



ARTIKEL PENELITIAN

Peruraian anaerobik termofilik *palm oil mill effluent* dengan variasi konsentrasi substrat

Roberty Wisnu Alvania Kartika^{1,*}, Nadiya Salsabila Desman², Irfan D. Prijambada^{1,3}

¹Program Studi Magister Bioteknologi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Jl Teknik Utara, Berek, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55283, Indonesia

³Program Studi Mikrobiologi Pertanian, Departemen Mikrobiologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl Flora No. 1 Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

Disubmit 5 Oktober 2021; direvisi 13 November 2021; diterima 1 Desember 2021



OBJECTIVES High utilization of palm oil in Indonesia corresponds to the emission of palm oil mill effluent (POME). The POME has chemical oxygen demand (COD) up to 100,000 mg/L, which can pollute the ecosystem if not adequately treated. One of the methods to manage POME is thermophilic anaerobic digestion. The advantage of this method is the production of methane gas as alternative energy. Substrate concentration affects anaerobic digestion. This preliminary experiment aims to evaluate the performance of thermophilic anaerobic digestion with various POME concentrations at 55 °C. **METHODS** The anaerobic digestion was run with 16,000, 11,000, and 5,000 mg sCOD/L initial substrate concentrations. Digested cow manure (DCM) was used as inoculum. The process was running in a continuous system after 7-days of acclimatization of the batch system. **RESULTS** The result showed that 16,000 and 11,000 mg sCOD/L concentrations produced more methane, but the methane yield was not statistically significant with the Tukey test ($p=0.05$). The POME with a 5,000 mg sCOD/L concentration produced less methane and plummeted after day 85. **CONCLUSIONS** The lower methane production at lower substrate concentration was due to the low sCOD availability and high volatile fatty acid (VFA) accumulation which inhibited the methane production.

KEYWORDS anaerobic digestion; concentration; methane;

POME; thermophilic

TUJUAN Tingginya tingkat pengolahan kelapa sawit di Indonesia menghasilkan limbah *palm oil mill effluent* (POME). Limbah POME memiliki kandungan *chemical oxygen demand* (COD) mencapai 100.000 mg/L yang dapat mencemari ekosistem jika dibuang ke lingkungan tanpa perlakuan yang tepat. Salah satu perlakuan yang digunakan dalam menangani limbah POME adalah peruraian anaerobik termofilik. Keuntungan dari proses ini adalah menghasilkan gas metana yang dapat digunakan sebagai energi alternatif. Konsentrasi substrat memengaruhi proses peruraian anaerobik. Penelitian pendahuluan ini bertujuan untuk mengetahui performa proses peruraian anaerobik termofilik pada berbagai konsentrasi POME sebagai substrat dengan suhu 55 °C. **METODE** Proses peruraian anaerobik menggunakan konsentrasi substrat 16.000, 11.000, dan 5.000 mg sCOD/L. Inokulum yang digunakan adalah *digested cow manure* (DCM). Proses peruraian dilakukan menggunakan sistem kontinyu dengan didahului proses aklimatisasi secara *batch*. **HASIL** Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L menghasilkan lebih banyak gas metana. Namun, *yield* metana pada konsentrasi 16.000 dan 11.000 mg sCOD /L tidak berbeda signifikan berdasarkan uji Tukey ($p=0,05$). Konsentrasi POME 5.000 mg sCOD/L menghasilkan gas metana yang lebih rendah dan terjadi penurunan drastis setelah hari ke-85. **KESIMPULAN** Hal ini disebabkan penurunan konsumsi sCOD yang diiringi dengan peningkatan kadar *volatile fatty acid* (VFA) menunjukkan akumulasi asam yang menghambat proses pembentukan gas metana.

