

**PERBANDINGAN PENILAIAN SIKLUS HIDUP (*LIFE CYCLE ASSESSMENT*) PRODUKSI
BIODIESEL SECARA KATALIS DARI *CRUDE PALM OIL* DAN *CRUDE JATROPHA CURCAS OIL***

***A COMPARISON OF LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIODIESEL PRODUCTION USING CATALYST
FROM CRUDE PALM OIL AND CRUDE JATROPHA CURCAS OIL***

Kiman Siregar^{1,2)}, Armanyah H. Tambunan^{1)*}, Abdul K. Irwanto³⁾, Soni S. Wirawan⁴⁾, Tetsuya Araki⁵⁾

¹⁾Program Studi Ilmu Keteknikaan Pertanian, Pascasarjana, IPB
PO Box 220, Kampus Darmaga, Bogor, Jawa Barat 16002
Email : ahtambun@ipb.ac.id

²⁾Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Hasan Krueng Kalee No.3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh 23111

³⁾Program Studi Ilmu Manajemen, Pascasarjana, IPB
Kampus Darmaga Bogor, Jawa Barat 16002,

⁴⁾Balai Besar Teknologi Energi-, PPT
Kawasan Puspitek Serpong Gd.620, Setu, Tangerang Selatan 15314,

⁵⁾Graduate School of Agriculture and Life Sciences, The Universitas of Tokyo,
1-1-1 Yayoi Bunkyo Ward, Tokyo 113-8657, Japan

ABSTRACT

Energy sector plays an important role for Indonesia and even the world in achieving their development goal. One issue related to countries strive for utilizing feedstock has emerged globally in the development of biodiesel production, e.g. USA, Europe, Asia, particularly Indonesia used soybean, rapeseed, and palm oil with jatropha curcas, respectively. Other global issue puts environmental as main consideration as they produced gaseous emission transferred into atmosphere which enhance global warming risk and causes damage to the environment. European countries claim that processing palm oil from planting into deriving biodiesel increase carbon emission transferred into the atmosphere. Appropriate method to analyze aforementioned problems is Life Cycle Assessment (LCA). Biodiesel production in Indonesia uses oil palm as the feedstock. Besides that, utilization of jatropha also recommended since it is inedible and adaptable to various land conditions in the country. This study was a comparative life cycle assessment of biodiesel production from oil palm and jatropha produced in Indonesia. The analysis was grouped into unstable production stage and stable production stage in order to accommodate the natural growth characteristics of both crops. The results of this study shows that biodiesel production from oil palm gave higher value of global warming potential (GWP) than jatropha. The use of agro-chemicals, such as fertilizers, herbicides, insecticides and pesticides, contribute significantly to the total GWP value, which were 68.14% and 37.56% for oil palm and jatropha, respectively. Emission characteristics of both crops during unstable productivity period were found to be different during the stable productivity. Annual GWP value and energy consumption for producing biodiesel from oil palm was found to be higher than that from those of jatropha.

Keywords : life cycle assessment, crude palm oil, crude Jatropha curcas oil, biodiesel

ABSTRAK

Sektor energi memainkan peran penting bagi Indonesia dan bahkan dunia dalam mencapai tujuan pembangunannya. Salah satu isu yang berkaitan dengan negara-negara yang berusaha untuk memanfaatkan bahan bakunya telah muncul secara global dalam pengembangan produksi biodiesel, misalnya USA yang menggunakan kacang kedelai, Eropa menggunakan *rapeseed* dan Asia khususnya Indonesia menggunakan minyak sawit. Isu global lainnya menempatkan lingkungan sebagai pertimbangan utama, karena produksi biodiesel menghasilkan emisi gas yang meningkatkan risiko pemanasan global dan menyebabkan kerusakan lingkungan. Negara-negara Eropa mengklaim bahwa pengolahan biodiesel yang berasal dari minyak sawit menyebabkan peningkatan emisi karbon yang ditransfer ke atmosfer. Metode yang tepat untuk menganalisis masalah tersebut melalui Penilaian Siklus Hidup (LCA). Produksi biodiesel di Indonesia menggunakan kelapa sawit sebagai bahan bakunya. Selain itu, penggunaan jatropha juga dianjurkan karena merupakan tanaman yang tidak dapat dimakan dan beradaptasi dengan berbagai kondisi tanah kritis yang ada di Indonesia. Studi ini merupakan penilaian komparatif siklus hidup dari produksi biodiesel dari minyak sawit dan jarak yang diproduksi di Indonesia. Analisis dikelompokkan ke dalam tahapan produksi tidak stabil dan tahap produksi stabil untuk mengakomodasi karakteristik pertumbuhan alami dari kedua tanaman ini. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa produksi biodiesel dari kelapa sawit memberikan nilai yang lebih tinggi pada potensi pemanasan global (GWP) daripada jarak pagar. Penggunaan agro-kimia, seperti pupuk, herbisida, insektisida dan pestisida, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap total nilai GWP, yaitu masing-masing 68,14% untuk kelapa sawit dan 37,56% untuk jarak pagar. Karakteristik emisi dari kedua tanaman selama periode produktivitas tidak stabil ditemukan berbeda

dengan produktivitas stabil. Nilai GWP dan konsumsi energi untuk memproduksi biodiesel dari kelapa sawit ditemukan lebih tinggi dari jarak pagar.

