JURNAL KIMIA MULAWARMAN
Vol 23, No. 1, Jul - Des 2025 pp. 11-18
https://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/JKM
P-ISSN 1693-5616 E-ISSN 2476-9258

Produksi Biogas dari Limbah Peternakan Sapi dengan Konsorsium Mikroorganisme Lokal

I Nyoman Tika[a,1], Qonita Awliya Hanif[a,2]*, Luh Putu Desy Puspaningrat[b,]

[a] Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Ganesha, Indonesia.
[b] Jurusan Farmasi, STIKES Buleleng, Indonesia.
* Corresponding Author: qhanif@undiksha.ac.id

ABSTRACT

Cow manure collected from farmers around Batukaru Forest, Bali, Indonesia, has been processed into biogas. The cow manure was processed using an anaerobic digester (AD) system with a consortium of local isolate microorganisms to produce biogas. The consortium consists of waste-decomposing microorganisms from the yeast, methanogen, and Bacillus groups. The study design used a randomized block design with two factors. The first factor was the concentration of the consortium added, namely 10%, 20%, and 30%, while the second factor was the ratio between cow manure and water, namely 1:1 and 1:2, in a 250-liter biodigester. The variables observed included biogas volume, pH, pressure, and biogas application. The results of the 31-day study showed that the highest consortium concentration, namely 20%, produced a biogas volume of 142,288.266 cm^3, with a bioreactor temperature between 30-32°C and pH 7.1. Gas testing was conducted twice, first on day 15 and second on day 31. The time required to use biogas for cooking was 24 minutes, with an effectiveness rate of 84.71% compared to LPG

This is an open-access article under the CC–BY-SA license.

Article History
Received 2025-03-04
Revised 2025-07-01
Accepted 2025-07-05
Publish 2025-11-31

Keywords
Biogas,
Cow Manure,
Pig Manure,
Local Microorganism Consortium

1. Pendahuluan

Biogas adalah gas yang dihasilkan melalui proses anaerobik yang menguraikan bahan organik seperti sisa makanan, kotoran manusia, atau kotoran hewan [1]. Sebagai sumber energi terbarukan, biogas menjadi alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil yang semakin terbatas [2]. Keunggulan biogas dibandingkan bahan bakar fosil adalah sifatnya yang dapat diperbaharui dan ramah lingkungan, karena tidak menimbulkan polusi dan bebas dari limbah berbahaya [3-4]. Selain itu, limbah hasil pengolahan biogas dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik untuk tanaman [5].

Bahan baku utama untuk produksi biogas sangat melimpah, seperti limbah rumah tangga, kotoran hewan, limbah domestik, mikroalga, dan residunya, serta setiap limbah organik yang dapat terurai oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerobik [6-7]. Kandungan utama biogas adalah metana dan karbon dioksida, menjadikannya sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan [8-9]. Salah satu limbah yang sering digunakan untuk produksi biogas adalah kotoran sapi [10]. Potensi sapi potong di Indonesia sangat besar, dengan populasi sapi potong yang terus mengalami kenaikan, meskipun grafiknya cenderung stagnan antara tahun 2015 hingga 2021. Pulau Bali, khususnya, memiliki sekitar 590.000 ekor sapi, dan limbah dari peternakan sapi potong ini memiliki potensi besar untuk menghasilkan biogas [11].

Di kawasan pinggiran hutan lindung Batukau Bali seluas 15.102,90 hektar yang meliputi Kabupaten Buleleng, Badung, dan Tabanan, sekitar 20% penduduk memelihara sapi [12]. Namun, kotoran sapi belum dimanfaatkan secara optimal untuk produksi biogas. Padahal,

biogas berpotensi mengurangi deforestasi akibat penggunaan kayu bakar dan alih fungsi lahan [13]. Limbah pertanian, perkebunan, dan peternakan di sekitar kawasan ini juga belum dimanfaatkan secara maksimal sebagai bahan baku biogas [14]. Produksi biogas bergantung pada aktivitas mikroorganisme dalam proses pencernaan anaerobik. Meski uji coba produksi biogas dari kotoran sapi sudah dilakukan di laboratorium, penelitian tentang pemanfaatan konsorsium mikroorganisme lokal untuk meningkatkan efisiensi produksi masih terbatas. Oleh karena itu, pengembangan biogas berbasis limbah lokal dan mikroorganisme asli menjadi langkah strategis dalam pengelolaan energi berkelanjutan di kawasan ini.