KATA KUNCI peruraian anaerobik; konsentrasi; metana; POME; termofilik

1. PENDAHULUAN

Kelapa sawit adalah salah satu komoditas penting yang diolah untuk memenuhi berbagai kebutuhan. Indonesia merupakan salah satu negara terbesar penghasil minyak kelapa sawit yang mencapai 51,6 juta ton dengan volume ekspor sebesar 34 juta ton (*Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indo-*

*Korespondensi: alvania.kartika@mail.ugm.ac.id

nesia 2021). Produksi minyak kelapa sawit menghasilkan limbah *palm oil mill effluent* (POME) yang dapat mencemari lingkungan karena memiliki kandungan tinggi *chemical oxygen demand* (COD) mencapai 100.000 mg/L serta minyak dan lemak mencapai 18.000 mg/L (A Aziz dkk. 2020). Oleh karena itu, diperlukan proses peruraian untuk mengurangi tingkat toksisitas limbah POME. Kandungan material organik yang tinggi pada POME dapat dikonversi menjadi energi yaitu biogas. Peruraian anaerobik dilaporkan mampu mengurangi nilai COD limbah POME dan menghasilkan gas metana yang berguna sebagai energi alternatif. Proses konversi limbah POME menjadi biogas memerlukan mikroorganisme pada empat proses peruraian anaerobik yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis (Rajani dkk. 2019).

Efisiensi proses peruraian limbah POME sangat dipengaruhi oleh komunitas mikroorganisme yang berperan di dalamnya serta faktor lingkungan seperti temperatur dan konsentrasi substrat. Proses peruraian yang dilakukan dalam kondisi termofilik (55 °C) dilaporkan menghasilkan gas metana lebih tinggi daripada kondisi mesofilik (Choong dkk. 2018). Penelitian dengan variasi *organic loading rate* (OLR) 6,2–8,2 g COD/Lday melaporkan bahwa semakin tinggi konsentrasi POME, semakin banyak potensi gas metana yang terbentuk (Meesap dkk. 2012). Di samping itu, kandungan material organik dan asam lemak yang terlalu tinggi pada POME dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dan menghambat mikroorganisme untuk memproduksi biogas. Konsentrasi POME yang terlalu tinggi dilaporkan menghambat mikroorganisme dalam menghasilkan biogas karena sulit mengurai asam lemak rantai panjang (Hagos dkk. 2017). Sebaliknya, jika konsentrasi substrat terlalu rendah, mikroorganisme kekurangan makanan untuk metabolismenya sehingga beresiko merusak sistem memproduksi biogas (Wang dkk. 2015). Di lain pihak, Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia tahun 1995 tentang baku mutu limbah cair industri kelapa sawit menetapkan bahwa batas maksimal kadar COD adalah 350 mg/L sedangkan pabrik pengolahan sawit mengeluarkan POME dengan konsentrasi COD 15.000–100.000 mg/L (Rahayu dkk. 2015). Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan proses peruraian anaerobik termofilik dengan berbagai pengenceran konsentrasi POME dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi material organik dalam limbah POME terhadap performa proses anaerob termofilik sekaligus sebagai upaya daur ulang POME agar sesuai ketentuan Kementerian Lingkungan Hidup.

Penelitian ini dilakukan sebagai usaha untuk mengurangi dampak pencemaran lingkungan dari POME dan meningkatkan nilai guna limbah POME sebagai bahan baku produksi biogas. Selain itu, riset ini juga dilakukan untuk mendukung produksi energi terbarukan yaitu gas metana sebagai sumber energi alternatif.

TABEL 1. Urutan variasi OLR yang akan dilakukan pada masing-masing konsentrasi POME.

Konsentrasi (mg sCOD/L)	OLR (g/L/day)				
16.000	0,2667	0,3810	0,5333	0,7619	1,0667
11.000	0,1826	0,2608	0,3651	0,5216	0,7302
5.000	0,0782	0,1118	0,1565	0,2235	0,3130

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan penelitian

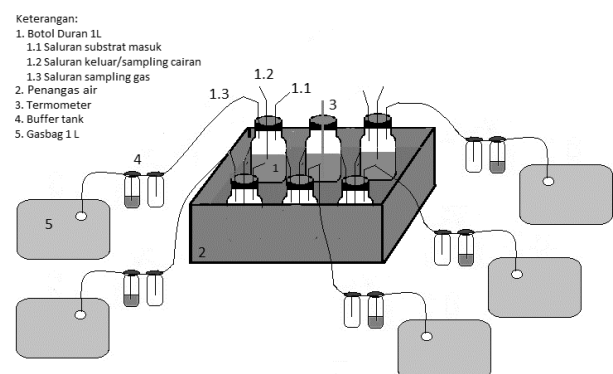
Limbah POME sebagai bahan baku dan substrat diperoleh dari PTPN VII Lampung. Limbah POME yang didapatkan memiliki konsentrasi COD 16.000–18.000 mg/L (pH 4,5±0,2), kemudian akan diencerkan menjadi 3 konsentrasi: 16.000, 11.000, dan 5.000 mg sCOD/L. Inokulum yang digunakan adalah *digested cow manure* (DCM) atau kotoran sapi terdegradasi (COD 25.750 mg/L, sCOD 1.775 mg/L) yang diperoleh dari peternakan sapi di Cangkringan Merapi.

