



ARTIKEL PENELITIAN

Perbandingan jenis media imobilisasi terhadap kinerja proses peruraian anaerob termofilik *palm oil mill effluent*

Deni Frans Sakka^{1,*}, Salsabilla Fitri Millenia², Irfan Dwidya Prijambada^{1,3}

¹Program Studi Bioteknologi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Jl Teknik Utara, Kocoran, Depok, Sleman Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl Grafika No. 2, Mlati, Sleman Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

³Departemen Mikrobiologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Karang Malang, Caturtunggal, Depok, Sleman Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

Disubmit 6 Oktober 2021; direvisi 16 November 2021; diterima 15 Desember 2021



OBJECTIVES Palm oil mill effluent (POME) is wastewater with high organic matter, the raw material of biogas production through anaerobic digestion. In anaerobic digestion, the washout effect frequently becomes a problem, along with the increasing organic loading rate in a continuous system. Therefore, the addition of immobilization media was carried out to reduce this risk. This study aims to evaluate the effect of immobilization media type and arrangement on the performance of thermophilic anaerobic digestion of POME. **METHODS** Two immobilization media were evaluated, i.e., carbon fiber textile (CFT) media and natural zeolite particles. The anaerobic process performance was determined by measuring the concentration of volatile fatty acids, soluble chemical oxygen demand (sCOD), and methane (CH₄) yield. **RESULTS** This study indicated that the immobilization media led to higher CH₄ yields than the reactor without immobilization media. The CH₄ yield of the reactor with natural zeolite was 0.3487 L/g sCOD, 0.3050 L/g sCOD in the reactor with CFT media, and 0.2873 L/g sCOD in the reactor without immobilization media. **CONCLUSIONS** The results showed that only natural zeolite can maintain reactor performance when the temperature accidentally increased with a recovery period of 14 days.

KEYWORDS anaerobic digestion; biogas; carbon fiber textile; natural zeolite; POME.

TUJUAN *Palm oil mill effluent* (POME) merupakan limbah cair dengan kandungan organik yang tinggi sebagai bahan baku produksi biogas melalui peruraian anaerob. Dalam peruraian anaerob, efek *washout* selalu menjadi masalah seiring dengan meningkatnya *organic loading rate* pada sistem kontinu. Oleh karena itu, dilakukan penambahan media imobilisasi untuk mengurangi risiko tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jenis dan pengaturan media imobilisasi terhadap kinerja peruraian anaerob termofilik POME. **METODE** Dua media imobilisasi yang diuji yaitu media jenis *carbon fiber textile* (CFT) dan media berupa partikel zeolit alam. Kinerja proses anaerob ditentukan dengan mengukur konsentrasi asam lemak volatil, *soluble chemical oxygen demand* (sCOD) dan *yield* metana (CH₄). **HASIL** Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa reaktor dengan media imobilisasi menghasilkan *yield* CH₄ yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tanpa media imobilisasi. *Yield* CH₄ reaktor dengan zeolit alam sebesar 0,3487 L/g sCOD, 0,3050 L/g sCOD pada reaktor dengan media CFT, dan 0,2873 L/g sCOD pada reaktor tanpa media imobilisasi. **KESIMPULAN** Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya zeolit alam yang dapat mempertahankan performa reaktor saat mengalami gangguan peningkatan suhu secara tiba-tiba dengan masa *recovery* selama 14 hari.

KATA KUNCI biogas; *carbon fiber textile*; peruraian anaerobik; POME; zeolit alam.

1. PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan komoditas pertanian terbesar di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, luas area perkebunan kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2019 diperkirakan mencapai 14,60 juta hektar. Luas area perkebunan tersebut menjadikan Indonesia sebagai negara produsen *crude palm oil* (CPO) terbesar di dunia dengan total produksi sebesar 48,42 juta ton pada tahun 2019. Produksi CPO menghasilkan limbah cair yang dikenal dengan istilah *palm oil mill effluent* (POME) sebanyak 2,5 hingga 3,75 ton untuk setiap sa-

*Korespondensi: sdenifrans@mail.ugm.ac.id

tu ton CPO (Chin dkk. 2013). *Palm oil mill effluent* merupakan limbah organik kental, berwarna coklat, memiliki bau yang tajam dan tidak beracun di alam (Lim dkk. 2020). Kandungan senyawa kimia pada POME meliputi karbohidrat, protein, senyawa nitrogen, lipid, dan mineral dengan konsentrasi yang tinggi (Garritano dkk. 2018). Kandungan senyawa inilah yang menyebabkan POME dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi biogas melalui peruraian anaerob.

