



KINERJA LAGOON DIGESTER DALAM PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI TAPIOKA SEBAGAI BAHAN BAKU BIOGAS DI PT TEDCO AGRI MAKMUR

Debi Tetanika¹, Hardoyo², Arif Setiajaya³

Universitas Malahayati Bandar Lampung

Jl. Pramuka No.27, Kemiling Permai, Kec. Kemiling, Kota Bandar Lampung, Lampung
35152

Korespondensi penulis: Debitetanika@email.com

Abstract. *The tapioca industry generates wastewater with high pollutant loads that may cause environmental problems if not properly managed. This study aims to analyze the utilization of tapioca wastewater as a raw material for biogas production at PT Tedco Agri Makmur, Tanjung Ratu Ilir, Way Pengubuan, Central Lampung. The research method employed a descriptive qualitative approach using a case study design, with data collected through field observations, interviews, and documentation of the wastewater treatment and biogas production processes. The results indicate that anaerobic fermentation using a lagoon digester system is able to produce biogas with a relatively high methane content and reduce the Chemical Oxygen Demand (COD) by up to 81%. The utilization of biogas as a renewable energy source provides both environmental and economic benefits, particularly in reducing wastewater pollution and decreasing dependence on fossil fuels.*

Keywords: *biogas; COD removal; renewable energy; tapioca wastewater; waste utilization*

Abstrak. Industri tapioka menghasilkan limbah cair dengan beban pencemar tinggi yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan limbah cair industri tapioka sebagai bahan baku biogas di PT Tedco Agri Makmur, Tanjung Ratu Ilir, Way Pengubuan, Lampung Tengah. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi kasus melalui observasi lapangan, wawancara, dan dokumentasi proses pengolahan limbah serta data operasional instalasi biogas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengolahan limbah cair melalui sistem fermentasi anaerobik menggunakan lagoon digester mampu menghasilkan biogas dengan kandungan metana yang cukup tinggi serta menurunkan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) hingga mencapai 81%. Pemanfaatan biogas sebagai sumber energi terbarukan memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi, terutama dalam pengurangan pencemaran serta penghematan penggunaan bahan bakar fosil.

Kata Kunci: biogas; COD removal; limbah cair; tapioka; energi terbarukan

LATAR BELAKANG

Industri pengolahan tepung tapioka menghasilkan limbah cair dengan kandungan bahan organik yang sangat tinggi, terutama pati dan senyawa terlarut lain yang berkontribusi terhadap tingginya nilai Chemical Oxygen Demand (COD). Apabila limbah ini dibuang tanpa pengolahan yang memadai, maka dapat menurunkan kualitas badan air dan mengganggu keseimbangan ekosistem perairan di sekitarnya (Sensih & Prayitno, 2023)

Limbah cair tapioka dengan kandungan COD tinggi pada dasarnya memiliki potensi sebagai substrat bioenergi karena bahan organik yang terkandung di dalamnya dapat diuraikan secara biologis. Proses *anaerobic digestion* memanfaatkan aktivitas mikroorganisme anaerob untuk mengonversi bahan organik menjadi biogas yang

didominasi oleh metana, sehingga limbah cair tidak hanya ditangani sebagai pencemar tetapi juga sebagai sumber energi terbarukan (Zhao & Chen, 2025).

