

Stabilitas Digester Anaerobik Satu Tahap dalam Produksi Biogas pada Variasi Temperatur Menggunakan Reaktor Batch

Stability of One-Stage Anaerobic Digester in Biogas Production at Temperature Variations Using Batch Reactors

Bambang Trisakti*, Irvan, Desi Berliana Sitompul
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jalan Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Email: b_trisakti@yahoo.com

Abstrak

Digestasi anaerob adalah dekomposisi bahan organik oleh mikroba menjadi metana, karbondioksida, dan hidrogen sulfida tanpa adanya oksigen. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki stabilitas digester anaerobik satu tahap dalam produksi melalui pengamatan pH dan alkalinitas. Proses dilakukan dengan memvariasikan temperatur, yaitu 35 °C, 45 °C, dan 55 °C dengan pH dijaga 7 ($\pm 0,2$). Analisis pH dan alkalinitas dilakukan untuk mengkaji stabilitas reaktor dengan menggunakan sampel yang diambil pada keluaran reaktor. Profil pH yang dihasilkan relatif stabil dengan rentang pH antara 6,8–7,3. Nilai alkalinitas yang dihasilkan relatif stabil dengan rentang alkalinitas antara 3.500–4.500 mg/L. Volume biogas yang dihasilkan pada masing-masing temperatur 35 °C, 45 °C, dan 55 °C adalah 2065 ml, 3830 ml, dan 4570 ml dengan konsentrasi metana (CH₄), Karbon dioksida (CO₂) dan *trace* Hidrogen Sulfida (H₂S) tertinggi, yaitu pada temperatur 55 °C diperoleh nilai komposisi komposisi metana, karbondioksida, dan hidrogen sulfida masing-masing sebesar 89,000 %, 11,000 %, dan 0,011 %.

Kata kunci: biogas, limbah cair pabrik kelapa sawit, LCPKS, digestasi anaerobik, reaktor batch

Abstract

Anaerobic digestion is the decomposition of organic matter by microbes into methane, carbon dioxide, and hydrogen sulfide in the absence of oxygen. This study aimed to obtain the stability of the one stage anaerobic digester in biogas production that was seen through pH and alkalinity parameters. The process was carried out by varying the temperature, which is 35 °C, 45 °C, and 55 °C with pH maintained 7 (± 0.2). Analysis of pH and alkalinity was carried out to assess the stability of reactor using samples taken from the reactor overflow. The pH profile produced was relatively stable with a pH range between 6.8 - 7.3. The resulting alkalinity is relatively stable with alkalinity range between 3.500 – 4.500 mg/L. The volume of biogas produced at 35 °C, 45 °C, and 55 °C respectively are 2065 mL, 3830 mL, and 4570 mL with the highest concentrations of methane (CH₄), Carbon dioxide (CO₂) and trace Hydrogen Sulfide (H₂S) at a temperature of 55 °C obtained the value of the composition of methane, carbon dioxide, and hydrogen sulfide each at 89,000 %, 11,000 %, and 0,011 %.

Keywords: biogas, palm oil mill effluent, POME, anaerobic digestion, batch reactor

Pendahuluan

Perubahan lingkungan global yang disebabkan oleh eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan dan pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan berbagai dampak negatif pada kesehatan manusia dan fungsi ekosistem. Produksi limbah padat meningkat dengan cepat sebagai akibat dari industrialisasi, urbanisasi global, dan pembangunan ekonomi [1]. Ketidakmampuan untuk mengelola limbah secara efektif seperti yang baru-baru ini disorot oleh para ilmuwan menyebabkan masalah lingkungan dan

sosial-ekonomi serius yang membutuhkan solusi mendesak [2,3]. Menanggapi masalah ini, sejumlah inisiatif ilmiah dilakukan dengan tujuan menciptakan penggunaan baru residu organik [4]. Biomassa merupakan sumber energi alternatif yang penting dan memberikan peluang untuk mengurangi masalah lingkungan seperti polusi dan menipisnya sumber daya alam. Salah satu solusi pengelolaan limbah organik sekaligus untuk produksi biogas adalah digestasi anaerobik [5].

Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS) memiliki kandungan organik yang tinggi dan biodegradabilitas yang sangat baik. Oleh karena itu, cocok untuk diolah dengan menggunakan digestasi anaerobik, yaitu teknologi ramah lingkungan yang juga mampu menghasilkan energi dari pengolahan LCPKS yaitu dalam bentuk biogas [6]. Stabilitas dan efisiensi digestasi anaerobik tergantung pada banyak faktor antaralain kondisi operasi dan konfigurasi reaktor [7]. Konfigurasi reaktor memiliki dampak penting pada digestasi LCPKS. Konfigurasi reaktor terbagi menjadi reaktor fase tunggal, dua-fase, atau beberapa fase. Dari semua ini, proses digestasi anaerobik satu tahap telah terbukti memiliki banyak keuntungan termasuk desain sederhana, kegagalan teknis yang lebih sedikit, dan biaya rendah [8]. Penting untuk dicatat bahwa sebagian besar sistem digestasi anaerobik beroperasi dalam sistem fase tunggal. 95% pabrik di Eropa biasanya menggunakan proses digestasi anaerobik fase tunggal untuk menghasilkan biogas dari limbah organik [9] dimana hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis terjadi secara bersamaan dalam satu reaktor [10]. Ganesh *et al.* [11] membandingkan kinerja proses dan reaktor stabilitas satu tahap dan dua-tahap. Mereka menemukan bahwa proses satu tahap menghasilkan gas metana, penghancuran *volatile solid* (VS), dan hasil energi yang lebih tinggi, dibandingkan dengan proses dua tahap. Sebagian besar penelitian telah menggunakan *set-up* digestasi anaerobik skala laboratorium untuk produksi biogas [6].

Penelitian ini melaporkan stabilitas dan efisiensi digestasi anaerobik satu tahap pada variasi temperatur 35 °C, 45 °C, dan 55 °C.

Teori

LCPKS adalah sumber yang baik untuk menghasilkan metana melalui pencernaan anaerobik karena kandungan organiknya yang sangat tinggi dan mudah terdegradasi [7]. LCPKS merupakan limbah cair dari pengolahan kelapa sawit yang memiliki karakteristik BOD 2.800 mg/L, COD 64.000 mg/L, TSS 24.000 mg/L, minyak dan lemak 6.950 mg/L, dan total kandungan N 750 mg/L [12]. Komponen utama yang terkandung dalam setiap 100 gram total padatan dalam LCPKS adalah karbohidrat (MW = 162,14) 16,95 g, protein (MW = 352,38) 7,48 g, dan lipid (MW = 787,24) 10,90 g [13].

Secara keseluruhan, factor-faktor yang mempengaruhi kinerja Stabilitas dan efisiensi digestasi anaerobik [14], yaitu:

1. Temperatur

Temperatur adalah salah satu parameter penting yang sering terabaikan dari pandangan peneliti. Kegagalan untuk mengontrol temperatur reaksi dengan benar dapat menyebabkan penurunan efisiensi proses dan secara tidak langsung mempengaruhi laju reaksi, kelarutan logam berat dan

karbon dioksida serta *buffering*. Secara teoritis, laju reaksi akan meningkat dengan meningkatnya temperatur sekitar. Dengan demikian, produksi biogas juga akan meningkat [15].

Ada tiga kisaran temperatur dalam digestasi anaerob yaitu: Psikofilik: < 25°C, Mesofilik: 25-40°C, dan Termofilik: >45°C. Kebanyakan digester konvensional menggunakan temperatur mesofilik sekitar 35°C [16]. Dalam kisaran mesofilik, aktivitas dan tingkat pertumbuhan bakteri berkurang 50% untuk setiap penurunan 10°C. Turunnya produksi biogas dimulai, ketika temperatur menurun hingga 20°C dan produksi bahkan berhenti pada 10°C [17]. Namun, temperatur termofilik yaitu berkisar antara 55°C hingga 60°C patut dipertimbangkan karena akan menghasilkan lebih banyak biogas dalam waktu yang lebih singkat. Dalam hal laju reaksi, temperatur termofilik menawarkan laju reaksi yang lebih cepat dalam waktu yang lebih singkat dan karenanya, hasil gas yang lebih tinggi [15].