Peruraian anaerob akan menghasilkan gas metana yang dapat digunakan sebagai bioenergi pengganti energi fosil. Peruraian anaerob dianggap sebagai metode yang paling efisien karena memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi dalam bentuk metana, produksi lumpur rendah dan residu yang dihasilkan dapat digunakan sebagai kompos (Mansor dkk. 2017). Peruraian anaerob dipengaruhi oleh faktor lingkungan, salah satunya adalah suhu. Proses anaerob dapat dioperasikan pada kondisi mesofilik (37°C) dan pada kondisi termofilik (55°C). Saat ini, proses anaerob pada kondisi termofilik telah menarik perhatian banyak peneliti (O-Thong dkk. 2016; Jamali dkk. 2019; Khadaroo dkk. 2020). Hal ini disebabkan karena proses anaerob termofilik memiliki beberapa keuntungan seperti laju pertumbuhan mikroorganisme dan proses fermentasi berlangsung lebih cepat sehingga biogas yang dihasilkan lebih tinggi dari pada proses mesofilik, serta destruksi mikroorganisme patogen yang lebih baik (Vindis dkk. 2009). Salah satu permasalahan yang sering terjadi dalam proses anaerob adalah adanya efek *washout* atau hilangnya mikroorganisme dalam reaktor seiring dengan meningkatnya laju alir umpan atau *organic loading rate* (OLR) pada sistem kontinu. Penambahan media imobilisasi ke dalam reaktor dapat menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut.

Media imobilisasi akan memberi tempat bagi mikroorganisme untuk menempel lalu mikroorganisme akan diam pada permukaan media sehingga tidak akan bergerak bebas pada fase cair dalam sistem sehingga mikroorganisme tidak akan mudah untuk mengalami *washout* (An dkk. 2008). Selain itu, media imobilisasi juga dapat meningkatkan stabilitas aktivitas mikroorganisme, ketahanan terhadap zat beracun, logam berat, pelarut, pH, dan suhu (Martins dkk. 2013; Żur dkk. 2016). Media imobilisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit alam dan media CFT. Kedua media imobilisasi tersebut dipilih karena memiliki porositas, hidrofobitas dan luas permukaan yang tinggi, memiliki ketahanan terhadap bahan kimia dan panas, tidak dapat larut dan terurai, memiliki kompatibilitas yang tinggi terhadap mikroorganisme, serta bisa diregenerasi dan dapat digunakan kembali (Martins dkk. 2013; Żur dkk. 2016; Zdarta dkk. 2018; Pörtner dan Faschian 2019).

Zeolit alam telah banyak dimanfaatkan sebagai media imobilisasi pada peruraian anaerob karena zeolit dapat menetralkan media biologis dengan pertukaran kation serta dapat mengikat senyawa toksik seperti senyawa fenolik, sulfur, dan amonia yang dapat mengganggu pertumbuhan mikroorganisme pada proses peruraian anaerob (Montalvo dkk. 2012; Wijesinghe dkk. 2018; Mellyanawaty dkk. 2019; Ciekowska dkk. 2020).

Penggunaan *fixed bed* dari berbagai bahan polimer sintetis dalam bentuk anyaman serat maupun membran pada reaktor anaerob telah banyak dilakukan. Beberapa alasan penggunaannya adalah desain yang sederhana, lebih stabil

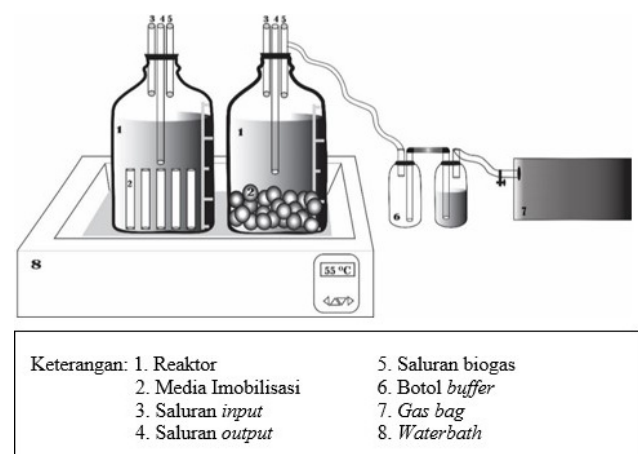
untuk pengolahan limbah cair, lebih banyak menyerap sel karena luas permukaan yang tinggi, interaksi antar sel dan matriks dapat mengatasi masalah permeabilitas dari membran sel, dan laju pertumbuhan mikroorganisme yang tinggi akibat pembentukan biofilm yang dapat mengikat nutrisi sehingga dapat meningkatkan laju pertumbuhan mikroorganisme (Verbelen dkk. 2006; Martins dkk. 2013; Djalma Nunes Ferraz Júnior dkk. 2014; Eş dkk. 2015; Żur dkk. 2016). Walaupun penggunaan zeolit alam dan *fixed bed* berbahan polimer telah banyak dilakukan, namun media polimer jenis *carbon fiber textile* (CFT) masih sangat jarang digunakan dan hanya pernah digunakan pada peruraian limbah sintesis pada kondisi mesofilik (37°C) (Sasaki dkk. 2009). Penggunaan zeolit alam pada proses peruraian anaerob POME secara termofilik juga masih sangat baru. Selain itu, kedua media imobilisasi tersebut belum pernah dibandingkan penggunaannya dalam penelitian yang sama pada proses peruraian anaerob POME pada kondisi operasi termofilik (55°C). Oleh sebab itu, dalam penelitian ini digunakan kedua media imobilisasi tersebut untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja proses peruraian anaerob POME pada kondisi termofilik.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan dan alat penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah POME yang berasal dari bak penampung limbah POME di PT. Perkebunan Nusantara VII Lampung dengan kandungan *soluble chemical oxygen demand* (sCOD) 16.000 mg/L. Inokulum untuk proses peruraian adalah *digested cow manure* (DCM) yang diperoleh dari bak penampungan peternakan sapi di Kaliurang, Yogyakarta dengan kandungan COD sebesar 17.500 mg/L. Media imobilisasi yang digunakan adalah CFT dan zeolit alam yang diperoleh dari Tasikmalaya, Jawa Barat. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis VFA dan sCOD adalah akuades, H₂SO₄ 95–97% (Merck), NaOH (Merck), AgSO₄ (Merck), HgSO₄ (EMSURE), K₂Cr₂O₇ (EMSURE), CH₃COOH (Merck).