Bahan-bahan yang mendukung penelitian antara lain asam sulfat (H₂SO₄ p.a., 95–97% Merck), kalium dikromat (K₂Cr₂O₇, Merck), perak sulfat (Ag₂SO₄, Merck), merkuri sulfat (HgSO₄ EMSURE), *buffer* garam 270 g/L, NaOH (p.a, Merck), HCl (p.a., 37–38%, Merck), gas nitrogen, indikator *phenol phthalein* dan akuades.

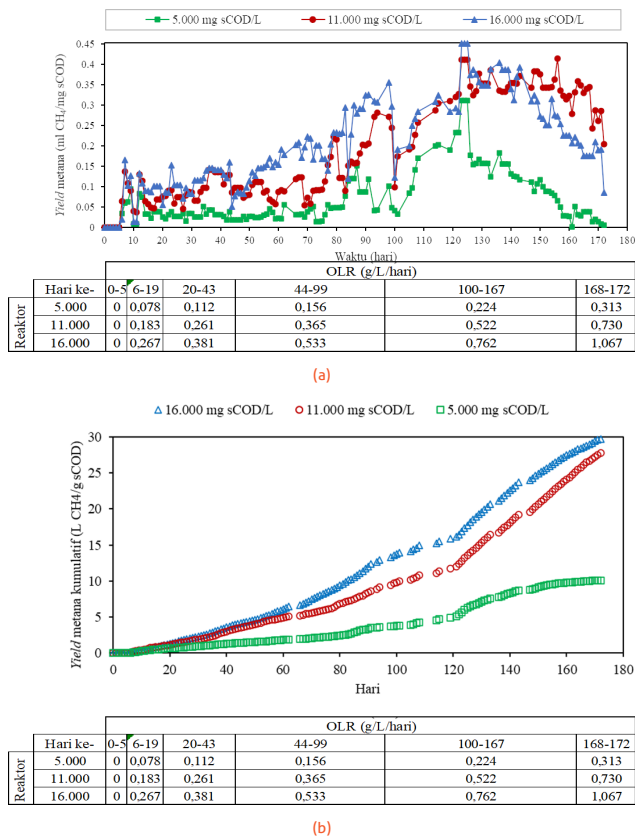
2.2 Cara penelitian

Pembuatan variasi konsentrasi menjadi 11.000 dan 5.000 mg sCOD /L dilakukan dengan cara mengencerkan limbah POME konsentrasi 16.000 mg sCOD /L dengan akuades. Sejumlah DCM disaring hingga didapat cairan sebanyak 800 mL yang dimasukkan pada botol Duran berukuran 1 L sebagai bioreaktor. Agar kondisi menjadi anaerob, dilakukan *flushing* nitrogen masing-masing bioreaktor selama beberapa menit. Tujuannya adalah untuk mengeluarkan oksigen yang ada dalam bioreaktor menjadi nitrogen melalui saluran selang yang telah disediakan. *Waterbath* diatur hingga suhu cairan di dalam bioreaktor stabil pada suhu 55 °C. Eksperimen dilakukan menggunakan 6 buah bioreaktor, satu bioreaktor sebagai kontrol dengan konsentrasi 16.000 mg sCOD /L serta dua bioreaktor untuk masing-masing konsentrasi 11.000 dan 5.000 mg sCOD/L. Digunakan satu bioreaktor yang hanya berisi DCM sebagai penanda suhu internal bioreaktor. Setiap bioreaktor disambungkan ke *buffer tank* berisi garam sebelum disambungkan ke kantong gas.

Setelah proses aklimatisasi selama 7 hari dengan sistem *batch*, masing-masing bioreaktor diberi *feeding* atau umpan sesuai dengan konsentrasi dan OLRnya. Variasi OLR pada masing-masing konsentrasi POME ditunjukkan pada tabel 1. Sebelum diberi umpan, sejumlah cairan dari dalam bioreaktor dikeluarkan sejumlah umpan agar volume bioreaktor tetap konstan. Umpan dimasukkan ke dalam bioreaktor menggunakan suntik 60 ml. Proses peruraian dilakukan sampai sa-



GAMBAR 1. Rangkaian alat peruraian anaerobik termofilik menggunakan bioreaktor termodifikasi.