2. Lama Proses

Waktu retensi hidraulik adalah waktu rata-rata agar senyawa yang dapat difermentasi tetap berada dalam digester dalam kontak dengan biomassa dan terurai menjadi produk metabolisme. Secara teoritis, waktu retensi yang lama akan menyebabkan efisiensi proses yang rendah. Dalam kondisi anaerob, dekomposisi zat organik lambat dan ini akan membutuhkan waktu lama untuk selesai. Jenis mikroba dan kisaran temperaturnya adalah salah satu alasan yang akan mempengaruhi waktu retensi. Sistem temperatur termofilik dalam digestasi anaerob akan memiliki waktu retensi yang lebih pendek dibandingkan dengan sistem temperatur mesofilik. Pada temperatur tinggi, laju kinetika partikel meningkat begitu juga laju reaksi. Dengan demikian, proses konversi berlangsung lebih cepat dan mengurangi waktu retensi. Pada saat yang sama, waktu retensi yang lebih pendek menyebabkan koloni mikroba aktif untuk dicuci sementara waktu retensi yang lebih lama berarti volume digester yang lebih besar dan meningkatkan biaya operasional [15].

3. Derajat Keasaman (pH)

pH merupakan parameter penting dalam produksi biogas. Untuk fase hidrolitik yang optimal dan fase produksi metana, pH ditetapkan masing-masing 5 dan 6,5-8, untuk asidogenesis adalah 4,0-8,5 dengan nilai optimal sekitar 6, dan untuk asetogenesis adalah sekitar 7. Kisaran pH optimal untuk metanogen adalah 5,5-8,5. Pertumbuhan metanogenik anjlok pada pH di bawah 6,6. pH harus dijaga sekitar netral karena metanogenesis adalah proses yang paling signifikan, dan proses lain dapat berfungsi di sekitar kondisi netral. pH dalam kisaran 6,6-8,0 adalah optimal [18].

Nilai pH mengalami perubahan dengan perubahan temperatur di media reaksi. Seiring naiknya temperatur, kelarutan CO₂ akan berkurang.

Ini dapat dinyatakan sebagai alasan untuk pH yang lebih tinggi pada digester termofilik, membandingkan digester mesofilik. Dalam digester mesofilik, asam karbonat terbentuk dengan peningkatan kelarutan CO_2 , menyebabkan peningkatan keasaman. Sementara digestasi berlangsung, amonia yang dihasilkan dari pengisian fluks atau protein cenderung meningkatkan nilai pH. Namun, dengan pembentukan *volatile fatty acid* (VFA) dalam media reaksi, pH diturunkan. Media reaksi harus memiliki sistem penyangga yang memadai untuk menetralkan formasi VFA. Secara umum, pengelolaan pH dicapai dengan sistem *buffer* bikarbonat. Variasi pH ditangani oleh sistem penyangga, sesuai dengan akumulasi basa/asam. Penggunaan kapasitas penyangga yang terlalu banyak akan menyebabkan variasi pH yang tinggi, mengakibatkan penghentian sebagian atau seluruh proses [19].

4. Penghambat Nitrogen dan Rasio Karbon Nitrogen

Selama digestasi anaerob, rasio C:N dalam bahan organik memainkan peran penting. Untuk mencapai stabilitas proses yang lebih baik selama proses digestasi, nilai rasio C:N melalui proses harus ditingkatkan [20]. Untuk permulaan proses anaerob yang benar, beberapa penulis telah menetapkan nilai optimal sekitar 300:5:1 untuk C:N:P. Mengenai rasio C:N:P, keseimbangan optimal adalah antara 400:5:1 dan 100:28:6. Karena proporsi tidak ditemukan untuk pengolahan semua jenis limbah, salah satu alternatifnya adalah mencampurkan limbah yang berbeda untuk memastikan bahwa substrat yang diumpukan ke digester telah memiliki rasio yang memadai. Meskipun pengaruh nutrisi pada populasi mikroba mungkin berbeda tergantung pada ketersediaannya sebagai fraksi yang larut (bioavailabilitas) atau padat, penting untuk mengkarakterisasi dengan benar perbedaan substrat pada saat itu mulai dari proses untuk memilih proporsi nutrisi yang paling cocok [21].

