

Energi Terbarukan dan Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dari Palm Oil Mill Effluent

Renewable Energy and Green House Gasses Reduction Emission from Palm Oil Mill Effluent

ARIF DWI SANTOSO, NAWA SUWEDI,
REBA ANINDYAJATI PRATAMA DAN JOKO PRAYITNO SUSANTO

Pusat Teknologi Lingkungan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung Geostek 820, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314
arif.dwi@bppt.go.id

ABSTRACT

Palm oil was predicted to be a potential source of biodiesel that has the highest productivity among other biofuel sources. Palm oil biodiesel production process could potentially contaminate the environment as a result of solid waste produced (empty fruit bunches fiber, fruit shells and ash) and palm oil mills effluent (POME). This paper evaluates and discusses the potentially captured methane gas as a renewable energy source. It also estimates the carbon emissions saving generated during the biofuel production. The quality and the quantity of methane gas data that are obtained in this study are adapted to the values of energy and emission factors from reliable sources. The results of calculation and analysis state that the POME's quality and quantity significantly correlate to the amount and concentration of produced methane. The results of the energy inventory indicate that the potential energy generated from capture of POME based methane gas is around 427.2 MJ / FU (Mega Joule per Functional Unit). The increasing of the energy value measured as a net energy ratio (NER) is from 3.19 to 3.31 or around 3.4%. Innovation of methane capture also produces carbon emissions saving of 126.4 kg/FU or reduces carbon emissions by approximately 8.2% of the baseline value.

Keywords: *biodiesel, palm tree, palm oil effluent (POME), carbon emissions, NER (net energy ratio)*

ABSTRAK

Biodiesel kelapa sawit diprediksi oleh banyak kalangan menjadi andalan sebagai sumber bahan bakar nabati (BBN) yang paling tinggi produktivitasnya dibandingkan dengan sumber BBN lainnya. Proses produksi biodiesel kelapa sawit berpotensi mencemari lingkungan akibat dari keluaran limbah padat (tandan buah kosong, serat, cangkang buah dan abu bakar) dan limbah cair kelapa sawit (*palm oil mill effluent/POME*). Makalah ini mengevaluasi dan mendiskusikan potensi penangkapan gas metan dari POME sebagai energi terbarukan dan estimasi penyelamatan emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi BBN. Data kualitas dan kuantitas gas metan yang diperoleh dari studi ini akan diadaptasikan dengan nilai faktor energi dan faktor emisi dari sumber pustaka yang terpercaya. Hasil evaluasi dan perhitungan menyatakan bahwa kualitas dan kuantitas POME menentukan jumlah gas metan yang dihasilkan secara signifikan. Hasil inventori energi mencatat bahwa potensi energi yang dihasilkan dari penangkapan gas metan dari POME berkisar 427,2 MJ/FU (fungsional unit). Nilai energi ini menaikkan *net energy ratio* (NER) dari 3,19 menjadi 3,31 atau sebesar 3,4 %. Inovasi penangkapan gas metan ini juga menghasilkan penyelamatan emisi gas karbon sebesar 126,4 kg/FU atau mengurangi emisi karbon sekitar 8,2 % dari nilai yang umum terjadi.

Kata kunci : biodiesel, kelapa sawit, POME, emisi karbon, NER

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri kelapa sawit Indonesia terus tumbuh dan berkembang menjadi salah satu industri pertanian penyumbang devisa negara yang signifikan. Produk utama dari industri kelapa sawit Indonesia yakni minyak sawit (*crude palm oil*, CPO) pada tahun 2015 mencapai 26,40 juta ton atau naik sekitar 21% dari produksi di tahun

2014 yakni sebesar 21,76 juta ton. Dengan pencapaian tersebut telah menempatkan Indonesia sebagai negara produsen terbesar CPO di dunia dengan prosentase produksi sebesar 46,6% dari total produksi CPO dunia⁽¹⁾.

Dari data statistik perkebunan menyatakan bahwa luasan lahan perkebunan sawit Indonesia

pada tahun 2015 mencapai 6,1 juta ha. Dengan peningkatan luas lahan yang mencapai sekitar 7,67% per tahun, maka diperkirakan luasan lahan sawit Indonesia akan mencapai 13,3 juta hektar pada tahun 2020⁽²⁾. Pada sisi lain permintaan pasar terhadap CPO terus meningkat.

