



# Analisis Kandungan Karbon Organik pada Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit setelah Proses Anaerobik di Reaktor Biodigester

Purwo Subekti<sup>a\*</sup>, Heri Suripto<sup>a</sup>, Ahmad Fathoni<sup>a</sup>, Eddy Elfiano<sup>b</sup>, M. Handyka Septia<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pasir Pengaraian, Kab. Rokan Hulu, Riau

<sup>b</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Riau

<sup>c</sup>Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pasir Pengaraian, Kab. Rokan Hulu, Riau

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin  
Universitas Pasir Pengaraian  
Jl. Tuanku Tambusai, Rambah,  
Kec. Rambah Hilir, Kabupaten  
Rokan Hulu, Riau 28558  
purwos@upp.ac.id  
herisuripto@upp.ac.id  
saifulanwar@upp.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Mesin  
Universitas Islam Riau  
Jl. Kaharuddin Nst No.113,  
Simpang Tiga, Kec. Bukit Raya,  
Kota Pekanbaru, Riau 28284  
eddy\_elfiano@eng.uir.ac.id

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan karbon organik pada tiga fraksi *Palm Oil Mill Effluent* (POME) setelah melalui proses pengolahan anaerobik di dalam reaktor biodegester Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Pemisahan POME menjadi tiga fraksi, yaitu *sludge*, *solid*, dan *liquid*, dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik serta potensi pemanfaatan lanjutan dari sisa proses pengolahan POME di reaktor biodigester PLTBg. Hasil analisis kuantitatif menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada kadar karbon organik (C-organik) residu antar fraksi tersebut. Secara berurutan, kadar C-organik tertinggi ditemukan pada fraksi *sludge* (rata-rata 8,91%), diikuti oleh fraksi *solid* (2,57%) dan *liquid* (0,12%). Temuan ini mengindikasikan bahwa tingkat biodegradasi bahan organik paling efektif terjadi pada fraksi cair (*liquid*). Analisis statistik menggunakan uji ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan ( $\alpha < 0,05$ ). Hasil ini menegaskan bahwa sifat matriks dan komposisi masing-masing fraksi POME secara fundamental memengaruhi kinetika serta efisiensi proses degradasi bahan organik selama pengolahan anaerobik.

**Kata kunci:** karbon organik; kelapa sawit; limbah cair; proses anaerobik; reaktor biodigester

## ABSTRACT

*This study aims to investigate the organic carbon content in three fractions of Palm Oil Mill Effluent (POME) following anaerobic treatment in the biodigester reactor of a Biogas Power Plant (PLTBg). The POME was separated into three distinct fractions: sludge, solid, and liquid to characterize their physical properties and assess the potential for further utilization of the residual materials generated from the anaerobic digestion process in the PLTBg reactor. Quantitative analysis revealed statistically significant differences in residual organic carbon (C-organic) content among the fractions. The highest concentration of C-organic was observed in the sludge fraction (average 8.91%), followed by the solid (2.57%) and liquid (0.12%) fractions. These results indicate that the most effective biodegradation of organic matter occurred within the liquid fraction. Statistical evaluation using one-way ANOVA confirmed significant differences among the treatment groups ( $\alpha < 0.05$ ). These findings suggest that the physicochemical characteristics and compositional properties of each POME fraction fundamentally influence the kinetics and efficiency of organic matter degradation during anaerobic processing.*

**Keywords:** organic carbon; palm oil; liquid waste; anaerobic process; biodigester reactor

## 1. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis yang menopang pertumbuhan ekonomi Indonesia. Berdasarkan data Gabungan Pengusaha Kelapa

Corresponding Author:  
✉ Purwo Subekti  
Accepted on: 2024-06-28

Sawit Indonesia (GAPKI), produksi minyak kelapa sawit mentah (Crude Palm Oil atau CPO) Indonesia mencapai lebih dari 50 juta ton per tahun, dengan ekspor yang dapat menyumbang devisa negara yang cukup besar [1]. Namun, aktivitas pengolahan minyak kelapa sawit menghasilkan limbah cair, yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan tepat. Setiap ton CPO yang dihasilkan dapat menghasilkan 2,5–3 m<sup>3</sup> Palm Oil Mill Effluent (POME) [2, 3].

POME mengandung bahan organik tinggi berupa karbohidrat, protein, asam lemak, dan lignoselulosa, yang menghasilkan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) antara 50.000–90.000 mg/L dan Biochemical Oxygen Demand (BOD) antara 25.000–40.000 mg/L [4]. Kandungan bahan organik yang tinggi tersebut menjadi tantangan sekaligus peluang dalam pengelolaan limbah berbasis bioconversion. Salah satu teknologi yang digunakan dalam pengolahan limbah cair POME adalah proses anaerobik, yang mampu menurunkan kadar bahan organik sekaligus menghasilkan biogas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan [5-9].