Reaktor peruraian anaerob yang digunakan berupa botol Duran dengan kapasitas 1 liter yang dimodifikasi dengan sumbat karet dan tiga buah pipa kaca sebagai saluran *input*, saluran *output* dan saluran biogas serta dilengkapi dengan botol *buffer*. Selain itu, juga digunakan *waterbath* untuk



GAMBAR 1. Rangkaian alat peruraian anaerob POME secara kontinu (A) CFT; (B) Zeolit alam.

memperoleh suhu 55°C pada reaktor. Rangkaian alat yang digunakan disajikan pada Gambar 1.

2.2 Pembuatan media imobilisasi

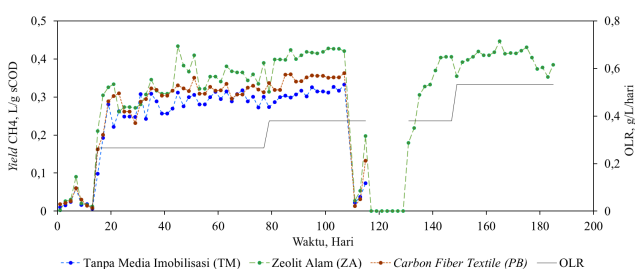
Media imobilisasi yang digunakan adalah zeolit alam dan CFT. Zeolit alam diayak menggunakan ayakan dengan ukuran 2 mm kemudian dicuci dengan akuades dan disaring lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C selama 3 jam (Cahyono dkk. 2018), sedangkan media CFT dililitkan pada batang silinder dengan tinggi 10 cm dan diameter 1,5 cm. Jumlah zeolit alam yang digunakan adalah 20 g/sCOD substrat (Wang dkk. 2011). Sehingga, perlu ditentukan kadar sCOD substrat dan volume kerja reaktor untuk menentukan jumlah total zeolit yang digunakan dalam satu reaktor. Kadar sCOD substrat POME dalam penelitian ini adalah 16.000 mg/L dan volume kerja reaktor yaitu 700 mL sehingga massa zeolit yang digunakan dalam satu reaktor adalah 224 gram. Luas permukaan luar zeolit alam dihitung dengan mengasumsikan bahwa partikel zeolit alam berbentuk bulat dengan diameter 2 mm sehingga diperoleh luas permukaan luar yaitu 0,00197 m²/g zeolit atau 0,44128 m²/reaktor. Pembuatan media CFT didasarkan pada luas permukaan luar zeolit yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian, untuk memperoleh luas permukaan yang sama antara media CFT dan zeolit alam digunakan media CFT dengan panjang 0,442 m dan lebar 0,1 m sebanyak 5 buah untuk setiap reaktor dengan asumsi bahwa media CFT tersebut memiliki dua sisi luar.

2.3 Proses peruraian anaerob POME secara kontinu

Pada penelitian ini digunakan reaktor anaerob dengan media imobilisasi zeolit alam (ZA), media CFT (PB) dan reaktor anaerob tanpa media imobilisasi (TM). Semua reaktor diisi dengan inokulum DCM sebanyak 700 mL kemudian zeolit alam dan media CFT yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam reaktor yang berbeda sebagai variasi media imobilisasi. Setelah masing-masing reaktor diisi dengan inokulum maka reaktor diaklimatisasi pada suhu 55°C sampai produksi gas dari inokulum telah habis. Selanjutnya dilakukan pengumpanan menggunakan substrat POME dengan sCOD 16.000 g/L dengan OLR 0,265 g/L/hari, 0,380 g/L/hari, dan 0,533 g/L/hari. *organic loading rate* (OLR) merupakan besaran yang menyatakan jumlah senyawa organik dalam substrat yang diuraikan oleh mikroorganisme di dalam reaktor per unit volume per hari (Indriyati 2018).

