

Potensi Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit untuk Produksi Biogas

The possibility of palm oil mill effluent for biogas production

EDWI MAHAJOENO^{1,2,*}, BIBIANA WIDIYATI LAY³, SURJONO HADI SUTJAHJO⁴, SISWANTO⁴

¹Program Doktor, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor (IPB), Bogor 16680.

²Jurusan Biologi FMIPA, Universitas Sebelas Maret (UNS), Surakarta 57126.

³Fakultas Kedokteran Hewan, Institut Pertanian Bogor (IPB), Bogor 16680.

⁴Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor 16124.

Diterima: 22 Desember 2007. Disetujui: 31 Januari 2008.

ABSTRACT

The world currently obtains its energy from the fossil fuels such as oil, natural gas and coal. However, the international crisis in the Middle East, rapid depletion of fossil fuel reserves as well as climate change have driven the world towards renewable energy sources which are abundant, untapped and environmentally friendly. Indonesia has abundant biomass resources generated from the agricultural industry particularly the large commodity, palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.). The aims of the research were to (i) characterize palm oil mill effluent which will be used as source of biogas production, (ii) know the biotic and abiotic factors which effect POME substrate for biogas production by anaerobic digestion in bulk system. The results show that POME sludge generated from PT Pinago Utama mill is viscous, brown or grey and has an average total solid (TS) content of, 26.5-45.4, BOD is 23.5-29.3, COD is 49.0-63.6 and SS is 17.1-35.9 g/L, respectively. This substrate is a potential source of environmental pollutants. The biotic factors were kind and concentration of the inoculums, i.e. seed sludge of anaerobic lagoon II and 20% (w/v) respectively. Both physical and chemical factors such as pre-treated POME pH, pH neutralizer matter Ca (OH)₂, temperature $\geq 40^{\circ}\text{C}$, agitation effect to increase biogas production, but in both coagulant concentration, FeCl₂ were not.

© 2008 Jurusan Biologi FMIPA UNS Surakarta

Key words: characteristic of POME, biogas production, biotic and abiotic factors, batch system, laboratory scale.

PENDAHULUAN

Pabrik minyak kelapa sawit (PMKS) dalam mengolah setiap ton tandan buah segar (TBS) akan menghasilkan rata-rata 120-200 kg minyak kelapa sawit mentah (CPO), 230-250 kg tandan kosong kelapa sawit (TKKS), 130-150 kg serat/ fiber, 60-65 kg cangkang, 55-60 kg kernel, dan 0,7 m³ air limbah. Jika Indonesia berhasil menjadi produsen utama CPO dunia, dengan memproduksi 18 juta ton CPO per tahun sebagaimana yang ditargetkan, maka akan dihasilkan limbah cair pabrik minyak kelapa sawit (LCPMKS) sebanyak >50 juta ton per tahun (Ditjenbibprodbun, 2004). LCPMKS merupakan sumber pencemar potensial yang dapat memberikan dampak serius bagi lingkungan, sehingga pabrik dituntut untuk menangani limbah ini melalui peningkatan teknologi pengolahan (*end of pipe*).

Bahan organik dalam proses fermentasi anaerob (teknologi perombakan anaerob) dirombak oleh aktivitas mikroorganisme menjadi biogas. Produksi biogas dengan bahan LCPMKS memberikan berbagai keuntungan di antaranya pengurangan jumlah padatan organik, jumlah mikrobia pembusuk yang tidak diinginkan, serta kandungan

racun dalam limbah (Judoamidjojo *et al.*, 1989). Di samping itu, residu biogas dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik non fitotoksin. Sudradjat *et al.* (2003) menyatakan bahwa produksi biogas mendapat perhatian karena produk akhir biogas adalah campuran CH₄ dan CO₂ yang merupakan gas mudah terbakar, sifatnya hampir sama dengan gas alam dan dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

Fermentasi anaerobik adalah proses perombakan bahan organik yang dilakukan oleh sekelompok mikrobia anaerobik fakultatif maupun obligat dalam suatu reaktor tertutup pada suhu 35-55°C. Perombakan bahan organik dikelompokkan dalam empat tahapan proses, pertama bakteri fermentatif menghidrolisis senyawa polimer menjadi senyawa sederhana yang bersifat terlarut. Kedua, monomer dan oligomer dirombak menjadi asam asetat, H₂, CO₂, asam lemak rantai pendek dan alkohol; tahap ini disebut pula tahap asidogenesis. Ketiga, disebut fase non-metanogenik yang menghasilkan asam asetat, CO₂ dan H₂. Keempat, pengubahan senyawa-senyawa tersebut menjadi gas metana oleh bakteri metanogenik (Reith *et al.*, 2003; Metcalf dan Eddy, 2003).

