

Proses Peruraian Anaerobik *Palm Oil Mill Effluent* dengan Media Zeolit Termodifikasi

Melly Mellyanawaty^{1,2*}, Firda Mahira Alfiata Chusna², Estin Nofiyanti¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tasikmalaya. Jl. Tamansari km. 2,5, Mulyasari Tasikmalaya 46169

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

*Alamat korespondensi: melly@umtas.ac.id

(Submisi: 28 September 2018; Revisi: 9 Februari 2019; Penerimaan: 14 Februari 2019)

ABSTRACT

This work evaluated the effect of modified zeolite as microbial immobilization medium in anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME). The affinity of microorganisms to attach and grow on the media surface could be increased by the addition of micro-nutrient into the media. The effect of micro-nutrient addition was studied in 1000 mL Erlenmeyer flask as batch reactors. Experiments were conducted for 30 days. The concentration of soluble chemical oxygen demand (COD) in substrate was 8000 mg/L. Zeolite was impregnated with nickel (Ni) and zinc (Zn) at individual concentration of 2.7×10^{-3} mg Ni/g zeolite and 3.5×10^{-3} mg Zn/g zeolite. The influence of each modified zeolite was determined by periodic measurement of sCOD, volatile fatty acid (VFA), pH, and biogas production. Cumulative biogas productions in this study were 252.44; 172.13; 57.70 ml from Ni-modified, Zn-modified and natural zeolites, respectively. The highest sCOD removal was obtained in reactor with Zn-modified zeolite with 38.22% removal, followed by 33.96% with Ni-modified zeolite, and 27.87% removal with natural zeolite.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; methane; palm oil mill effluent; zeolite

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh zeolit yang dimodifikasi sebagai media imobilisasi mikroorganisme pada proses anaerobik limbah *palm oil mill effluent* (POME). Afinitas mikroorganisme untuk melekat dan tumbuh di permukaan dapat meningkat dengan impregnasi mikronutrien pada media. Efek penambahan mikronutrien dipelajari dengan labu Erlenmeyer 1000 mL sebagai reaktor *batch*. Eksperimen dijalankan selama 30 hari. Konsentrasi *soluble chemical oxygen demand* (sCOD) substrat yang digunakan adalah 8000 mg/L. Zeolit terimpregnasi Ni dan Zn yang digunakan memiliki kadar $2,7 \times 10^{-3}$ mg Ni/g zeolit dan $3,5 \times 10^{-3}$ mg Zn/g zeolit. Pengaruh setiap zeolit yang dimodifikasi dievaluasi dengan mengukur konsentrasi sCOD, *volatile fatty acid* (VFA), pH, dan produksi biogas secara periodik. Akumulasi biogas penelitian ini sebesar 252,44; 172,13; 57,70 ml berturut-turut untuk zeolit modifikasi Ni, zeolit modifikasi Zn dan zeolit alam. Penurunan sCOD terbaik dihasilkan oleh zeolit termodifikasi Zn dengan nilai 38,22%, selanjutnya diikuti oleh zeolit termodifikasi Ni dan zeolit alam dengan nilai 33,96% dan 27,87%.

Kata kunci: *anaerobic digestion; biogas; metana; palm oil mill effluent; zeolit*

1. Pendahuluan

Saat ini, Indonesia adalah produsen minyak sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) terbesar di dunia. Setiap ton produksi CPO menghasilkan limbah cair berupa *palm oil mill effluent* (POME) sebanyak 2,5 hingga 3,75 ton (Chin dkk., 2013). Limbah POME bersifat asam dan berwarna kecoklatan, dengan nilai sCOD sebesar 45.000-100.000 mg/L (Chin dkk., 2013).

Selama ini, POME hanya ditampung dalam kolam-kolam terbuka dan dibiarkan terurai dengan sendirinya. Selain menghasilkan bau dan melepaskan gas rumah kaca, sistem ini membutuhkan area yang luas (Liew dkk., 2015). Namun di sisi lain, POME diidentifikasi berpotensi sebagai sumber energi terbarukan seperti metana dan hidrogen melalui proses peruraian anaerobik (Lam dan Lee, 2011; Hosseini dan Wahid, 2013). Dengan demikian, teknologi pengolahan limbah POME menggunakan reaktor semakin berkembang untuk mengatasi permasalahan dalam sistem pengolahan secara konvensional.