Data dari world statistik menyebutkan bahwa kebutuhan CPO dunia pada tahun 2020 akan mencapai jumlah sebesar 95.7 juta ton⁽³⁾. Kondisi ini menunjukkan bahwa masa depan industri kelapa sawit Indonesia berpotensi terus berkembang untuk mencukupi kebutuhan CPO dunia tersebut. Ilustrasi tentang proyeksi pasar dan potensi industri sawit Indonesia yang menjanjikan tersebut memberikan harapan sekaligus tantangan bagi pelaku industri tersebut. Kondisi produksi dan semua hal-hal yang mendukung keberlanjutan produksi harus dipertahankan, termasuk hal pengelolaan limbah baik pada proses budidaya maupun pada proses dalam pabrik.

Pabrik kelapa sawit selain menghasilkan produk utama CPO juga mengeluarkan limbah tandan kosong, serat, cangkang, abu, dan limbah cair kelapa sawit (*palm oil mill effluent*, POME). Dari beberapa peneliti menyatakan bahwa banyak POME yang dihasilkan sekitar 0,62-0,77 m³/ton TBS^(4,5,6,7,8,9). Sampai saat ini, limbah POME masih menjadi permasalahan lingkungan pabrik kelapa sawit karena volumenya yang besar dan belum termanfaatkan dengan baik. Namun di sisi lain, POME memiliki nilai positif bagi keberlanjutan industri sawit bila dimanfaatkan dengan baik.

1.2. Studi Literatur

POME adalah limbah cair yang berasal dari serangkaian proses produksi CPO pada pabrik kelapa sawit. Komposisi limbah POME terdiri dari 90-95% air, 0,6-0,7% minyak dan 4-5% padatan terlarut⁽¹⁰⁾. POME berasal dari 3 proses dalam produksi CPO yaitu proses sterilisasi tandan segar yang menghasilkan air kondensat (18%), dari *sentrifuge sludge* (74,5%) dan dari pencucian hidrosiklon (30%)^(4,7). Volume total POME yang dihasilkan dalam proses produksi CPO atau biodiesel bervariasi jumlahnya tergantung pada beberapa hal, seperti jenis metode sterilisasi, umur dan jenis tanaman, kondisi tandan buah segar dan variasi musim.

Volume limbah cair yang dihasilkan pabrik kelapa sawit sangat besar. Data perkiraan total limbah cair yang dikeluarkan oleh pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 60 ton/jam dengan masa kerja 16 jam/hari adalah 643,2 m³/hari. Volume limbah sebanyak ini harus diolah sebelum dibuang ke sungai. Kualitas dari limbah POME menunjukkan nilai yang masih jauh dari standar baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah (Tabel 2). Beberapa perusahaan memanfaatkan limbah POME langsung diaplikasikan untuk

pupuk ke tanaman sawit, setelah dilewatkan dan diinkubasi dalam saluran/kolam dalam waktu tertentu. Namun aplikasi ini terbukti mengganggu pertumbuhan dan produktivitas tanaman sawit⁽¹¹⁾.

Tabel 1. Jumlah POME yang dihasilkan dalam proses produksi CPO (m³/1 ton TBS)

Volume (m ³)	Referensi
0,67	Yusoff, 2006 ⁽⁴⁾
0,65	Kamahara, <i>et al.</i> , 2010 ⁽⁵⁾
0,62	Chua, N.S., 1992 ⁽⁶⁾
0,675	Lubis, 2008 ⁽⁷⁾
0,7	Tabassum <i>et al.</i> , 2015 ⁽⁸⁾
0,77	Saidu, <i>et al.</i> , 2013 ⁽⁹⁾

Proses penanganan Tandan Buah Segar (TBS) sampai menghasilkan POME melalui beberapa tahap antara lain sterilisasi, *stripping*, *digestion* dan klarifikasi. TBS hasil panen akan melalui jembatan timbangan (*weight bridge*) untuk mengetahui berat TBS yang diterima, setelah itu TBS disortir kualitasnya dengan cara visual.

