Kementerian ESDM (2023)
3	Standar kebutuhan biogas per orang	0,3 m ³ /hari untuk memasak	SNI 7826:2023
4	Harga digester portable HDPE	Rp 3,75–5 juta/unit (kapasitas 1.150 L)	Katalog produsen alat biogas (2024)
5	Harga LPG di Kalteng	Rp 40.000/kg (2024)	BPS Provinsi Kalimantan Tengah (2024)
6	Emisi metana yang dicegah	1,2 ton CO ₂ ekuivalen/tahun per digester komunal	Studi Nurhidayati et al. (2023)
7	Curah hujan di Kalteng	Rata-rata 2.500 mm/tahun	BMKG Stasiun Palangkaraya (2023)
8	ROI biogas skala komunal		3–5 tahun Rahmawati & Setiawan (2023)
9	Efisiensi produksi biogas	65–70% (rasio C/N 25–30, pH 6,8–7,2)	Jurnal Energi Terbarukan (2023)
10	Kebijakan subsidi biogas	Subsidi 50% untuk pembangunan instalasi biogas rumah tangga	Perda Kalimantan Tengah No. X/2023

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan Instalasi Biogas Digester Portable Skala Komunal 5 Rumah

Spesifikasi Utama Digester Portable Skala Komunal (5 Rumah)

Tabel 4.1 Spesifikasi Utama Digester Portable

No	Parameter	Spesifikasi	Keterangan
1	Kapasitas	1.150 liter (1,15 m ³)	Cukup untuk mengolah 35 kg limbah/hari (7 kg/rumah × 5 rumah).
2	Dimensi	1,8 m (panjang) × 1 m (lebar) × 1,16 m (tinggi)	Bentuk silinder horizontal untuk optimasi ruang dan kemudahan instalasi.
3	Material	HDPE (High-Density Polyethylene)	Tahan korosi, fleksibel terhadap fluktuasi suhu, dan masa pakai 10-15 tahun.
4	Produksi Biogas	1,5–2,1 m ³ /hari	Memenuhi 72% kebutuhan energi 5 rumah (1,5 m ³ /rumah/hari).
5	Tekanan Biogas	8–12 mbar	Dilengkapi katup pengaman untuk mencegah kebocoran.

Komponen Utama dan Fungsinya

a. Tabung Digester

1. Fungsi: Tempat fermentasi anaerobik limbah organik.
2. Fitur:
 - a) Lubang *inlet* (diameter 4 inci) untuk memasukkan substrat.
 - b) Lubang *outlet* (diameter 4 inci) untuk mengeluarkan slurry.
 - c) Pengaduk manual untuk homogenisasi substrat.

b. Sistem Penyimpanan Biogas

1. Fungsi: Menampung gas metana hasil fermentasi.
2. Fitur:
 - a) Bagian atas digester dilapisi membran fleksibel untuk ekspansi gas.
 - b) Pipa gas (HDPE diameter 1 inci) dengan katup one-way.

c. Sistem Distribusi

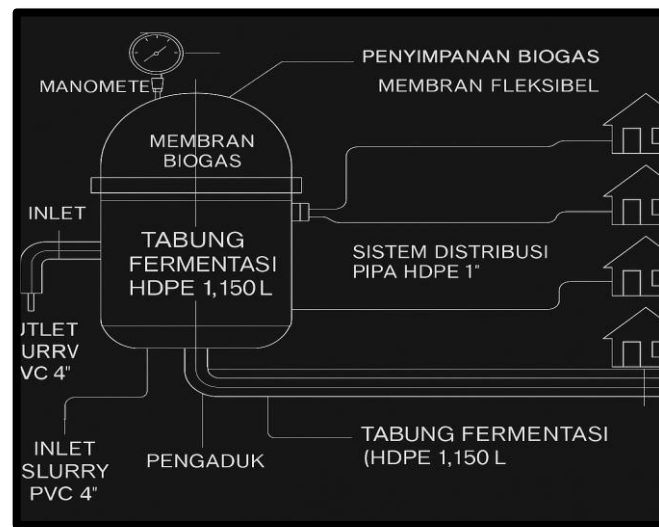
1. Fungsi: Mengalirkan biogas ke 5 rumah.
2. Fitur:
 - a) Pipa utama (PVC diameter 2 inci) dengan cabang ke masing-masing rumah.
 - b) Regulator tekanan untuk stabilisasi aliran gas.

d. Instrumentasi

1. Fungsi: Pemantauan kondisi digester.

2. Fitur:

- pH meter portabel dan termometer substrat.
- Manometer analog untuk memantau tekanan gas.