Penelitian ini memiliki tiga tujuan utama: pertama, untuk menemukan solusi dalam penyediaan sumber energi terbarukan bagi masyarakat di sekitar hutan, yang dapat mengurangi ketergantungan pada kayu bakar dari hutan Batukau; kedua, untuk memanfaatkan limbah peternakan dan pertanian guna mengurangi pencemaran udara dan danau di sekitar hutan; dan ketiga, untuk mengolah limbah lumpur menjadi pupuk cair dan padat yang dapat digunakan dalam pertanian, seperti untuk tanaman sayur dan stroberi, guna mengurangi penggunaan pupuk kimia di sekitar danau Buyan dan Tamblingan yang merupakan bagian dari kawasan pinggiran hutan Batukau.

Di laboratorium Biokimia Jurusan Kimia, FMIPA Universitas Pendidikan Ganesha, formulasi konsosium telah kami buat dengan kandungan sebagai berikut : (1) Bakteri metanogen (a) Methanobacterium bryantii 1,09 x 107 cfu/mL, (b) Methanobacterium formicum 1,09 x 107 cfu/mL, (c) Methanobrevibacter arboriphilicus, 1,34 x 107 cfu/mL, (d) Methanobrevibacter gottschalkii : 1,34 x 107 cfu/mL, (d) Methanobrevibacter ruminantium: 1,04 x 107 cfu/mL, (2) jenis Bacillus Lignolitik 1,04 x 107 cfu/mL (3) Bacillus selulolitik : 1,03 x 107 cfu/Ml, (4) Baciilis Sp Ureolitik : 1,08 x 107 cfu/mL s (5) Bakteri nitrifikasi : Nitrosomonas isolate lokal 1.04 x 107 cfu/mL, dan (6) Ragi, yakni Saccharomyces cereviciae : 4,30 x 107 cfu/mL. Komposisi ini belum pernah diteliti pada substrat kotoran babi dan limbah rumah tangga.

Kebaruan dari penelitian ini adalah penggunaan konsorsium mikroorganisme lokal untuk produksi biogas. Mikroorganisme lokal telah teradaptasi dengan baik di lingkungan sekitar hutan Batukaru. Penelitian ini melibatkan isolasi mikroorganisme untuk produksi biogas, dengan menggabungkan mikroorganisme dari kelompok ragi, metanogen, dan bakteri Bacillus dalam bentuk konsorsium. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui efektivitas produksi biogas dari kotoran sapi dengan menggunakan konsorsium mikroorganisme lokal, serta untuk mengidentifikasi karakteristik biogas (seperti pH dan suhu bioreaktor) dan aplikasi praktisnya dalam kehidupan sehari-hari.

2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Ganesha, sementara aplikasi konsorsiumnya diterapkan di Desa Pancasari, pada peternak yang tinggal di sekitar kawasan hutan Batukahu. Sebanyak 15 peternak yang memiliki peternakan sapi ikut serta dalam penelitian ini, dan telah diberikan pemahaman mengenai teknik produksi biogas.