Penyortiran kualitas ini untuk menentukan treatment sterilisasi dan proses pengolahan TBS lebih lanjut. TBS selanjutnya dimasukkan ke tempat penimbunan sementara (*loading ramp*) dan selanjutnya diteruskan ke stasiun perebusan (*sterilizer*). Fungsi dari perebusan TBS adalah untuk memudahkan pelepasan brondolan dari janjang (pemipilan), melunakan buah, mengurangi kadar air dalam buah karena proses penguapan. Fungsi terpenting dari perebusan adalah untuk mematikan mikroorganisme dan enzim yang dapat menguraikan minyak menjadi asam lemak bebas.

Pada tahap *stripping*, TBS yang telah direbus dipisahkan buah dari janjangannya dengan cara mengangkat dan membantingnya serta mendorong tandan kosong ke tempat yang telah disiapkan. Pada proses *digestion*, TBS yang telah dipisahkan dari tandan kosongnya, dilakukan pelumatan dan pengempaan untuk mengambil minyak dari buah kelapa sawit. Selanjutnya minyak sawit yang diperoleh dari tahap *digestion* masih banyak mengandung kotoran-kotoran yang berasal dari daging buah seperti lumpur, air dan lain-lain. Untuk mendapatkan minyak yang memenuhi standar, maka perlu dilakukan pemurnian terhadap minyak pada tahap ini.

POME yang dikeluarkan dari pabrik kelapa sawit memiliki karakteristik seperti yang disajikan pada tabel 2. Dari komposisi POME yang keluar dari outlet pabrik kelapa sawit (Tabel 2), menyebutkan bahwa hampir semua parameter kualitas air dari POME nilainya di atas dari nilai standart yang ditetapkan oleh pemerintah. Untuk menjaga keberlanjutan pabrik, maka limbah POME tersebut harus dikelola sedemikian rupa sehingga nilainya di bawah nilai standart atau

nilainya berada pada batas-batas tidak mencemari lingkungan. Bila mencermati nilai kandungan BOD dan COD yang tinggi, maka upaya konversi limbah POME menjadi energi terbarukan adalah upaya yang sangat menjanjikan.

Tabel 2. Karakteristik dari POME*

Parameter	range	Standart**
Suhu	80-90	45
pH	3,4 -5,2	6,0 – 9.0
Minyak (mg/L)	130-18.000	30
BOD (mg/L)	10.250-43.750	100
COD (mg/L)	15.000-100.000	500
Padatan terlarut (mg/L)	5.000 -54.000	300
Total N (mg/L)	180-1.400	200

* Lam *et al.*, 2011⁽¹⁰⁾

** No.5 /MENLH/2014⁽¹²⁾

1.3. Tujuan

Tujuan paper ini adalah mengulas tentang potensi energi yang dihasilkan dari pemanfaatan POME menjadi energi terbarukan dan potensi pengurangan emisi gas rumah kacanya. Pembahasan makalah difokuskan pada proses perhitungan potensi gas metan dari POME dengan membandingkan NER antara kondisi POME yang diolah dan yang tidak diolah.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Pengumpulan dan Analisis Data

Penelitian ini memfokuskan pada pengelolaan limbah cair dari pabrik kelapa sawit dengan kapasitas penanganan tandan buah

