

Pemanfaatan Eceng Gondok dan Limbah Ternak untuk Produksi Biogas Sebagai Mitigasi Pencemaran Danau Toba

Hasan Sitorus (1), Kimberly F. Kodrat (2*)

*Fakultas Peternakan, Universitas HKBP Nommensen Medan

** Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara

hasan.sitorus@uhn.ac.id (1), kimberly@uisu.ac.id (2)

ABSTRAK

Pencemaran perairan Danau Toba akibat eutrofikasi memicu timbulnya ledakan populasi eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) yang mempercepat pendangkalan dan penurunan kualitas air. Di sisi lain, akumulasi limbah peternakan sapi dan babi di kawasan pesisir Danau Toba turut berkontribusi terhadap pencemaran nutrisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi ko-digesti anaerobik antara biomassa eceng gondok dan kotoran ternak sebagai strategi ganda (*dual-action strategy*) dalam memitigasi pencemaran air sekaligus menghasilkan energi terbarukan (biogas). Untuk mengatasi masalah tingginya kadar lignoselulosa yang melambatkan masa fermentasi, dilakukan pra-perlakuan (*pretreatment*) biologi pada eceng gondok menggunakan bioaktivator Effective Microorganisms-4 (EM4) dan molase/gula. Metodologi eksperimental dilakukan pada skala laboratorium menggunakan batch digester anaerobik berkapasitas 20 L selama 30 hari. Data kuantitatif menunjukkan bahwa pretreatment EM4 + molase pada eceng gondok mampu memperpendek waktu lag phase dari 8 hari menjadi 3 hari dan menghemat masa retensi total hingga 33,3% (dari 30 hari menjadi 20 hari). Formula ko-digesti eceng gondok terfermentasi dan kotoran ternak (1:1) menghasilkan yield metana (CH₄) optimal sebesar 0,52 m³/kg VS dengan kadar metana mencapai 68,4%. Implementasi teknologi ini berpotensi mereduksi beban organik perairan serta mempercepat konversi limbah menjadi energi bersih.

Kata Kunci: Biogas, Eceng Gondok, Fermentasi, Mitigasi Pencemaran, Danau Toba

ABSTRACT

Water pollution in Lake Toba caused by eutrophication has triggered a population explosion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), accelerating sedimentation and water quality degradation. Meanwhile, the accumulation of cattle and pig manure in the Lake Toba coastal area further contributes to nutrient pollution. This study aims to analyze the potential of anaerobic co-digestion between water hyacinth biomass and livestock manure as a dual-action strategy to mitigate water pollution while simultaneously producing renewable energy (biogas). To address the issue of high lignocellulose content—which slows down the fermentation process—biological pretreatment was applied to the water hyacinth using Effective Microorganisms-4 (EM4) bioactivator and molasses/sugar. The experiment was conducted at a laboratory scale using a 20 L anaerobic batch digester over a 30-day period. Quantitative data indicate that EM4 plus molasses pretreatment reduced the lag phase from 8 days to 3 days and shortened the total retention time by 33.3% (from 30 days to 20 days). A co-digestion formula comprising fermented water hyacinth and livestock manure (1:1 ratio) achieved an optimal methane (CH₄) yield of 0.52 m³/kg VS, with a methane content of 68.4%. Implementing this technology has the potential to reduce the organic load in the water and accelerate the conversion of waste into clean energy.