2.4 Metode eksperimen

Selama proses penelitian, dilakukan beberapa pengamatan antara lain pengukuran volume biogas, pengukuran kadar



GAMBAR 2. Yield CH₄ selama proses peruraian anaerob.

metana, pengukuran pH yang dilakukan setiap hari. Selain itu, dilakukan sampling dua kali dalam seminggu untuk analisis sCOD dan *volatile fatty acid* (VFA). Pengukuran volume biogas dilakukan dengan menggunakan *syringe* 100 mL, pengukuran kadar metana dilakukan dengan menggunakan *infrared gas analyser* (Riken Keiki RI-557) dan pengukuran pH menggunakan Hanna pH *electronic paper* (Hanna Instrument tipe HI98107). Sampel yang dikumpulkan dua kali dalam seminggu sebelum dianalisis konsentrasi sCOD dan VFA, terlebih dahulu disentrifugasi selama 10 menit dengan kecepatan 1000 rpm. Analisis sCOD dilakukan dengan menggunakan metode kolorimetri (HACH *colorimeter* DR900) dan analisis VFA dengan menggunakan metode distilasi yang dilakukan mengikuti standar *Examination of Water and Wastewater* (Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation 2018a,b).

Data hasil pengukuran volume biogas dan kadar metana dinyatakan dalam *yield* CH₄ dengan Persamaan 1 dan konsentrasi sCOD setiap sampel dinyatakan dalam bentuk sCOD *removal* melalui Persamaan 2. Hasil perhitungan *yield* CH₄, sCOD *removal* dan konsentrasi VFA dianalisis secara statistik menggunakan *one-way ANOVA* pada program Ms.Excel.

$$\text{Yield}_{\text{CH}_4} = \frac{\frac{\text{volume biogas} \times \% \text{CH}_4}{100}}{\left(\frac{\text{Volume substrat}}{1000} \times \text{sCOD substrat} \right)} \quad (1)$$

$$\text{sCOD}_{\text{removal}} = \frac{(\text{sCOD substrat} \times \text{Volume substrat}) - (\text{sCOD effluent} \times \text{sCOD substrat})}{(\text{sCOD substrat} \times \text{Volume substrat})} \times 100\% \quad (2)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh media imobilisasi terhadap *yield* CH₄ (metana)

Hasil pengukuran volume biogas dan kadar metana yang terbentuk selama proses peruraian anaerob dinyatakan dalam *yield* CH₄ yang ditampilkan dalam grafik *yield* CH₄ pada Gambar 2. *Yield* CH₄ pada ketiga reaktor dengan media imobilisasi yang berbeda. *Yield* CH₄ hari ke-1 hingga 13 merupakan *yield* saat proses aklimatisasi inokulum. *Yield* tersebut cenderung masih sangat rendah yang disebabkan oleh rendahnya kandungan senyawa organik pada inokulum tersebut dan mikroorganisme pembentuk metana yang masih rendah. Proses aklimatisasi bertujuan untuk menumbuhkan mikroorganisme anaerob termofilik yang dibutuhkan dalam proses peruraian anaerob. Selain itu, proses aklimatisasi juga berguna untuk membunuh mikroorganisme patogen yang dapat mengganggu proses peruraian.

Setelah proses aklimatisasi selesai, maka dilakukan pengumpanan substrat POME dari tingkat OLR terendah yaitu 0,265 g/L/hari. Terlihat pada awal bahwa *yield* CH₄ yang terbentuk juga masih rendah. Hal ini disebabkan karena mikroorganisme metanogen yang berperan dalam proses pembentukan gas metana masih sangat rendah populasinya. Diketahui bahwa mikroorganisme tersebut merupakan mikroorganisme yang memiliki pertumbuhan yang cenderung lambat (Demirel dan Yenigün 2002). Untuk melihat pengaruh penggunaan media imobilisasi terhadap *yield* CH₄ dari

TABEL 1. Yield CH₄.

Reaktor	OLR (g/L/hari)	Yield CH ₄ (L/g sCOD)	Yield CH ₄ setelah gangguan (L/g sCOD)	Rata-rata Yield CH ₄ (L/g sCOD)
TM	0,265	0,2728	0,1088	0,2805
	0,380	0,3114	0,1088	0,2805
	0,533	0	0,1088	0,2805
ZA	0,265	0,3268 + 0,03	0,1883 + 0,01	0,3487 + 0,03
	0,380	0,4080 + 0,01	0,1883 + 0,01	0,3487 + 0,03
	0,533	0,4120 + 0,03	0,1883 + 0,01	0,3487 + 0,03
PB	0,265	0,2982 + 0,02	0,1608 + 0,01	0,3107 + 0,01
	0,380	0,3466 + 0,01	0,1608 + 0,01	0,3107 + 0,01
	0,533	0	0,1608 + 0,01	0,3107 + 0,01

ketiga reaktor dengan media imobilisasi yang berbeda, maka dilakukan uji statistik *one-way* ANOVA. Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan dari penggunaan media imobilisasi terhadap *yield* CH₄ dengan *P-value* < 0,05 yaitu sebesar 0,0011. Hasil perhitungan *yield* CH₄ ketiga reaktor disajikan dalam Tabel 1.