Proses konversi bahan organik menjadi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) berlangsung melalui tiga tahapan proses yaitu: hidrolisis, asidogenesis, serta metanogenesis. Pada tahap hidrolisis, bahan organik rantai panjang (seperti lipid, protein, karbohidrat) terdegradasi menjadi asam lemak, asam amino, dan glukosa. Asam lemak, asam amino, dan glukosa ini diubah menjadi asam organik seperti asetat, propionat, dan butirat oleh bakteri asidogen pada tahap asidogenesis. Produk dari tahap asidogenesis akan dikonversi oleh *archaea* metanogen menjadi biogas sebagai produk akhir (Anderson dkk., 2003; Gerardi, 2003; Deublein & Steinhauser, 2008; Seadi dkk., 2008).

Teknologi untuk mengonversi material organik menjadi biogas yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah *Anaerobic Fluidized Bed Reactor* (AFBR). Reaktor ini berisi media untuk mengimobilisasi mikroorganisme (Nicoletta dkk., 2000; Montalvo dkk., 2012; Burghate dan Ingole, 2013). Keberadaan media berbasis zeolit dapat mempercepat proses penurunan COD terlarut sebesar 85,69% dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme anaerob

(Ayu dkk., 2017; Halim dkk., 2017; Setyowati dkk., 2017). Keunggulan dari reaktor ini adalah efisiensinya yang lebih tinggi daripada reaktor biogas tanpa media imobilisasi.

Penelitian ini dilakukan dalam rangka memodifikasi zeolit sebagai media imobilisasi untuk diaplikasikan pada reaktor AFBR. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan mikronutrien pada zeolit, yaitu nikel (Ni) dan seng (Zn). Kation Ni dan Zn merupakan *trace element* yang ditemukan dalam struktur sel, karena unsur ini terlibat dalam sejumlah besar sistem enzimatik. Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh Ni dan Zn pada zeolit sebagai media imobilisasi dalam reaktor anaerobik secara *batch*.

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan penelitian

Palm oil mill effluent (POME) sebagai bahan baku utama dan berfungsi sebagai substrat dalam proses berasal dari PT. Perkebunan Nusantara VII (PTPN VII) Lampung. Inokulum yang digunakan dalam penelitian ini berupa luaran digester aktif yang diambil dari industri biodiesel yang beroperasi di daerah Jawa Timur. Zeolit alam sebagai media imobilisasi digunakan zeolit dari daerah Tasikmalaya, dengan ukuran partikel rata-rata 2-2,38 mm.

Bahan-bahan pendukung yang digunakan adalah akuades, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ p.a. (Merck), H_2SO_4 p.a. (Merck), HgSO_4 p.a. (Merck), Ag_2SO_4 p.a. (Merck), NaOH pelet p.a. (Merck), HCl p.a. (Merck), $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ p.a. (Merck), *phenolphthalein disodium salt* (Merck), alkohol 95%, NiSO_4 (Merck), ZnSO_4 (Merck) dan CH_3COOH *glacial* (Merck).

2.2 Cara Penelitian

2.2.1 Pembuatan media imobilisasi

Pembuatan media imobilisasi dilakukan dengan cara mengimpregnasi kation ke dalam zeolit. Sebelum dilakukan impregnasi, zeolit terlebih dahulu dihomionkan dengan cara merendam zeolit menggunakan larutan NaCl. Setelah dilakukan perendaman dengan NaCl, zeolit dicuci menggunakan aquabidestilata. Impregnasi dilakukan dengan cara merendam

zeolit yang telah dihomioionkan ke dalam larutan Zn dan Ni dengan konsentrasi 200 ppm. Konsentrasi ini diperoleh berdasarkan percobaan pendahuluan. Dari hasil analisis zeolit alam menggunakan ICP (Perkin Elmer Optima 8300) diperoleh kandungan Ni dan Zn awal dan zeolit terimpregnasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai kandungan *trace element* Ni dan Zn pada zeolit yang telah terimpregnasi sesuai dengan rentang nilai yang dibutuhkan oleh mikroorganisme anaerobik.