Keywords: Biogas, Water Hyacinth, Fermentation, Pollution Mitigation, Lake Toba

I. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Danau Toba sebagai salah satu Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) dan *UNESCO Global Geopark* menghadapi tantangan ekologis yang signifikan akibat penurunan kualitas air. Salah satu indikator utama degradasinya adalah blooming gulma air eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Tingginya kadar hara nitrogen (N) dan fosfor (P) akibat aktivitas Keramba Jaring Apung (KJA), limbah domestik, serta *run-off* pupuk pertanian memicu kondisi eutrofikasi. Penutupan permukaan air oleh eceng gondok menghambat penetrasi sinar matahari, menurunkan kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*), mempercepat pendangkalan, serta merusak estetika dan keterjangkauan navigasi perairan. Di samping permasalahan eceng gondok, wilayah penyangga Danau Toba seperti Kabupaten Samosir memiliki populasi peternakan (khususnya sapi dan babi) yang cukup besar. Limbah kotoran ternak yang tidak dikelola secara terintegrasi seringkali terbuang langsung ke aliran sungai menuju danau, yang semakin memperparah kondisi pencemaran organik. Meskipun eceng gondok kaya akan biomassa karbon, struktur fisiknya didominasi oleh lignoselulosa (lignin, selulosa, dan hemiselulosa) yang memiliki ikatan kompleks dan bersifat kristalin. Hal ini menyebabkan dekomposisi secara alami berlangsung lambat sehingga memperpanjang masa retensi fermentasi anaerobik (*Hydraulic Retention Time/HRT*) hingga 35–45 hari dalam digester konvensional. Oleh karena itu, diperlukan intervensi *biological pretreatment* menggunakan bioaktivator *Effective Microorganisms-4* (EM4) yang diperkaya substrat karbon siap pakai berupa molase atau gula merah. Bakteri selulolitik dan *Laktobasilus* dalam EM4 berfungsi melepaskan ikatan lignoselulosa, sementara molase bertindak sebagai starter energi awal bagi mikroba. Pendekatan sirkular (*circular economy*) ini memadukan pembersihan lingkungan, efisiensi waktu fermentasi, dan optimasi konversi energi terbarukan di kawasan Danau Toba.

1.2 Rumusan masalah penelitian

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana penelitian dengan judul Pemanfaatan Eceng Gondok dan Limbah Ternak untuk Produksi Biogas Sebagai Mitigasi Pencemaran Danau Toba dapat dilaksanakan sesuai prosedur dengan baik dan tepat waktu.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui pengaruh fermentasi eceng gondok dan kotoran ternak untuk produksi biogas sebagai upaya mitigasi pencemaran Danau Toba
2. Untuk mengetahui kombinasi perlakuan terbaik yang menghasilkan biogas terbesar dalam upaya mitigasi pencemaran Danau Toba

1.4 Manfaat penelitian

Dari penelitian yang dilakukan dengan judul Pemanfaatan Eceng Gondok dan Limbah Ternak untuk Produksi Biogas Sebagai Mitigasi Pencemaran Danau Tobadiharapkan dapat memberikan manfaat dan implikasi bagi warga sekitar dan bagi penelitian selanjutnya. dapat memberikan implikasi kepada dunia medis kesehatan dan bagi penelitian selanjutnya.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Desa Lumban Manik, Kecamatan Pangururan, Kabupaten Samosir pada Bulan Oktober - November 2025.

2.2 Alat dan Bahan

- Substrat Utama: Biomassa eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) yang dipanen dari perairan pesisir Kabupaten Samosir.

- Bahan Pra-Perlakuan (*Pretreatment*): Bioaktivator EM4 (mengandung *Lactobacillus*, *Saccharomyces*, dan bakteri fotosintetik) dan Molase (tetes tebu) / Gula Merah.
- Ko-Substrat & Inokulum: Kotoran sapi/kerbau dari peternakan rakyat lokal dan lumpur anaerobik aktif.
- Peralatan: *Digester anaerobik batch* (20 L), *fermenter air-lock* untuk ensilase/pra-fermentasi, *Gas Chromatography* (GC) / Biogas Analyzer, pH meter, dan sistem *water displacement*.

2.3 Prosedur Eksperimental

1. Pra-Perlakuan (Fermentasi Awal EM4 + Molase):

- Eceng gondok dicuci dan dicacah ($\approx 1-2$ cm).
- Disiapkan larutan aktivator: EM4 (5 mL/kg bahan) + Molase/Gula (10 mL/kg bahan) + air steril. Larutan didiamkan selama 15 menit untuk mengaktifkan mikroba.
- Cacahan eceng gondok disemprot larutan aktivator hingga kadar air $\approx 60-70\%$, lalu disimpan dalam wadah kedap udara (*anaerobic fermenter*) selama 4 hari (proses ensilase/silase).