GAMBAR 2. Yield metana (a) dan yield kumulatif metana (b) pada konsentrasi POME 16.000, 11.000 dan 5.000 mg sCOD/L beserta peningkatan OLR-nya.

lah satu reaktor tidak dapat menghasilkan biogas atau terjadi *washout*. Skema alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.

Pengambilan sampel cairan dilakukan setiap 2 kali dalam seminggu sebanyak 15 mL untuk dilakukan pengukuran konsentrasi sCOD dan *volatile fatty acid* (VFA) dengan metode "5220 Chemical Oxygen Demand (COD)" dan "5560 Organic and Volatile Acids" (Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation 2018b,a). Gas yang tertampung dalam kantong gas akan diukur volumenya dengan menggunakan penghisap 100 mL dan diukur kandungan metananya dengan *infrared gas analyzer* (Model RI-557, Riken Keiki, Co. Ltd, Japan). Pengukuran dan pengambilan gas dari kantong gas dilakukan setiap hari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan *yield* dan *yield* kumulatif metana yang didapatkan dari semua bioreaktor ditunjukkan gambar 2.

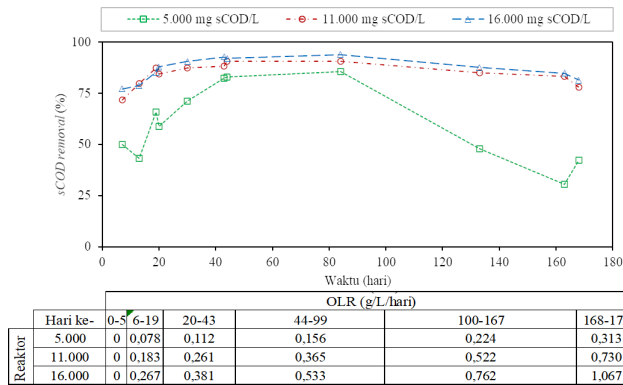
Selama proses peruraian, bioreaktor dengan konsentrasi POME 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L menunjukkan performa yang cenderung mirip. Uji ANOVA satu arah ($p=0,05$) menunjukkan ada perbedaan di antara ketiga konsentrasi POME yang digunakan selama proses peruraian anaerobik termofilik. Uji Tukey ($p=0,05$) menunjukkan tidak ada perbedaan antara konsentrasi POME 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L. Pada hari ke-100 terjadi penurunan *yield* metana yang drastis pada konsentrasi 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L karena efek peningkatan OLR, yang semula 0,533 dan 0,365 mg/L menjadi 0,762 dan 0,522 mg/L. Kenaikan OLR menyebabkan

mikroorganisme untuk beradaptasi dengan banyaknya makanan yang tersedia dalam reaktor, sehingga produksi gasnya menurun. Setelah mikroorganisme menyesuaikan dengan kondisi OLR yang baru, produksi biogas akan meningkat (Wang dkk. 2021). Pada bioreaktor dengan konsentrasi POME 5.000 mg sCOD/L, terjadi penurunan *yield* metana yang drastis sejak hari ke-85. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh material organik yang terlalu sedikit bagi mikroorganisme untuk menghasilkan biogas atau mikroorganisme sudah tidak mampu mengonsumsi sCOD yang tersedia karena terjadi akumulasi asam yang menghambat pertumbuhan. Belum diketahui penyebab terjadinya akumulasi asam pada konsentrasi substrat POME 5.000 mg sCOD/L. Kemungkinan terjadi ketidakseimbangan komunitas mikroorganisme pada bioreaktor namun memerlukan analisis DNA yang belum dilakukan dalam penelitian ini.