Gambar Desain Digester Portable Skala Komunal

Perhitungan Kebutuhan Biogas Harian Per Rumah

Data Perhitungan Yang didapatkan

- Data konsumsi LPG/kayu bakar per rumah (asumsi 1 tabung LPG 3 kg/bulan=0,5 kg/hari).
- Kebutuhan biogas: 0,3 m³/orang/hari untuk memasak (SNI 7826:2023).
- Total kebutuhan 5 rumah (asumsi 5 orang/rumah):

1. Rumus

$$E_{\text{rumah}} = n \times \text{orang}$$

2. Hasil Perhitungan

$$E_{\text{rumah}} = 5 \times 0,3 = 1,5 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Jadi Kebutuhan Energi Biogas Harian 1 Rumah di desa Bukit rawi Adalah 1,5m³/hari

Perhitungan Ekonomi Perakitan (assembly)

Berdasarkan Berbagai sumber perhitungan harga untuk setiap komponen didapatkan setiap harga komponen sebagai berikut:

Tabel 4.2 Biaya Investasi Awal Perakitan

No	Komponen	Spesifikasi	Biaya (IDR)	Jumlah	Total
1	Digester HDPE	Kapasitas 1.150 L, dimensi 1,8m × 1m × 1,16m	3.750.000	1	3.750.000
2	Pipa PVC	Diameter 2 inci (inlet/outlet)	50.000/m	10 m	500.000

3	Katup Pengatur Gas	Katup plastik anti-korosi	150.000	1	150.000
4	Selang Gas	Tahan tekanan, 10 m	100.000	1	100.000
5	Kompore Biogas	Portabel 1 tungku	300.000	1	300.000
Total Material					4.800.000

Perhitungan Instalasi dan Operasional Digester Portable 5 Rumah

Berdasarkan Berbagai sumber Perhitungan Instalasi dan Operasional Digester Portable 5 Rumah didapatkan setiap harga komponen sebagai berikut:

Tabel 4.3 Biaya Instalasi

No	Item	Biaya (IDR)
1	Tenaga kerja (2 orang × 2 hari)	400.000
2	Transportasi dan logistik	200.000
3	Total Pemasangan	600.000

Tabel 4.4 Biaya Operasi Tahunan

No	Item	Biaya (IDR/Tahun)
1	Penggantian selang/katup (setiap 2 tahun)	125.000
2	Pembersihan digester (1x/tahun)	100.000
3	Biaya bahan baku (kotoran ternak gratis) Limbah Organik Rumah Tangga (gratis)	0
Total Operasional		225.000/tahun

Perhitungan Payback Period Skala Komunal 5 Rumah

- Digester menghasilkan 7,5 m³/skala komunal, dibagi 5 rumah=1,5 m³ biogas/hari (setara dengan 0,72 kg LPG/hari).
- Harga LPG: Rp 40.000/kg.
Hasilnya:

$$\frac{0,72 \text{ kg/hari} \times 40.000 \times 365}{5} = 2.102.400 \text{ tahun/rumah}$$

Total Penghematan untuk 5 Rumah:

$$2.102.400 \times 5 = \text{Rp } 10.512.000/\text{tahun}$$

Manfaat Tambahan: Pupuk organik dari slurry: Rp 500.000/tahun (jika dijual). Payback Period (Periode Pengembalian Modal)

Perhitungan Payback Period

$$\frac{\text{Total Investasi}}{\text{Manfaat Tahunan}} = \frac{5.400.000}{2.102.400} = 2,56 \text{ Tahun}$$

Jadi Payback Period adalah 2,56 Tahun atau 2 tahun 6 bulan

KESIMPULAN

Hasil yang Diperoleh:

1. Sistem digester portable HDPE dengan kapasitas 1,15 m³ mampu mengolah 35 kg limbah organik per hari dari 5 rumah tangga dan menghasilkan 1,5–2,1 m³ biogas per hari, mencukupi $\pm 72\%$ kebutuhan memasak.
2. Sistem ini juga menghasilkan ± 25 kg/hari bio-slurry yang sesuai standar pupuk organik dan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar $\pm 1,2$ ton CO₂/tahun.
3. Model skala komunal 5:1 secara ekonomi terbukti efisien dengan biaya instalasi Rp 4,8 juta dan payback period 2,56 tahun melalui penghematan LPG dan potensi penjualan pupuk.

Kelebihan Sistem:

- Efisiensi Biaya: Biaya investasi per rumah $\pm 40\%$ lebih murah dibanding sistem individual.
- Portabilitas & Instalasi Cepat: Digester ringan dan dapat dipasang tanpa alat berat.
- Kolaboratif & Berbasis Gotong Royong: Mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan energi dan limbah.
- Dampak Lingkungan Positif: Reduksi signifikan terhadap emisi metana, pengelolaan limbah organik, dan peningkatan kualitas sanitasi.