Tabel 1. Kandungan *trace element* pada zeolit

<i>Trace element</i>	Unit	Zeolit alam	Zeolit terimpregnasi
Zn	mg/L	$0,9 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$
Ni	mg/L	$1,9 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-3}$

2.2.2 Proses Peruraian Anaerobik

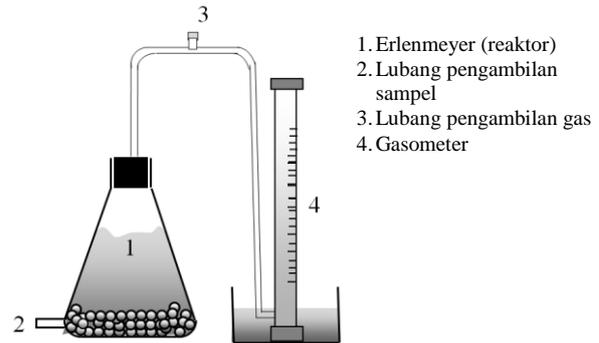
Substrat POME dan luaran digester aktif dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 1000 mL sebagai reaktor yang telah diisi zeolit. Perbandingan volume substrat POME dan inokulum adalah 3:1 dengan volume efektif sekitar 800 mL. Untuk membuat kondisi anaerob dilakukan *flushing* gas nitrogen ke dalam reaktor selama beberapa menit. *Flushing* dilakukan dengan cara memasukkan selang gas nitrogen ke dalam reaktor. Hal ini dilakukan selama beberapa menit agar gas oksigen yang ada di dalam reaktor keluar melalui lubang yang telah disediakan dan tergantikan oleh gas nitrogen. Pengamatan tekanan gas dilakukan setiap hari dan selama empat hari sekali dilakukan analisis kadar sCOD, VFA, serta kadar metana.

Eksperimen dilakukan dalam 3 buah reaktor, dengan 2 reaktor menggunakan 2 jenis *trace element* (Ni, Zn) dan satu reaktor kontrol (zeolit alam tidak dimodifikasi). Proses dijalankan selama 30 hari atau sampai tidak terjadi penurunan sCOD yang signifikan dan tidak terbentuk lagi gas. Nilai sCOD awal pada ketiga reaktor adalah sekitar 8000 mg/L.

$$\frac{dC_{sCOD}}{dt} = - \left[Y_{C_{sCOD}/X_1} \left(\frac{\mu_{m1} \cdot C_{sCOD}}{K_{SX1} \cdot X_1 + C_{sCOD}} - k_{d1} \right) \cdot X_1 + m_1 \cdot X_1 \right] \quad (1)$$

$$\frac{dC_{VFA}}{dt} = Y_{CVFA/X_1} \left(\frac{\mu_{m1}}{K_{SX1} \cdot X_1 + C_{sCOD}} - k_{d1} \right) \cdot X_1 - \left[Y_{CVA/X_2} \left(\frac{\mu_{m2} \cdot C_{VFA}}{K_{SX2} \cdot X_2 + C_{VFA}} - k_{d2} \right) \cdot X_2 - m_2 \cdot X_2 \right] \quad (2)$$

Rangkaian alat proses peruraian anaerobik yang digunakan disajikan pada Gambar 1 dan penamaan reaktor disajikan pada Tabel 2.



Gambar 1. Rangkaian alat proses peruraian anaerobik limbah POME

Tabel 2. Penamaan Reaktor

No	sCOD _{awal} (mg/L)	Kation	Reaktor
1	8000±275	Zeolit alam	Z (kontrol)
2	8000±750	Ni	Z-Ni
3	8000±925	Zn	Z-Zn

2.2.3 Pemodelan Matematis

Komparasi kinerja tiga reaktor dalam penelitian ini didasarkan pada parameter kinetika. Pendekatan matematis yang digunakan adalah pemodelan yang diadaptasi dari Ramadhani dkk. (2017). Asumsi tahapan yang digunakan dalam permodelan ini adalah peruraian material organik kompleks menjadi material organik sederhana yang larut dalam air dan terukur sebagai sCOD, degradasi sCOD menjadi asam karboksilat (C1-C4) sebagai VFA, serta pembentukan gas metana.