2.1. Penyiapan Konsorsium Mikroorganisme

Mikroorganisme ditumbuhkan di laboratorium kimia dengan menggunakan media yang mengandung 2% molase, 1% pepton, dan 1% NaCl. Kultur mikroorganisme ditumbuhkan dalam Erlenmeyer masing-masing, kemudian setelah aktif, kultur tersebut dimasukkan ke dalam media untuk dicampurkan dalam konsorsium mikroorganisme. Media yang digunakan adalah Bushnell-Haas (BH) dengan komposisi $MgSO_4$ 0,2 g/L, KH_2PO_4 1 g/L, K_2HPO_4 1 g/L, $FeCl_3 \cdot 3H_2O$ 0,05 g/L, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,02 g/L, ekstrak ragi 12 g/L, dan NH_4NO_3 1 g/L. Setelah itu, media ini siap digunakan untuk diterapkan pada biodigester

2.2. Penyiapan Biodigester

Instalasi biodigester untuk produksi biogas menggunakan galon plastik berukuran 250 liter yang telah dimodifikasi menjadi digester dan tabung pengumpul gas, kemudian disambungkan dengan selang antara digester dan tabung pengumpul gas. Untuk menyiapkan bahan baku, feses ternak diambil dari kandang sapi menggunakan sekop dan ember. Feses tersebut diambil dari

salah satu peternakan sapi di Desa Pancasari, yang terletak di kawasan penyangga hutan Batukaru.

Penelitian ini menggunakan kombinasi feses sapi dan air dengan perbandingan 1:1, 1:2, dan 1:3, kemudian ditambahkan kultur aktif konsorsium mikroorganisme lokal dalam jumlah 10%, 20%, dan 30%. Perlakuan tersebut dilakukan dengan pengulangan sebanyak dua kali, menghasilkan 18 set percobaan

2.3. Variabel pengamatan

Variabel yang diamati dalam penelitian ini yakni, tekanan, volume biogas, pH, suhu dan Aplikasi biogas yang dihasilkan dari biodigester. Volume gas yang dihasilkan dari limbah ternak babi, diukur setiap hari, (hari 1 sampai 31 hari) Cara pengukuran dilakukan dengan cara mencatat langsung dari jumlah gas yang tertampung pada tabung penampungan gas dengan menggunakan rumus silinder [15]. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termometer berskala celcius. Pengukuran temperatur dilakukan setiap hari meliputi pengukuran bagian dalam dan diluar digester. Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan pH indikator.

2.4. Aplikasi dan pengukuran biogas

Pada tahap akhir, dilakukan uji coba biogas untuk keperluan memasak, serta pencatatan waktu dan konsumsi biogas. Selama periode retensi 31 hari, pengujian atau penggunaan biogas dilakukan dua kali, yakni pada hari ke-14 dan hari ke-31. Pengujian dilakukan dengan menyambungkan selang ke kran pengeluaran biogas dan menggunakan kompor yang telah dimodifikasi khusus untuk biogas, di mana lubang aliran gas pada kompor diperbesar untuk mengatasi tekanan biogas yang lebih rendah dibandingkan dengan gas elpiji

3. Hasil dan Diskusi

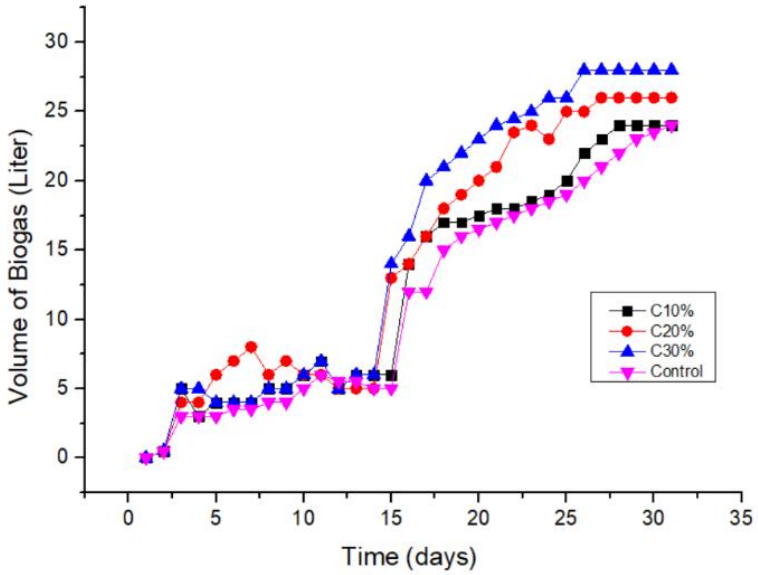
3.1. Volume Biogas dengan konsorsium Mikroorganisme Lokal