Proses biokonversi metanogenik merupakan proses biologi yang sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama suhu, pH, dan senyawa toksik. Secara keseluruhan faktor yang mempengaruhi proses perombakan anaerob bahan organik pada pembentukan biogas, mencakup faktor biotik dan abiotik. Faktor biotik

* Corresponding address:
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta 57126
Tel. & Fax.: +62-271-663375
e-mail: emasich@yahoo.com

berupa mikrobia dan jasad aktif, sedang faktor abiotik meliputi pengadukan, suhu, pH, kadar substrat, kadar air, rasio C/N dan P dalam substrat, dan kehadiran bahan toksik. Proses fermentasi dapat dilakukang dengan beberapa metode, salah satunya adalah sistem fermentasi curah, yaitu dilakukan dalam suatu tangki (digester), dan dapat diuji dalam skala laboratorium. Tujuan penelitian ini adalah: (i) mengetahui karakteristik limbah cair pabrik minyak kelapa sawit PT. Pinago Utama, Sumatera Selatan, dan menentukan kombinasi jenis dan konsentrasi inokulum terbaik, serta (ii) pengaruh faktor abiotik terhadap total produksi biogas tiap perlakuan dalam sistem curah.

BAHAN DAN METODE

Bahan yang diperlukan berupa: jenis dan konsentrasi inokulum berupa kotoran sapi 10% (KTS-10%); lumpur LCPKMS kolam I, 10 dan 20% (LKLM I-10%, I-20%); kolam II, 10 dan 20% (LKLM II-10%, II-20%), dan kontrol. Sedang bahan perlakuan abiotik berupa NaOH, Ca(OH)₂, FeCl₃, pH 4,4, 5,5, dan 7, tanpa agitasi dan peningkatan suhu $\geq 40^{\circ}\text{C}$, dengan LCPMKS sebagai bahan baku substrat. Alat yang diperlukan antara lain jerigen plastik 22 L, botol PET 1,5 L, selang (ϕ 0,5 cm), kawat.

Percobaan dibagi dalam dua sub percobaan yaitu: karakterisasi limbah serta pengaruh faktor abiotik dan biotik terhadap produksi biogas. Percobaan ini dilakukan di rumah kaca Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia Bogor. Jerigen 22 L (bioreaktor), diberi berbagai perlakuan inokulum, dan LCPMKS sebagai bahan baku substrat dalam reaktor curah kondisi anaerob. Perlakuan faktor biotik jenis dan konsentrasi inokulum, sedang faktor abiotik berupa pH, suhu, agitasi, waktu, dan bahan penetral. Proses fermentasi diukur setiap interval dua minggu, berlangsung selama 12 minggu. Produksi biogas ditampung dalam botol PET 1,5 L dan selang (ϕ 0,5 cm). Hasil akhir yang diukur adalah produksi dan konsentrasi metana (Jawed dan Tare, 1999). Parameter yang diukur meliputi pH, suhu, total produksi biogas, laju dan COD, BOD, TS, SS, minyak dan lemak kasar dan total nitrogen (Suzuki *et al.*, 2003; Greenberg *et al.*, 1992).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian disajikan dalam beberapa sub percobaan di antaranya karakteristik LCPMKS PT Pinago Utama Palembang, serta pengaruh faktor biotik dan abiotik terhadap total produksi biogas masing-masing perlakuan dari LCPMKS sistem curah.