Proses anaerobik di Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) melibatkan aktivitas mikroorganisme yang menguraikan bahan organik menjadi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Meski demikian, tidak semua senyawa organik dapat terdegradasi secara sempurna. Sebagian residu berupa POME sludge, POME solid, dan POME liquid masih mengandung karbon organik dalam bentuk kompleks seperti lignin dan selulosa [10]. Oleh karena itu, parameter C-Organik (Corg) menjadi indikator penting dalam menilai efisiensi proses biodegradasi anaerobik serta menentukan potensi pemanfaatan residu hasil pengolahan.

Menurut peneliti sebelumnya [11], penurunan kadar C-Organik mencerminkan tingkat konversi bahan organik menjadi biogas. Sebaliknya, tingginya kadar C-Organik pada residu menunjukkan efisiensi proses yang belum optimal. Dengan demikian, analisis kadar C-Organik pada berbagai jenis fraksi POME pasca proses anaerobik menjadi langkah penting dalam mengevaluasi performa sistem PLTBg. Selain itu, data tersebut juga berfungsi sebagai dasar perancangan sistem pemanfaatan limbah lanjutan, baik sebagai pupuk organik, bahan baku kompos, maupun sumber energi alternatif melalui proses pirolisis atau co-digestion [5, 8, 12].

Penelitian ini difokuskan pada analisis kadar C-Organik pada tiga jenis POME (liquid, sludge, dan solid) pasca proses anaerobik di reaktor biodigester. Tujuannya adalah untuk menganalisis pengaruh jenis POME yang keluar dari saluran buang dari unit reaktor PLTBg terhadap kandungan C-Organik dan mengidentifikasi potensi pemanfaatan lanjutan dari setiap jenis POME. Hasil penelitian diharapkan memberikan informasi terkait nilai C-Organik dari beberapa jenis POME sebagai upaya mendukung pengembangan teknologi pengolahan limbah kelapa sawit yang efisien, ramah lingkungan, serta dukungan terhadap konsep zero waste dan circular bioeconomy.

## 2. MATERIAL DAN METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan analisis laboratorium untuk mengukur kadar C-Organik pada tiga fraksi limbah cair kelapa sawit setelah proses pengolahan anaerobik. Pengambilan sampel uji tiga jenis POME (*liquid, sludge, dan solid*) dilakukan di instalasi proses anaerobik di reaktor biodigester pada salah satu unit PLTBg dari limbah cair pabrik kelapa sawit di Provinsi Riau [8]. Analisis kadar C-Organik dilakukan dengan metode Walkley-Black [13], menggunakan tiga kali ulangan untuk setiap jenis sampel. Data hasil analisis kemudian diuji menggunakan ANOVA satu arah dengan taraf signifikansi 5% ( $\alpha = 0,05$ ), uji statistik dilakukan untuk mengetahui perbedaan kadar C-Organik antar fraksi POME.

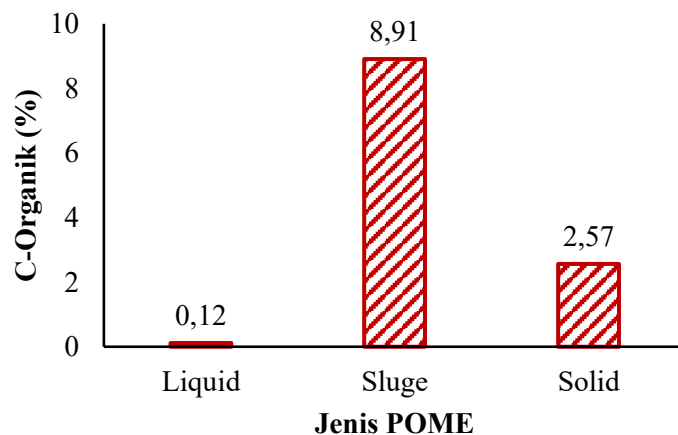
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian seperti yang disajikan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kadar Karbon Organik (C-Organik) pada tiga jenis POME pasca proses anaerobik berbeda secara signifikan. Berdasarkan hasil pengukuran laboratorium, nilai rata-rata kadar C-Organik berturut-turut untuk POME jenis sludge sebesar 8,91%, POME solid sebesar 2,57%, dan POME liquid sebesar 0,12%. Hasil uji statistik menggunakan ANOVA satu arah menghasilkan F-hitung = 412,35 yang jauh lebih besar dibandingkan F-tabel = 5,14 ( $\alpha = 0,05$ ), hasil uji tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antar kelompok perlakuan (fraksi liquid, sludge, dan solid) bersifat signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa jenis POME memiliki pengaruh yang kuat terhadap kandungan karbon organik yang tersisa setelah proses pengolahan anaerobik.