Degradasi atau peruraian sCOD dipengaruhi oleh kecepatan pembentukan VFA $\left(\frac{dVFA}{dt}\right)$ sebagai hasil dari proses asidogenesis dan juga kecepatan konsumsi sCOD $\left(\frac{dsCOD}{dt}\right)$ untuk *maintenance cell* mikroorganisme yang berperan dalam proses asidogenesis, yaitu mikroorganisme asidogen $\left(\frac{dX_1}{dt}\right)$. Neraca massa sCOD ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$\frac{dC_{CH_4}}{dt} = Y_{CCH_4/X_2} \cdot \left(\frac{\mu_{m2} \cdot C_{VFA}}{K_{SX2} \cdot X_2 + C_{VFA}} - k_{d2} \right) \cdot X_2 \tag{3}$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \left(\frac{\mu_{m1} \cdot C_{sCOD}}{K_{SX1} \cdot X_1 + C_{sCOD}} - k_{d1} \right) \cdot X_1 \tag{4}$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \left(\frac{m \mu_{m2} \cdot C_{VFA}}{K_{SX2} \cdot X_2 + C_{VFA}} - k_{d2} \right) \cdot X_2 \tag{5}$$

Pembentukan VFA dipengaruhi oleh konversi sCOD oleh mikroorganisme asidogen dan banyaknya VFA yang digunakan dalam *maintenance cell* mikroorganisme metanogen, yang dinyatakan dalam Persamaan (2).

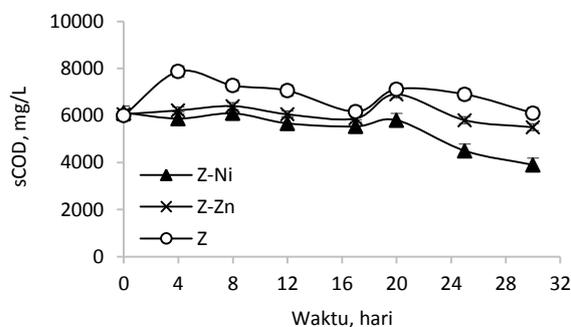
Metana (CH₄) merupakan produk dari tahap metanogenesis. Laju pembentukan metana ($\frac{dCH_4}{dt}$) dipengaruhi oleh laju pertumbuhan mikroorganisme karena metana dihasilkan pada fase pertumbuhan. Laju pembentukan CH₄ ditunjukkan pada Persamaan (3).

Berdasarkan persamaan Contois, yang menyebutkan bahwa laju pertumbuhan mikroorganisme dipengaruhi oleh konsentrasi substrat (Shuler dan Kargi, 2002), maka kecepatan pertumbuhan mikroorganisme asidogen ($\frac{dX_1}{dt}$) dan metanogen ($\frac{dX_2}{dt}$) dapat dihitung dengan Persamaan (4) dan (5).

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran konsentrasi sCOD dan VFA selama proses disajikan pada Gambar 2 dan 3. Secara keseluruhan, konsentrasi sCOD reaktor dalam penelitian ini memiliki kecenderungan yang sama. Pada hari ke-4 hingga 20, konsentrasi sCOD masih berfluktuasi. Ini disebabkan mikroorganisme masih dalam fase adaptasi. Konsentrasi sCOD cenderung menurun setelah hari ke-20 untuk reaktor Z-Ni dan hari ke-25 untuk reaktor Z-Zn serta kontrol. Ini menunjukkan bahwa mikroorganisme telah beradaptasi dengan baik karena kandungan bahan organik yang sesuai untuk didegradasi. Pada proses peruraian anaerobik, kandungan organik yang terlalu tinggi di dalam substrat dapat mengganggu aktivitas mikroorganisme sehingga proses menjadi terganggu (Purnomo dkk., 2017). Dari hasil eksperimen, efisiensi penurunan sCOD

tertinggi diperoleh dari reaktor Z-Zn yaitu sebesar 38,22%, sedangkan dari reaktor Z-Ni dan kontrol diperoleh efisiensi penurunan sCOD sebesar 33,96% dan 27,87%. Penurunan sCOD yang lebih tinggi pada zeolit termodifikasi Zn mengindikasikan bahwa keberadaan *trace element* Zn cenderung selektif terhadap kinerja mikroorganisme asidogen.