Karakteristik LCPMKS

Hasil analisis karakteristik kimia LCPMKS PT. Pinago Utama menunjukkan bahwa limbah bersifat koloid, kental, coklat atau keabu-abuan, pH 4,4-5,4 dan mempunyai rerata kandungan COD 49,0-63,6; BOD 23,5-29,3; TS 26,5-45,4 dan SS 17,1-35,9 g/L (Tabel 1.). Keseluruhan parameter diukur di atas ambang baku mutu peruntukan yang telah ditetapkan MENKLH (1995), sehingga LCPMKS berpotensi sebagai pencemar lingkungan. Tanpa adanya upaya untuk mencegah atau mengelola secara efektif akan timbul dampak negatif terhadap lingkungan, seperti timbulnya bau, pencemaran air dan perairan umum di sekitar pabrik, dan gas rumah kaca yang berdampak perubahan iklim global (Ahmad *et al.*, 2003).

Tabel 1. Karakteristik LCPMKS PT Pinago Utama

Parameter	Nilai kisaran	Rata-rata	Baku mutu*
pH (Satuan Internasional)	4,4-4,5	4,4	6-9
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	50-65	57	-
BOD (g/L)	23,40-29,28	27,72	0,11
COD (g/L)	49,01-63,60	56,20	0,25
Padatan total (g/L)	26,57-45,38	28,24	0,25
Padatan tersuspensi (g/L)	17,00-35,88	15,15	0,10
Minyak dan lemak kasar (g/L)	29,00-29,50	29,30	0,03
Total Nitrogen (g/L)	27,00-28,70	27,70	0,02

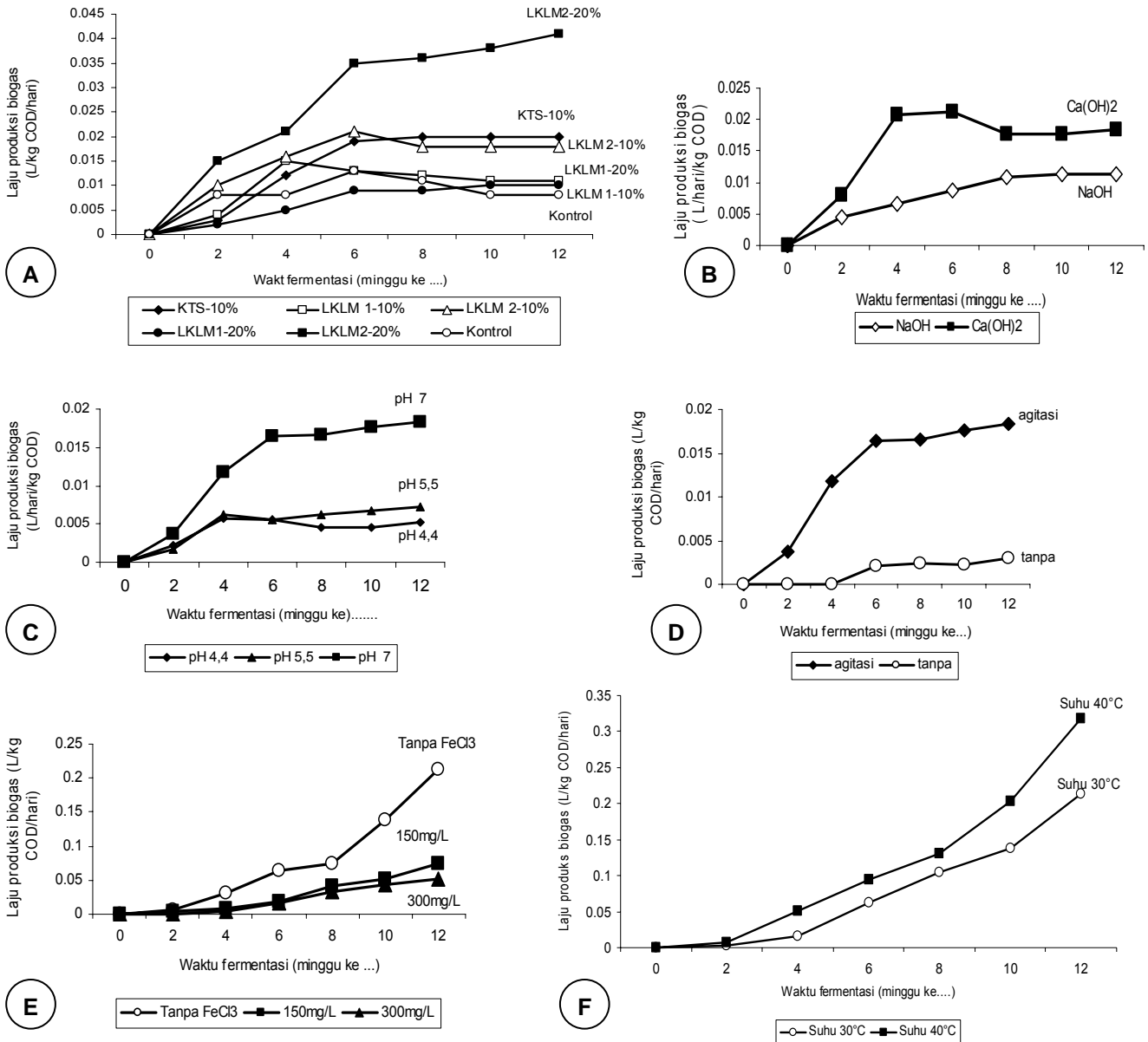
Keterangan: *) Berdasarkan Kep-51/MENLH/10/1995.