5. Pengadukan

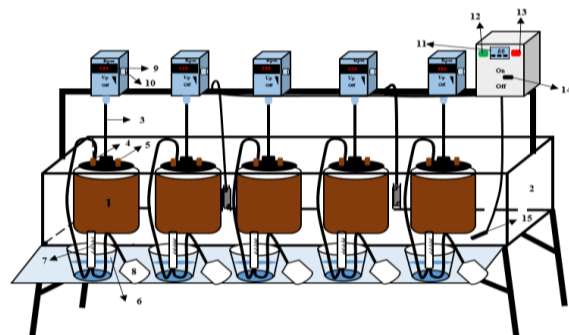
Untuk mendistribusikan muatan organik yang memasuki sistem secara seragam dengan bakteri, perlu dilakukan proses pengadukan untuk memastikan distribusi padatan dan untuk memfasilitasi pembuangan gas yang dihasilkan. Pengadukan memungkinkan gas untuk melewati busa atau di atas permukaan cairan, mencegah bahan-bahan dalam cairan agar tidak jatuh ke bawah dan memungkinkan kontak antara bakteri dan bahan organik berlangsung homogen. Akibatnya, produksi gas meningkat 10-15%. Keuntungan lainnya adalah menyamakan perubahan temperatur limbah dalam fermentor, mengatur kepadatan populasi bakteri dalam bubur dan mempercepat reaksi dengan menyediakan campuran populasi bakteri dan limbah segar [22].

Metodologi Penelitian

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Rambutan, PT. Perkebunan Nusantara III, Kabupaten Serdang Bedagai dan *starter* hasil pengolahan LCPKS dari *Pilot Plant* Pembangkit Listrik Tenaga Biogas, Pusdiklat LPPM USU, Medan.

Prosedur Penelitian

Starter dan LCPKS yang telah dikarakterisasi dan mencapai suhu kamar dimasukkan ke dalam digester dengan komposisi 20% *starter* dan 80% LCPKS. Fermentor dioperasikan pada pengadukan 200 rpm, dengan temperatur yang divariasikan 35, 45, dan 55°C. Proses dimulai setelah pH dan *M-Alkalinity* stabil pada $\text{pH } 7,0 \pm 0,3$ dan *M-Alkalinity* 2.500-5.000 mg/L. Kedua parameter ini dijaga stabil agar kondisi kehidupan mikroba di dalam reaktor dapat berkembang dengan baik. Untuk mencegah terjadinya penurunan pH dan alkalinitas ditambahkan Natrium Bikarbonat (NaHCO_3) kedalam reaktor dari awal proses sampai akhir operasi. Dilakukan analisis pH dan *M-Alkalinity* selama proses berlangsung. Analisis pH dan alkalinitas dilakukan setiap hari menggunakan sampel dari aliran keluaran reaktor. Adapun Biogas yang terbentuk diukur dengan gas meter yang dihubungkan dengan reaktor lalu analisa yang dilakukan adalah komposisi gas CH_4 , CO_2 dan H_2S menggunakan pendeteksi gas.



Gambar 1. Rangkaian Peralatan

Keterangan Gambar :

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| 1. Jar fermentor | 9. Penampung gas |
| 2. Water bath | 10. Kecepatan pengaduk |
| 3. Stirrer | 11. Controller |
| 4. Sampling injector | 12. Temperature controller |
| 5. Termometer | 13. Lampu indikator on |
| 6. Water trap | 14. Lampu indikator off |
| 7. Gelas Ukur | 15. On/off |
| 8. Thermocouple | |

Tabel 1. Karakteristik LCPKS PKS PT. Perkebunan Nusantara III

Parameter	Hasil Uji (mg/L)	Metode Uji
pH	3,70-4,70	APHA 4500-H
COD	68.131	APHA 5220B
TS	36.000	APHA 2540B
VS	32.000	APHA 2540E
TSS	12.000	APHA 2540D
VSS	10.000	APHA 2540E
SCOD	23.076	APHA 5220B

Tabel 2. Hasil Analisa Karakteristik starter

Parameter	Hasil Uji (mg/L)	Metode Uji
pH	8,4	APHA 4500-H
COD	37.500	APHA 5220B
TS	18.000	APHA 2540B
VS	14.000	APHA 2540E
TSS	16.000	APHA 2540D
VSS	14.000	APHA 2540E
SCOD	28.571	APHA 5220B