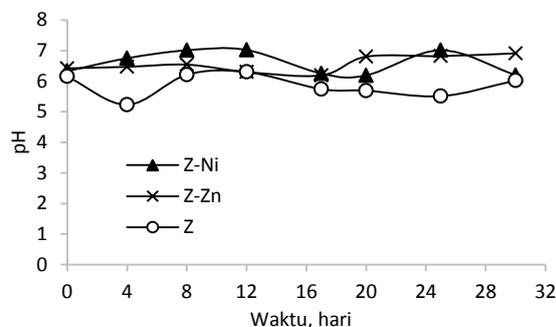


Gambar 2. Konsentrasi sCOD selama proses anaerobik dengan substrat POME

Gambar 3 menunjukkan pH selama proses anaerobik. Kisaran pH optimum untuk proses anaerob adalah 6,8 hingga 7,2 (Ward dkk., 2008). Selama proses berlangsung, pH di dalam reaktor Z-Ni tidak mengalami perubahan yang signifikan yaitu berada pada kisaran antara 6 hingga 7. Namun pada reaktor kontrol (Z) pH menurun menjadi 5,2 pada hari ke 4. Demikian pula pada reaktor Z-Zn, pH menurun dari 6,3 menjadi 5,6 pada hari ke-17. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya akumulasi asam organik atau VFA.

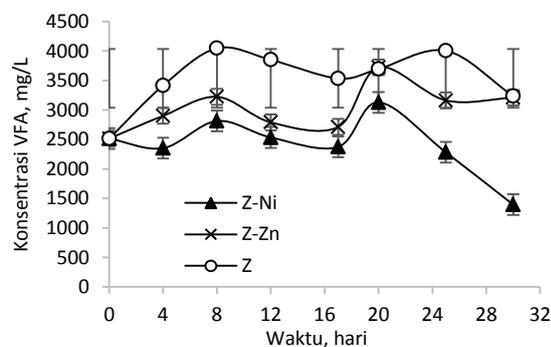
Volatile fatty acids (VFA) merupakan produk antara dalam produksi metana dan konsentrasinya mempengaruhi proses anaerobik. Kondisi konsentrasi VFA selama proses disajikan pada Gambar 4. Selama eksperimen, pada reaktor Z-Ni tidak ditemukan adanya akumulasi VFA. Akumulasi VFA terjadi pada reaktor Z-Zn pada hari ke-20 dengan konsentrasi mencapai 4186,38

mg/L dan nilai pH 5,5. Pada reaktor kontrol (Z), konsentrasi VFA sebesar 4045,95 mg/L pada hari ke-8 menyebabkan pH menurun hingga 5,1. Akumulasi VFA pada reaktor Z-Zn dapat disebabkan oleh proses asidogenesis yang berlangsung cepat. Hal ini ditunjukkan dengan efisiensi penurunan sCOD tertinggi yang dicapai pada reaktor Z-Zn. Walaupun demikian, kecepatan pembentukan VFA ini tidak diimbangi dengan pembentukan metana yang cepat sehingga terjadi akumulasi VFA di dalam reaktor. Akumulasi VFA ini belum menjadi inhibitor karena teramati bahwa kecepatan pembentukan metana pada reaktor Z-Zn masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan reaktor kontrol (Z).

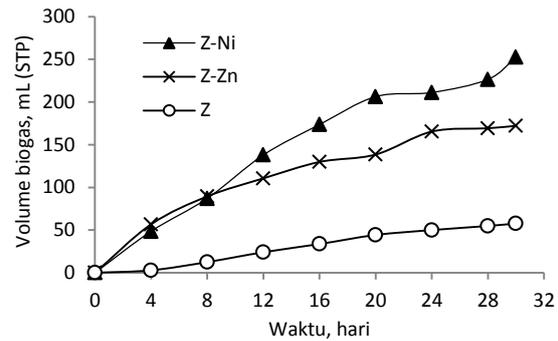


Gambar 3. Perbandingan pola XRD dari (a) konsentrat NM, (b) konsentrat M, (c) *roasting* 950 °C dan (d) bijih emas.

Produksi biogas diamati dengan mengukur volume gas setiap hari. Volume kumulatif biogas disajikan pada Gambar 5. Volume kumulatif biogas selama proses anaerobik dihasilkan dari reaktor Z-Ni yaitu sebanyak 252,44 mL. Dari reaktor Z-Zn diperoleh biogas sebanyak 172,13 mL dan reaktor kontrol 57,70 mL.