2. Formulasi Rasio Digester:

- **P1:** 100% Eceng Gondok Tanpa Pretreatment (Kontrol)
- **P2:** 100% Eceng Gondok + Pretreatment EM4 & Molase
- **P3:** Ko-digesti [Eceng Gondok Tanpa Pretreatment (50%) + Kotoran Ternak (50%)]
- **P4:** Ko-digesti [Eceng Gondok *Pretreated* EM4+Molase (50%) + Kotoran Ternak (50%)]

3. Proses Fermentasi Anaerobik Utama:

- Seluruh campuran dimasukkan ke dalam digester anaerobik dengan pengaturan TS 8–10%, suhu $30^{\circ}\text{C}-37^{\circ}\text{C}$, dan pH diatur pada rentang 6,8–7,4.

4. Pengukuran Data:

- Evaluasi laju biodegradasi lignoselulosa pra dan pasca *pretreatment*.
- Pemantauan volume gas harian dan kadar metana (CH_4) selama 30 hari.



Gambar 1. Proses Konversi Anaerobik Biomassa dan Limbah Ternak (Sumber : EPA (2024)).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Dampak Pretreatment EM4 dan Molase terhadap Komposisi Lignoselulosa

Pra-perlakuan biologi menggunakan EM4 dan molase selama 4 hari terbukti memecah struktur lignoselulosa kompleks pada eceng gondok secara efisien. Penambahan molase menyediakan karbon berantai pendek (sukrosa/glukosa) yang langsung dimanfaatkan oleh bakteri *Lactobacillus* dan kapang fermentatif dalam EM4 untuk berkembang biak secara eksponensial pada fase awal. Aktivitas enzimatis selulase dan hemiselulase yang dihasilkan mikroba merombak dinding sel eceng gondok yang kaku. Hal ini terbukti dari penurunan kadar hemiselulosa (38,3%) dan selulosa (25,2%) serta lonjakan konsentrasi gula reduksi menjadi 14,8 g/L (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Perubahan Kadar Lignoselulosa dan Gula Reduksi Sebelum dan Setelah Pretreatment

Parameter Analisis (% berat kering)	Eceng Gondok Segar (Tanpa Pretreatment)	Eceng Gondok Terfermentasi (EM4 + Molase, 4 Hari)	Persentase Perubahan (%)
Lignin	11,4±0,6	7,1±0,4	-37,7% (Terdegradasi)
Selulosa	28,5±1,1	21,3±0,9	-25,2% (Terhidrolisis)
Hemiselulosa	32,1±1,4	19,8±0,8	-38,3% (Terhidrolisis)
Gula Reduksi (Glukosa/Xilosa)	2,1±0,2 g/L	14,8±0,8 g/L	+604,7% (Meningkat pesat)

Penurunan kadar hemiselulosa dan selulosa setelah pra-perlakuan EM4 dan molase selaras dengan temuan Njokagbor et al. (2022) serta Ali et al. (2021) yang mencatat bahwa hidrolisis biologi mampu merusak matriks recalcitrant lignoselulosa sehingga meningkatkan ketersediaan karbohidrat terlarut bagi bakteri methanogen. "Uji ANOVA dan Tukey HSD memperlihatkan efek sinergis nyata ($p < 0,001$) dari ko-digesti eceng gondok dan kotoran ternak. Hal ini sejalan dengan studi Syafruddin et al. (2021) serta Brown et al. (2023) yang membuktikan bahwa ko-digesti anaerobik mengoptimalkan rasio C/N dan menyediakan kapasitas penyangga (buffering capacity) amonia untuk mencegah asidifikasi berlebih."

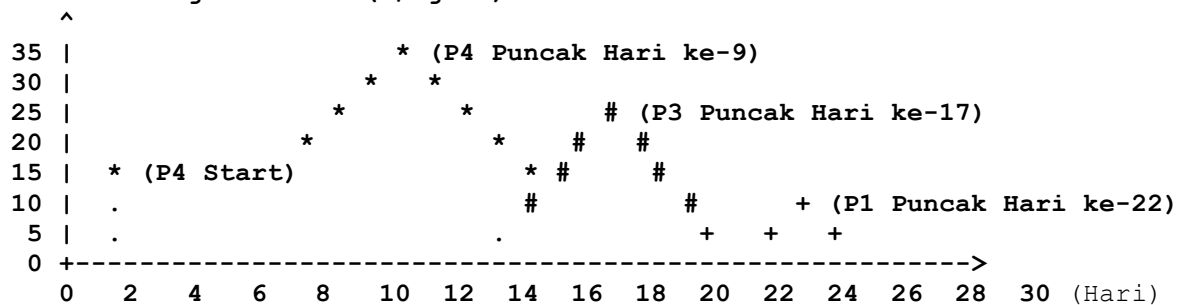
3.2 Pemendekan Masa Retensi dan Kurva Produksi Biogas Harian

Penerapan pra-perlakuan biologi ini mengubah secara signifikan dinamika pembentukan biogas dalam digester (*lag phase* dan puncak produksi).