Volume biogas yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan substrat dan aktivitas mikroorganisme dalam biodigester. Dalam penelitian ini, keberadaan mikroorganisme terbukti berperan penting dalam menentukan jumlah gas yang terbentuk. Berdasarkan data pengamatan (Gambar 1), pada hari ke-1 hingga hari ke-5, volume gas yang terdeteksi masih relatif kecil. Hal ini disebabkan belum terjadinya akumulasi gas secara signifikan selama masa retensi awal, karena proses yang dominan pada tahap ini adalah hidrolisis dan pengasaman. Umumnya, hidrolisis berlangsung selama 6–8 jam pada suhu tinggi (80ºC–110ºC), namun dalam penelitian ini dilakukan pada suhu yang lebih rendah, yaitu 30ºC–35ºC, seiring dengan aktivitas enzim penghidrolisis yang dihasilkan oleh konsorsium mikroorganisme lokal. Suhu dan aktivitas enzim tersebut menciptakan kondisi optimal bagi pertumbuhan dan aktivitas bakteri metanogenik. Informasi lebih rinci mengenai volume biogas disajikan pada Tabel S1 (*Supplementary Information*).

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kotoran sapi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan biogas. Kotoran sapi diproses dalam pencernaan anaerobik menjadi cairan atau bubur yang dicampur dengan air. Pencernaan anaerobik umumnya terdiri dari wadah untuk bahan baku, tangki pencernaan, unit pemulihan biogas, dan penukar panas untuk menjaga suhu yang diperlukan agar bakteri dapat beraktivitas. Aktivitas mikroorganisme secara anaerobik mengubah substrat menjadi biogas yang mengandung gas CO_2, H_2S, dan CH_4.

Proses pembentukan biogas dipengaruhi oleh ketersediaan bahan organik dalam substrat, rasio C/N, dan aktivitas mikroorganisme. Mikroorganisme membutuhkan karbon dan nitrogen untuk pertumbuhannya, sehingga rasio C/N dalam substrat (dalam hal ini, kotoran sapi) sangat penting. Jika rasio C/N terlalu tinggi, maka populasi dan aktivitas mikroorganisme akan rendah, yang mengakibatkan produksi biogas rendah atau bahkan tidak terbentuk. Sebaliknya, jika rasio C/N terlalu rendah, nitrogen yang ada akan berubah menjadi amonia yang dapat meracuni bakteri. Biogas memiliki berat sekitar 20% lebih ringan dibandingkan udara dan memiliki nilai kalori pembakaran antara 4800 hingga 6200 kcal/m^3. Nilai ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan nilai pembakaran gas metana murni yang mencapai 8900 kcal/m^3.

 ISSN 2476-9258

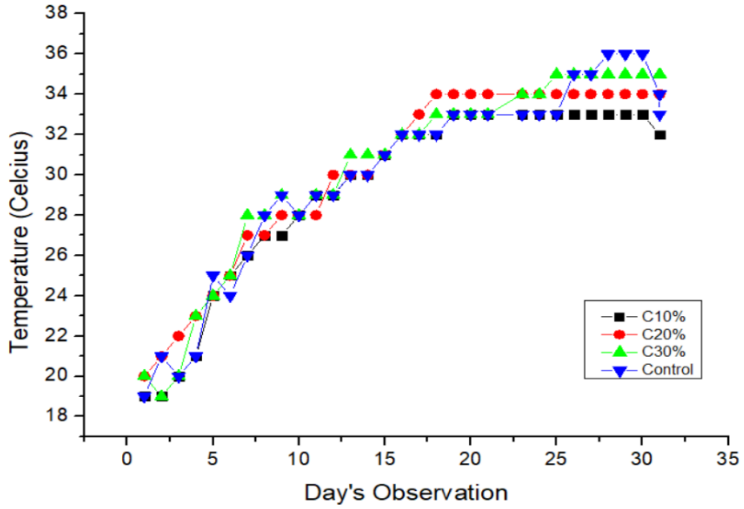


Gambar 1. Hasil pengukuran volume biogas (C-10; konsorsium 10%, C-20: penambahan konsorsium 20%, dan C-30: penambahan konsorsium 30%)