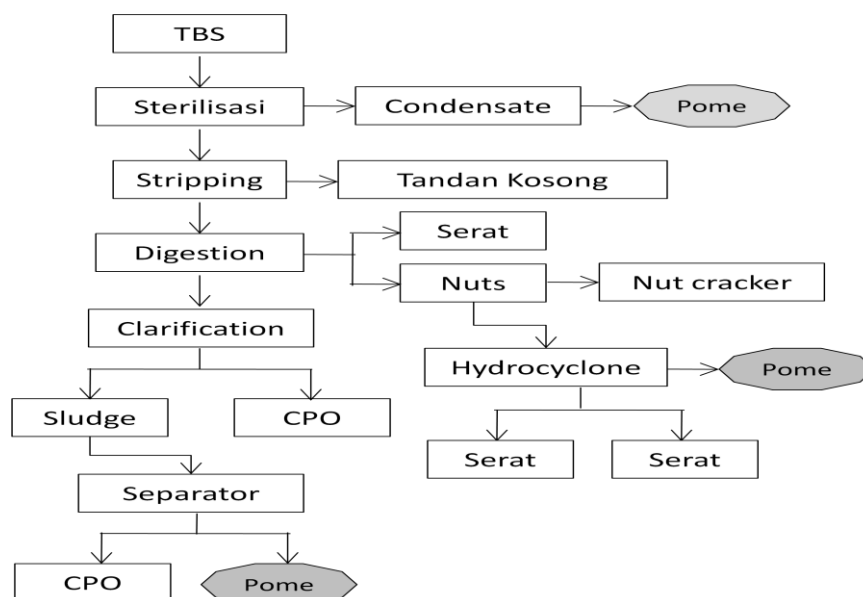
segar (TBS) sebanyak 50 ton/hari. Pabrik menerima TBS yang diangkut dari perkebunan yang berlokasi di sekitar pabrik dalam radius 5-8 km. Pabrik memiliki fasilitas pengolahan limbah cair, yang meliputi kolam penampungan awal, kolam aerobik dan kolam anaerobik. Limbah cair yang ditampung berasal dari 3 sumber proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Data yang pertama dikumpulkan adalah data untuk memenuhi kebutuhan *life cycle assessment* (LCA) dari produksi biodiesel dengan satuan unit 1 (satu) ton biodiesel. Untuk memenuhi data ini, penulis berpatokan pada ruang lingkup penelitian (Gambar1), semua material, energi, dan limbah dari proses produksi biodiesel dikumpulkan dan divalidasi dengan data dari literatur yang *up to date* dan terpercaya.

Data yang utama lainnya adalah data tentang kuantitas dan kualitas limbah cair pabrik kelapa sawit. Data kuantitas limbah diperoleh dari 2 sumber, yakni dari data monitoring harian pabrik terhadap volume air limbah di kolam penampungan dan data input air yang digunakan selama proses produksi berlangsung.

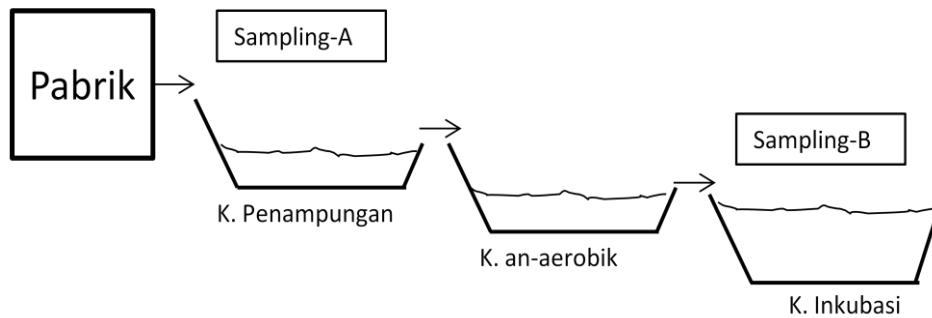
Sampel air yang diperoleh dari kedua kolam kemudian dianalisa di Labolatorium untuk mendapatkan data suhu, BOD, dan COD.

Data kualitas air limbah diambil dengan pengukuran dan analisa lapangan. Metode pengambilan sampling secara cross section dengan mengambil sampel secara acak dan bersamaan pada 5 stasiun pada kolam penampungan limbah (A) dan 5 stasiun pada kolam inkubasi (B) (Gambar 2).



(sumber: Lam *et al.*, 2011⁽¹⁰⁾; TY. Wu *et al.*, 2010⁽¹¹⁾, diadaptasi penulis)

Gambar 1. Skema sumber POME pada proses produksi CPO



Gambar 2. Skema kolam penampungan limbah

2.2 Data Faktor Energi

Data tentang kualitas dan kuantitas POME yang diperoleh selanjutnya diadaptasi dengan skala fungsional unit (FU). Data FU selanjutnya dianalisis dan dikonversi ke perhitungan energi (sesuai tabel 3) dengan menampilkan indikator nilai NER (*net energy ratio*) dilakukan secara manual dengan *MS-Excell*.