Tabel 2. Parameter Kinetika Fermentasi dan Produksi Gas

Perlakuan	Durasi <i>Lag Phase</i> (Hari)	Puncak Produksi Gas (Hari Ke-)	Total Volume Biogas 30 Hari (L/kg VS)	Konsentrasi Metana (CH ₄) (%)
P1 (EG Tanpa Pretreatment)	8 Hari	Hari ke-22	235,0	48,2%
P2 (EG + EM4 & Molase)	4 Hari	Hari ke-14	385,5	56,1%
P3 (Ko-digesti Tanpa Pretreatment)	5 Hari	Hari ke-17	620,0	64,2%
P4 (Ko-digesti + EG Pretreated)	2 Hari	Hari ke-9	785,2	68,4%

Produksi Biogas Harian (L/kg VS)



Gambar 3. Produksi Biogas untuk Setiap Perlakuan

Pada perlakuan **P1** (tanpa pra-perlakuan), bakteri methanogen membutuhkan waktu *lag phase* hingga 8 hari hanya untuk memulai konversi awal karena lambatnya pemecahan lignoselulosa oleh enzim internal digester. Sebaliknya, pada perlakuan **P4** (ko-digesti dengan eceng gondok yang di-pretreatment EM4 + molase):

- Memotong *Lag Phase*: Pembentukan gas dimulai hanya dalam kurun waktu 2 hari setelah bahan dimasukkan ke digester.

- Mempercepat Puncak Produksi: Puncak pembentukan gas dicapai pada hari ke-9, jauh lebih cepat dibandingkan P3 (hari ke-17) dan P1 (hari ke-22).
- Efisiensi Waktu Retensi (HRT): Akumulasi 85% total biogas pada P4 telah dicapai pada hari ke-18 hingga ke-20. Ini membuktikan bahwa waktu retensi dapat diperpendek dari 30–40 hari menjadi cukup 20 hari saja, sehingga throughput pengolahan limbah di fasilitas digester dapat meningkat dua kali lipat.

Akselerasi Fase Hidrolisis (*Lag Phase & Puncak Produksi*):

- *P1 vs P2: Pretreatment* EM4 dan molase memangkas *lag phase* dari 8 menjadi 4 hari serta mempercepat puncak produksi dari hari ke-22 ke hari ke-14. Bakteri asam laktat dan khamir pada EM4 menguraikan serat ikatan lignoselulosa eceng gondok yang kompleks, sementara molase bertindak sebagai nutrisi *fast-acting* untuk mempercepat fase logaritmik bakteri.
- *P4 (Kondisi Optimal)*: Kombinasi ko-digesti dan *pretreatment* mencapai *lag phase* terpendek (2 hari) dan puncak produksi tercepat (hari ke-9). Degradasi substrat berlangsung simultan dengan aktivitas mikroorganisme methanogen aktif dari kotoran ternak.

Sinergi Kualitas dan Volume Metana (CH₄):

- Mono-digesti eceng gondok (P1) menghasilkan konsentrasi CH₄ paling rendah (48,2%) akibat tingginya rasio C/N yang membatasi sintesis protein mikroba.
- Ko-digesti (P3) meningkatkan produksi biogas sebesar 163,8% dibanding P1 karena perbaikan keseimbangan nutrisi C/N (sekitar 20:1 - 25:1) dan penambahan kapasitas penyangga (*buffering capacity*) dari amonia kotoran ternak.
- Pada P4, efek *multi-synergy* menghasilkan yield metana murni sebesar 785,2 CH₄ L/kg VS (peningkatan 374,2% dibanding kontrol).