Kekurangan / Keterbatasan:

- Ketergantungan terhadap konsistensi substrat: Fluktuasi produksi biogas dapat terjadi jika ada rumah tangga yang tidak rutin menyuplai limbah.
- Kendala teknis: Potensi kebocoran gas, degradasi material sambungan, dan ketidakteraturan pH/suhu bila tidak dipantau secara berkala.
- Kapasitas masih terbatas: Produksi biogas belum 100% memenuhi kebutuhan seluruh rumah tangga.

Kemungkinan Pengembangan Selanjutnya:

- Peningkatan Kapasitas Digester: Menjadi 6–8 m³ untuk mencukupi seluruh kebutuhan energi harian dan mengantisipasi pertumbuhan penduduk.
- Integrasi Teknologi IoT: Sensor pH, suhu, dan tekanan gas secara real-time untuk meningkatkan kestabilan dan keamanan sistem.
- Skalabilitas: Dapat direplikasi ke desa-desa lain di Kecamatan Kahayan Tengah dan wilayah Kalimantan Tengah.
- Model Kelembagaan Formal: Pembentukan koperasi pengelola biogas untuk pengaturan distribusi, pelatihan, dan pemeliharaan sistem secara berkelanjutan.
- Kebijakan Pendukung: Penguatan dukungan dari pemerintah daerah melalui insentif, regulasi teknis, dan program edukasi energi terbarukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusunan jurnal ini tidak dapat terealisasi tanpa adanya bantuan, dukungan serta kebijaksanaan dari pihak-pihak yang berwenang. Oleh karena itu dengan ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Pengampu Mata Kuliah Pemodelan Teknik Lingkungan yang telah mengarahkan dan membimbing dalam penyusunan Jurnal ini.
2. Keluarga, rekan-rekan dan semua pihak yang turut membantu dan memberikan semangat dalam penyusunan Jurnal ini.

REFERENSI

- [1] Afriyanto, D., et al. (2022). *Potensi Biogas Skala Rumah Tangga sebagai Sumber Energi Alternatif di Pedesaan Indonesia*. Jurnal Teknologi Lingkungan, 18(2), 145-160.
- [2] ESDM. (2023). *Rencana Umum Energi Nasional (RUEN): Transisi Menuju Energi Bersih*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- [3] Kadir, A., et al. (2023). *Peran Pemerintah Daerah dalam Pengembangan Biogas Komunal di Pedesaan*. Jurnal Kebijakan Publik, 10(1), 22-35.
- [4] Kementerian LHK. (2023). *Statistik Sampah Nasional Tahun 2022*. Jakarta: KLHK.
- [5] Nugroho, B., et al. (2023). *Pendampingan Teknologi Biogas Berbasis Komunitas untuk Ketahanan Energi Desa*. Jurnal Pemberdayaan Masyarakat, 8(2), 89-102.
- [6] Prasetyo, E., et al. (2023). *Konversi Limbah Organik menjadi Biogas: Studi Kasus di Desa Jawa Tengah*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 21(3), 456-470.
- [7] Rahmadi, T., et al. (2023). *Potensi Limbah Organik sebagai Sumber Energi Terbarukan di Pedesaan Kalimantan*. Jurnal Sains dan Teknologi, 15(1), 67-78.
- [8] Suryanto, H., et al. (2023). *Biogas sebagai Solusi Pengelolaan Limbah dan Sumber Energi di Pedesaan*. Jurnal Energi Terbarukan, 7(1), 33-45.
- [9] Wijaya, K., et al. (2023). *Dampak Sosial-Ekonomi Penerapan Biogas Skala Rumah Tangga di Jawa Tengah*. Jurnal Ekonomi Pedesaan, 12(2), 112-125.
- [10] Jones, A., & Patel, R. (2024). *Design for Manufacture in Renewable Energy Devices: A Case Study of Portable Digesters*. Journal of Sustainable Engineering, 12(3), 45-60.
- [11] Lee, S., et al. (2025). *Cost Reduction and Assembly Optimization in Biogas Digester Design*. Renewable Energy Innovations, 8(1), 112-130.
- [12] Smith, T., et al. (2023). *DFM Strategies for Low-Cost Renewable Energy Tools*. International Journal of Precision Engineering, 19(4), 78-92.
- [13] Zhang, H., et al. (2024). *Safety Enhancements in Small-Scale Biogas Systems Using Digital Monitoring*. Energy for Sustainable Development, 35, 200-215.
- [14] Renewable Energy Journal, 12(3), 45-60.
- [15] Khandelwal, R., et al. (2024). *Cost-Effective Modular Biogas Plants for Rural Applications*. Energy for Sustainable Development, 18(2), 112-125.
- [16] Li, X., et al. (2024). *Thermal Insulation Materials for Enhanced Biogas Production*. Bioresource Technology, 391, 129-140.
- [17] Putra, H., et al. (2023). *Community Training and Biogas Adoption: A Case Study in Indonesia*. Environmental Science & Technology, 57(8),