Hasil

Karakterisasi Bahan Baku

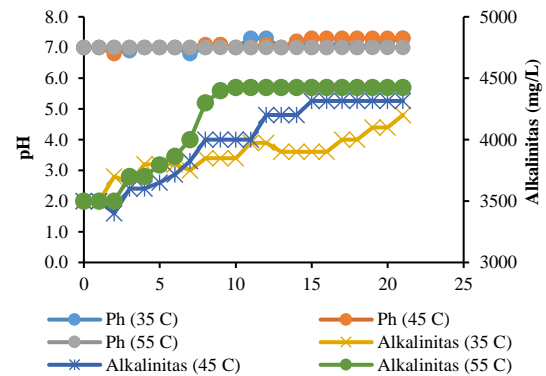
Pada penelitian ini digunakan bahan baku berupa LCPKS dan starter. *Starter* digunakan sebagai sumber mikroba yang akan mendegradasi substrat menjadi biogas. Sebelum digunakan sebagai umpan ke dalam reaktor, LCPKS dan *starter* terlebih dahulu dianalisis. Karakteristik LCPKS dan *starter* yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Karakteristik POME tergantung pada kualitas bahan baku dan proses produksi [23]. Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa LCPKS dan *starter* memiliki potensi yang sangat tinggi untuk dijadikan biogas. LCPKS mengandung zat organik yang sangat tinggi dengan hasil analisis COD senilai 68.131 mg/L sedangkan kadar COD limbah yang diizinkan untuk dibuang sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup 2014 adalah 350 mg/L dengan pH 6,0–9,0 [24]. *Starter* juga menunjukkan hasil analisis VSS yang tinggi senilai 10.000 mg/L yang mengindikasikan kandungan mikroba yang tinggi. Apabila keduanya dicampur diharapkan kandungan nutrisi telah cukup untuk mikroba dapat tumbuh dan mendegradasi LCPKS menjadi biogas. Berdasarkan Tabel 1 juga dapat dilihat bahwa beberapa parameter LCPKS seperti pH, COD, dan TSS berada di atas ambang baku mutu limbah buangan sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup 2014 sehingga memiliki potensi dalam pencemaran lingkungan, maka perlu diolah sebelum dibuang.

Profil pH dan Alkalinitas

Keseimbangan sistem dan stabilitas digester dapat ditunjukkan dari pH yang stabil [25]. Berdasarkan kondisi pH dan alkalinitas di dalam

digester dapat diprediksi apakah proses metanogenesis masih berjalan. Untuk fase hidrolitik yang optimal dan fase produksi metana, pH ditetapkan masing-masing 5 dan 6,5–8, untuk asidogenesis adalah 4,0–8,5 dengan optimal sekitar 6, dan untuk asetogenesis adalah sekitar 7. Kisaran pH optimal untuk metanogen adalah 5,5–8,5. Oleh sebab itu, pada proses digunakan pH 7 ($\pm 0,2$). pH VFA dijaga stabil dengan penambahan NaHCO_3 , dimana umpan memiliki pH 4,7 sehingga diperoleh profil pH stabil yaitu 7 ($\pm 0,2$). Profil pH dan alkalinitas ditunjukkan pada Gambar 2.

**Gambar 2. Pengaruh Temperatur terhadap pH dan Alkalinitas**

Grafik menunjukkan profil pH dan alkalinitas relatif stabil dengan rentang pH antara 6,8–7,3 dan alkalinitas antara 3500–4500 mg/L. pH dan alkalinitas merupakan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan aktivitas bakteri. Kedua faktor tersebut membuktikan kestabilan dalam proses digestasi [20]. Peran alkalinitas adalah sebagai *buffer* yang mencegah perubahan pH [26]. Jika terjadi perubahan pH, mikroba pembentuk gas metana akan mengalami penurunan aktivitas, sehingga produksi gas metana menurun. Batasan alkalinitas yang wajar adalah 2.500–5.000 mg/L [27].