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan OLR substrat POME mampu meningkatkan produksi metana pada proses peruraian anaerob. *Yield* CH₄ ketiga reaktor dengan media imobilisasi yang berbeda menunjukkan bahwa reaktor ZA memiliki *yield* CH₄ yang lebih tinggi dibandingkan reaktor PB dan TM. Hal ini membuktikan bahwa zeolit alam merupakan media imobilisasi yang paling baik sebagai tempat pelekatan dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam reaktor.

Proses peruraian mengalami gangguan peningkatan suhu secara tiba-tiba hingga 95°C pada hari ke-109, sehingga mikroorganisme yang berperan dalam proses peruraian mengalami gangguan fungsi metabolisme hingga kematian sel yang mengakibatkan reaktor tidak menghasilkan metana. Pada hari ke-113 hingga 115 terlihat bahwa ketiga reaktor telah mengalami *recovery*. Reaktor ZA mengalami *recovery* paling cepat lalu diikuti reaktor PB dan reaktor TM. Hal tersebut terlihat dari *yield* CH₄ yang dihasilkan pada hari ke-115 berturut-turut sebanyak 0,1980 ± 0,05 ; 0,1329 ± 0,04 ; dan 0,0739 L/g sCOD POME. Pada hari ke-116 terjadi kerusakan sensor *waterbath* kedua kali yang mengakibatkan peningkatan suhu hingga 110°C di dalam reaktor, sehingga mikroorganisme mengalami gangguan. Hal itu terlihat pada grafik bahwa setelah mengalami gangguan kedua, reaktor PB dan reaktor TM tidak menghasilkan biogas lagi sedangkan reaktor ZA mengalami *recovery* pada hari ke-130 atau 14 hari se-

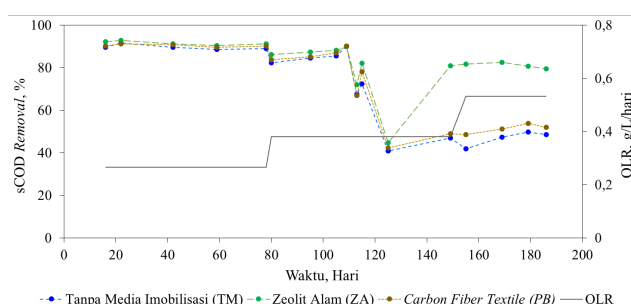
telah gangguan. Kemampuan reaktor ZA dalam mempertahankan performa setelah mengalami gangguan disebabkan karena zeolit alam memiliki kestabilan terhadap panas dan memiliki pori-pori sebagai tempat *entrapment* mikroorganisme sehingga mikroorganisme dapat terhindar dari gangguan mekanis seperti peningkatan suhu (Zdarta dkk. 2018).

3.2 Pengaruh penggunaan media imobilisasi terhadap efisiensi sCOD removal

Hasil pengukuran konsentrasi sCOD dapat dilihat pada Gambar 3. Penurunan sCOD atau *sCOD removal effluent* POME untuk ketiga reaktor pada tingkat OLR terendah yakni 0,265 g/l/hari cenderung stabil dengan rata-rata 85,68% pada reaktor TM, 91,54 ± 0,28% pada reaktor ZA, dan 90,3 ± 0,62% pada reaktor PB. Saat terjadi kenaikan OLR, ketiga reaktor mengalami penurunan persentase sCOD *removal*. Hal ini disebabkan karena mikroorganisme kembali beradaptasi dengan jumlah kandungan organik yang lebih tinggi dari sebelumnya, akan tetapi persentase sCOD *removal* kembali mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

Pada Gambar 3, terlihat bahwa persentase sCOD *removal* ketiga reaktor tidak memiliki perbedaan yang signifikan pada OLR 0,265 g/l/hari maupun pada OLR 0,380 g/l/hari. Hasil uji ANOVA menunjukkan *P-value* > 0,05 yaitu sebesar 0,5 yang mengindikasikan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan dari penurunan sCOD *removal* pada ketiga reaktor. Namun, secara matematis sederhana penurunan sCOD tertinggi terjadi pada reaktor ZA, lalu diikuti reaktor PB dan reaktor TM. Rata-rata sCOD *removal* ketiga reaktor sebelum mengalami gangguan adalah 89,93 ± 0,37% pada reaktor ZA, 88,64 ± 0,60% pada reaktor PB, dan 87,85% pada reaktor TM.