1. Pemanfaatan limbah cair industri agro-pangan sebagai bahan baku biogas menjadi semakin relevan dalam konteks transisi energi dan upaya penurunan emisi karbon. Teknologi pengolahan berbasis *anaerobic digestion* dinilai mampu berkontribusi terhadap pencapaian target keberlanjutan industri dengan menurunkan beban pencemaran sekaligus menghasilkan energi alternatif yang dapat dimanfaatkan kembali dalam sistem produksi (Yang et al., 2021).
2. Penelitian terkini menunjukkan bahwa karakteristik limbah cair tapioka sangat sesuai untuk proses anaerobik karena rasio karbon yang tinggi dan sifat mudah terdegradasi. Limbah ini mampu menghasilkan biogas dalam jumlah signifikan apabila diolah dalam kondisi operasi yang stabil, khususnya pada pH dan waktu retensi hidraulik yang sesuai dengan kebutuhan mikroorganisme metanogenik (Srisopa et al., 2025).
3. Selain faktor karakteristik limbah, konfigurasi dan desain reaktor turut menentukan kinerja pengolahan limbah cair tapioka. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa sistem reaktor anaerobik sederhana seperti lagoon digester masih banyak digunakan di negara berkembang karena biaya operasional yang relatif rendah dan kemudahan penerapannya pada skala industri (Xiong et al., 2020).
4. Penggunaan lagoon digester dalam pengolahan limbah cair industri memberikan keunggulan dari sisi kapasitas tampung dan kestabilan proses, terutama untuk limbah dengan fluktuasi beban organik yang tinggi. Namun demikian, sistem ini sering kali kurang dievaluasi secara kuantitatif dari sisi efisiensi penurunan COD dan produksi metana dalam kondisi operasional nyata (Hirotsugu et al., 2021).
5. Sejumlah penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pengembangan teknologi lanjutan di skala laboratorium, seperti *microbial electrolysis cell-assisted anaerobic digestion*, yang terbukti mampu meningkatkan produksi biogas. Akan tetapi, pendekatan tersebut belum banyak diimplementasikan secara luas di industri karena kompleksitas sistem dan kebutuhan biaya yang lebih tinggi (Khomariah et al., 2025).
6. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan antara kondisi ideal pengolahan limbah berbasis teknologi anaerobik (*das sollen*) dan kondisi aktual penerapan di industri (*das sein*). Industri pengolahan tapioka masih membutuhkan bukti empiris terkait kinerja sistem yang telah diaplikasikan secara langsung dan berkelanjutan di lapangan (de Andrade et al., 2021).
7. Meskipun pemanfaatan limbah cair industri tapioka melalui proses *anaerobic digestion* telah banyak dikaji, sebagian besar penelitian masih berfokus pada skala laboratorium atau reaktor pilot dengan kondisi operasi yang terkontrol, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata di industri. Fenomena yang terjadi di lapangan menunjukkan bahwa banyak industri tapioka telah mengoperasikan sistem lagoon digester sebagai pengolahan limbah, namun evaluasi kuantitatif terhadap kinerja sistem tersebut khususnya terkait efisiensi penurunan COD dan produksi metana pada skala operasional masih sangat terbatas dan jarang dilaporkan secara ilmiah. Kondisi ini menciptakan kesenjangan antara konsep ideal pengolahan limbah yang mampu menurunkan beban pencemaran sekaligus menghasilkan energi terbarukan (*das sollen*) dan

praktik aktual di industri yang belum terdokumentasi secara komprehensif (*das sein*), sehingga diperlukan penelitian berbasis data lapangan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dan memberikan bukti empiris mengenai kinerja nyata lagoon digester di industri tapioka (Liu et al., 2022).

8. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja lagoon digester dalam pengolahan limbah cair industri tapioka dengan meninjau efisiensi penurunan COD dan produksi metana sebagai indikator utama, sehingga dapat memberikan kontribusi ilmiah dan rekomendasi aplikatif bagi pengelolaan limbah cair yang ramah lingkungan dan berkelanjutan

KAJIAN TEORITIS

Limbah cair agro-industri memiliki karakteristik beban organik tinggi yang membuatnya menjadi kandidat ideal untuk proses *anaerobic digestion* (AD) jika dikelola secara tepat. Limbah cair yang dihasilkan dari industri pengolahan tepung tapioka umumnya mengandung konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) yang sangat besar, sehingga dapat mencemari badan air dan menurunkan kualitas lingkungan jika dibuang tanpa pengolahan. Studi mengenai pengolahan terpadu limbah cair industri berbasis pati menunjukkan bahwa pendekatan biologis dapat efektif dalam menurunkan beban pencemar sekaligus memanfaatkan bahan organik tersebut sebagai sumber energi (Huyh, 2023).

Proses *anaerobic digestion* merupakan mekanisme biologis di mana komunitas mikroba bekerja dalam kondisi tanpa oksigen untuk memecah senyawa organik kompleks menjadi produk akhir berupa metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Tahapan AD mencakup hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis, masing-masing dikatalisis oleh kelompok mikroorganisme khusus yang berperan dalam degradasi bahan organik (Zueva et al., 2024).

Keberhasilan proses AD sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dalam reaktor, terutama nilai pH. Nilai pH yang cenderung netral memberikan kondisi yang lebih stabil bagi mikroba metanogenik dibandingkan kondisi asam atau basa ekstrem, sehingga secara signifikan meningkatkan hasil produksi biogas (Diniz et al., 2025).