Gambar 4. Konsentrasi VFA selama proses anaerobik dengan substrat POME



Gambar 5. Volume kumulatif biogas proses anaerobik dengan substrat POME

Dari hasil eksperimen, keberadaan Zn pada zeolit sebagai media imobilisasi dapat meningkatkan produksi metana dari POME sebanyak 3 kali. Hal ini menunjukkan bahwa Zn terbukti sebagai faktor untuk meningkatkan produktivitas fermentasi metana yang tinggi (Wu dkk., 2016). Sedangkan, penambahan Ni pada zeolit dapat meningkatkan produksi metana sebesar 4,5 kali. Perolehan biogas pada penelitian ini lebih tinggi dari penelitian sebelumnya yaitu sebesar 3,5 kali. Hal ini dikarenakan perbedaan kandungan Ni yang terimpregnasi dalam zeolit. Pada penelitian sebelumnya digunakan $56,1 \times 10^{-3}$ mg Ni/g zeolit sedangkan pada penelitian ini digunakan $2,7 \times 10^{-3}$ mg Ni/g zeolit (Mellyanawaty dkk., 2018). Ini menunjukkan bahwa kadar mikronutrien pada zeolit mempengaruhi produksi biogas. Oleh karena itu, perlu dicari kadar optimum yang menghasilkan produksi biogas maksimum. Selain itu, laju perombakan asetat oleh *archaea* metanogen dalam proses peruraian anaerobik meningkat dengan adanya Ni. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Milán dkk. (2003) yang mengamati proses peruraian anaerobik limbah kotoran babi. Pada penelitian tersebut, zeolit yang dimodifikasi dengan nikel meningkatkan aktivitas spesifik metanogen sebesar 2,8 kali.

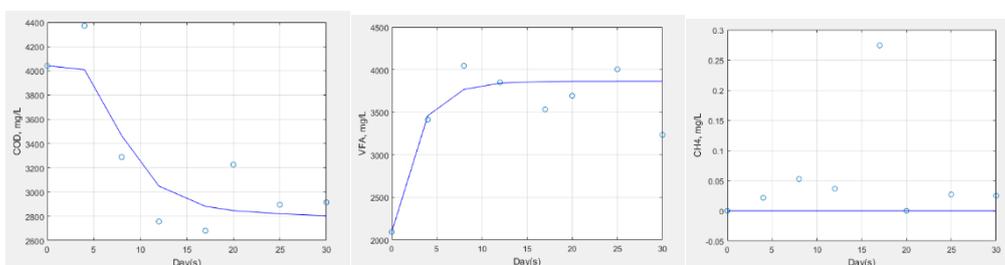
Pengaruh penambahan nutrisi Ni dan Zn pada zeolit terhadap proses peruraian anaerobik dievaluasi menggunakan model matematis. Gambar 6 (a, b, c) menunjukkan hasil simulasi data eksperimen konsentrasi sCOD, VFA dan CH_4 untuk masing-masing reaktor.

Konstanta-konstanta dari hasil *fitting* data eksperimen dan data hasil simulasi dirangkum pada Tabel 3. Dari hasil *fitting* data eksperimen pada model matematis terlihat bahwa performa proses asidogen terbaik terdapat pada reaktor Z-Zn. Hal ini dibuktikan dengan tingginya laju pertumbuhan mikroorganisme asidogen (μ_{m1}) dan laju kematian yang rendah ($k_{d X1}$). Hasil tersebut juga menguatkan data eksperimen yang menyatakan bahwa penurunan sCOD terbaik ada pada Z-Zn. Namun, baiknya performa pada proses asidogen reaktor Z-Zn kurang didukung oleh performa mikroorganisme metanogenya, karena nilai kematian mikroorganisme

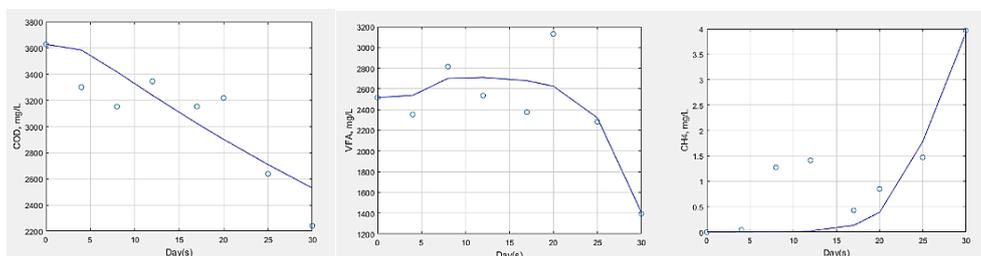
metanogen ($k_{d X2}$) pada reaktor ini paling tinggi dibanding kedua reaktor yang lain.