Proses biologis dalam pembentukan metana tergolong kompleks, melibatkan beragam jenis mikroorganisme yang umumnya berinteraksi secara simbiotik karena keterbatasan energi untuk pertumbuhannya. Komposisi komunitas mikroba ini sangat dipengaruhi oleh jenis bahan yang diolah serta kondisi operasional, seperti suhu proses. Ketidakseimbangan dalam komunitas tersebut dapat memicu gangguan bahkan kegagalan proses. Oleh karena itu, untuk memastikan proses tetap stabil, pemantauan rutin terhadap parameter penting seperti tingkat degradasi senyawa antara dan kualitas gas yang dihasilkan sangat diperlukan [16].

3.2. Pengaruh Waktu Fermentasi Anaerob terhadap Suhu

Fermentasi anaerob dilakukan selama 31 hari dengan pengukuran suhu setiap 24 jam sekali. Hasil pengukuran suhu dapat dilihat pada Gambar 2

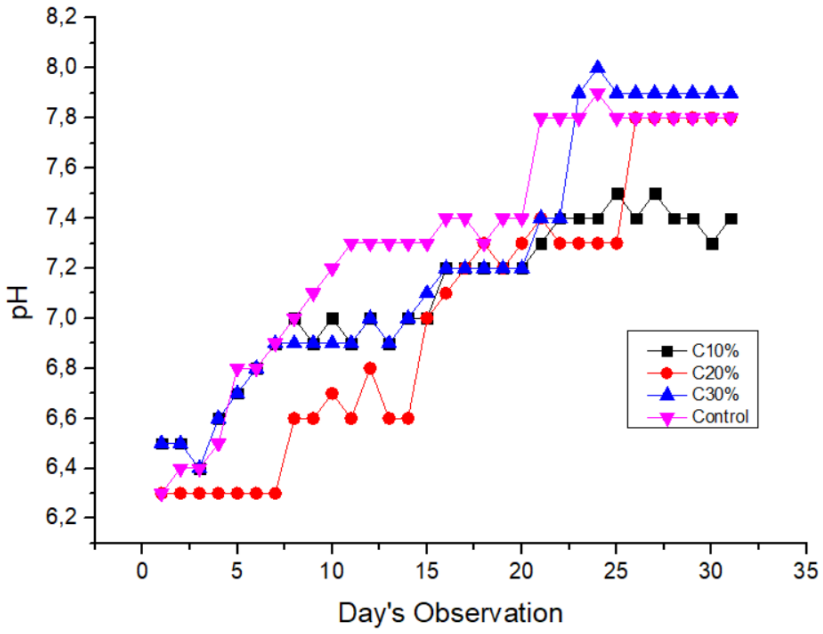


Gambar 2. Hasil Pengukuran Suhu Digester (C-10; konsorsium 10%, C-20: penambahan konsorsium 20%, dan C-30: penambahan konsorsium 30%)

Berdasarkan gambar 2 diketahui bahwa penambahan konsorsium Control (tanpa penambahan mikroba konsorsium) pada media produksi biogas menunjukkan suhu paling tinggi, Suhu bahan baku pada hari pertama fermentasi anaerob sebesar 25°C. Semakin lama waktu fermentasi, maka suhu semakin meningkat. Suhu maksimal pada tabung bioreaktor berakhir di 36°C untuk kelompok biogas yang dibantu dengan konsorsium mikroorganisme Isolat Lokal, sedang kelompok control yakni bioreaktor dengan menggunakan mikroba secara spontan suhu terendah 20°C dan tertinggi 35°C. Peningkatan suhu dikarenakan aktivitas bakteri pengurai (bakteri mesofilik). Bakteri mesofilik hidup dalam rentang suhu 13°C - 40°C. Suhu maksimal bahan baku dalam reaktor bisa mencapai 42 - 55°C, habitat untuk tumbuhnya bakteri termofilik. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada penggunaan konsorsium mikroorganisme isolate lokal mengandung bakteri yang bersifat termofilik tidak ada.