Selain pH, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) merupakan parameter penting yang menentukan keseimbangan nutrisi dalam substrat. Limbah dengan rasio C/N yang terlalu tinggi atau rendah dapat menghambat aktivitas mikroba dan menurunkan efisiensi produksi biogas karena kurangnya keseimbangan nutrisi yang diperlukan untuk metabolisme mikroba (Budiyono et al., 2023).

Strategi *co-digestion* limbah agro-industri dengan bahan lain telah banyak diteliti sebagai pendekatan untuk meningkatkan efisiensi produksi metana. *Co-digestion* dengan biomassa yang memiliki komposisi nutrisi yang lebih seimbang dapat meningkatkan hasil metana karena mikroba mendapatkan substrat yang lebih lengkap untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolik (Ibarra et al., 2026).

Kajian lain menyoroti pentingnya penggunaan media pendukung seperti biofilm atau *fixed-film biofilter* untuk meningkatkan kontak antara mikroba dan bahan organik. Media semacam ini dapat memperluas area permukaan mikroba dan memperkuat struktur komunitas mikroba, sehingga memperbaiki degradasi organik dan produksi biogas (Cayetano et al., 2022).

Dalam konteks desain teknologi, konfigurasi reaktor seperti *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB) telah digunakan secara luas untuk limbah berorganik tinggi karena kemampuannya mempertahankan biomassa mikroba dalam sistem dan memberikan pengolahan yang efisien (Zhang et al., 2024).

Reaktor tipe *expanded granular sludge bed* (EGSB) menunjukkan performa yang baik pada limbah dengan beban organik tinggi karena kemampuan retensi biomassa yang lebih tinggi, sehingga memberikan masa tinggal mikroba yang panjang dan potensi produksi biogas yang meningkat (Lu et al., 2022).

Faktor operasional seperti organic loading rate (OLR) dan hydraulic retention time (HRT) memegang peranan penting dalam kinerja sistem AD. OLR yang terlalu tinggi dapat menyebabkan akumulasi asam organik, sedangkan HRT yang tidak memadai dapat mengurangi waktu yang tersedia bagi mikroba untuk mendegradasi bahan organik secara efektif (Maaz et al., 2021). Pemanfaatan nanomaterial dalam proses anaerobic digestion (AD) menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan kinerja produksi bioenergi berkelanjutan, khususnya melalui peningkatan hasil metana dan stabilitas proses. Berdasarkan tinjauan sistematis dan analisis bibliometrik terhadap artikel ilmiah serta paten, integrasi nanomaterial terutama nanomaterial logam berbasis besi terbukti mampu meningkatkan produksi metana rata-rata hingga 25% dibandingkan proses AD konvensional, terutama pada pengolahan limbah organik seperti kotoran ternak, lumpur tinja, dan limbah lignoselulosa (Parra et al., 2025). Namun demikian, variasi jenis nanomaterial dan karakteristik substrat limbah menyebabkan hasil yang tidak konsisten, yang mengindikasikan masih terbatasnya pemahaman mengenai mekanisme biokimia yang mendasari interaksi antara nanomaterial dan mikroorganisme anaerob.

Meskipun banyak penelitian menggunakan data laboratorium atau reaktor kecil, bukti empiris yang memuat performa nyata sistem AD dalam kondisi operasional industri masih terbatas. Kebutuhan akan studi kontekstual yang menghubungkan karakter limbah cair industri tapioka dengan performa pengolahan biogas di sistem nyata menjadi dasar penting penelitian ini untuk mengisi celah antara teori dan praktik operasional industri yang sesungguhnya (Mohanty & Das, 2021).