Nilai C-Organik yang tinggi pada POME sludge mengindikasikan bahwa fraksi tersebut masih menyimpan bahan organik kompleks. Fraksi tersebut umumnya terdiri atas biomassa mikroba yang mati, bahan lignoselulosa, dan senyawa kompleks yang bersifat resisten terhadap degradasi biologis [14]. Menurut peneliti sebelumnya [15], proses metanogenesis pada sistem reaktor anaerobik cenderung efektif untuk senyawa organik sederhana seperti asam lemak volatil, tetapi kurang efisien untuk senyawa berat seperti lignin dan selulosa yang membutuhkan waktu retensi lebih lama. Hal tersebut menjelaskan mengapa POME sludge memiliki kandungan C-Organik yang jauh lebih tinggi dibandingkan fraksi cair.

Sementara itu, kadar C-Organik yang rendah pada POME liquid menunjukkan bahwa sebagian besar bahan organik telah dikonversi menjadi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) melalui tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis [16]. Hasil tersebut selaras dengan temuan peneliti [17], yang menyatakan bahwa efisiensi konversi karbon pada reaktor tipe Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) dapat mencapai lebih dari 95% untuk fraksi cair POME. Dengan demikian, semakin besar fraksi cair yang diproses, maka efisiensi total reaktor terhadap pengurangan beban organik juga semakin meningkat.

Nilai C-Organik menengah pada POME solid (2,57%) menunjukkan bahwa residu padatan tersebut telah mengalami degradasi parsial, tetapi masih menyimpan sebagian senyawa organik kompleks. Menurut penelitian [12], fraksi padat limbah kelapa sawit seperti serat dan partikel kecil tandan kosong masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan kompos atau sumber bahan bakar padat setelah proses stabilisasi. Hal tersebut diperkuat oleh studi [7], yang menunjukkan bahwa kombinasi antara POME solid dan sludge dapat meningkatkan rasio karbon terhadap nitrogen (C/N ratio) dalam proses co-digestion, sehingga menghasilkan produksi biogas yang lebih tinggi dan stabil.



**Gambar 1.** Kandungan Karbon Organik pada Tiga Jenis Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Perbedaan kadar C-Organik antar fraksi POME juga mencerminkan distribusi efisiensi degradasi karbon pada sistem reaktor PLTBg. Menurut [18], kinerja reaktor anaerobik dipengaruhi oleh dua parameter utama, yaitu Hydraulic Retention Time (HRT) dan Organic Loading Rate (OLR). Bila HRT terlalu pendek, senyawa organik kompleks tidak memiliki waktu cukup untuk terurai, sehingga residu padatan dan lumpur cenderung memiliki kadar C-Organik tinggi. Sebaliknya, peningkatan HRT dapat memperbesar waktu kontak mikroba dengan substrat, yang meningkatkan efisiensi degradasi, namun berpotensi menurunkan kapasitas olah reaktor. Oleh karena itu, keseimbangan antara OLR dan HRT menjadi kunci dalam mencapai efisiensi konversi karbon yang optimal.

Secara termodinamik, proses degradasi karbon organik dalam sistem anaerobik dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi, rasio C/N, serta kondisi pH. Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa nilai pH pada reaktor PLTBg relatif stabil pada kisaran 6,8–7,2, sesuai rentang optimum untuk pertumbuhan mikroba metanogenik [4, 8]. Kondisi tersebut memastikan bahwa sebagian besar karbon terkonversi menjadi gas, tetapi beberapa senyawa kompleks tetap tertinggal dalam bentuk sludge. Selain itu, suhu operasi sekitar 35–37°C (mesofilik) juga berkontribusi terhadap kestabilan proses anaerobik, sebagaimana dilaporkan oleh peneliti sebelumnya [3], yang menemukan bahwa degradasi karbon tertinggi terjadi pada kondisi mesofilik stabil dibanding termofilik yang fluktuatif.

Dari sisi pemanfaatan, hasil karakterisasi tersebut membuka peluang untuk pengembangan sistem pengelolaan limbah terintegrasi. POME sludge, dengan kadar C-Organik tinggi, dapat digunakan sebagai bahan baku co-digestion bersama limbah organik lain seperti sisa sayuran atau limbah pertanian untuk meningkatkan produksi biogas [17]. Alternatif lain adalah memanfaatkan sludge sebagai bahan bakar padat melalui proses pirolisis, menghasilkan biochar yang dapat berfungsi sebagai pembenah tanah atau penyerap karbon [7].