3.3. Pengaruh Waktu Fermentasi Anaerob terhadap pH

Hasil pelatihan diamati pengaruh lama waktu fermentasi anaerob terhadap pH dapat dilihat pada Gambar 3. Detail hasil pengukuran suhu biodigester dapat dilihat pada Tabel S2 (*Supplementary Information*).



Gambar 3. Hasil Pengukuran pH Biodigester

pH bahan baku pada hari pertama fermentasi menunjukkan nilai 6,3 dan 6,5. pH limbah bebas memiliki nilai di bawah 6,3. Peningkatan pH terjadi seiring dengan bertambahnya waktu fermentasi. Hari ke-10 fermentasi bahan baku pH menunjukkan angka 6,8-7,3 Jika pH telah menunjukkan nilai 7,9 maka diasumsikan sudah mengandung bakteri metana yang merupakan bakteri untuk memproduksi gas metana.

Aktivitas mikroorganisme menyebabkan terbentuknya ammonia sehingga pH nya terus meningkat. Biogas dihasilkan oleh mikroorganisme, seperti metanogen dan bakteri pereduksi sulfat, yang melakukan respirasi anaerob. Respirasi anaerobik adalah komponen penting dari siklus nitrogen, besi, belerang, dan karbon global melalui reduksi oxyanion nitrogen, belerang, dan karbon menjadi senyawa yang lebih tereduksi [17].

3.4. Aplikasi Penggunaan Biogas

Aplikasi penggunaan biogas [18] dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel ini memperlihatkan seberapa banyak gas yang terpakai dan berapa lama waktu yang diperlukan untuk memasak, serta dibandingkan dengan penggunaan LPG (Pada pengujian pertama dilakukan tes pada hari ke 14 pada ketinggian tong 46,8 cm dengan volume bak penampung biogas sebesar 142.288,266

cm^3. Pengujian yang kedua dilakukan pada hari ke 31 dengan tinggi tong 44 cm, dilengkapi peralatan kompor yang sudah di rancang untuk biogas, terbentuk nyala api yang dihasilkan berkualitas dan berwarna biru terang.

Aplikasi biogas ini dapat diterapkan di sekitar penduduk di lingkungan hutan Batukahu, dimana masyarakat kerap menggunakan kayu bakar yang berasal dari hutan. Data aplikasi ini menunjukkan bahwa penggunaan biogas sebanyak 85,71% dibandingkan dengan penggunaan LPG. Total lama nyala api yang diperlukan untuk memasak serta banyaknya gas yang terpakai tergantung dari besar kecilnya kran pengeluaran ketika dibuka pada saat penggunaan biogas. Hasil pengukuran volume biogas dapat dilihat pada Tabel S1 (*Supplementary Information*).

Table 1. Aplikasi biogas untuk memasak

Kegiatan	Jumlah Bahan	Biogas		LPG	
		Volume (cm^3)	Waktu (menit)	Volume (cm^3)	Waktu (Menit)
Memasak Air	1 liter	29.368,51	9	25.368,62	8
Goreng telur ayam	1 butir	30.677,76	6	26.456,87	5
Rebus Mie (air 200 mL)	1 bungkus	24.877,78	9	20.899,78	8
Total		84.924,05	24	72.725,27	21

3.5. Residu Biogas

Proses produksi biogas melalui pencernaan anaerobik menghasilkan residu padat berwarna coklat tua. Warna ini menandakan bahan organik telah matang dan siap digunakan sebagai pupuk kompos. Residu basah menunjukkan volume sisa bahan baku yang telah berkurang lebih dari setengahnya, menandakan penguraian bahan berlangsung efektif. Sementara itu, residu kering mencerminkan tingginya kandungan air dalam bahan baku. Produksi biogas optimal terjadi pada bahan dengan kadar padatan 7–9% dan kadar air lebih dari 60%.