Hasil ini menunjukkan bahwa reaktor ZA memiliki efisiensi penurunan sCOD yang lebih baik dibandingkan reaktor PB dan reaktor TM. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan bakteri asidogen cenderung lebih banyak pada reaktor ZA dibandingkan reaktor PB dan reaktor TM. Terjadinya peningkatan suhu pada hari ke-109 mengakibatkan aktivitas bakteri asidogen terganggu sehingga laju penurunan sCOD mengalami penurunan setelah gangguan. Pada hari ke-115 diketahui bahwa ketiga reaktor mulai mengalami *recovery*. Hal itu terlihat dari peningkatan persentase sCOD *removal* ketiga reaktor. Terlihat pada Gambar 3 bahwa penurunan sCOD lebih cepat pada reaktor ZA lalu diikuti dengan reaktor PB dan reaktor TM dengan persentase sCOD *removal*



GAMBAR 3. sCOD removal effluent setiap reaktor.

rata-rata berturut-turut sebesar $82,03 \pm 0,22\%$, $78,09 \pm 0,04\%$, dan $72,50\%$.

Gangguan peningkatan suhu yang kedua mengakibatkan laju penurunan sCOD pada semua reaktor mengalami penurunan yang sangat signifikan yakni hanya sekitar $40,88\%$ pada reaktor TM, $44,66 \pm 0,40\%$ pada reaktor ZA, dan $42,28 \pm 0,31\%$ pada reaktor PB, namun pada hari ke-167 penurunan sCOD pada ketiga reaktor kembali mengalami peningkatan. Peningkatan persentase penurunan sCOD paling signifikan pada reaktor ZA yakni sebesar $82,53 \pm 1,28\%$, lalu diikuti dengan reaktor PB sebesar $48,09 \pm 2,16\%$, dan reaktor TM sebesar $41,00\%$. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit alam memiliki kemampuan untuk mempertahankan aktivitas mikroorganisme di dalam reaktor dengan baik sehingga mampu mengurai sCOD substrat dengan persentase penurunan sCOD yang lebih tinggi dibandingkan kedua reaktor lainnya.

3.3 Pengaruh penggunaan media imobilisasi terhadap efisiensi peningkatan volatile fatty acid (VFA)

Volatile fatty acid (VFA) merupakan produk *intermediate* yang dihasilkan oleh bakteri asidogenik. Produk *intermediate* tersebut berupa asam karboksilat dengan atom karbon C1–C4. Adapun hasil analisis VFA *effluent* disajikan pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa konsentrasi VFA ketiga reaktor pada OLR 0,265 g/L/hari juga tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Saat dilakukan peningkatan OLR terhadap ketiga reaktor, konsentrasi VFA ketiga reaktor mengalami peningkatan dan reaktor TM memiliki konsentrasi VFA yang lebih tinggi dibandingkan dua reaktor lainnya. Terjadinya peningkatan disebabkan karena mikroorganisme masih beradaptasi dengan peningkatan OLR yang diberikan sehingga VFA yang tersedia belum dapat dikonversi secara total menjadi biogas. Rata-rata konsentrasi VFA ketiga reaktor yaitu 1.303 mg/L pada reaktor TM, $1,128 \pm 27,23$ mg/L pada reaktor ZA, dan $1,121 \pm 35,77$ mg/L pada reaktor PB. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan konsentrasi VFA yang signifikan antara ketiga reaktor dengan *P-value* > 0,05 atau sebesar 0,06.

Saat terjadi peningkatan suhu, konsentrasi VFA meningkat hingga 3.935 mg/L tetapi perlahan kembali menurun yang mengindikasikan bahwa aktivitas bakteri metanogen telah mengalami *recovery* yang ditandai dengan peningkatan *yield* CH₄. Konsentrasi VFA terendah setelah gangguan pertama yaitu pada reaktor ZA yaitu sebesar 1.962 mg/L lalu diikuti reaktor PB dan reaktor TM masing-masing sebesar 2.480 mg/L dan 2.769 mg/L. Setelah mengalami gangguan peningkatan suhu yang kedua, ketiga reaktor mengalami peningkatan VFA yang disebabkan karena adanya penambahan substrat sebanyak 250 mL untuk mengoreksi volume re-

aktor. Setelah volume dikoreksi, reaktor TM dan reaktor dengan PB tidak lagi mengalami penurunan VFA yang signifikan yang mengindikasikan bahwa aktivitas metabolisme bakteri metanogen pada kedua reaktor tidak berjalan dengan baik. Tingginya kandungan VFA tersebut menjadi faktor inhibisi bagi mikroorganisme metanogen yang berperan dalam mengonversi asam asetat, H₂ dan CO₂ menjadi metana (Demirel dan Yenigün 2002). Selain itu, adanya kematian sel dan adanya bakteri patogen juga dapat menjadi faktor pengganggu proses metabolisme mikroorganisme metanogen. Hal yang berbeda terjadi pada reaktor ZA yang kembali mengalami penurunan konsentrasi VFA dua minggu setelah gangguan atau pada hari ke-130.