Hasil penelitian parameter COD, BOD dan parameter lainnya menunjukkan bahwa kualitas LCPMKS PT. Pinago Utama, Sumatera Selatan jauh di atas baku mutu yang diperkenankan, sehingga berpotensi menjadi bahan pencemar apabila dibuang langsung ke lingkungan. Kisaran karakteristik LCPMKS berfluktuasi karena pengaruh proses produksi pabrik, musim, dan pasca panen (Yacob *et al.*, 2006). Battacharya *et al.* (2003) menyatakan bahwa LCPMKS dengan perombakan anaerob memiliki COD lebih dari 1,5 kg/m³. Produksi 1 m³ LCPMKS dapat menghasilkan 20-28 m³ biogas. Paepatung (2006) menyatakan potensi produksi biogas dapat mencapai > 35 kali lipat dari jumlah LCPMKS atau 1 m³ LCPMKS dapat dikonversi menjadi 38,69 m³ biogas. Hasil pengukuran penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa COD LCPMKS sebesar 35-95 g/L dan BOD 10-60 g/L. Hasil pengukuran lainnya diperoleh COD 90,4 g/L dan BOD 54,56 g/L (Prasertsan dan Sajjakulnukit, 2006), serta COD 44,3 g/L dan BOD 22,7 g/L (Zinatizadeh *et al.*, 2006). LCPMKS PT Pinago Utama berpotensi sebagai bahan pencemar yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan perairan, di sisi lain limbah ini secara biokimiawi berpotensi ekonomis sehingga perlu diupayakan peningkatan pengelolaan agar lebih berdaya guna.

Pengaruh faktor biotik terhadap produksi biogas

Hasil yang diperoleh menunjukkan pengaruh faktor biotik jenis dan konsentrasi inokulum terhadap produksi biogas (Gambar 1A), yakni: (i) KTS-10%, (ii) LKLM I-10%, (iii) LKLM II-10%, (iv) LKLM I-20%, (v). LKLM II-20%, dan (vi) kontrol (tanpa inokulum) disajikan pada Gambar 1A. Faktor biotik yang berpengaruh paling baik adalah inokulum LCPMKS PT. Pinago Utama kolam II, dengan konsentrasi 20% (LKLM II-20%) dengan volume substrat sebanyak 15 L. Jenis dan konsentrasi inokulum sangat penting untuk proses pengurangan bahan organik dan laju produksi biogas, karena pada proses biofermentasi LCPMKS, mikrobia yang berperan adalah jasad hidup yang tumbuh berkembang di dalam substrat. Sahirman (1994) menyatakan bahwa inokulum lebih dari 12,5% (b/v) dengan volume substrat 2 L dalam skala laboratorium tidak menunjukkan peningkatan produksi biogas. Sementara hasil penelitian ini mengungkapkan inokulum LKLM II-20% (b/v) dengan substrat 15 L, diperoleh produksi biogas paling baik dibandingkan konsentrasi lainnya.

Faktor jenis dan konsentrasi inokulum sangat berperan dalam proses perombakan dan produksi biogas. Dekomposisi anaerob merupakan proses pertumbuhan mikrobia dan menggunakan energi dengan merombak bahan organik dalam lingkungan anaerob dan menghasilkan metana. Menurut Reith *et al.* (2003) terdapat empat tahap dekomposisi anaerob dimana terjadi proses hidrolisis protein menjadi asam amino, karbohidrat diubah menjadi gula, dan lipid diubah menjadi asam lemak rantai panjang dan gliserol. Hal ini dapat dilakukan oleh berbagai jenis mikrobia, sehingga banyak faktor yang mempengaruhinya, baik faktor abiotik maupun biotik.