Biogas diproduksi oleh aktivitas mikroorganisme anaerob, terutama bakteri metanogenik dan asidogenik, yang secara alami terdapat dalam kotoran hewan, manusia, dan sampah organik. Proses fermentasi ini berlangsung tanpa oksigen dan melalui beberapa tahap, mulai dari hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, hingga metanogenesis. Pada tahap awal, belum terbentuk gas metana; yang dihasilkan adalah H_2S, CO_2, uap air, NH_3, dan gas lain [19]. Metana mulai terbentuk setelah sekitar 12 hari fermentasi, ditandai dengan gas yang mampu menyalakan api.

Penambahan konsorsium mikroorganisme lokal terbukti meningkatkan efisiensi produksi dibandingkan tanpa penambahan mikroba dari luar. Biogas hasil fermentasi ini mengandung 60–70% metana dan 30–40% karbon dioksida, serta jejak gas lainnya seperti NH_3, H_2S, O_2, N_2, dan uap air. Jika gas metana belum murni, gas masih tercium seperti bau belerang dan belum mampu menyalakan api.

Dalam uji aplikasi, untuk menggoreng telur dibutuhkan 30.677,76 cm^3 biogas selama 6 menit. Merebus mie memerlukan 24.877,78 cm^3 dalam 9 menit, dan merebus air butuh 29.368,51 cm^3 dalam waktu yang sama. LPG, dengan komposisi yang lebih homogen dan kalor lebih tinggi, lebih efisien dibandingkan biogas

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemanfaatan konsorsium mikroorganisme lokal dalam sistem digester anaerob efektif untuk mengubah limbah kotoran sapi menjadi biogas. Dengan menggunakan campuran mikroorganisme dari kelompok ragi, metanogen, dan *Bacillus*, produksi biogas optimal tercapai pada konsentrasi konsorsium 20% dan rasio kotoran sapi-air 1:1. Hasil produksi mencapai 142.288,266 cm^3 selama 31 hari fermentasi pada suhu 30–32°C

dan pH 7,1. Efektivitas biogas sebagai bahan bakar mencapai 84,71% dibandingkan LPG, dengan durasi memasak selama 24 menit. Temuan ini menunjukkan potensi besar biogas sebagai energi terbarukan dan solusi pengelolaan limbah peternakan yang ramah lingkungan. Namun, untuk efisiensi jangka panjang, diperlukan pengkajian lebih lanjut mengenai stabilitas konsorsium mikroorganisme, serta pengendalian variabel seperti waktu retensi dan suhu. Penelitian ini memberikan dasar penting bagi pengembangan energi alternatif berbasis kearifan lokal di daerah pedesaan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada BPDLH atas dana Hibah Dana Terra tahun 2023 dengan No. SPK.03/11/DANATERRA/NOV/2022, tertanggal 14 Desember 2022

Deklarasi

Kontribusi penulis	:	INT: Konseptualisasi, Metodologi, Pengambilan Data di Lapangan dan Laboratorium, Analisis Data; QAH: Pengambilan Data di Lapangan, Validasi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; LPDP: Pengawasan, Analisis Data, Penulisan Draft Manuskrip.
Pendanaan	:	Penelitian ini didanai oleh BBPDLH dalam Hibah Dana Terra dengan No. SPK.03/11/DANATERRA/NOV/2022
Konflik kepentingan	:	Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.
Informasi tambahan	:	Lampiran *Supplementary information*

References

[1] O. E. Asri, I. Hafidi, and M. E. Afilal, "Comparison of biogas purification by different substrates and construction of a biogas purification system," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 6, no. 4, pp. 459–464, May 2015, doi: 10.1007/s12649-015-9378-z.

[2] S. A. Alavi-Borazjani, L. a. C. Tarelho, and I. Capela, "A brief overview on the utilization of biomass ash in biogas production and purification," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, no. 12, pp. 6375–6388, May 2021, doi: 10.1007/s12649-021-01461-7.