Konsentrasi substrat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan akumulasi senyawa antara sehingga menghambat proses peruraian anaerobik (Zhang dkk. 2014). Ketika jumlah substrat melebihi batas toleransi mikroorganisme, terjadi ketidakseimbangan antara mikroorganisme hidrolisis atau asidogen dengan metanogen, sehingga terjadi akumulasi asam volatil yang dapat menyebabkan penurunan pH dan mikroorganisme metanogen sulit tumbuh (Braz dkk. 2019). Sebaliknya, konsentrasi substrat yang terlalu rendah beresiko menurunkan aktivitas metabolisme mikroorganisme yang ada pada sistem bioreaktor sehingga tidak menghasilkan biogas yang optimal (Filer dkk. 2019; Tanimu dkk. 2015; Wang dkk. 2015). Proses peruraian anaerobik sangat dipengaruhi aktivitas mikroorganisme anaerob yang berperan di dalamnya (Mellyanawaty dkk. 2017). Beberapa mikroorganisme anaerob sangat dipengaruhi oleh konsentrasi substrat untuk dapat hidup dan menghasilkan metabolit (Martin dkk. 1999). Oleh karena itu, perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui mikroorganisme apa saja dalam sistem bioreaktor ini yang pertumbuhannya dipengaruhi oleh konsentrasi substrat sehingga dapat memaksimalkan produksi biogas.

Sebuah penelitian kinetika menggunakan *biochemical methane potential* (BMP) mengevaluasi konsentrasi substrat terhadap potensi metana yang dihasilkan (Wang dkk. 2015). Penelitian tersebut menggunakan konsentrasi 5–15 g VS/L dan produksi metana tertinggi didapatkan dari konsentrasi 15 g VS/L. Disisi lain, pengenceran substrat menjadi lebih rendah dari 10 g VS/L sebaiknya dihindari untuk mengurangi resiko kegagalan sistem (Wang dkk. 2015).

Hasil pengukuran sCOD dan VFA ditunjukkan pada gambar 3 dan 4. Persentase konsumsi sCOD pada bioreaktor dengan konsentrasi POME 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L memiliki kecenderungan yang sama. Pada hari 0-50 keduanya cenderung mengalami kenaikan konsumsi sCOD dengan konsentrasi 16.000 mg sCOD/L mencapai sCOD *removal* tertinggi yaitu 94,03%, diikuti 91,50%, dan 85,78% pada reaktor dengan konsentrasi 11.000 dan 5.000 mg sCOD/L. Hal ini terjadi karena banyaknya konsentrasi substrat berpotensi menghasilkan biogas yang tinggi, sehingga semakin banyak pula material organik yang habis diolah oleh mikroorganisme (Goswami dkk. 2016). gambar 3 juga menunjukkan fase adaptasi mikroorganisme dalam proses peruraian anaerobik yaitu sebelum hari ke-25, kemudian tingkat konsumsi sCOD menjadi stabil. Hal ini menunjukkan komunitas mikroorganisme mengalami pertumbuhan dan adaptasi pada sistem bio-



GAMBAR 3. Persentase sCOD removal pada konsentrasi POME 16.000, 11.000, dan 5.000 mg sCOD/L beserta peningkatan OLRnya.

reaktor untuk mendegradasi material organik yang tersedia (Feng dkk. 2019). Pada bioreaktor dengan konsentrasi POME 5.000 mg sCOD/L, terjadi penurunan konsumsi sCOD yang drastis. Hal ini menjadi alasan bioreaktor dengan konsentrasi POME 5.000 mg sCOD/L menghasilkan metana yang sangat sedikit mulai hari ke-85, yakni sCOD yang tersedia tidak cukup untuk dikonsumsi oleh mikroorganisme sehingga mikroorganisme tidak dapat bekerja dengan optimal (Wang dkk. 2015).

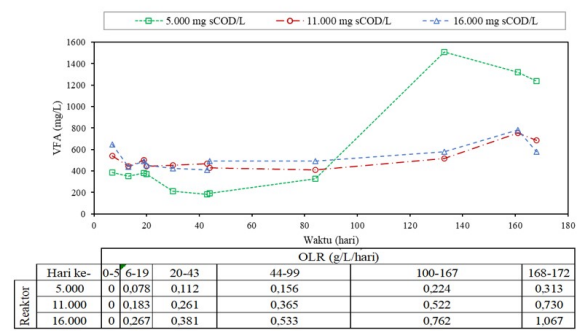
Nilai VFA pada berbagai bioreaktor mengalami sedikit peningkatan seiring waktu. Pada bioreaktor dengan konsentrasi POME 16.000 dan 11.000 mg sCOD /L cenderung mirip dan mengalami sedikit peningkatan menjelang akhir pengamatan. Pada bioreaktor dengan konsentrasi POME 5.000 mg sCOD /L, terjadi kenaikan nilai VFA secara drastis mulai dari hari ke-85.