Kata kunci: penilaian siklus hidup, minyak mentah sawit, minyak mentah jarak pagar, biodiesel

PENDAHULUAN

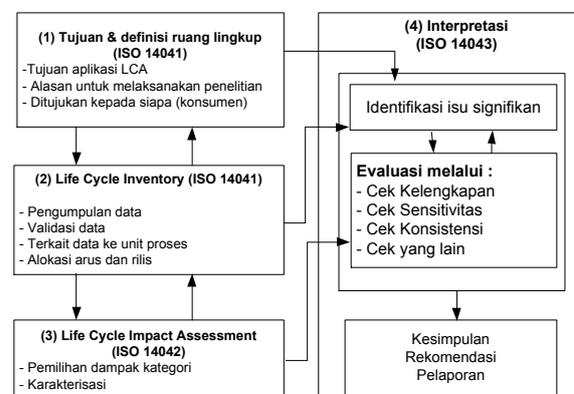
Indonesia sebagai negara agraria dan produsen minyak sawit terbesar di dunia memiliki potensi yang sangat besar untuk mengembangkan energi terbarukan sebagai sumber energinya, khususnya biodiesel. Keamanan energi merupakan sektor yang sangat penting dalam stabilitas ekonomi masing-masing negara, khususnya Indonesia sebagai sebuah negara berkembang, untuk mendapatkan pembangunan yang berkelanjutan. Meskipun biodiesel diklaim sebagai energi terbarukan, tetapi sepanjang siklus hidupnya masih banyak menggunakan bahan *agro-chemical* dan sumber energi tidak terbarukan. Kondisi ini mengungkapkan bahwa produksi biodiesel sesungguhnya masih mencemari lingkungan, namun seberapa besar nilainya tersebut harus dianalisa dan dihitung, serta dapat dibandingkan dengan nilai pencemaran lingkungan bahan bakar diesel. Salah satu isu yang berkaitan dengan negara-negara yang berusaha untuk memanfaatkan bahan bakunya telah muncul secara global dalam pengembangan produksi biodiesel, misalnya USA yang menggunakan kacang kedelai, Eropa menggunakan *rapeseed* dan Asia khususnya Indonesia menggunakan minyak sawit. Isu global lainnya menempatkan lingkungan sebagai pertimbangan utama, karena produksi biodiesel menghasilkan emisi gas yang meningkatkan resiko pemanasan global dan menyebabkan kerusakan lingkungan.

Negara-negara Eropa mengklaim bahwa pengolahan biodiesel yang berasal dari minyak sawit menyebabkan peningkatan emisi karbon yang ditransfer ke atmosfer, bahkan EPA-NODA menyebutkan bahwa biodiesel dari minyak sawit hanya dapat menurunkan emisi GWP-nya hanya 17%, sedangkan persyaratan yang ditetapkan adalah minimal 35%, sehingga CPO dari Indonesia sangat kesulitan untuk masuk pasar global. Indonesia sangat berkepentingan untuk menjawab permasalahan ini secara ilmiah, namun sampai saat masih sangat sedikit mengeluarkan publikasi ilmiah internasional untuk menjawab emisi minyak sawitnya. Metode yang tepat untuk menganalisis masalah tersebut adalah melalui *life cycle assessment* (LCA) yang sesuai dengan Standar Organisasi Internasional (ISO seri 14000).

LCA adalah alat yang sistematis untuk menilai dampak lingkungan yang terkait dengan setiap produk, proses dan kegiatan yang dibakukan dalam seri ISO-14000 (Ciambrone, 1997). Tahapan LCA dapat dilihat pada Gambar 1. LCI adalah salah satu empat langkah di LCA yang memainkan peranan sangat penting dalam melaksanakan penilaian. Hasil dari LCA sangat dipengaruhi oleh

keandalan dan kecukupan inventarisasi data objek yang sedang dinilai. Dalam kasus Indonesia, akses data yang dapat digunakan dalam LCA ini masih sangat terbatas. Proses pengumpulan data adalah fokus utama dalam analisis persediaan dan proses yang paling memakan waktu dari semua proses LCA (Searcy, 2000). Sejumlah penelitian LCA pada produksi biodiesel yang menggunakan bahan baku dari Indonesia menemukan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan hasil ini, salah satunya disebabkan oleh inkonsistensi data yang digunakan dan kurang mendekati kondisi nyata di lapangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian secara terus-menerus untuk mengidentifikasi dan mendekati kondisi nyata perkebunan kelapa sawit dan jarak pagar di Indonesia.

Bahan baku utama produksi biodiesel di Indonesia adalah CPO, karena Indonesia adalah salah satu penghasil utama minyak sawit di dunia. Namun, pemerintah Indonesia juga mengidentifikasi yang lain, yaitu CJCO. *Jatropha curcas* L. adalah tanaman industri *non-edible* untuk produksi bahan bakar biodiesel sebagai alternatif sumber energi atau bahan bakar (Tambunan *et al.*, 2012). Meskipun minyak tanaman *edible* sebagai bahan baku utama biodiesel, kemungkinan tanaman *non-edible* harus dianalisa dan diteliti lebih lanjut untuk menghindari konflik antara pemanfaatan tanaman untuk makanan atau biodiesel. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa dan membandingkan penilaian siklus hidup proses produksi biodiesel secara katalis dari bahan baku CPO dan CJCO dengan batasan dari buaian ke pintu gerbang (*cradle to gate*) di Indonesia.