POME solid, yang mengandung bahan lignoselulosa dalam jumlah sedang, berpotensi digunakan sebagai bahan dasar kompos organik. Pengomposan POME solid bersama sludge mampu meningkatkan kandungan humus dan memperbaiki struktur tanah pertanian. Kemudian hasil penelitiannya juga menunjukkan bahwa aplikasi POME padat yang dikomposkan dapat meningkatkan hasil tanaman hortikultura hingga 28% dibanding perlakuan tanpa kompos [12].

Sementara itu, POME liquid yang memiliki kadar C-Organik rendah tetap memiliki nilai ekonomis. Studi oleh peneliti sebelumnya [4] Chin *et al.* (2020) menunjukkan bahwa POME cair yang telah distabilisasi dapat digunakan langsung sebagai biofertilizer dengan rasio pengenceran tertentu tanpa menimbulkan fitotoksisitas. Aplikasi berulang POME cair juga dapat memperbaiki aktivitas mikrobiologi tanah dan meningkatkan kandungan bahan organik tanah dalam jangka panjang [17].

Selain manfaat praktisnya, hasil penelitian ini memiliki implikasi penting terhadap kebijakan energi dan lingkungan. Karakterisasi kadar C-Organik dapat dijadikan parameter indikator efisiensi biologis reaktor PLTBg, sekaligus alat diagnostik dini terhadap penurunan performa sistem. Nilai C-Organik yang meningkat dalam residu menunjukkan penurunan efisiensi degradasi dan perlunya penyesuaian OLR atau penambahan inokulum mikroba. Pendekatan berbasis monitoring real-time C-Organik dapat diintegrasikan dengan sistem kontrol otomatis reaktor untuk meningkatkan stabilitas proses dan meminimalkan residu organik yang terbuang [18].

Lebih lanjut, hasil tersebut mendukung penerapan konsep zero discharge dan circular bioeconomy dalam pengelolaan limbah industri kelapa sawit. Dengan memanfaatkan setiap fraksi POME sesuai karakteristiknya — sludge untuk energi, solid untuk kompos, dan liquid untuk pupuk — maka tidak hanya diperoleh pengurangan emisi karbon, tetapi juga peningkatan efisiensi sumber daya dan nilai ekonomi dari limbah. Hal tersebut sejalan dengan strategi Net Zero

Emission 2060 yang digagas oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [19], di mana sektor agroindustri menjadi salah satu pilar utama dalam pengembangan energi terbarukan nasional.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa analisis kadar C-Organik merupakan instrumen penting untuk mendapatkan informasi kinerja proses anaerobik, upaya strategi pemanfaatan sisa proses penangkapan gas metan pada PLTBg, dan mendukung transisi menuju sistem energi hijau berbasis biomassa sawit. Dengan pendekatan yang terintegrasi antara pengolahan limbah, pemulihan energi, dan pemanfaatan hasil samping, diharapkan PLTBg dari limbah cair pabrik pengolahan kelapa sawit dapat menjadi model nyata dari sustainable waste-to-energy system di Indonesia.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terhadap kandungan C-Organik (karbon organik) pada tiga jenis Palm Oil Mill Effluent (POME) pasca proses anaerobik, diperoleh bahwa terdapat perbedaan yang nyata antar jenis POME terhadap kadar C-Organik yang dihasilkan. Nilai rata-rata kadar C-Organik berturut-turut adalah POME sludge (8,91%), POME solid (2,57%), dan POME liquid (0,12%). Hasil analisis statistik dengan metode ANOVA satu arah menunjukkan nilai Fhitung (412,35) > Ftabel (5,14) pada taraf signifikansi  $\alpha = 0,05$ , yang berarti bahwa perbedaan antar jenis POME terhadap kandungan C-Organik adalah signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ). Kandungan C-Organik yang tinggi pada POME sludge menunjukkan bahwa fraksi tersebut masih mengandung padatan organik dan biomassa mikroba. Sebaliknya, kadar C-Organik yang rendah pada POME liquid mengindikasikan bahwa sebagian besar senyawa karbon telah dikonversi menjadi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) melalui proses metanogenesis. Informasi tersebut menegaskan bahwa efisiensi degradasi bahan organik dalam reaktor PLTBg bergantung pada karakteristik fisik dan kimia masing-masing fraksi POME.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada seluruh staf dan pengelola unit PLTBg dari POME dan seluruh perangkat Desa Rantau Sakti Kecamatan Tambusa Utara atas semua fasilitas dan bantuan dalam kegiatan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] GAPKI (Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia), *Kinerja industri minyak sawit tahun 2023 dan prospek tahun 2024*. <https://gapki.id/news/2024/02/27/kinerja-industri-minyak-sawit-tahun-2023-prospek-tahun-2024/>
- [2] M. F. Basri, M. A. Hassan, S. Yacob, Y. Shirai, and M. Wakisaka, "Improved biogas production from palm oil mill effluent by a novel anaerobic process," *Bioresour. Technol.*, vol. 148, pp. 610–616, 2013. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.077
- [3] M. M. A. Aziz, K. A. Kassim, M. ElSergany, S. Anuar, M. E. Jorat, H. Yaacob, A. Ahsan, M. A. Imteaz, and M. Arifuzzaman, "Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, p. 109603, 2020. doi: 10.1016/j.rser.2019.109603
- [4] S. Tabassum, Y. Zhang, and Z. Zhang, "An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge—A pilot study," *J. Clean. Prod.*, vol. 95, pp. 148–155, 2015. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.056