Gambar 2 menunjukkan bahwa profil pH dan alkalinitas pada temperatur 35, 45, dan 55 °C mengalami fluktuasi. Nilai alkalinitas berfluktuasi seiring dengan perubahan pH dalam reaktor. Hasil alkalinitas pada temperatur 35°C berada pada nilai 3.500–4.200 mg/L, pada temperatur 45°C berada pada nilai 3500–4.315 mg/L, dan pada temperatur 55 °C berada pada nilai 3.500–4.500 mg/L. Namun fluktuasi alkalinitas yang diperoleh masih dalam rentang nilai yang wajar yaitu 2.500–5.000 mg/L [27].

Volume biogas yang dihasilkan pada masing-masing temperatur 35, 45, dan 55 °C sebesar 2065 mL, 3830 mL, dan 4570 mL dengan konsentrasi metana (CH_4), Karbon dioksida (CO_2) dan *trace* Hidrogen Sulfida (HS) masing masing temperatur, yaitu pada temperatur 35°C diperoleh nilai komposisi metana, karbondioksida, dan hidrogen sulfida masing-masing sebesar 74,833%; 25,167%; dan 0,016%, pada temperatur 45°C diperoleh nilai komposisi metana, karbondioksida, dan hidrogen

sulfida masing-masing sebesar 81,750%; 18,250%; dan 0,014%, temperatur 55°C diperoleh nilai komposisi metana, karbondioksida, dan hidrogen sulfida masing-masing sebesar 89,000%; 11,000%; dan 0,011%.

Meski demikian, nilai pH dan alkalinitas yang diperoleh pada penelitian ini termasuk kedalam rentang yang masih dapat dihidupi oleh bakteri metanogenesis yaitu pada pH 6,8-7,3 dan alkalinitas 3.500–4.500 mg/L. Dengan tercapainya kondisi pH dan alkalinitas yang stabil maka mikroba dapat bekerja dengan baik. Oleh karena itu, proses digestasi pada pengadukan 200 rpm digestasi anaerobik satu tahap masih dalam kondisi stabil untuk proses pembuatan biogas.

Kesimpulan

Nilai pH selama proses metanogenesis berada pada rentang optimum bagi bakteri untuk menghasilkan biogas yaitu pada rentang 6,8-7,3. Nilai alkalinitas pada proses digestasi untuk masing-masing temperatur 35 °C, 45 °C, dan 55 °C berada pada rentang alkalinitas proses metanogenesis yaitu 3.500-4.500 mg/L. Volume biogas yang dihasilkan sebesar 2065 mL, 3830 mL, dan 4570 mL dengan komposisi biogas pada masing-masing temperatur sebesar konsentrasi metana (CH₄) yaitu 74,833%, 81,750%, 89,000%, konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yaitu 25,167%, 18,250%, 11,000%, dan *trace* hidrogen sulfida (H₂S) yaitu 0,016%, 0,014%, 0,011% yang menunjukkan bahwa mikroba dapat bekerja dengan baik pada digester anaerobik satu tahap dengan pengadukan 200 rpm.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada LPPM Biogas Universitas Sumatera Utara yang telah mendukung pendanaan penelitian dan telah menyediakan fasilitas selama penelitian ini berlangsung sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] K. A. Koryś, A. E. Latawiec, K. Grotkiewicz, and M. Kuboń, "The review of biomass potential for agricultural biogas production in Poland," *Sustainability*, vol. 11, pp. 1–13, 2019.
- [2] J. Kostecka, J. Koc-jurczyk, and K. Brudzisz, "Waste management in Poland and European Union," *Arch. Waste Manag. Environ. Prot.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, 2014.
- [3] J. R. Jambeck *et al.*, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015.
- [4] A. Rodrigues and A. Latawiec, "Rethinking organic residues: The great potential of biomass in Brazil," *Mod. Concepts Dev. Agron.*, vol. 1, no. 4, pp. 73–77, 2018.
- [5] R. Lora Grando, A. M. de Souza Antune, F. V. da Fonseca, A. Sánchez, R. Barrena, and X. Font, "Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 44–53, 2017.
- [6] S. K. Pramanik, F. B. Suja, M. Porhemmat, and B. K. Pramanik, "Performance and kinetic model of a single-stage anaerobic digestion system operated at different successive operating stages for the treatment of food waste," *Processes*, vol. 7, no. 600, pp. 1–16, 2019.
- [7] A. Rabii, S. Aldin, Y. Dahman, and E. Elbeshbishy, "A review on anaerobic co-digestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration," *Energies*, vol. 12, pp. 1–25, 2019.
- [8] R. Kothari, A. K. Pandey, S. Kumar, V. V. Tyagi, and S. K. Tyagi, "Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 174–195, 2014.
- [9] P. Vandevivere, L. De Baere, and W. Verstraete, "Types of anaerobic digester for solid wastes," in *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, Barcelona: Iwa Publishing, 2002, pp. 111–140.
- [10] S. Krishnan, L. Singh, M. Sakinah, S. Thakur, Z. A. Wahid, and M. Alkasrawi, "Process enhancement of hydrogen and methane production from palm oil mill effluent using two-stage thermophilic and mesophilic fermentation," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–11, 2016.
- [11] R. Ganesh, M. Torrijos, P. Sousbie, A. Lugardon, J. P. Steyer, and J. P. Delgenes, "Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance," *Waste Manag.*, vol. 34, pp. 875–885, 2014.
- [12] E. İnce, M. İnce, and G. Önköl Engin, "Comparison of thermophilic and mesophilic anaerobic treatments for potato processing wastewater using a contact reactor," *Glob. Nest J.*, vol. 19, no. 2, pp. 318–326, 2017.
- [13] A. E. Ghaly, D. R. Ramkumar, S. S. Sadaka, and J. D. Rochon, "Effect of reseed and pH control on the performance of a two-stage mesophilic anaerobic digester operating on acid cheese whey," *Can. Agric. Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 173–183, 2000.
- [14] L. Naik, Z. Gebreegziabher, V. Tumwesige, B. B. Balana, J. Mwirigi, and G. Austin, "Factors determining the stability and productivity of small scale anaerobic digesters," *Biomass and Bioenergy*, pp. 1–7, 2014.
- [15] A. H. Ibrahim, I. Dahlan, M. N. Adlan, and A.