Gambar 1. Tahapan LCA

METODE PENELITIAN

Batasan dalam penelitian LCA ini ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu dari *cradle to gate* (buaian ke pintu gerbang) yang terdiri dari delapan

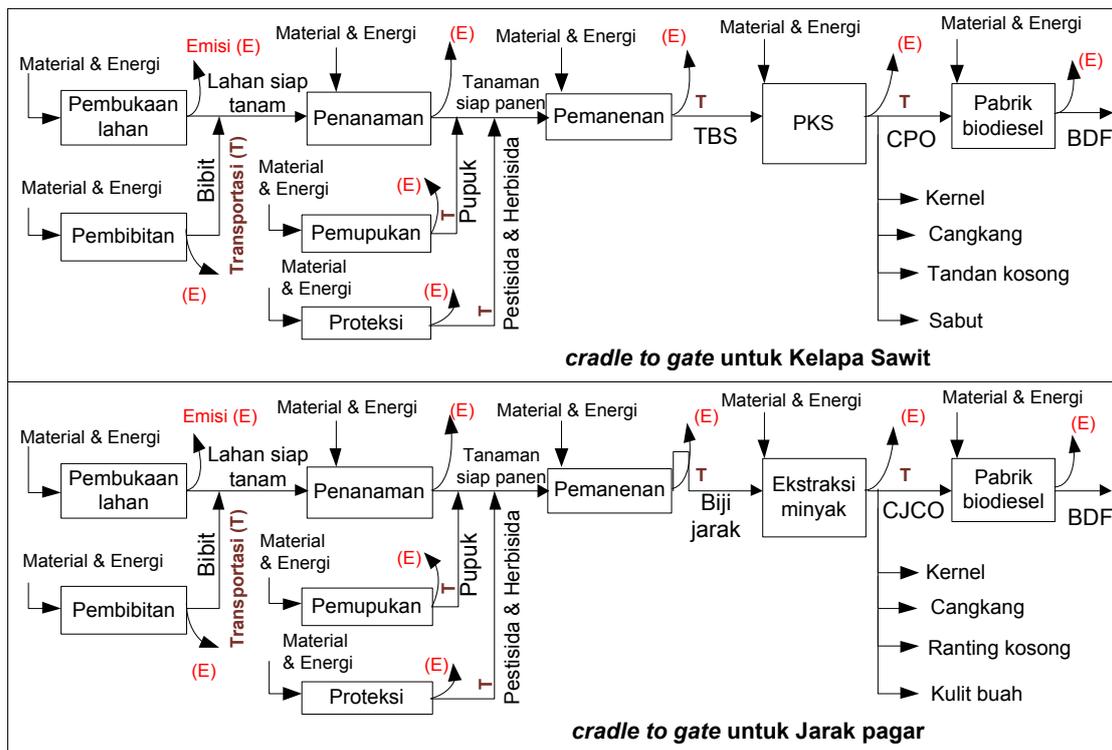
tahapan sub-proses. Unit fungsional dari penelitian ini adalah 1 ton produksi biodiesel dari CPO dan CJCO per ha per tahun. Karena keterbatasan waktu dan prasarana lainnya, data yang diperoleh dalam penelitian ini terutama mengenai kondisi Jawa dan Sumatera, walaupun sebenarnya Indonesia terdiri dari berbagai pulau, seperti Kalimantan, Sulawesi, dan Papua yang memiliki karakteristik yang berbeda dari tanah, iklim, dan faktor-faktor lain yang perlu perlakuan yang berbeda pula. Sumber data terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer secara langsung dilakukan berdasarkan data yang dikumpulkan dari perkebunan kelapa sawit di PTPN VIII Unit Kebun Kertajaya Lebak Banten, serta dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Kertajaya dengan kapasitas 30 ton TBS per jam. Sementara itu, data untuk budidaya, pemanenan, ekstraksi minyak jarak pagar, dikumpulkan dari Pusat Induk Jarak Pagar Pakuwon Sukabumi Jawa Barat, serta produksi biodiesel secara katalis dengan bahan baku CPO dan CJCO yang dilakukan secara langsung dengan menggunakan alat di BRDST BPPT Puspitek Serpong dengan kapasitas 1 ton per hari. Dan data sekunder diperoleh dari jurnal nasional dan internasional, data pabrik kelapa sawit dari laporan praktek lapang mahasiswa tentang perkebunan kelapa sawit, skripsi, tesis, dan laporan penelitian yang masih relevan, serta data-data dari perusahaan swasta nasional yang bergerak dalam bidang produksi biodiesel dari CPO dan CJCO.

Analisis siklus hidup persediaan dilakukan pada masukan material dan energi, emisi ke air, emisi ke udara, dan limbah padat yang terlibat dalam

produksi biodiesel. Tahapan analisis dan perhitungan dilakukan sebelum tanaman berproduksi stabil dan setelah tanaman berproduksi stabil. Berdasarkan survei di lapangan, dapat diasumsikan bahwa tanaman kelapa sawit mulai berproduksi pada umur 30 bulan, sementara jarak pagar pada umur 4 bulan dan akan berproduksi stabil setelah umur tanaman lima tahun (Pranowo, 2009; Ferry, 2009; Pahan, 2011; Lubis dan Widanarko, 2011).