Gambar 1. Produksi biogas dari limbah cair pabrik minyak kelapa sawit. A. Interaksi jenis, konsentrasi inokulum dan waktu fermentasi terhadap laju produksi biogas. B. Interaksi pemberian bahan penetral dan waktu fermentasi terhadap produksi biogas, C. Interaksi pH awal dan waktu fermentasi terhadap produksi biogas, D. Interaksi pemberian agitasi dan waktu fermentasi terhadap laju produksi biogas, E. Interaksi penambahan garam FeCl₃ dan waktu fermentasi terhadap produksi biogas, F. Interaksi peningkatan suhu dan waktu fermentasi terhadap produksi biogas.

Pengaruh faktor abiotik terhadap produksi biogas

Pengaruh masing-masing faktor abiotik terhadap produksi biogas dijelaskan dalam Gambar 1B-1F. NaOH dan Ca(OH)₂ adalah bahan yang digunakan untuk memacu peningkatan pH substrat LCPMKS yang bersifat asam. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan bahan penetral pH dapat meningkatkan produksi biogas, dan Ca(OH)₂ berpengaruh lebih baik dibandingkan NaOH (Gambar 1B). Hal ini dapat dimengerti karena NaOH yang bertemu dengan minyak akan mengalami proses penyabunan menghasilkan gliserol dan asam lemak (Ahmad *et al.*, 2003). LCPMKS kaya akan bahan organik termasuk lemak, sehingga penambahan NaOH kemungkinan dapat mengganggu proses perombakan substrat dan secara tidak langsung akan mengganggu laju produksi biogas. Ca(OH)₂ sering digunakan untuk

peningkatan pH larutan. Peningkatan pH optimum akan memacu proses pembusukan, sehingga meningkatkan efektivitas kerja mikrobia dan dapat meningkatkan produksi biogas.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pH substrat awal 7 memberikan peningkatan laju produksi biogas lebih baik dibandingkan dengan perlakuan pH yang lain (Gambar 1C). Peningkatan pH dapat mempercepat pembusukan, sehingga mempercepat perombakan dan secara tidak langsung mempercepat produksi biogas (Metcalf dan Eddy, 2003). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pH netral memacu perkembangan bakteri metana (metanogen), sehingga pada pH tersebut bakteri perombak asam asetat tumbuh dan berkembang secara optimum, hal ini meningkatkan produksi biogas. Perombakan anaerob merupakan proses biologi yang sangat dipengaruhi oleh

faktor-faktor lingkungan. Faktor pengendali utama antara lain: suhu, pH, dan senyawa beracun (de Mez *et al.*, 2003). Derajat pH netral memacu perkembangan bakteri metana, sehingga dengan pH netral bakteri perombak asam asetat tumbuh dan berkembang secara optimum, hal ini meningkatkan produksi biogas.

Faktor abiotik lainnya, agitasi juga berpengaruh terhadap produksi biogas (Gambar 1D), dimana pemberian agitasi berpengaruh lebih baik pada peningkatan laju produksi biogas dibandingkan tanpa agitasi (Gambar 1C). Hal ini terjadi karena dengan agitasi substrat akan homogen, inokulum kontak langsung dengan substrat dan merata, sehingga proses perombakan lebih efektif. Barford (1983) menyatakan bahwa agitasi dapat meningkatkan intensitas kontak antara organisme dan substrat, dibandingkan tanpa agitasi. Pengadukan dimaksudkan agar kontak antara limbah segar dan bakteri perombak lebih baik, dan menghindari padatan terbang atau mengendap, yang akan mengurangi keefektifan digester dan menimbulkan 'plugging' gas dan lumpur. Pengadukan atau agitasi 100 rpm dapat meningkatkan produksi biogas.