Tabel 3. Data faktor energi per 1 ton CPO

Parameter	Unit	Nilai
TBS	ton	4,6 ⁽¹³⁾
IPCC CH ₄	kg CH ₄ /kg COD removal	0,24 ⁽¹⁴⁾
IPCC CH ₄	m ³ CH ₄ /kg COD removal	0,35 ⁽¹⁴⁾
IPCC energi	Kwh/ m ³ CH ₄	3,47 ⁽¹⁴⁾
IPCC energi	MJ/Kwh	3,6

2.3 Data Faktor Emisi Karbon

Data faktor emisi karbon menggunakan perkiraan data emisi karbon sebesar FU yang diambil dari beberapa sumber yang terpercaya. Emisi karbon total dari proses produksi 1 ton biodiesel adalah 1.541 kg eq-CO₂^(16,17). Data akumulasi jumlah emisi karbon yang dapat disimpan melalui aplikasi pengelolaan limbah cair dari produksi biodiesel kemudian dibandingkan dengan emisi karbon total.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Inventori Energi

Data tentang input dan output proses produksi biodiesel disajikan pada tabel 4 di bawah ini. Untuk memudahkan pengelompokan dan analisis, variabel input dibagi menjadi beberapa sub input antara lain pupuk, pestisida, transportasi, produksi CPO dan produksi biodiesel.

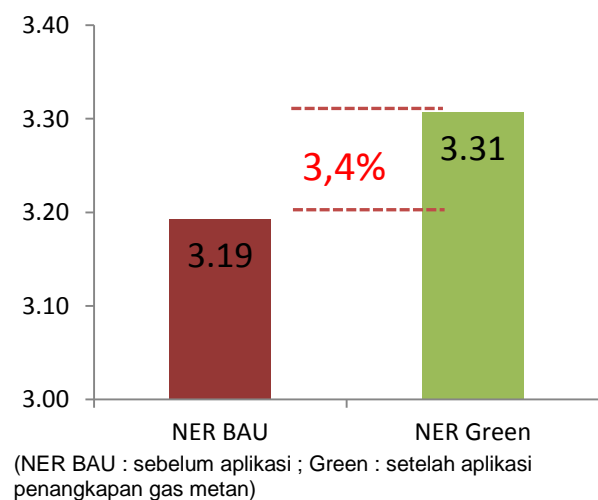
Ditinjau dari konsumsi energi pada setiap tahapnya, maka total persentase energi input yang diperlukan dari tahap budidaya, produksi CPO dan produksi biodiesel adalah 30, 24,5 dan 45,5%. Pada tahap budidaya, variabel yang berkontribusi besar menyerap energi adalah

penggunaan pupuk N (urea) yang mencapai 2.490 MJ. Pada tahap produksi CPO, variabel yang dominan menyerap energi adalah variabel penggunaan listrik dan steam yang mencapai 2.765 MJ. Listrik dan steam ini digunakan pada proses sterilisasi TBS dan proses klarifikasi minyak. Pada tahap produksi biodiesel, penggunaan metanol mendominasi penyerapan energi yakni sebesar 4.690 MJ.

3.2 Potensi Energi dari POME

Perhitungan estimasi potensi produksi energi dari limbah POME pada proses produksi biodiesel kelapa sawit disajikan pada tabel 5.

Banyaknya gas CH₄ yang terbentuk yang nanti akan dapat dikonversi menjadi energi (MJ) tergantung pada kondisi kualitas dan kuantitas POME. Kualitas POME ditentukan oleh selisih nilai COD pada 2 lokasi pengukuran yakni pada kolam penampungan (outlet pabrik) dan kolam inkubasi. Semakin tinggi selisih COD (COD removal) tersebut maka semakin banyak gas metan yang terbentuk.



Gambar 3. Kenaikan nilai NER akibat pemanfaatan POME

Persentase data COD removal pada penelitian ini berkisar 86,8%. Nilai ini

menunjukkan bahwa proses penangkapan gas metan dari limbah POME berlangsung efektif. Nilai persentase ini hampir sama seperti yang dilakukan beberapa peneliti, seperti Hasanuddin et al (85-87%)⁽²⁰⁾, Yacob et al. (80,7%)⁽¹³⁾ dan Wu et al (71-76%)⁽¹¹⁾. Total potensi energi yang

dihasilkan dari peng (satu) ton biodiesel adalah sekitar 427,2 MJ. Nilai energi ini meningkatkan nilai NER produksi biodiesel sebesar 3,4% dari nilai 3,19 menjadi 3,31 (Gambar 3).