Transportasi juga diperhitungkan dalam penelitian ini, yaitu dari areal pembibitan ke areal penanaman/perkebunan sepanjang 30 km dengan kapasitas truk 5 ton, dengan rasio bahan bakar diesel 1:5 (1 liter untuk 5 km), dari areal perkebunan/pemanenan untuk mengangkut tandan buah segar (TBS) ke PKS rata-rata sebesar 150 km (karena lokasi kebun yang cukup jauh dari PKS) dengan kapasitas truk 10 ton dengan rasio bahan bakar diesel 1:7, serta dari PKS ke pabrik biodiesel (di Bekasi) 200 km dengan kapasitas truk 10 ton. Jarak transportasi untuk perhitungan diasumsikan sekali jalan dengan titik sentral di PKS Unit Kebun Kertajaya Lebak Banten dan Pusat Induk Jarak Pagar Pakuwon Sukabumi.

Penilaian dampak (*Life Cycle Impact Assessment*) dilakukan dengan menggunakan *software* MiLCA-JEMAI (*Multiple Interface Life Cycle Assessment-Japan Environmental Management Association for Industry*) versi 1.1.2.5 dengan menggunakan data Indonesia, skema proses perhitungan seperti diperlihatkan pada Gambar 3



Gambar 2. Batasan penelitian

| MASUKAN | PROSES | KELUARAN |
|---|--|--|
| <p>MATERI & ENERGI :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Listrik, • Pupuk, • Insektisida, • Metanol • Dan lain-lain | <p>Calculation by Software MILCA-JEMAI</p>  <p>Client Version : 1.1.2.5 Database Version : 1.2.0 License : Regular licence Team GUID : Node GUID : a0c7639e-24cb-4856-9059-2b2b3b98ab32 IP Address : 172.18.37.60 MAC Address : 74-E5-43-FB-C1-D2 @copyright JEMAI 2011</p> | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Global warming potential</i> • <i>Acidification</i> • <i>Eutrophication</i> • <i>Waste, landfill volume</i> • <i>Energy consumption</i> |

Gambar 3. Tahapan perhitungan dalam penelitian ini

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persediaan data (*Life Cycle Inventory, LCI*)

Perbandingan materi dan energi yang digunakan untuk produksi 1 ton biodiesel per ha per tahun berbasis bahan baku kelapa sawit dan jarak pagar merupakan rata-rata dari data primer dan skunder seperti ditampilkan dalam Tabel 1 untuk produk belum stabil (Suhartana dan Arifin, 2008; Anonim, 2008; Pranowo, 2009; Ferry, 2009; Wirawan, 2009; Nasir dan Setyaningsih, 2010; Wicke *et al.*, 2011; Pardamean, 2011; Anonim, 2011; Siregar *et al.*, 2012). Produksi perkebunan kelapa sawit rakyat sekitar 12 ton TBS per ha per tahun, namun untuk perkebunan swasta dengan proses pembibitan, pemeliharaan dan pemupukan yang lebih baik dapat menghasilkan produksi sekitar 32,67 ton TBS per ha per tahun, dengan rata-rata sekitar 22,34 ton TBS per ha per tahun dengan varietas Lame, Langambi, Simalungun, Dura, Tenera, Pisifera, dan lain-lain (Pahan, 2011; Lubis dan Widanarko, 2011). Jarak pagar di petani mempunyai produksi sekitar 2 ton biji per ha per tahun, sedangkan untuk IP3-P sekitar 8 ton biji per ha per tahun, atau dengan rata-rata sekitar 5 ton biji per ha per tahun (Pranowo, 2009).

Siklus hidup kelapa sawit adalah sekitar 25 tahun, sementara jarak pagar dapat mencapai hingga 50 tahun, namun produksi jarak pagar diperkirakan produktif hanya sampai umur 25 tahun (Ferry, 2009; Pranowo, 2009; Tjahjana dan Pranowo, 2010; Pahan, 2011; Lubis dan Widanarko, 2011). Pada Gambar 4 diperlihatkan produksi biodiesel dari CPO dan CJCO per ha per tahun. Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa setelah produksi stabil, kelapa sawit dapat menghasilkan biodiesel 4,31 ton per ha dan jarak pagar 1,09 ton per ha. Kelapa sawit berproduksi pada tahun ke 3, sedangkan jarak pagar walaupun masih sangat rendah, tapi sudah berproduksi dari tahun ke 1. Pleanjai *et al.* (2007) mengatakan bahwa untuk memproduksi 1 ton biodiesel dibutuhkan sekitar 1,14 ton CPO atau rendemen sekitar 87,7%, dan dibutuhkan sekitar 6-7 ton TBS atau rendemen sekitar 15,38% terhadap biodiesel. Dari hasil pengumpulan data

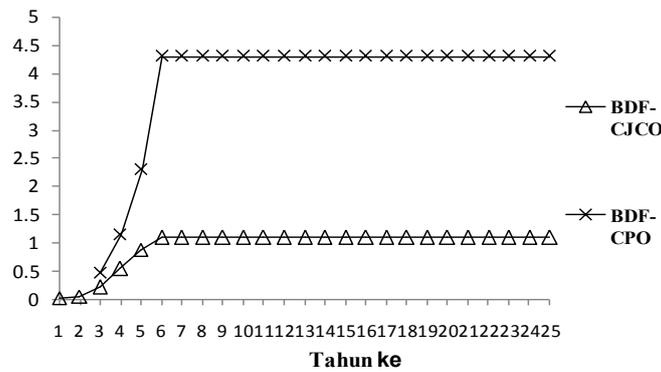
diperoleh bahwa populasi gulma di perkebunan kelapa sawit lebih tinggi dari jarak pagar, sehingga kebutuhan herbisida lebih tinggi pada perkebunan kelapa sawit daripada jarak pagar (Tabel 1). Kebutuhan bahan bakar solar pada perkebunan kelapa sawit juga lebih tinggi dari jarak pagar, kondisi ini disebabkan oleh kebutuhan pengolahan tanah dengan mesin traktor untuk lahan perkebunan kelapa sawit lebih intensif agar tanaman dapat tumbuh dengan baik, dibandingkan dengan jarak pagar, dimana tanaman jarak pagar memiliki ketahanan yang tinggi dengan kondisi lahan yang kritis, sehingga tidak terlalu perlu melakukan pembajakan lahan yang dalam.