Penambahan FeCl_3 tidak berpengaruh terhadap laju produksi biogas, dimana hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanpa penambahan FeCl_3 produksi biogas lebih baik dibandingkan dengan penambahan FeCl_3 150 maupun 300 mg/L. Penambahan FeCl_3 dimaksudkan sebagai suplemen untuk memacu aktivitas mikrobia, namun hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan FeCl_3 kurang efisien terhadap peningkatan laju produksi biogas (Gambar 1E). Bardia dan Gaur (2000) menyatakan bahwa Fe merupakan sumber kation yang berfungsi sebagai katalis, sehingga diharapkan dapat meningkatkan produksi biogas. Namun pada jumlah yang lebih besar dari kebutuhan minimum mikrobia, Fe akan menjadi racun, sehingga akan menghambat aktivitas mikrobia. Konsentrasi FeCl_3 yang optimum adalah 25 mg/L, pada konsentrasi yang lebih tinggi dapat menghambat produksi biogas. de Mez *et al.* (2003) menyatakan bahwa faktor utama pengendali proses anaerob antara lain suhu, pH dan senyawa racun. Metcalf dan Eddy (2003) menyatakan bahwa FeCl_3 sebagai koagulan dapat memacu terjadinya pengendapan, sehingga mengganggu kontak langsung dengan mikrobia dan mempengaruhi aktivitas mikrobia dalam melakukan perombakan, maka secara tidak langsung akan menghambat produksi biogas. Dengan demikian FeCl_3 dalam dosis tertentu merupakan suplemen yang dapat mempercepat aktivitas mikrobia dan perombakan, tetapi pada dosis yang berlebihan dapat menjadi racun.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan suhu substrat dapat meningkatkan laju produksi biogas (Gambar 1F). Hal tersebut dapat dipahami karena suhu yang tinggi dapat memacu perombakan secara kimiawi, perombakan yang cepat akan dimanfaatkan oleh bakteri metanogenik untuk menghasilkan gas metana, sehingga meningkatkan produksi biogas. Suhu air limbah yang hangat dapat meningkatkan reaksi biokimia pada kolam anaerob, dimana bahan organik dirombak menjadi biogas pada kisaran suhu hangat (mesofilik) antara 30-38°C. Secara rinci faktor abiotik yang menghasilkan biogas tertinggi adalah pH netral yaitu 6,9-7,3, dan suhu 30-38°C (Metcalf dan Eddy, 2003).

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa faktor waktu fermentasi dengan interval dua minggu berpengaruh terhadap laju produksi biogas. Hal ini dapat dipahami karena proses perombakan anaerob berjalan empat tahap oleh kelompok masing-masing organisme konsorsium (Werner *et al.*, 1989). Setiap tahap proses perombakan

membutuhkan waktu yang cukup, sehingga pengaruh faktor waktu fermentasi terhadap substrat dalam kondisi anaerob memberikan hasil yang berbeda pada produksi biogas, semakin lama proses fermentasi semakin tinggi produksi biogas.

Pengaruh faktor biotik dan abiotik terhadap total produksi biogas

Pengaruh faktor abiotik dan biotik terhadap total produksi biogas sama dengan faktor yang mempengaruhi laju produksi biogas, yaitu jenis dan konsentrasi inokulum (Tabel 2.). Dalam hal ini kondisi terbaik dihasilkan dari kolam II dengan konsentrasi inokulum 20% (LKLM II-20%), dimana total produksi biogas selama 12 minggu sebesar 121 L. Faktor abiotik $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dapat meningkatkan total produksi biogas, demikian pula pH netral (7), agitasi, tanpa penambahan FeCl_3 , dan peningkatan suhu. Perlakuan tersebut berpengaruh meningkatkan total produksi biogas, selama 12 minggu masing-masing sebesar 55 L, sedang pada peningkatan suhu sebesar 65 L. Hal ini dapat dipahami karena proses pembentukan biogas dari perombakan LCPMKS dilakukan oleh mikrobia. Sehingga jenis dan konsentrasi inokulum sangat berpengaruh terhadap produksi biogas (Reith *et al.*, 2003). Substrat dengan pH netral dapat mempercepat pembusukan, sehingga bakteri metanogenik mudah melakukan perombakan substrat membentuk biogas, sehingga produksi biogas meningkat (Metcalf dan Eddy, 2003). Agitasi dapat meningkatkan total produksi biogas, karena dengan agitasi kondisi substrat menjadi homogen dan kontak inokulum dengan substrat menjadi lebih intensif, sehingga inokulum bekerja lebih optimum. Inokulum yang homogen dan kontak dengan substrat yang merata dapat menyebabkan mikrobia bekerja dengan optimum (Barford dan Cail 1985).