- [5] M. Mufrizon and P. Subekti, "Kebijakan energi baru-terbarukan serta peluang pemanfaatan biogas dan biomasa limbah pengolahan kelapa sawit untuk pembangkit tenaga listrik di Propinsi Riau," *J. APTEK*, vol. 5, no. 1, pp. 42–48, 2013.
- [6] A. Z. Zainal and J. W. Lim, "Recovery and utilization of biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 331–339, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.005
- [7] E. P. Rahayu, N. Abdullah, and A. Setiawan, "Valorization of POME waste into biogas and solid biofuel: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, p. 111876, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2021.111876
- [8] P. Subekti, H. Suropto, A. Fathoni, E. Elfiano, R. A. Putra, M. S. S. Hasibuan, "Pengaruh jenis palm oil mill effluent terhadap kadar air dan pH pasca proses anaerobik pada reaktor PLTBg," *J. APTEK*, vol. 14, no. 2, pp. 152–155, 2022.
- [9] P. Subekti, D. Defidelwina, I. Gunawan, H. C. Rahayu, P. Lumba, Y. Susanti, L. Fitriana, B. Irwansyah, and J. Kaswari, "Uji coba pemanfaatan biogas dari cairan sisa proses produksi pengolahan kelapa sawit pada kompor rumah tangga," *J. APTEK*, Vol. 15, no. 2, pp. 155–157, 2023.
- [10] T. A. Tengku, N. A. Rahman, and R. Omar, "Valorization of palm oil mill residues: A review on the current technologies and future perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, p. 111011, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.111011
- [11] A. L. Ahmad, S. Ismail, and S. Bhatia, "Optimization of coagulation–flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 8, pp. 180–188, 2019. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.02.011
- [12] M. A. Nasution, S. Harahap, and A. S. Lubis, "Potensi limbah padat kelapa sawit sebagai bahan pembenah tanah organik," *J. Teknol. Pertan.*, vol. 21, no. 1, pp. 45–53, 2020.
- [13] A. Walkley and I. A. Black, "An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method," *Soil Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 29–38, 1934. doi: 10.1097/00010694-193401000-00003
- [14] J. I. Eze, E. Okorie, and K. T. Lee, "Characterization and valorization of palm oil mill sludge for renewable energy," *Energy Convers. Manage.*, vol. 257, p. 115456, 2022. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115456
- [15] M. A. Hassan, S. Yacob, Y. Shirai, M. Wakisaka, and S. Subash, "Microbial degradation dynamics in anaerobic POME reactors," *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 122612, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122612
- [16] S. Yacob, M. A. Hassan, and Y. Shirai, "Baseline study of methane emission from anaerobic ponds in palm oil mill effluent treatment," *Sci. Total Environ.*, vol. 366, no. 1, pp. 187–196, 2006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.08.023
- [17] W. C. Liew, C. W. Lee, and Y. H. Tan, "Nutrient recovery from treated POME effluent for sustainable fertilizer production," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 5, p. 110967, 2023. doi: 10.1016/j.jece.2023.110967

- [18] N. H. Abdurrahman, M. Hasan, and M. Yusoff, "Optimization of anaerobic digestion of POME for renewable energy generation," *Renew. Energy*, vol. 214, pp. 1194–1203, 2023. doi:10.1016/j.renene.2023.06.048
- [19] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), *Peta jalan net zero emission Indonesia 2060*. Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE, 2023. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/>