Dari Tabel 1 juga dapat dilihat bahwa pada tahap pembibitan, kelapa sawit menggunakan pestisida dan pupuk lebih tinggi daripada jarak pagar. Kondisi ini terjadi karena proses pembibitan kelapa sawit lebih panjang (sekitar 12 bulan) dibandingkan dengan jarak pagar (sekitar 3 bulan). Proses tahap pembibitan, kelapa sawit terdiri dari tahap penumbuhan bibit dan pembibitan utama yang membutuhkan pupuk dan pestisida secara intensif. Pada tahap penanaman, kebutuhan pupuk untuk lubang tanam pada jarak pagar lebih tinggi daripada kelapa sawit. Hal ini terjadi karena jumlah tanaman per hektar pada jarak pagar lebih banyak (sekitar 2500 pohon/ha) dibandingkan dengan kelapa sawit (sekitar 136 pohon/ha) (Ferry, 2009; Tjahjana dan Pranowo, 2010; Pahan, 2011; Lubis dan Widanarko, 2011).

Pada tahap pemupukan (Tabel 1) dapat dilihat bahwa penggunaan bahan dan energi untuk kelapa sawit secara keseluruhan lebih tinggi daripada jarak pagar terutama dalam penggunaan urea, *rock phosphate*, *muriate of potash* (K), ammonia, MgSO₄, walaupun dalam penggunaan pupuk organik lebih tinggi pada jarak pagar. Hal ini terjadi karena sifat dasar dari tanaman kelapa sawit yang tinggi akan kebutuhan pupuk, terutama pupuk N, P, dan K. Pada tahap proteksi, kelapa sawit juga lebih rentan terhadap hama, sehingga membutuhkan insektisida dan pestisida yang lebih besar daripada jarak pagar.

Tabel 1. Massa dan energi untuk produksi 1 ton biodiesel CPO dan CJCO per ha per tahun untuk tahapan produksi sebelum stabil (1-5 tahun)

| Tahapan proses | Massa dan Energi | Satuan | Kelapa sawit | Jarak pagar | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|----------|
| (1) Pembukaan lahan | Herbisida | kg | 2,216 | 1,196 | |
| | Minyak solar | L | 0,675 | 0,011 | |
| (2)Pembibitan | Fungisida | kg | 0,774 | 1,277 | |
| | Insektisida | kg | 0,053 | 0,057 | |
| | Pupuk Meister | kg | 0,081 | - | |
| | Pupuk kimia Urea 0,2 % | L | 1,123 | - | |
| | Pupuk organik | kg | 3,40 | 12,503 | |
| | TSP/SP36 | kg | 0,107 | - | |
| | Muriate Photash (K) | kg | 0,001 | - | |
| | Dolomite | kg | 0,002 | - | |
| | N-P-K-Mg (mixing) | kg | 0,618 | - | |
| | Listrik untuk pompa air | kWh | 26,70 | - | |
| | Pestisida | kg | 0,183 | - | |
| | Transportasi | Minyak solar | L | 4,896 | 1,560 |
| | (3) Penanaman | TSP/SP36 | kg | 9,640 | 79,562 |
| Pupuk organik | | kg | 0,162 | 1591,238 | |
| Rock Phosphate (RP) | | kg | 1,217 | - | |
| KCl | | - | - | 15,912 | |
| (4) Pemupukan Untuk 5 tahun | Urea | kg | 184,694 | 140,029 | |
| | TSP/SP36 | kg | 74,645 | 445,547 | |
| | Rock Phosphate (RP) | kg | 153,685 | - | |
| | Sulphate Amonia (ZA) | kg | 45,633 | - | |
| | Muriate Potash (K) | kg | 202,001 | 152,759 | |
| | Kieserite (MgSO ₄) | kg | 119,020 | - | |
| | HGF-B (HGF-Borate) | kg | 7,676 | - | |
| | CuSO ₄ | kg | 3,651 | - | |
| | ZnSO ₄ | kg | 1,582 | - | |
| | LSD | kg | 54,759 | - | |
| | Pupuk organic | kg | - | 1291,228 | |
| (5) Proteksi Untuk 5 tahun | Insektisida | kg | 2,658 | 2,278 | |
| | Pestisida | kg | 1,955 | 1,816 | |
| | Curater 3G + Dipterek 95 sp | kg | 1,205 | - | |
| (6) Pemanenan | | | | | |
| Transportasi | Minyak solar | L | 5,027 | 2,468 | |
| (7) Pabrik kelapa sawit/Ekstraksi minyak | Listrik | kWh | 44,070 | 14,833 | |
| | Konsumsi steam | kg | 59,770 | - | |
| | Konsumsi air | m ³ | 0,852 | - | |
| | PAC | kg | 0,027 | - | |
| | Flokulon | kg | 0,00011 | - | |
| | NaOH | kg | 0,023 | - | |
| | H ₂ SO ₄ /HCl | kg | 0,023 | - | |
| | Tanin Consenstrate | kg | 0,010 | - | |
| | Poly Perse BWT 302 | kg | 0,010 | - | |
| | Alkali BWT 402 | kg | 0,009 | - | |
| | Konsumsi cangkang (shell) | kg | 28,746 | - | |
| Transportasi | Minyak solar | L | 4,720 | 1,890 | |
| (8) Pabrik Biodiesel | | | | | |
| | | Produksi biodiesel | Ton | - | 1,00 |
| | Esterifikasi | Metanol | Ton | - | 0,449 |
| | | H ₂ SO ₄ | Ton | - | 0,027 |
| | | Listrik | kWh | - | 1,285 |
| | Transesterifikasi | Produksi biodiesel | Ton | 1,00 | - |
| | | Metanol | Ton | 0,269 | - |
| | | Listrik | kWh | 15,645 | 15,645 |
| | | NaOH | Ton | 0,080 | 0,080 |
| | | Crude glycerol | Ton | 0,082 | 0,082 |
| | | Konsumsi air | L | 1700,68 | 1719,180 |
| | | Minyak solar untuk boiler | L | 14,00 | 16,00 |