Tabel 2. Jumlah produksi biogas dari LCPMKS secara anaerob sistem curah skala laboratorium, dengan waktu fermentasi 12 minggu.

Perlakuan	Substrat LCPMKS	Produksi biogas (L)
Biotik	Jenis substrat + inokulum	
	Kotoran sapi 10%	64,5
	LCPMKS kolam I-10%	36,5
	LCPMKS kolam II-10%	55
	LCPMKS kolam I-20%	28
	LCPMKS kolam II-20%	121
	Kontrol	22
Abiotik 1	Penambahan bahan penetral pH	
	NaOH	34
Abiotik 2	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	55
	pH substrat dasar (awal)	
	pH 4,4	15,0
	pH 5,5	20,5
Abiotik 3	pH 7	55,0
	Agitasi	55
	Tanpa agitasi	6
Abiotik 4	Tanpa penambahan FeCl_3	55
	Penambahan FeCl_3 150 mg/L	28
	Penambahan FeCl_3 300 mg/L	23,5
Abiotik 5	Suhu substrat 30°C	55
	Peningkatan suhu 40°C	68, 5

Pemberian FeCl_3 tidak berpengaruh terhadap peningkatan produksi biogas, boleh jadi karena kadar perlakuan FeCl_3 dalam penelitian ini bersifat sebagai racun dan menghambat proses perombakan. Menurut Bardia dan Gaur (1994), kadar optimum FeCl_3 adalah 25 mg/L,

sehingga pada kadar yang lebih tinggi boleh jadi bersifat racun dan menghambat produksi biogas. Suhu dapat mempercepat proses perombakan, sehingga dapat meningkatkan produksi biogas. Pada suhu substrat 40°C dihasilkan biogas relatif lebih tinggi dibandingkan suhu 30°C. Hal ini dimungkinkan karena suhu dapat meningkatkan reaksi kimia, sehingga memacu peningkatan perombakan senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana, yang dapat dimanfaatkan lebih cepat dan memudahkan aktivitas bakteri metanogenik membentuk biogas (NAS, 1981; Bitton, 1999; Wellinger 1999).

KESIMPULAN

LCPMKS PT. Pinago Utama bersifat koloid, kental, coklat atau keabu-abuan dan mempunyai rerata kandungan COD, 49,0-63,6, BOD 23,5-29,3, TS 26,5-45,4 dan SS 17,1-35,9 g/L, sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Kombinasi jenis dan konsentrasi inokulum terbaik untuk produksi biogas dari LCPMKS, dengan volume substrat sebanyak 15 L, sistem curah skala laboratorium adalah jenis lumpur LCPMKS kolam II dengan konsentrasi 20% (LKLM II-20%), dimana total produksi biogas tertinggi sebesar 121 L. Faktor abiotik yang dapat meningkatkan produksi biogas adalah penambahan bahan penetral pH Ca(OH)₂, pH awal substrat = 7, dan pemberian agitasi, dimana total produksi biogas yang diperoleh masing-masing sebesar 55 L. Peningkatan suhu substrat 40°C menghasilkan biogas sebesar 68,5 L, sedang penambahan garam FeCl₃ tidak berpengaruh terhadap peningkatan total produksi biogas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktur Utama PT. Pinago Utama, Sumatera Selatan yang telah memberikan dukungan fasilitas dan finansial bagi penelitian ini, demikian pula kepada pimpinan Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor serta Kementerian Negara Riset dan Teknologi RI yang telah mensponsori penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, A.L., S. Ismail, and S. Bhatia, 2003. Water recycling from palm oil mill effluent using membrane technology. *Desalination* 157: 87-95.
 Bardia, N. and A.C. Gaur. 1994. Iron supplementation enhances biogas generation. In: Klass, D.L. (ed.). *Proceedings Biomass Conference of the Americas II*. New York: National Renewable Energy Laboratory Golden Co.
 Barford, J.P. and R.G. Cail. 1985. Mesophilic semi-continuous anaerobic of palm oil mill effluent. *Biomass* 7: 287-295.