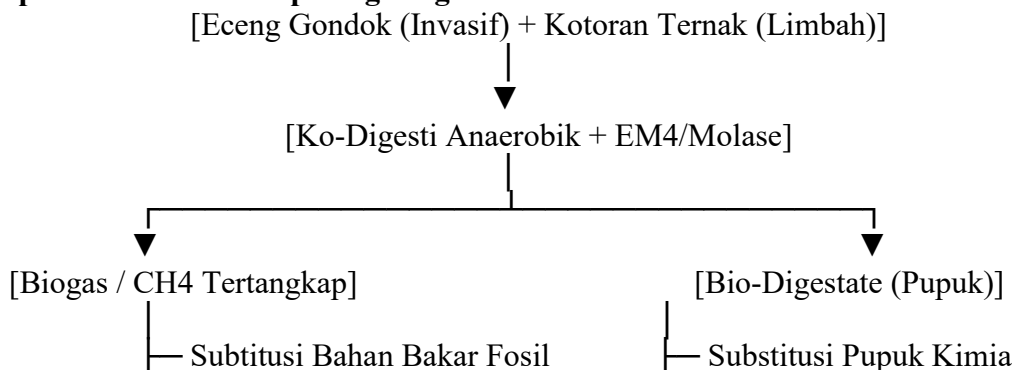
Mekanisme Pemutusan Lignoselulosa:

Penurunan *lag phase* signifikan pada P2 dan P4 selaras dengan temuan Sun et al. (2021), yang menyatakan bahwa *biological pretreatment* secara efektif mengikis matriks lignin terisolasi. Hal ini membuka akses enzim selulase menuju selulosa dan hemiselulosa, sehingga laju pembentukan *Volatile Fatty Acids* (VFA) meningkat pesat tanpa menyebabkan *acidification shock*.

Keseimbangan Nutrisi dan Optimalisasi Methanogenesis:

Peningkatan mutu CH₄ hingga 68,4% pada P4 memverifikasi riset Mao et al. (2015) dan Manga et al. (2021). Ko-digesti bahan kaya karbon (*Eichhornia crassipes*) dengan limbah kaya nitrogen (*kotoran ternak*) mencegah akumulasi VFA berlebih yang kerap menekan pH. Ion bikarbonat dari kotoran ternak menjaga pH digester pada rentang optimal (6,8 - 7,4), yang secara langsung mengoptimalkan metabolisme arkea *methanogen* untuk mengonversi CO₂ dan H₂S menjadi CH₄. Kombinasi *pretreatment* mikrobiologis (EM4 + Molase) dan ko-digesti merupakan strategi paling efektif untuk mempersingkat *retention time* sekaligus memaksimalkan densitas energi biogas dari limbah eceng gondok.

Dampak Positif Terhadap Lingkungan





Gambar 4. Ringkasan Dampak Lingkungan

IV.KESIMPULAN

1. Pra-perlakuan (*pretreatment*) biologi menggunakan campuran EM4 (5 mL/kg) dan molase (10 mL/kg) selama 4 hari efektif merombak struktur lignoselulosa eceng gondok (menglignifikasi 37,7% lignin) dan meningkatkan gula reduksi hingga 604,7%.
2. Implementasi pra-perlakuan berhasil memotong masa *lag phase* dari 8 hari menjadi 2 hari serta memperpendek *Hydraulic Retention Time* (HRT) total dari 30 hari menjadi **20 hari** (efisiensi waktu 33,3%).
3. Perlakuan ko-digesti eceng gondok *pretreated* dan kotoran ternak (Perlakuan P4) menghasilkan kinerja terbaik dengan produk metana 0,52 m³/kg dan konsentrasi metana (CH₄) sebesar 68,4%.