Tabel 4. Inventaris data input dan output produksi 1 ton biodiesel

Life Cycle Biodiesel Production	Per ton PME	MJ/ton PME
Input (satuan)		
I. Pupuk		
Nitrogen (kg)	75	2.490
Fosfat (kg)	8	22,4
Kalium (kg)	70	245
Magnesium (kg)	42	21
Sub total (kg)		2.778,40
II. Pestisida		
Paraquat (kg)	0.4	183,36
Glyshopate (kg)	1.2	543
Sub total		726,36
III. Transportasi (l diesel)		
Sub total	4.75	196,32
IV. Produksi CPO		
Listrik (kWh)	140	1.465,8
Steam (m3)	0.5	1.302
Diesel (l)	7	289,31
Sub total		3.057,11
V. Produksi Biodiesel		
Listrik (kWh)	80	837,6
Metanol (kg)	140	4.690
NaOH (kg)	6	118,2
Sub total		5.645,8
Total Energi Input (I+II+III+IV+V)		12.403,99
Output (satuan)		
Palm methyl ester (PME) (kg)	1000	39.600
Glyserol (kg)	0.18	3,25
Total Energi Product		39.603,25

Tabel 5. Estimasi potensi energi dari POME

Parameter	Stn-1	Stn-2	Stn-3	Stn-4	Stn-5	Rerata
COD Kolam A (mg/L)*	49.535,0	53.010,0	47.975,0	51.350,0	49.540,0	50.282,0
COD Kolam B (mg/L)*	8.530,0	6.750,0	5.500,0	6.010,0	6.250,0	6.608,0
COD removal (mg/L)	41.005,0	46.260,0	42.475,0	45.340,0	43.290,0	43.674,0
COD _{removal} (%)	82,8	87,3	88,5	88,3	87,4	86,8
COD _{removal} (kg)	128,4	144,9	133,1	141,9	135,5	136,8
CH ₄ (m ³)	32,1	36,2	33,3	35,5	33,9	34,2
Kwh	111,4	125,7	115,4	123,2	117,6	118,6
MJ	401,1	452,5	415,4	443,5	423,4	427,2

Ket : * diadaptasi dari Yacob *et al*, 2005⁽¹³⁾; data dihitung berdasarkan acuan produksi 1 ton biodiesel

Tabel 6. Estimasi potensi penyelamatan emisi karbon

Parameter	Stn-1	Stn-2	Stn-3	Stn-4	Stn-5	Rerata
COD removal (kg)	128,4	144,9	133,1	141,9	135,5	136,8
CH ₄ (kg)	32,1	36,2	33,2	35,4	33,9	34,2
GWP pot (kg CO ₂ -e/ton biodiesel)	674,2	760,6	698,4	745,5	711,6	718,1

3.3 Potensi Penyelamatan Emisi Karbon

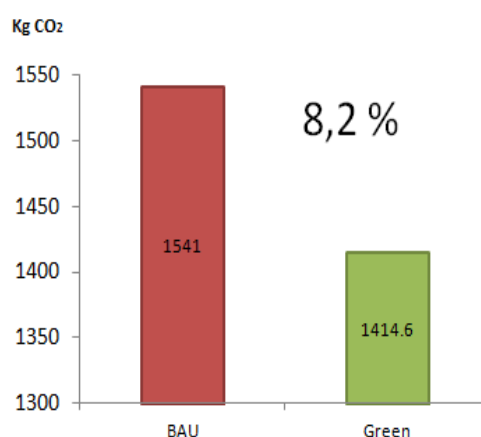
Inovasi pengelolaan limbah POME juga berpotensi menyelamatkan emisi karbon. Perhitungan banyaknya gas metan yang terperangkap oleh proses metan *capture* yang menyebabkan gas metan tidak terurai ke atmosfer disajikan pada Tabel 6.