Selain itu, kajian literatur menunjukkan bahwa pemilihan teknologi *anaerobic digestion* dengan konfigurasi reaktor yang tepat dan pengaturan kondisi operasi sangat menentukan efektivitas konversi limbah cair tapioka menjadi biogas. Studi literatur khususnya pada limbah cair tepung tapioka mengungkapkan bahwa variasi teknologi seperti *covered lagoon anaerobic reactor*, *continuous stirred tank reactor* (CSTR), dan *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB) memiliki karakteristik dan efektivitas berbeda dalam menurunkan beban organik serta menghasilkan biogas, dengan faktor-faktor seperti konsentrasi awal substrat, pH, suhu operasi, dan rasio C/N yang turut mempengaruhi performa sistem secara keseluruhan (Anggari & Prayitno, 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan jenis penelitian deskriptif-analitis yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem lagoon digester dalam pengolahan limbah cair industri tapioka dan pemanfaatannya sebagai biogas. Metode pendekatan yang digunakan adalah pendekatan lapangan (field study) dengan objek penelitian berupa limbah cair hasil proses produksi tapioka di PT Tedco Agri Makmur,

Tanjung Ratu Ilir, Way Pengubuan, Lampung Tengah. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengambilan sampel limbah cair pada titik inlet dan outlet sistem lagoon digester, pengukuran parameter kualitas air limbah terutama Chemical Oxygen Demand (COD), serta pengumpulan data operasional sistem seperti kapasitas reaktor, debit aliran, dan waktu tinggal hidrolis. Selain data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder yang diperoleh dari dokumen perusahaan dan regulasi baku mutu air limbah industri. Metode analisis data dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan nilai parameter kualitas limbah sebelum dan sesudah pengolahan, serta menghitung persentase penurunan COD sebagai indikator efektivitas sistem pengolahan limbah cair dan keberhasilan proses konversi bahan organik menjadi biogas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Sistem Pengolahan Limbah Cair

Industri pengolahan tepung tapioka menghasilkan limbah cair dengan kandungan bahan organik yang tinggi sebagai hasil samping dari proses pencucian dan pemisahan pati ubi kayu. Di PT Tedco Agri Makmur, limbah cair tersebut dialirkan menuju sistem pengolahan berbasis lagoon digester yang dirancang untuk menurunkan beban pencemar sekaligus memanfaatkan kandungan organik sebagai sumber energi biogas. Sistem ini bekerja secara anaerobik dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana, terutama gas metana, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif di kawasan industri.

Karakteristik Limbah Cair Industri Tapioka

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa limbah cair industri tapioka yang masuk ke sistem pengolahan memiliki karakteristik khas berupa nilai Chemical Oxygen Demand (COD) yang tinggi, pH cenderung asam hingga netral, serta kandungan bahan organik terlarut yang signifikan. Kondisi ini mencerminkan tingginya potensi pencemar apabila limbah dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan. Namun, di sisi lain, karakteristik tersebut juga menunjukkan potensi besar limbah cair sebagai substrat dalam proses fermentasi anaerobik untuk menghasilkan biogas.

Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Cair Industri Tapioka

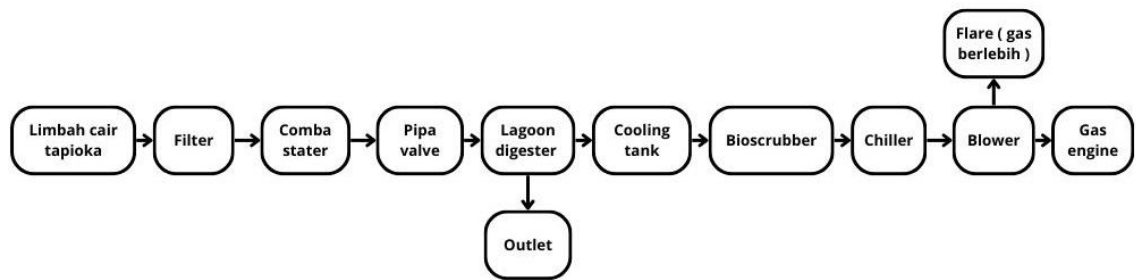
Parameter	Satuan	Nilai Rata-rata
pH	–	5,5 – 6,8
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	8.000 – 12.000
Biological Oxygen Demand (BOD)	mg/L	4.000 – 6.000
Total Suspended Solid (TSS)	mg/L	1.000 – 2.000
Suhu	°C	28 – 32

(berisi parameter COD, pH, dan parameter pendukung lainnya)

Tabel ini menunjukkan bahwa kandungan bahan organik dalam limbah cair berada pada tingkat yang memungkinkan terjadinya proses degradasi biologis secara optimal di dalam sistem lagoon digester.