Tabel 3. Konstanta kinetika proses peruraian POME dengan media zeolite termodifikasi

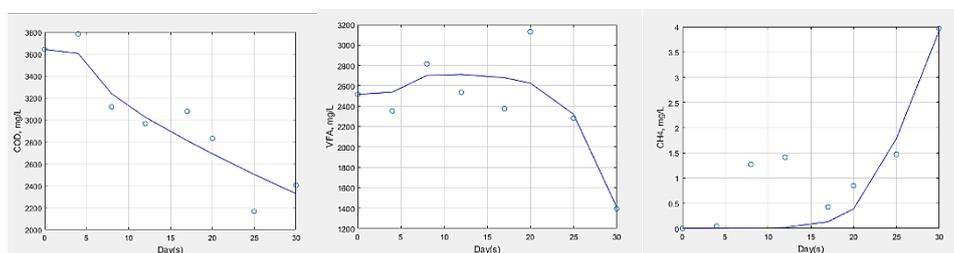
Konstanta	Kontrol	Zn	Ni
μ_{m1}	1,765	3,695	3,317
μ_{m2}	0,418	0,311	0,784
Y_{CH_4/X_2}	0,009	22,127	0,125
Y_{sCOD/X_1}	17,891	0,747	39,985
m_1	0,056	0,685	6,134
Y_{VFA/X_1}	0,469	12,414	25,166
m_2	519,194	29,994	7,630
Y_{VFA/X_2}	855219,182	60,637	0,242
$k_{d X1}$	0,253	0,601	1,988
$k_{d X2}$	0,801	4,626	0,414



Gambar 6 a. Hasil *fitting* data simulasi dan eksperimen reaktor kontrol (Z)



Gambar 6 b. Hasil *fitting* data simulasi dan eksperimen reaktor Z-Zn



Gambar 6 c. Hasil *fitting* data simulasi dan eksperimen reaktor Z-Ni

Lain halnya dengan reaktor Z-Ni, proses asidogen dan metanogen berlangsung cukup seimbang sehingga tidak terjadi akumulasi VFA. Hal ini dibuktikan dengan nilai pertumbuhan mikroorganisme asidogen dan metanogen (μ_{m1}

dan μ_{m2}) yang baik serta laju kematiannya ($k_{d X2}$) yang cukup rendah. Kondisi ini menguatkan hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa produksi biogas pada Z-Ni relative lebih baik dibanding dua reaktor lainnya.

4. Kesimpulan

Keberadaan mikronutrien Ni dan Zn dalam zeolit sebagai media imobilisasi pada proses peruraian anaerobik dengan substrat POME terbukti dapat meningkatkan produksi biogas. Peningkatan produksi biogas dengan adanya Ni adalah sebesar 4,5 kali dan Zn sebesar 3 kali dibandingkan dengan produksi biogas dengan zeolit alami. Penggunaan zeolit terimpregnasi Ni dapat menjaga kestabilan proses, mampu mencegah terjadinya akumulasi VFA dan meningkatkan efisiensi penurunan sCOD sehingga baik proses asidogen maupun metanogen berjalan dengan baik.

Daftar Notasi

$k_{d\ X1}$	= kecepatan kematian mikroorganisme asidogenik (hari^{-1})
$k_{d\ X2}$	= kecepatan kematian mikroorganisme metanogenik (hari^{-1})
μ_{m1}	= kecepatan pertumbuhan spesifik maksimum mikroorganisme asidogenik (hari^{-1})
μ_{m2}	= kecepatan pertumbuhan spesifik maksimum mikroorganisme metanogenik (hari^{-1})
K_{SX1}	= konstanta kejenuhan mikroorganisme asidogenik (mg sCOD/mg sel)
K_{SX2}	= konstanta kejenuhan mikroorganisme metanogenik (mg sCOD/mg sel)
X_1	= konsentrasi mikroorganisme asidogenik (mg/L)
X_2	= konsentrasi mikroorganisme metanogenik (mg/L)
S	= konsentrasi substrat (mg/L)
$Y_{X1/CsCOD}$	= <i>yield</i> massa mikroorganisme asidogen yang dihasilkan persatuan sCOD (mg sel asidogenik/mg sCOD)
$Y_{X2/CVFA}$	= <i>yield</i> massa mikroorganisme metanogen yang dihasilkan persatuan VFA (mg sel metanogenik/mg VFA)
$Y_{CVFA/X1}$	= <i>yield</i> massa VFA oleh mikroorganisme asidogen (mg VFA/mg sel asidogenik)
$Y_{CH_4/X2}$	= <i>yield</i> massa CH_4 yang dihasilkan per satuan massa mikroorganisme metanogen (mg CH_4 /mg sel metanogenik)

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (RISTEKDIKTI) pada skema Penelitian Kerja Sama Antar Perguruan Tinggi (PKPT) tahun pelaksanaan 2018.