[3] T. R. Bajracharya, A. Dhungana, N. Thapaliya, and G. Hamal, "Purification and Compression of Biogas: A Research experience," *Journal of the Institute of Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 90–98, Jan. 1970, doi: 10.3126/jie.v7i1.2066.

[4] I. Angelidaki *et al.*, "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

[5] J. Pan, J. Shen, Z. Zhou, Y. Xin, Z. Huang, J. Xiong, Y. Liu, X. Cui, and Y. Liu, "Sustainable management of biogas slurry discharge in biogas engineering: As a chemical fertilizer substitute for garlic cultivation," *BioResources*, vol. 20, No. 1, pp. 790–808, 2025. https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/24068

[6] M. Lebiocka, A. Montusiewicz, and A. Cydzik-Kwiatkowska, "Effect of bioaugmentation on biogas yields and kinetics in anaerobic digestion of sewage sludge," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 8, p. 1717, Aug. 2018, doi: 10.3390/ijerph15081717.

[7] S. Bakkaloglu *et al.*, "Quantification of methane emissions from UK biogas plants," *Waste Management*, vol. 124, pp. 82–93, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.01.011.

[8] R. J. Patinvoh, O. A. Osadolor, K. Chandolias, I. S. Horváth, and M. J. Taherzadeh, "Innovative pretreatment strategies for biogas production," *Bioresource Technology*, vol. 224, pp. 13–24, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.083.

[9] A. I. Adnan, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, K. W. Chew, and P. L. Show, "Technologies for Biogas upgrading to Biomethane: a review," *Bioengineering*, vol. 6, no. 4, p. 92, Oct. 2019, doi: 10.3390/bioengineering6040092.

[10] B. S.U. I. Abubakar & N. Ismail, "Anaerobic digestion of cow dung for biogas production," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 169–72, 2012.

[11] S. Rusdiana, L. Praharani, "Pengembangan Peternakan Rakyat Sapi Potong: Kebijakan Swasembada Daging Sapi dan Kelayakan Usaha Ternak," *Forum Penelit Agro Ekonomi*, vol. 36, No. 2, p. 97, 2019. https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/fae/article/view/1133

[12] I. Suamba, S. Sumiyati, A. Krisnandika, I. Tika, N. Sulastri, and G. Arisena, "The subak-based agro-tourism management model in the world cultural heritage area of Catur Angga Batukaru Tabanan Regency, Bali province, Indonesia," *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*, vol. 23, no. 2, pp. 22534–22547, Feb. 2023, doi: 10.18697/ajfand.117.21970.

[13] E. Mulu, M. M. M'Arimi, and R. C. Ramkat, "A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111081, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111081.

[14] B. Miyawaki *et al.*, "Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 1153–1165, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.045.

[15] D. K. P. Suriman, J. E. M. Soputan, J. A. D. Kalele, and V. R. W. Rawung, "Kombinasi feses sapi dan babi sebagai sumber biogas," *ZOOTEC*, vol. 41, no. 1, p. 181, Feb. 2021, doi: 10.35792/zot.41.1.2021.32560.

[16] D. Irawan and E. Suwanto, "Pengaruh EM4 (Effective Microorganisme) terhadap Produksi Biogas menggunakan Bahan Baku Kotoran Sapi," *Turbo Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, Sep. 2017, doi: 10.24127/trb.v5i1.118.

[17] H. Wang, R. A. Larson, M. Borchardt, and S. Spencer, "Effect of mixing duration on biogas production and methanogen distribution in an anaerobic digester," *Environmental Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 93–99, Jun. 2019, doi: 10.1080/09593330.2019.1621951.

[18] P. G. Kougias, L. Treu, D. P. Benavente, K. Boe, S. Campanaro, and I. Angelidaki, "Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems," *Bioresource Technology*, vol. 225, pp. 429–437, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.124.

[19] G. Rastogi, D. R. Ranade, T. Y. Yeole, M. S. Patole, and Y. S. Shouche, "Investigation of methanogen population structure in biogas reactor by molecular characterization of methyl-coenzyme M reductase A (mcrA) genes," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 13, pp. 5317–5326, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.024.