Proses Pengolahan Limbah Cair Menggunakan Lagoon Digester

Proses pengolahan limbah cair dilakukan melalui beberapa tahapan utama yang saling terintegrasi, dimulai dari pengaliran limbah ke kolam penampung awal hingga masuk ke lagoon digester untuk proses fermentasi anaerobik. Dalam sistem ini, senyawa organik diuraikan oleh mikroorganisme melalui tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis, yang menghasilkan biogas sebagai produk akhir. Alur pengolahan limbah cair hingga pembentukan biogas digambarkan secara ringkas untuk menunjukkan keterkaitan antarunit proses dalam sistem pengolahan yang diterapkan.



Gambar 1. Alur Pengolahan Limbah Cair Tapioka Menjadi Biogas

Setelah melalui proses fermentasi anaerobik di dalam *lagoon digester*, limbah cair yang telah terolah dialirkan menuju outlet sebagai tahap akhir pengolahan di unit biogas. Limbah cair keluaran (*effluent*) ini selanjutnya dialirkan ke instalasi pengolahan air limbah (*IPAL*) untuk proses pengolahan lanjutan sebelum dibuang ke lingkungan, atau dialirkan ke saluran pembuangan sesuai dengan ketentuan teknis dan baku mutu yang berlaku. Pengaliran *effluent* ke *IPAL* bertujuan untuk memastikan bahwa kualitas air limbah yang dilepaskan ke badan air atau saluran umum telah memenuhi standar lingkungan dan tidak menimbulkan dampak pencemaran.

Alur pengolahan limbah cair hingga pembentukan biogas digambarkan secara ringkas untuk menunjukkan keterkaitan antarunit proses dalam sistem pengolahan yang diterapkan, mulai dari kolam penampung awal, *lagoon digester*, hingga outlet dan unit pengolahan lanjutan. Keberlangsungan proses anaerobik dalam sistem ini sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, terutama waktu tinggal hidrolis dan kestabilan pH, yang dijaga agar tetap berada pada kisaran optimal sehingga aktivitas mikroorganisme penghasil metana dapat berlangsung secara efektif dan berkelanjutan.

Kinerja Sistem Lagoon Digester

Kinerja sistem lagoon digester dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam menurunkan beban pencemar limbah cair, khususnya parameter COD. Hasil pengukuran menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara nilai COD limbah sebelum dan sesudah pengolahan. Penurunan COD ini mengindikasikan bahwa sebagian besar bahan organik telah berhasil didegradasi selama proses fermentasi anaerobik berlangsung.

Tabel 2. Nilai COD Limbah Cair pada Inlet dan Outlet Lagoon Digester

Titik Pengambilan Sampel	COD (mg/L)
--------------------------	------------

Inlet Lagoon Digester	10.500
Outlet Lagoon Digester	2.800
Efisiensi Penurunan COD	73,3 %

Berdasarkan data pada tabel tersebut, sistem lagoon digester mampu menurunkan COD limbah cair secara efektif, yang mencerminkan kinerja pengolahan limbah yang baik sekaligus menunjukkan keberhasilan konversi bahan organik menjadi biogas.

Kualitas Biogas yang Dihasilkan

Biogas yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah cair didominasi oleh kandungan metana sebagai komponen utama, disertai dengan gas lain seperti karbon dioksida dan sejumlah kecil gas pengotor. Kandungan metana yang relatif tinggi menunjukkan bahwa proses metanogenesis berlangsung dengan baik di dalam lagoon digester. Biogas ini kemudian dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung kebutuhan operasional industri, sehingga memberikan nilai tambah dari limbah yang sebelumnya berpotensi mencemari lingkungan.

Tabel 3. Komposisi Biogas Hasil Fermentasi Anaerobik

Parameter	Hasil Outlet (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Keterangan
COD	2.800	300	Belum memenuhi
BOD	1.200	150	Belum memenuhi
TSS	180	100	Mendekati batas
pH	6,8	6,0 – 9,0	Memenuhi

Komposisi biogas tersebut menunjukkan bahwa limbah cair industri tapioka tidak hanya dapat diolah untuk menurunkan beban pencemar, tetapi juga memiliki potensi nyata sebagai sumber energi terbarukan.