Gambar 4. Produksi biodiesel per ha dari CJO dan CPO selama siklus hidupnya

Untuk memberikan aplikasi yang tepat, dosis akan berubah terus-menerus berdasarkan kebutuhan tanaman, hal ini dapat dianalisis dari uji laboratorium daun tanaman. Analisis ini akan menghasilkan nilai yang tepat dari jumlah dan jenis pupuk apa saja yang dibutuhkan oleh tanaman. Jarak pagar yang ditanam di Indonesia dikenal sebagai tanaman beracun sehingga memiliki ketahanan tinggi terhadap serangan hama dan penyakit. Hal ini mungkin disebabkan oleh sistem tanam yang umumnya dicampur dengan tanaman lainnya seperti gamal (*glyrecidiamaculata*) dan waru. Jika penanaman dilakukan dalam sistem monokultur dengan berbagi ruang untuk tanaman lain itu mungkin mengakibatkan terjadinya serangan hama dan penyakit.

Pada tahap pemanenan, penggunaan energi transportasi untuk kelapa sawit lebih tinggi daripada jarak pagar karena perbedaan jumlah hasil panen. Hasil panen kelapa sawit lebih tinggi daripada jarak pagar. Dalam hal produksi minyak mentah, ekstraksi minyak jarak pagar kebutuhannya hanya untuk listrik dan bahan bakar solar. Di sisi lain, minyak kelapa sawit membutuhkan lebih banyak bahan dan energi di PKS. Pada tahap produksi biodiesel, karena nilai rata-rata asam lemak bebas (*free faty acid* (FFA)) dari minyak jarak pagar yang tinggi, sehingga dalam produksinya dibutuhkan proses esterifikasi sebelum transesterifikasi. Akibatnya, minyak jarak pagar membutuhkan lebih banyak input material dan energi.

Penilaian dampak (Life cycle impact assessment (LCIA))

Penilaian dampak dilakukan dengan menggunakan *software* MiLCA-JEMAI versi 1.1.2.5. Lima kategori dampak lingkungan yang dinilai yaitu *global warming potensial, acidification, waste for landfill volume, eutrophication, dan energy consumption.*

Tabel 2 memperlihatkan bahwa total dampak lingkungan sebelum produksi stabil. Porsi terbesar dari persentasi nilai GWP muncul dari penggunaan *agro-chemical* pada tahap pemupukan dan tahap proteksi, yaitu 68,14% untuk kelapa sawit dan 37,56% untuk jarak pagar. Hasil penelitian

Pramudita (2011) menunjukkan bahwa nilai emisi GWP di tahapan ekstraksi sebesar 1,34 kg-CO₂eq./kg-CJO dan Sekiguchi (2011) mempunyai nilai sebesar 0,08 kg-CO₂eq./kg-BDF-CJO. Pada penelitian ini diperoleh nilai GWP sebesar 18,65 kg-CO₂eq./ton-BDF-CJO dengan asumsi pengeringan dilaksanakan secara alami (*sun drying*). Siangjaeo (2011) mengatakan bahwa untuk produksi 1 juta liter biodiesel per hari, kasus Krabi, Chonburi dan Pathumthani mengakibatkan masing-masing perubahan stok karbon sebesar -709 Mg CO₂-eq./hari, -748 Mg CO₂-eq./hari, dan -600 Mg CO₂-eq./hari.

Dari Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai GWP kelapa sawit lebih tinggi dari jarak pagar di setiap tahapan proses kecuali untuk tahap penanaman dan produksi biodiesel. Nilai GWP paling signifikan disebabkan oleh tahap pemupukan dan produksi biodiesel baik pada kelapa sawit maupun pada jarak pagar. Nilai total emisi GWP sebelum produksi stabil adalah 2300,24 kg-CO₂eq./ton-BDF-CPO dan 1947,63 kg-CO₂eq./ton-BDF-CJO. Berdasarkan Gambar 5 dapat dibuat persentasi nilai dari delapan sub-proses pada kelapa sawit mulai dari pembukaan lahan, pembibitan, penanaman, pemupukan, proteksi, pemanenan, PKS, dan produksi biodiesel secara berurutan sebesar 0,67%; 1,27%; 0,51%; 61,21%; 6,93%; 0,08%; 4,1%; dan 25,23%. Untuk jarak pagar dari Gambar 6 masing-masing sebesar 0,42%; 1,28%; 15,51%; 33,96%; 3,60%; 0,04%; 0,57%; dan 44,61%. Jika dikelompokkan ke dalam tahap pra-panen, panen, dan pasca panen, nilai persentasinya untuk kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 3.