4. KESIMPULAN

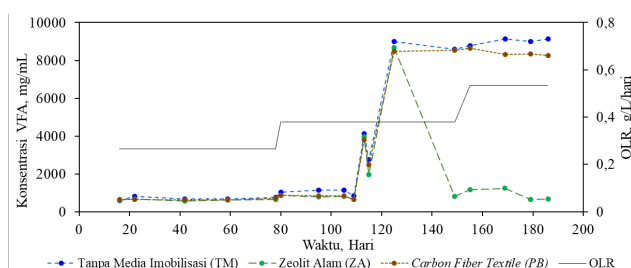
Media imobilisasi zeolit alam dan media CFT memiliki pengaruh terhadap performa proses peruraian anaerob termofilik POME dengan inokulum DCM. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa rata-rata *yield* CH₄ reaktor ZA sebesar 0,3487 L/g sCOD, reaktor PB sebesar 0,3050 L/g sCOD, dan reaktor TM sebesar 0,2873 L/g sCOD. Hasil *yiled* CH₄ tersebut menunjukkan bahwa zeolit alam merupakan media imobilisasi terbaik pada proses peruraian anaerob. Selain itu, dalam penelitian ini hanya reaktor dengan zeolit alam yang mampu mempertahankan kinerja reaktor setelah mengalami gangguan peningkatan suhu secara tiba-tiba. Hal ini terlihat dari hasil yang diperoleh yang menunjukkan rata-rata *yield* CH₄ reaktor dengan zeolit alam sebesar 0,3740 L/g sCOD POME sedangkan reaktor dengan media CFT tidak lagi menghasilkan metana setelah mengalami gangguan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini menggunakan peralatan yang dibiayai oleh kerjasama antara Grup Riset Rekayasa 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

- An T, Zhou L, Li G, Fu J, Sheng G. 2008. Recent patents on immobilized microorganism technology and its engineering application in wastewater treatment. *Recent Patents on Engineering*. 2(1):28–35. doi:10.2174/187221208783478543.
- Cahyono RB, Ismiyati S, Ginting SB, Mellyanawaty M, Budhijanto W. 2018. Characterization of modified zeolite as microbial immobilization media on POME anaerobic digestion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 316(1):012070. doi:10.1088/1757-899X/316/1/012070.
- Chin MJ, Poh PE, Tey BT, Chan ES, Chin KL. 2013. Biogas from palm oil mill effluent (POME): opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26:717–726. doi:10.1016/j.rser.2013.06.008.
- Ciezkowska M, Bajda T, Decewicz P, Dziewit L, Drewniak L. 2020. Effect of clinoptilolite and halloysite addition on biogas production and microbial community structure



GAMBAR 4. VFA *effluent* setiap reaktor.