Bitton, G. 1999. *Wastewater Microbiology*. 2nd ed. New York: Wiley-Liss Inc.
 de Mez, T.Z.D., A.J.M. Stams, J.H. Reith, and G., Zeeman. 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In: Reith, J.H., R.H. Wiffels and H. Barten (eds.). *Biomethane and Biohydrogen Status Add Perspectives of Biological Methane and Hydrogen Production*. Wageningen: Dutch Biological Hydrogen Foundation.
 Ditjenbibprodhun. 2004. *Statistik Perkebunan*. Jakarta: Ditjen Bina Produksi Perkebunan, Departemen Pertanian.
 Greenberg, A.E., L.S. Clasceri and A.D. Easton. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water Wastewater*. 18th ed. Washington, D.C.: APHA, AWWA, and WACF.
 Jawad, M. and V. Tare. 1999. Microbial composition assessment of anaerobic biomass through methanogenic activity tests. *Water S.A.* 25 (3): 345-350.
 Judoamidjojo, R.M., E.G. Said, dan L. Hartoto. 1989. *Biokonversi*. Bogor: PAU Bioteknologi IPB.
 Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep-51/MENLH/10/1995. Tentang *Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri*.
 Leggett, J., R.E. Graves, and L.E. Lanyon. 2007. *Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction from Manure*. Pennsylvania: PennState College of Agricultural Sciences, Cooperative Extension, Agricultural and Biological Engineering.
 Metcalf and Eddy Inc. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill.
 MNKLH-NORAD. 2004. *Buku Panduan Penerapan Produksi Bersih pada Industri Kelapa Sawit*. Jakarta: KLH-RI-NORAD.
 National Academy of Sciences (NAS). 1981. *Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes*. 2nd ed. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
 O'Faherty, V., G. Collins, and M. Therese, 2006. The Microbiology and biochemistry of anaerobic bioreactors with relevance to domestic sewage treatment. *Earth and Environmental Science* 5 (1): 39-55.
 Paepatun, N., P. Kullavanaya, O. Loapitinar, A. Nopparatana, W. Shongkasri and P. Chairprasert. 2006. *Assessment of Palm Oil Mill Effluent as Biogas Energy Source in Thailand*. www.cppo.gov.th
 Prasertan, S. and B. Sajjakulnukit. 2006. Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy* 3: 599-610.
 Reith, J.H., H. den Uil, H. van Veen, W.T.A.M. de Laat, J.J. Niessen, E. de Jong, H.W. Elbersen, R. Weusthuis, J.P. van Dijken and L. Raamsdonk. 2003. Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass residues. *Proceedings of the 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*. Amsterdam, 17 -21 June 2002.
 Sahirman, S. 1994. *Kajian Pemanfaatan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit untuk Memproduksi Gas Bio*. [Tesis]. Bogor: Program Pascasarjana IPB.
 Sudradjat, R., Y. Erra, K. Umi, dan K. Evi. 2003. Produksi biogas dari limbah pengolahan kelapa sawit dengan proses fermentasi padat. *Buletin Penelitian Hasil Hutan* 21: 227-237.
 Suzuki, S., Y. Shiray, and A.M. Hasan. 2003. *Research for the reduction of Methane Release from Malaysian Palm oil Mill Lagoon and its Countermeasures*. CDM Feasibility Study 2001. Tokyo: Ministry of the Environment Japan.
 Wellinger A, and A. Lindeberg 1999. *Biogas Upgrading and Utilization*. Task 24. Dublin: IEA Bioenergy.
 Wellinger, A. 2005. *Energy from Biogas and Landfill Gas*. Task 37. Dublin: IEA Bioenergy.
 Werner, U., V. Stochr, and N. Hees. 1989. *Biogas Plant in Animal Husbandry*. Berlin: Gueslechaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ) GnbH.
 Yacob, S., M.A. Hassan, Y. Shirai M. Wakisaka, and S. Subash. 2006. Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment* 366: 187-196.
 Zinatizadeh, A.A.L., A.R. Mohamed, M.D. Mashitah, A.Z. Abdullah and G.D. Najidfour. 2006. *Effect of Physical and Pretreatment on POME Digestion in an Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film Bedreactor*. <http://www.omicron.ch.tulasigov/eejmj.docs/145.pdf>.