Efektivitas Pengolahan Limbah dan Implikasinya

Secara keseluruhan, penerapan sistem lagoon digester di PT Tedco Agri Makmur menunjukkan efektivitas yang baik dalam mengurangi beban pencemar limbah cair sekaligus menghasilkan energi alternatif. Penurunan COD yang signifikan serta kualitas biogas yang dihasilkan membuktikan bahwa pengelolaan limbah cair berbasis fermentasi anaerobik dapat menjadi solusi berkelanjutan bagi industri tapioka. Selain mengurangi potensi pencemaran lingkungan, sistem ini juga berkontribusi pada efisiensi energi dan penerapan prinsip ekonomi sirkular di sektor agroindustri.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah cair industri tapioka di PT Tedco Agri Makmur sebagai bahan baku biogas merupakan solusi yang efektif dalam mengurangi beban pencemaran lingkungan sekaligus menghasilkan energi terbarukan. Proses pengolahan limbah melalui sistem fermentasi anaerobik dengan tahapan penyaringan, pengkondisian substrat, dan pengolahan dalam lagoon digester

mampu menghasilkan biogas dengan kandungan metana yang cukup tinggi dan tingkat penurunan COD yang signifikan, sehingga menunjukkan kinerja sistem yang baik. Penerapan teknologi biogas ini tidak hanya mendukung pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi perusahaan melalui penghematan penggunaan bahan bakar fosil serta mendukung pengembangan industri tapioka yang berkelanjutan di wilayah Tanjung Ratu Ilir, Way Pengubuan, Lampung Tengah.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kinerja lagoon digester dalam pengolahan limbah cair industri tapioka di PT Tedco Agri Makmur, terdapat beberapa saran yang dapat diajukan. Pertama, perlu dilakukan optimalisasi pengolahan lanjutan pada effluent hasil lagoon digester, mengingat nilai COD, BOD, dan TSS pada outlet masih belum sepenuhnya memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Integrasi unit pengolahan lanjutan seperti kolam aerobik atau sistem polishing IPAL diharapkan dapat meningkatkan kualitas air limbah sebelum dibuang ke lingkungan.

Kedua, pengendalian parameter operasional seperti pH, waktu tinggal hidrolis (HRT), dan beban organik (OLR) perlu dilakukan secara lebih teratur dan terdokumentasi untuk menjaga kestabilan proses fermentasi anaerobik dan meningkatkan efisiensi produksi biogas. Pemantauan rutin kandungan metana dalam biogas juga disarankan guna memastikan pemanfaatan energi yang optimal dan berkelanjutan.

Ketiga, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi kinerja sistem lagoon digester dalam jangka waktu yang lebih panjang serta menambahkan parameter analisis lain, seperti laju produksi biogas, efisiensi energi, dan potensi pengurangan emisi gas rumah kaca. Selain itu, kajian komparatif dengan teknologi anaerobik lain pada skala industri dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam menentukan sistem pengolahan limbah cair tapioka yang paling efektif dan ekonomis.

DAFTAR REFERENSI

- Anggari, V. S., & Prayitno, P. (2023). Studi Literatur Limbah Tapioka Untuk Produksi Biogas: Metode Pengolahan Dan Peranan Starter Substrat. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 176–187. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.106>
- Budiyono, Matin, H. H. A., Yasmin, I. Y., & Priogo, I. S. (2023). Effect of Pretreatment and C/N Ratio in Anaerobic Digestion on Biogas Production from Coffee Grounds and Rice Husk Mixtures. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(1), 209–215. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.49298>
- Cayetano, R. D. A., Kim, G.-B., Park, J., Yang, Y.-H., Jeon, B.-H., Jang, M., & Kim, S.-H. (2022). Biofilm formation as a method of improved treatment during anaerobic digestion of organic matter for biogas recovery. *Bioresource Technology*, 344, 126309. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126309>
- de Andrade, C. M., Cogo, A. J. D., Perez, V. H., dos Santos, N. F., Okorokova-Façanha, A. L., Justo, O. R., & Façanha, A. R. (2021). Increases of bioethanol productivity