Keempat proses peruraian anaerobik terjadi secara simultan (Ayu dkk. 2017). Pada grafik konsumsi sCOD, meskipun bioreaktor 16.000 dan 11.000 mg sCOD/L terlihat konstan, mikroorganisme asidogen dan asetogen mengubah sCOD yang ada menjadi asam organik yang kemudian dianalisis sebagai VFA. Sejumlah VFA yang tersedia akan digunakan oleh mikroorganisme metanogen sebagai bahan baku pembuatan gas metana. Namun demikian, belum diketahui bagaimana dinamika mikroorganisme yang terjadi selama proses.

Nilai VFA yang sangat tinggi namun gas metana yang dihasilkan sangat sedikit menunjukkan adanya ketidakseimbangan reaksi yang disebabkan oleh akumulasi asam (Mao dkk. 2019). Asam-asam yang terbentuk terlalu banyak selama proses peruraian dapat menghambat mikroorganisme metanogen (Ravi dkk. 2018). Mikroorganisme metanogen yang ada pada bioreaktor tersebut kemungkinan tidak dapat mengonsumsi banyaknya asam-asam volatil yang tertinggal dalam sistem bioreaktor sehingga tidak menghasilkan gas metana (Gómez dkk. 2006). Asam volatil adalah salah satu faktor kritis dalam proses peruraian anaerobik. Kadar VFA sekitar 500 mg/L dianggap batas wajar sedangkan 1500 mg/L merupakan batas maksimal VFA agar proses peruraian anaerob tidak terjadi inhibisi (Wang dkk. 2021).

4. KESIMPULAN

Performa proses peruraian anaerobik termofilik pada konsentrasi POME 11.000 mg sCOD/L dan 16.000 mg sCOD/L tidak memberikan hasil metana yang berbeda secara signifikan.



GAMBAR 4. Kadar VFA pada konsentrasi POME 16.000, 11.000, dan 5.000 mg sCOD/L beserta peningkatan OLRnya.

Hal ini menunjukkan bahwa sampai konsentrasi tertinggi yang diuji dalam penelitian ini yaitu 16.000 mg sCOD/L belum terjadi inhibisi. Pada konsentrasi POME 5000 mg sCOD/L, justru terjadi akumulasi asam volatil dalam proses anaerobik yang menghambat proses metanogenesis sehingga tidak terbentuk gas metana, maka konsentrasi ini tidak direkomendasikan sebagai substrat. Saran untuk penelitian lanjutan adalah perlu dilakukan analisis DNA untuk mengetahui komunitas mikroorganisme yang ada selama proses pada masing-masing konsentrasi POME.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini menggunakan peralatan yang dibiayai oleh kerjasama antara Grup Riset Reayasa Bioproses dengan PT. Wijaya Karya (Tbk) dalam RISPRO LPDP (PRJ-75/LPDP/2020). Bahan baku POME diperoleh dengan bantuan Dr. Dewi Agustina dan tim di Departemen Teknik Kimia di Universitas Lampung (UNILA).

DAFTAR PUSTAKA

A Aziz MM, Kassim KA, ElSergany M, Anuar S, Jorat ME, Yacob H, Ahsan A, Imteaz MA, Arifuzzaman. 2020. Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 119:109603. doi:10.1016/j.rser.2019.109603.

Ayu ED, Halim L, Mellyanawaty M, Sudibyo H, Budhijanto W. 2017. The effect of natural zeolite as microbial immobilization media in anaerobic digestion at various concentrations of palm oil mill effluent (POME). *AIP Proceedings*. 1840:110005. doi:10.1063/1.4982335.

Braz GHR, Fernandez-Gonzalez N, Lema JM, Carballa M. 2019. Organic overloading affects the microbial interactions during anaerobic digestion in sewage sludge reactors. *Chemosphere*. 222:323–332. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.01.124.

Choong YY, Chou KW, Norli I. 2018. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82:2993–3006. doi:10.1016/j.rser.2017.10.036.