Potensi emisi karbon yang dapat diselamatkan dengan memanfaatkan limbah POME adalah 126,4 kg/ton atau mengurangi emisi sebesar 8,2 % dari total emisi yang dikeluarkan (Gambar 4). Nilai kisaran ini sangat besar bila dikaitkan dengan jumlah total produksi biodiesel skala besar. Sebagai ilustrasi misalnya pabrik kelapa sawit dengan kapasitas olah TBS 60 ton/jam masa kerja 16 jam/hari, maka diperkirakan biodiesel yang diproduksi adalah 280 ton/hari atau 6.260,8 ton/bulan. Dari kapasitas total produksi pabrik tersebut maka bila pabrik mengolah POME-nya emisi karbon yang bisa diselamatkan setiap bulan dan setiap tahun adalah 26,4 ton dan 791,2 ton CO₂.

3.4 Pembahasan Umum

Upaya pengelolaan limbah POME menghasilkan dua keuntungan bagi industri kelapa sawit, yaitu keuntungan berupa tambahan energi dan partisipasi dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Upaya pengurangan emisi gas rumah ini masih belum dihargai secara finansial. Program CDM (*clean development mechanism*) maupun REDD (*reduction emission deforestation*

and degradation) masih jarang diaplikasikan di sektor perkebunan sawit, namun upaya ini akan meningkatkan promosi kegiatan sawit sebagai kegiatan yang ramah lingkungan. Promosi ini akan sangat berguna sebagai jawaban atas kritikan berbagai pihak yang menuduh bahwa kegiatan sawit cenderung anti konsevasi lingkungan.



(BAU : sebelum aplikasi ; Green : setelah aplikasi penangkapan gas metan)

Gambar 4. Penurunan emisi karbon akibat pemanfaatan POME

Energi tambahan dari pengolahan limbah POME sekitar 427,2 MJ atau sekitar 3,4 % dari total energi input sebesar 12.403 MJ. Energi tambahan ini relatif kecil bila dilihat dari

persentasenya, namun yang dipentingkan dalam pengelolaan POME ini adalah upaya pengelolaan limbah agar keberadaannya tidak mengganggu lingkungan dan sebagai persyaratan kelaikan beroperasinya pabrik kelapa sawit.

Potensi yang dapat menjadi sumber tambahan energi yang banyak dilakukan oleh industri sawit adalah memanfaatkan cangkang buah, serat dan tandan buah kosong sebagai material bahan bakar *steam* dan pengganti energi diesel. Energi yang dihasilkan dari pemanfaatan limbah padat tersebut adalah 11.710 MJ/ton biodiesel⁽¹⁸⁾ dan 15.870 MJ⁽¹⁹⁾.

Hal lain yang menjadi perhatian dalam pengelolaan POME adalah pengelolaan POME paska proses penangkapan gas metan. Kualitas POME paska treatment menunjukkan nilai COD yang masih tinggi yakni berkisar 5.500 – 8.530 ppm. Nilai COD ini masih jauh di atas nilai yang dipersyaratkan pemerintah yakni 500 ppm⁽¹²⁾. (POME paska treatment harus diolah lagi sebelum dibuang ke saluran pembuangan umum seperti sungai. Beberapa pabrik mengolah limbah paska POME dengan menampung pada kolam inkubasi selama beberapa waktu hingga kandungan COD dan parameter lainnya mendekati parameter yang diperbolehkan. Upaya lain untuk mengolah POME paska treatment adalah memanfaatkannya menjadi air siraman untuk pembuatan kompos dengan media kompos berupa serat dan tandan buah kosong. POME secara berkala dialirkan ke media kompos untuk mempercepat dekomposisi media menjadi kompos^(20,21).

4. KESIMPULAN

Pemanfaatan limbah cair (POME) dari proses produksi biodiesel kelapa sawit merupakan salah satu inovasi teknologi untuk meningkatkan nilai produk dari kelapa sawit sekaligus menciptakan kondisi yang baik untuk keberlanjutan industri kelapa sawit. Ada 2 keuntungan sekaligus yang diperoleh dari inovasi tersebut yaitu adanya tambahan energi terbarukan dan penyelamatan gas karbon dioksida. Tambahan energi yang didapat sekitar 411,7 MJ/FU atau menaikkan *net energy ratio* (NER) sebesar 3,4 % dari nilai yang biasanya. Sedangkan emisi gas karbon yang diselamatkan adalah sebesar 126,4 kg/FU atau mengurangi emisi karbon sekitar 8,2 % dari nilai yang biasanya.