Lord dan Clay (2009) menyatakan bahwa dampak lingkungan ke perairan, darat, udara dan lain-lain pada pengolahan minyak kelapa sawit masing-masing sebesar 47%, 24%, 8%, dan 21%. Prueksakorn dan Gheewala (2006) mengatakan bahwa kontribusi utama dari efek gas rumah kaca (GRK) selama produksi biodiesel dari tanaman jarak yang berasal dari proses produksi dan penggunaan pupuk, konsumsi minyak diesel untuk irigasi, dan proses transesterifikasi masing-masing sebesar 31%, 26%, dan 24%.

Tabel 2. Penilaian dampak untuk produksi 1 ton BDF dari CPO dan CJCO per ha per tahun untuk produksi sebelum stabil (1-5 tahun)

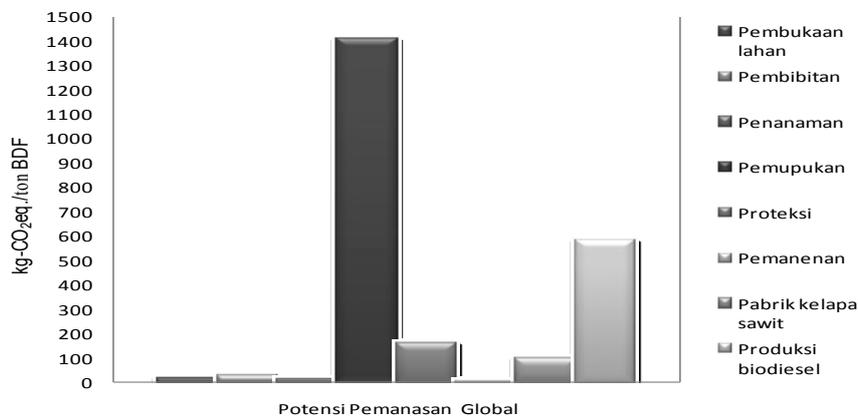
| Tahapan proses | Penilaian dampak | Stn | Kelapa sawit | Jarak pagar |
|--|---------------------------------|----------------------|--------------|-------------|
| (1) Pembukaan lahan | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 15,52 | 8,25 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,043 | 0,02315 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,0000092 | 5,01E-06 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 6,60E-08 | 5,94E-10 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 269,70 | 129,70 |
| (2)Pembibitan | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 29,14 | 24,93 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,18 | 0,13 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,00014 | 0,00048 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 1,06E-08 | 4,22E-08 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 590,50 | 481,50 |
| (3) Penanaman | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 11,71 | 302,10 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,03 | 5,39 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,00028 | 0,0042 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 1,67E-08 | 7,96E-07 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 251,10 | 4813,00 |
| (4) Pemupukan | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 1408,00 | 661,40 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 4,45 | 6,97 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,014 | 0,012 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 0,000032 | 1,09E-06 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 24330,00 | 11220,00 |
| (5) Proteksi | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 159,35 | 70,15 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,62 | 0,26 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,0029 | 0,0011 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 2,31E-08 | 8,72E-08 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 2704,50 | 1179,50 |
| (6) Pemanenan | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 1,73 | 0,85 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,0023 | 0,0012 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 5,36E-09 | 2,63E-09 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 1,81E-13 | 8,84E-14 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 224,80 | 110,40 |
| (7) Pabrik kelapa sawit/Ekstraksi minyak | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 94,39 | 11,15 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,32 | 0,08 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,000102 | 3,38E-09 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 0,0000048 | 1,14E-13 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 1447,00 | 209,80 |
| (8) Biodiesel production | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 580,40 | 868,80 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 0,97 | 1,26 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,00023 | 0,00026 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 1,85E-08 | 1,98E-08 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 16490,00 | 25950,00 |
| Total | GWP, 100-year GWP-IPCC, 2007 | kg-CO ₂ e | 2300,24 | 1947,63 |
| | Acidification, DAF-LIME,2006 | kg-SO ₂ e | 6,61 | 14,11 |
| | Waste,landfill volume-LIME,2006 | m ³ | 0,018 | 0,013 |
| | Eutrophication, EPMC-LIME,2006 | kg-PO ₄ e | 3,72E-05 | 2,03E-06 |
| | Energy consumption,fossil fuel | MJ | 46307,60 | 44093,90 |

Prueksakorn dan Gheewala (2006) juga menjelaskan lebih rinci bahwa emisi CO₂ untuk memproduksi biodiesel dari minyak jarak pagar dengan transesterifikasi mulai dari tahap persiapan lahan, budidaya, irigasi, pemupukan, *cracking* minyak, ekstraksi minyak, penyaringan, dan proses transesterifikasi masing-masing sebesar 4,7%; 0,2%; 26,1%; 30,3%; 3,0%; 10,9%; 0,5% dan 24,3%.