- F. Dasti, "Comparative study on characterization of Malaysian palm oil mill effluent," *Res. J. Chem. Sci.*, vol. 2, no. 12, pp. 1–5, 2012.
- [16] A. Ahmad, R. Ghufuran, and Z. A. Wahid, "Bioenergy from anaerobic degradation of lipids in palm oil mill effluent," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 10, pp. 353–376, 2011.
- [17] M. Noraini, S. N. A. Sanusi, O. S. J. Elham, M. Z. Sukor, and K. H. K. Hamid, "Factors affecting production of biogas from organic solid waste via anaerobic digestion process : a review," *Solid State Sci. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 29–39, 2017.
- [18] A. E. Cioabla, I. Ionel, G. A. Dumitrel, and F. Popescu, "Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 5, no. 39, pp. 1–9, 2012.
- [19] S. Shrestha and B. Shrestha, "Small Scale Biogas reactor," Dissertation, Metropolia University of Applied Sciences, Finlandia, 2019.
- [20] P. Dobre, F. Nicolae, and F. Matei, "Main factors affecting biogas production - an overview," *Rom. Biotechnol. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 9283–9296, 2014.
- [21] I. A. Zakarya, S. N. B. Khalib, K. N. F. Mat, and T. N. T. Izhar, "Effect of pH, alkalinity and C: N ratio during anaerobic digestion of palm oil mill effluent in two-phase reactor with food waste as a feedstock," *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 6127–6131, 2016.
- [22] A. Gil, J. A. Siles, A. Serrano, A. F. Chica, and M. A. Martín, "Effect of variation in the C/[N+P] ratio on anaerobic digestion," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, pp. 1–9, 2018.
- [23] A. Yilmaz, S. Ünvar, A. Koçer, and B. Aygün, "Factors affecting the production of biogas," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 59–62, 2018.
- [24] Menteri Negara Lingkungan Hidup, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah, 2014.
- [25] S. Chen, J. Zhang, and X. Wang, "Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste," *Waste Manag. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1–8, 2015.
- [26] C. W. Wambugu, E. R. Rene, J. van de Vossenberg, C. Dupont, and E. D. van Hullebusch, "Role of biochar in anaerobic digestion based biorefinery for food waste," *Front. Energy Res.*, vol. 7, pp. 1–13, 2019.
- [27] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th editio., no. 7. Hongkong: McGraw-Hill Companies, Inc, 2004.