PERSANTUNAN

Kepada Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP) Sawit - Departemen Keuangan, atas bantuan pembiayaan penelitian bagi penulis. Penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada Prof. Kardono atas bimbingan, arahan dan koreksi makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. [http://gapki.id/refleksi-industri-kelapa-sawit \(2015\) -dan-prospek-2016/](http://gapki.id/refleksi-industri-kelapa-sawit-(2015)-dan-prospek-2016/) diunduh 10 Nov 2016 jam 03.50.
2. <http://ditjenbun.pertanian.go.id/setditjenbun/berita-238-pertumbuhan-areal-kelapa-sawitmeningkat.html/diunduh> 09 Nov 2016 jam 19.45.
3. <http://data.worldbank.org/>
4. Yusoff, S., (2006), Renewable Energy from Palm Oil-innovation on Effective Utilization of Waste, Journal of Cleaner Production 14:87-93.
5. Kamahara, H., U. Hasanuddin,., A Widiyanto,., R. Tachibana, Y. Atsuta, N. Goto, H. Daimon, K. Fujie, (2010), Improvement potential for net energy balance of biodiesel derived from palm oil: A case study from Indonesia practice, Biomass and Bioenergy 34:1818-1824.
6. Chua N.S., (1992), Optimal Utilization of Energy Sources in a Palm Oil Processing Complex. Porim Engineering News, 25:3-6.
7. Lubis, A.U., 2008, Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Indonesia, edisi-2, Pusat Penelitian Kelapa Sawit, Medan, 277-301 hal.
8. Tabassum, S., Y. Zhang, Z. Zhang, (2015), An Integrated Method for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment for Achieving Zero Liquid Discharge – a pilot study. J. Cleaner Prod. 95, 148–155.
9. Saidu M., A. Yuzi, M.R. Salim , S. Imiati, S. Azman, N. Abdullah, (2013), Influence of Palm Oil Mill Effluent as Inoculums on Anaerobic Digestion of Cattle Manure for Biogas Production. Bioresource Technology 141, 174-174.
10. Lam M.K., K.T. Lee, (2011), Renewable and sustainable bio energies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection, Biotechnology Advances 29, 124–141.
11. Wu T.W., M.A. Wahab, M.J. Jahim, N. nuar N., (2009), A holistic approach to managing palm oil mill effluent (POME): Biotechnological advances in the sustainable reuse of POME, Biotechnology Advances 27:40-52.
12. Anonim, (2014), Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku mutu air limbah. Kantor Menteri Lingkungan Hidup.

13. Yacob S., M.A, Y. Shirai , M. Wakisaka, S. Subash, (2005), Baseline study of methane emission from open digesting tanks of palm oil mill effluent treatment, *Chemosphere* 59: 1575-1581.
14. IPCC, (2006), Wastewater treatment and discharge. In: IPCC Guidelinnes for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 5. Prepare by H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe) IGES, Japan
15. 15. Siregar K., A.H. Tambunan, A.K. Irwanto, S.S Wirawan, T. Araki, (2015), A comparison of life cycle assessment on oil palm (*Elaeis guineensis*) and Physic nut (*Jatropha curcas*) as feedstock for biodiesel production in Indonesia, *Energy Procedia*, 170-179.
16. Silalertruksa T., S.H. Gheewala, (2012), Environmental sustainable assessment of palm biodiesel production in Thailand, *Energy* 43: 306-3014.
17. Papong S., C. Tassaneewan, N. Soottivan, M. Pomthong, (2010), Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production from palm oil in Thailand, *Energy policy* 38: 226-233.
18. Pleanjai S., S.H. Gheewala, (2009), Full Chain Energy Analysis of Biodiesel Production from *Jurnal Teknologi Lingkungan* Vol. 18, No 1, Januari 2017, 88-95
Palm Oil in Thailand. *Applied Energy*, 18: 209-214.
19. Hasanuddin U., R. Sugiharto, A. Haryanto, T. Setiadi, K. Fujie, (2015), Palm oil mill effluent treatment and utilization to ensure the sustainability of palm oil industries, *Water science and technology* 72.7: 1089-1095.
20. 20. Schuchardt F., D. Darnoko, P. Guritno, (2002), Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation of palm oil mill waste water (POME), *International oil palm Conference*, July 8-12, 2002, Nusa Dua, Bali, Indonesia.