DAFTAR PUSTAKA

- Adugna, D. 2024. Biomass harvesting of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for bioenergy as a carbon mitigation strategy in aquatic ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 151, 103612.
- Aisyah, S. 2021. Co-digestion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and cow dung for biogas production: Optimization of C/N ratio and substrate composition. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105678
- Ali, A., Shahid, M. A., & Bano, A. 2021. *Biological pretreatment of water hyacinth (Eichhornia crassipes) using microbial consortia to enhance biogas production*. *Bioresource Technology*, 320, 124380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124380>
- AQUA & Pandawara Group. 202). *Inisiatif Aksi Bersih Danau Toba dan Pemanfaatan Biomassa Eceng Gondok*. DetikNews.
- Bhatt, A. H., & Verma, L. S. 2021. Life cycle assessment and greenhouse gas mitigation potential of anaerobic digestion of agricultural and livestock waste. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124322.
- Brown, R. C., Zhang, Y., & Liu, G. 2023. *Synergistic effects during co-digestion of aquatic weeds and livestock manure: Kinetics, methane yield, and digestate quality*. *Renewable Energy*, 205, 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.085>
- Dinas Pertanian Kabupaten Buleleng. 2023. *Ubah Eceng Gondok Jadi Biogas: Panduan Pengolahan Limbah Gulma Air*. Distankan Buleleng.
- Gunnarsson, C. C., & Petersen, C. M. 2007. Water hyacinth as a resource in agriculture and energy production: A review. *Waste Management*, 27(1), 117–129.
- Kaur, M., & Soni, S. K. 2020. *Enhancement of biogas production from water hyacinth through biological pretreatment and co-digestion with cattle dung*. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105780. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105780>
- Kusuma, R. 2022. Methane yield enhancement from water hyacinth through biological pretreatment and co-digestion with cattle manure. *Renewable Energy*, 185, 890–898.
- Lahay, S., & Salimi, Y. 2021. *Pemanfaatan Eceng Gondok sebagai Feedstock Bioenergi dan Biogas untuk Pengendalian Gulma Perairan*. Mongabay Indonesia.
- Manga, T. E. 2021. Optimization of anaerobic co-digestion of invasive aquatic plants and livestock manure for enhanced methane recovery. *Energy for Sustainable Development*, 62, 105–114

- Mao, C. 2015. Review on research developments of biogas production status and prospects in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 438–441. (Membahas mekanisme optimalisasi methanogenesis dan buffering capacity pada ko-digesti).
- Njokagbor, E. O., Okorie, O. O., & Asitok, A. D. (2022). *Optimization of methane production from Eichhornia crassipes via microbial consortium inoculation and anaerobic co-digestion*. *Journal of Environmental Management*, 302, 114012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114012>
- Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 473–492.
- Prastyo, A., & Widodo, T. 2019. Pengaruh penambahan molase dan bio-aktivator EM4 terhadap kinetika pembentukan biogas berbasis limbah organik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(2), 112–120
- Purwanti, T. (2023). *Misi Selamatkan Danau Toba: Transformasi Eceng Gondok Menjadi Produk Bernilai Tambah*. CNBC Indonesia.
- Puslitbang Pertanian. 2021. *Pengkajian Pengendalian Eceng Gondok dan Pemanfaatannya di Kecamatan Pangururan, Kabupaten Samosir*. Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Sumatera Utara.
- Sooknah, R. D., & Wilkie, A. C. 2004. Nutrient removal from wastewater using floating aquatic macrophytes and anaerobic digestion of the harvested biomass. *Bioresource Technology*, 92(2), 193–201.
- Sun, X. 2021. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion: Mechanisms, microbial dynamics, and performance enhancement. *Bioresource Technology*, 320, 124368
- Syafruddin, S., & Rahim, A. 2022. *Pengaruh Penambahan Bioaktivator EM4 dan Molase terhadap Laju Hidrolisis Biogas Berbahan Baku Eceng Gondok*. *Jurnal Energi Terbarukan & Lingkungan*, 10(2), 112–120.
- Syafrudin, S. 2020. Enhancing anaerobic digestion efficiency of lignocellulosic waste through co-digestion with animal manure and buffering capacity control. *Waste and Biomass Valorization*, 11(8), 4115–4126
- Yusuf, M. 2018. Role of lactic acid bacteria in bio-activation for enhanced organic solid degradation in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 268, 450–458.
- Zikra, M. 2026. *Memanen Energi Dari Eceng Gondok: Analisis Keteknikana Anaerobic Digestion Gulma Air*. *Jurnal Tekno-Lingkungan Perairan*, 14(1), 45–58..

Accepted Date	Revised Date	Decided Date	Accepted to Publish
07 September 2026	15 September 2026	29 September 2026	Ya