Daftar Pustaka

- Anderson, K., Sallis, P., and Uyanik, S., 2003, Anaerobic Treatment Processes, Handb. Water Wastewater Microbiol., Elsevier, Turkey, pp. 391–426.
- Ayu, E.D., Halim, L., Mellyanawaty, M., Sudibyo, H., and 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 Conference Proceedings 1840, 110005
- Burghate, S.P., and Ingole, N.W., 2013, Fluidized bed biofilm reactor – A novel wastewater treatment reactor, Int. J. Res. Environ. Sci. Technol., 3 (4), 145–155.
- Chin, M.J., Poh, P.E., Tey, B.T., Chan, E.S., and Chin, K.L., 2013, Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective, Renew. Sustain. Energy Rev., 26, 717–726.
- Deublein, D., and Steinhauser, A., 2008, Biogas from Waste and Renewable Resources, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany.
- Gerardi, M.H., 2003, The Microbiology of an Anaerobic Digesters, John Willey & Sons, Inc., Canada.
- Halim, L., Mellyanawaty, M., Cahyono, R.B., Sudibyo, H., and Budhijanto, W., 2017, Anaerobic digestion of palm oil mill effluent with lampung natural zeolite as microbe immobilization medium and digested cow manure as starter, AIP Conference Proceedings, 1840, 110003
- Hosseini, S.E., and Wahid, M.A., 2013, Feasibility study of biogas production and utilization as a source of renewable energy in Malaysia, Renew. Sustain. Energy Rev., 19, 454–462.

- Lam, M.K., and Lee, K.T., 2011, Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection, *Biotechnol. Adv.*, 29 (1), 124–141.
- Liew, W.L., Kassim, M.A., Muda, K., Loh, S.K., and Affam, A.C., 2015, Conventional methods and emerging wastewater polishing technologies for palm oil mill effluent treatment: A review, *J. Environ. Manage.*, 149, 222–235.
- Montalvo, S., Guerrero, L., Borja, R., Sánchez, E., Milán, Z., Cortés, I., and Angeles de la Rubia, M., 2012, Application of natural zeolites in anaerobic digestion processes: A review, *Appl. Clay Sci.*, 58, 125–133.
- Nicolella, C., van Loosdrecht, M.C.M., and Heijnen, J.J., 2000, Wastewater treatment with particulate biofilm reactors, *J. Biotechnol.*, 80 (1), 1–33.
- Purnomo, C.W., Mellyanawaty, M., and Budhijanto, W., 2017, Simulation and experimental study on iron impregnated microbial immobilization in zeolite for production of biogas, waste and biomass valorization, 8 (7), 2413–2421
- Ramadhani, L.I., Damayanti, S.I., Sudiby, H., and Budhijanto, W., 2017, Kinetics of anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) in double stage batch reactor with recirculation and fluidization of microbial immobilization media, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 316, 012071
- Seadi, T. Al, Dominik, R., Prassl, H., and Köttner, M., 2008, *Biogas Handbook*, edited by Al Seadi, T., University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, Denmark.
- Setyowati, P.A.H., Halim, L., Mellyanawaty, M., Sudiby, H., and Budhijanto, W., 2017, Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in batch reactor with digested biodiesel waste as starter and natural zeolite for microbial immobilization, *AIP Conference Proceedings* 1840, 110004.
- Shuler, M.L., and Kargi, F., 2002, *Bioprocess Engineering*, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., and Jones, D.L., 2008, Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresour. Technol.*, 99 (17), 7928–7940.
- Wu, L.J., Kobayashi, T., Kuramochi, H., Li, Y.Y., and Xu, K.Q., 2016, Effects of potassium, magnesium, zinc, and manganese addition on the anaerobic digestion of de-oiled grease trap waste, *Arab. J. Sci. Eng.*, 41 (7), 2417–2427.