Feng S, Hong X, Wang T, Huang X, Tong Y, Yang H. 2019. Reutilization of high COD leachate via recirculation strategy for methane production in anaerobic digestion of municipal solid waste: performance and dynamic of metha-

- nogen community. *Bioresource Technology*. 288:121509. doi:10.1016/j.biortech.2019.121509.
- Filer J, Ding HH, Chang S. 2019. Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research. *Water*. 11(5):921. doi:10.3390/w11050921.
- Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia. 2021. Refleksi Industri Sawit 2020 & Prospek 2021. Jakarta: Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia. <https://gapki.id/news/18768/refleksi-industri-sawit-2020-prospek-2021>.
- Goswami R, Chattopadhyay P, Shome A, Banerjee SN, Chakraborty AK, Mathew AK, Chaudhury S. 2016. An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management. *3 Biotech*. 6(1):72. doi:10.1007/s13205-016-0395-9.
- Gómez X, Cuertos MJ, Cara J, Morán A, García AI. 2006. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*. 31(12):2017–2024. doi:10.1016/j.renene.2005.09.029.
- Hagos K, Zong J, Li D, Liu C, Lu X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76:1485–1496. doi:10.1016/j.rser.2016.11.184.
- Mao C, Xi J, Feng Y, Wang X, Ren G. 2019. Biogas production and synergistic correlations of systematic parameters during batch anaerobic digestion of corn straw. *Renewable Energy*. 132:1271–1279. doi:10.1016/j.renene.2018.09.009.
- Martin DD, Ciulla RA, Roberts MF. 1999. Osmoadaptation in Archaea. *Applied and Environmental Microbiology*. 65(5):1815–1825. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC91261/>.
- Meesap K, Boonapatcharoen N, Techkarnjanaruk S, Chairasert P. 2012. Microbial communities and their performances in anaerobic hybrid sludge bed-fixed film reactor for treatment of palm oil mill effluent under various organic pollutant concentrations. *BioMed Research International*. 2012:1–11. doi:10.1155/2012/902707.
- Mellyanawaty M, Purnomo CW, Budhijanto W. 2017. Pengaruh penambahan zeolit alam termodifikasi sebagai media imobilisasi bakteri terhadap dekomposisi material organik secara anaerob. *Jurnal Rekayasa Proses*. 11(1):36–42. doi:10.22146/jrekpros.26353.
- Rahayu AS, Karsiwulan D, Yuwono H, Trisnawati I, Mulyasari S, Rahardjo S, Hokermin S, Paramita V. 2015. Handbook POME-to-biogas project development in Indonesia. Jakarta: Winrock International. <https://winrock.org/wp-content/uploads/2016/05/CIRCLE-Handbook-2nd-Editon-EN-25-Aug-2015-MASTER-rev02-final-new02-edited.pdf>.
- Rajani A, Kusnadi, Santosa A, Saepudin A, Gobikrishnan S, Andriani D. 2019. Review on biogas from palm oil mill effluent (POME): challenges and opportunities in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 293(1):012004. doi:10.1088/1755-1315/293/1/012004.
- Ravi PP, Lindner J, Oechsner H, Lemmer A. 2018. Effects of target pH-value on organic acids and methane production in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresource Technology*. 247:96–102. doi:10.1016/j.biortech.2017.09.068.
- Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. 2018a. 5220 chemical oxygen demand (COD). In: Lipps W, Baxter T, Braun-Howland E, editors. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: APHA Press. doi:10.2105/SMWW.2882.103.
- Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. 2018b. 5560 organic and volatile acids. In: Lipps W, Baxter T, Braun-Howland E, editors. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: APHA Press. doi:10.2105/SMWW.2882.103.
- Tanimu MI, Ghazi TIM, Harun MR, Idris A. 2015. Effect of feed loading on biogas methane production in batch mesophilic anaerobic digesters treating food waste. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*. 5(1):39–44. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153210285>.
- Wang B, Strömberg S, Li C, Nges IA, Nistor M, Deng L, Liu J. 2015. Effects of substrate concentration on methane potential and degradation kinetics in batch anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 194:240–246. doi:10.1016/j.biortech.2015.07.034.
- Wang H, Fotidis IA, Yan Q, Angelidaki I. 2021. Feeding strategies of continuous biomethanation processes during increasing organic loading with lipids or glucose for avoiding potential inhibition. *Bioresource Technology*. 327:124812. doi:10.1016/j.biortech.2021.124812.
- Zhang W, Lang Q, Wu S, Li W, Bah H, Dong R. 2014. Anaerobic digestion characteristics of pig manures depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China. *Bioresource Technology*. 156:63–69. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.013.