- by *S. cerevisiae* in unconventional bioreactor under ELF-magnetic field: New advances in the biophysical mechanism elucidation on yeasts. *Renewable Energy*, 169, 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.074>
- Diniz, B. C., Wilfert, P., Sorokin, D. Y., & van Loosdrecht, M. C. M. (2025). Anaerobic digestion at high-pH and alkalinity for biomethane production: Insights into methane yield, biomethane purity, and process performance. *Bioresource Technology*, 429, 132505. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132505>
- Hirotsugu, K., Udin, H., Yoichi, A., Anugerah, W., Ryuichi, T., Naohiro, G., Hiroyuki, D., & Koichi, F. (2021). *Methane Emission from Anaerobic Pond of Tapioca Starch Extraction Wastewater in Indonesia*.
- Huynh, N. P. M. (2023). *Integrated treatment of tapioca processing industrial wastewater based on environmental bio-technology* [Wageningen University]. <https://doi.org/10.18174/121836>
- Ibarra, E. F. E., González-López, M. E., Senés-Guerrero, C., Chong, J. P. J., Forrester, S., & Gradilla-Hernández, M. S. (2026). Anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes: A systematic review focused on feedstock physicochemical parameter optimization. *Biomass and Bioenergy*, 206, 108671. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108671>
- Khomariah, N., Syaichurrozi, I., & Kurniawan, T. (2025). Enhanced Biogas Production from Tapioca Wastewater Through the Microbial Electrolysis Cell-Assisted Anaerobic Digestion Process at Various Urea Additions. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 13(2), 146–155. <https://doi.org/10.15294/jbat.v13i2.12860>
- Lu, Q., Jeong, B., Lai, S., Yan, Z., Xiao, X., & Jiang, W. (2022). Performance Comparison of EGSB and IC Reactors for Treating High-Salt Fatty Acid Organic Production Wastewater. *Processes*, 10(7), 1295. <https://doi.org/10.3390/pr10071295>
- Maaz, M., Yasin, M., Aslam, M., Kumar, G., Atabani, A. E., Idrees, M., Anjum, F., Jamil, F., Ahmad, R., Khan, A. L., Lesage, G., Heran, M., & Kim, J. (2021). Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: Novel configurations, fouling control and energy considerations. *Bioresource Technology*, 283, 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.061>
- Mohanty, M. K., & Das, D. M. (2021). *Industrial Applications of Anaerobic Digestion*.
- Parra, O. B. A., Soto-Paz, J., Lara-Franco, S. J., Castañeda-Restrepo, M. F., Oviedo-Ocaña, E. R., Wang, Z., & Sánchez, A. (2025). Nanomaterial-enhanced anaerobic digestion for sustainable bioenergy production: opportunities, challenges and territorial issues. A systematic bibliometric review. *Biomass and Bioenergy*, 203, 108268. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108268>
- Sensih, D. G., & Prayitno, P. (2023). Limbah Tapioka Untuk Produksi Biogas: Alternatif Pengolahan Dan Pengaruh Konsentrasi Substrat. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 457–467. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.158>

- Srisopa, S., Thepubon, T., Choeisai, P., Choeisai, K., & Kubota, K. (2025). Enhanced biogas production through co-digestion of tapioca starch wastewater and duckweed in a continuous stirred tank reactor. *Engineering and Applied Science Research*, 52(5), 499–505. <https://doi.org/10.14456/easr.2025.44>
- Xiong, W., Wang, L., Zhou, N., Fan, A., Wang, S., & Su, H. (2020). High-strength anaerobic digestion wastewater treatment by aerobic granular sludge in a step-by-step strategy. *Journal of Environmental Management*, 262, 110245. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110245>
- Yang, G., Li, Y., Zhen, F., Xu, Y., Liu, J., Li, N., Sun, Y., Luo, L., Wang, M., & Zhang, L. (2021). Biochemical methane potential prediction for mixed feedstocks of straw and manure in anaerobic co-digestion. *Bioresource Technology*, 326, 124745. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124745>
- Zhang, X., Ma, G., Sun, C., Guo, H., Xi, Z., Zhang, T., Hu, Y., Li, Y.-Y., & Kong, Z. (2024). Characterization of start-up, long-term performance and resistance to ammonia inhibition during anaerobic treatment of high-strength pharmaceutical wastewater by up-flow anaerobic blanket reactor integrated with partial nitrification-anammox. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 105944. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105944>
- Zhao, Z., & Chen, Z. (2025). Dual-path exploration of anaerobic biotechnology under carbon neutrality goals: from wastewater methane production to systematic utilization of renewable energy. *Frontiers in Environmental Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1613690>
- Zueva, S., Ferella, F., Corradini, V., & Vegliò, F. (2024). Review of Organic Waste-to-Energy (OWtE) Technologies as a Part of a Sustainable Circular Economy. *Energies*, 17(15), 3797. <https://doi.org/10.3390/en17153797>