- during anaerobic digestion. *Materials*. 13(18):4127. doi:[10.3390/ma13184127](https://doi.org/10.3390/ma13184127).
- Demirel B, Yenigün O. 2002. The effects of change in volatile fatty acid (VFA) composition on methanogenic upflow filter reactor (UFAF) performance. *Environmental Technology*. 23(10):1179–1187. doi:[10.1080/09593323208618336](https://doi.org/10.1080/09593323208618336).
- Djalma Nunes Ferraz Júnior A, Wenzel J, Etchebehere C, Zaiat M. 2014. Effect of organic loading rate on hydrogen production from sugarcane vinasse in thermophilic acidogenic packed bed reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 39(30):16852–16862. doi:[10.1016/j.ijhydene.2014.08.017](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.017).
- Eş I, Vieira JDG, Amaral AC. 2015. Principles, techniques, and applications of biocatalyst immobilization for industrial application. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 99(5):2065–2082. doi:[10.1007/s00253-015-6390-y](https://doi.org/10.1007/s00253-015-6390-y).
- Garritano AN, Faber MdO, De Sá LR, Ferreira-Leitão VS. 2018. Palm oil mill effluent (POME) as raw material for bi-hydrogen and methane production via dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 92(March 2017):676–684. doi:[10.1016/j.rser.2018.04.031](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.031).
- Indriyati I. 2018. Pengolahan limbah cair organik secara biologi menggunakan reaktor anaerobik lekat diam. *Jurnal Air Indonesia*. 1(3):340–343. doi:[10.29122/jai.v1i3.2361](https://doi.org/10.29122/jai.v1i3.2361).
- Jamali NS, Dzul Rashidi NF, Jahim JM, O-Thong S, Jehlee A, Engliman NS. 2019. Thermophilic biohydrogen production from palm oil mill effluent: effect of immobilized cells on granular activated carbon in fluidized bed reactor. *Food and Bioprocess Processing*. 117:231–240. doi:[10.1016/j.fbp.2019.07.012](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.012).
- Khadaroo SN, Grassia P, Gouwanda D, Poh PE. 2020. The impact of thermal pretreatment on various solid-liquid ratios of palm oil mill effluent (POME) for enhanced thermophilic anaerobic digestion performance. *Journal of Cleaner Production*. 261:121159. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.121159](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121159).
- Lim A, Chew JJ, Ngu LH, Ismadji S, Khaerudini DS, Sunarso J. 2020. Synthesis, characterization, adsorption isotherm, and kinetic study of oil palm trunk-derived activated carbon for tannin removal from aqueous solution. *ACS Omega*. 5(44):28673–28683. doi:[10.1021/acsomega.0c03811](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03811).
- Mansor UQA, Yahya A, Shafie NFA, Roslan QI, Manshor NM, Som AM, Nour AH, Hassan Z, Yunus RM. 2017. An overview of anaerobic treatment processes performance treating palm oil mill effluent (POME) past, present and future. *Advanced Science Letters*. 23(5):4179–4183. doi:[10.1166/asl.2017.8238](https://doi.org/10.1166/asl.2017.8238).
- Martins SCS, Martins CM, Fiúza LMCG, Santaella ST. 2013. Immobilization of microbial cells: a promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater. *African Journal of Biotechnology*. 12(28):4412–4418. doi:[10.5897/AJB12.2677](https://doi.org/10.5897/AJB12.2677).
- Mellyanawaty M, Alfiata Chusna FM, Nofiyanti E. 2019. Proses peruraian anaerobik palm oil mill effluent dengan media zeolit termodifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 13(1):16. doi:[10.22146/jrekpros.39206](https://doi.org/10.22146/jrekpros.39206).
- Montalvo S, Guerrero L, Borja R, Sánchez E, Milán Z, Cortés I, Angeles de la la Rubia M. 2012. Application of natural zeolites in anaerobic digestion processes: a review. *Applied Clay Science*. 58:125–133. doi:[10.1016/j.clay.2012.01.013](https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.013).
- O-Thong S, Suksong W, Promnuan K, Thipmune M, Mamin C, Prasertsan P. 2016. Two-stage thermophilic fermentation and mesophilic methanogenic process for bi-hydrothane production from palm oil mill effluent with methanogenic effluent recirculation for pH control. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(46):21702–21712. doi:[10.1016/j.ijhydene.2016.07.095](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.095).
- Pörtner R, Faschian R. 2019. Design and operation of fixed-bed bioreactors for immobilized bacterial culture. In: *Growing and Handling of Bacterial Cultures*. IntechOpen. p. 1–12. doi:[10.5772/intechopen.87944](https://doi.org/10.5772/intechopen.87944).
- Sasaki K, Morita M, Hirano Si, Ohmura N, Igarashi Y. 2009. Effect of adding carbon fiber textiles to methanogenic bioreactors used to treat an artificial garbage slurry. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 108(2):130–135. doi:[10.1016/j.jbiosc.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.03.003).
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.103).
- Verbelen PJ, De Schutter DP, Delvaux F, Verstrepen KJ, Delvaux FR. 2006. Immobilized yeast cell systems for continuous fermentation applications. *Biotechnology Letters*. 28(19):1515–1525. doi:[10.1007/s10529-006-9132-5](https://doi.org/10.1007/s10529-006-9132-5).
- Vindis P, Mursec B, Stajniko D. 2009. The comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. In: *DAAAM International scientific book 2009*. Vienna: DAAAM International Vienna. p. 251–260. doi:[10.2507/daaam.scibook.2009.27](https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2009.27).
- Wang Q, Yang Y, Yu C, Huang H, Kim M, Feng C, Zhang Z. 2011. Study on a fixed zeolite bioreactor for anaerobic digestion of ammonium-rich swine wastes. *Bioresource Technology*. 102(14):7064–7068. doi:[10.1016/j.biortech.2011.04.085](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.085).
- Wijesinghe DTN, Dassanayake KB, Scales PJ, Sommer SG, Chen D. 2018. Effect of Australian zeolite on methane production and ammonium removal during anaerobic digestion of swine manure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6(1):1233–1241. doi:[10.1016/j.jece.2018.01.028](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.028).
- Zdarta J, Meyer A, Jesionowski T, Pinelo M. 2018. A general overview of support materials for enzyme immobilization: characteristics, properties, practical utility. *Catalysts*. 8(2):92. doi:[10.3390/catal8020092](https://doi.org/10.3390/catal8020092).
- Žur J, Wojcieszynska D, Guzik U. 2016. Metabolic responses of bacterial cells to immobilization. *Molecules*. 21(7):958. doi:[10.3390/molecules21070958](https://doi.org/10.3390/molecules21070958).