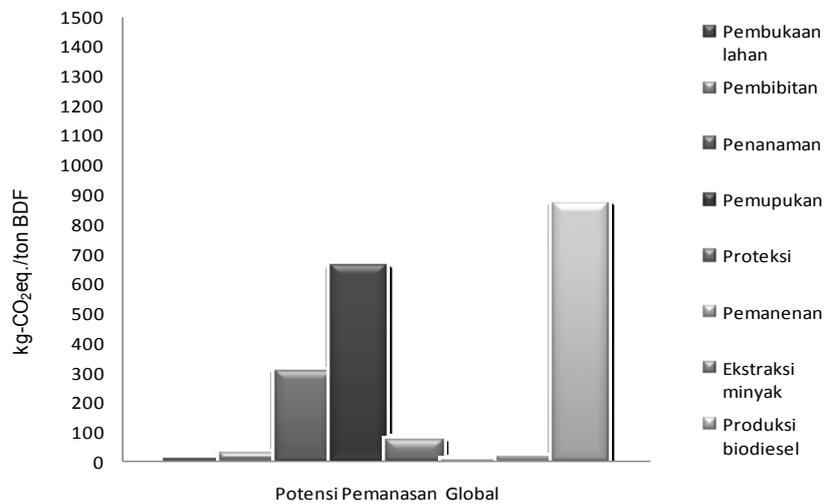
Ndong *et al.* (2009) juga memberikan rincian emisi GRK dalam berbagai tahapan proses, yaitu: budidaya jarak pagar, transesterifikasi dan penggunaan biodiesel (*combustion phase*) masing-masing sebesar 52%, 17% dan 16%, dan persentasi emisi paling besar yaitu dalam aplikasi pupuk, yaitu 93%.

Tabel 3. Persentasi nilai GWP dalam kelompok pra-panen, panen, dan pasca panen untuk kelapa sawit dan jarak pagar

| Tahapan proses | Persentasi (%) | |
|----------------|----------------|-------------|
| | Kelapa sawit | Jarak pagar |
| Pra-panen | 70,59 | 54,78 |
| Panen | 0,08 | 0,04 |
| Pasca panen | 29,34 | 45,18 |



Gambar 5. Total nilai GWP pada kelapa sawit sebelum produksi stabil

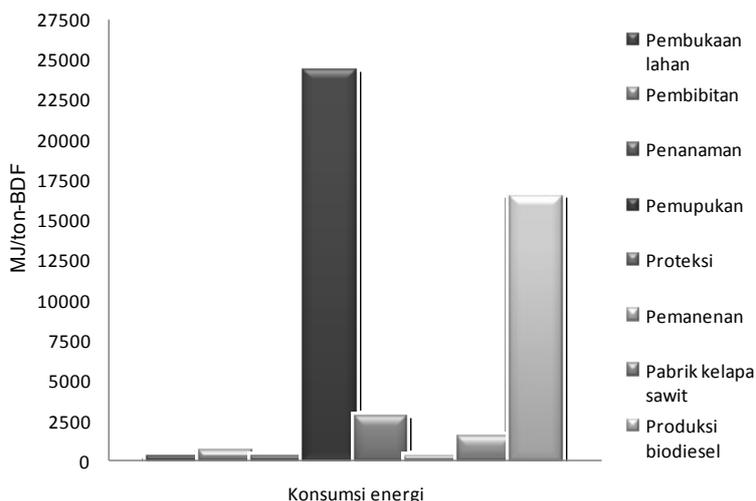


Gambar 6. Total nilai GWP pada jarak pagar sebelum produksi stabil

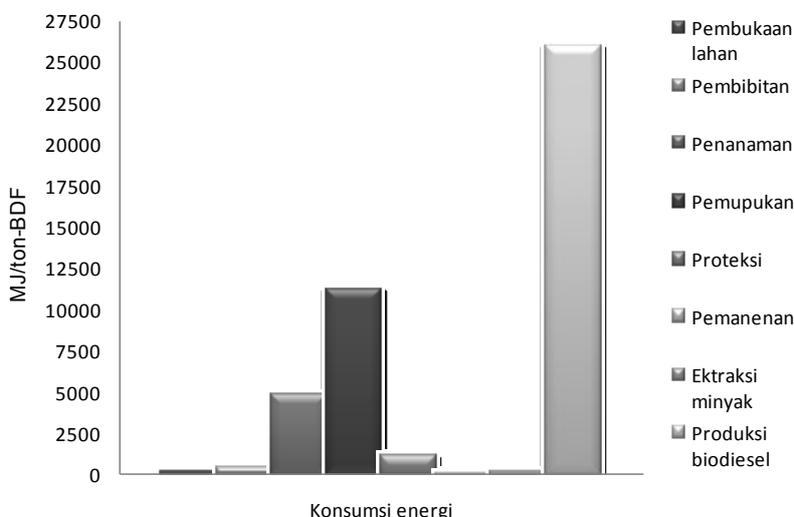
Dari Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat bahwa nilai konsumsi energi dalam bentuk fosil untuk kelapa sawit lebih tinggi daripada jarak pagar dalam setiap tahapan proses kecuali pada tahap penanaman dan produksi biodiesel. Konsumsi energi terbesar untuk jarak pagar terjadi pada tahap produksi biodiesel yaitu 25950,00 MJ/ton-BDF-CJCO, sementara konsumsi energi terbesar kelapa sawit adalah pada tahap pemupukan yaitu 24330,00 MJ/ton-BDF-CPO. Konsumsi energi pada tahap produksi biodiesel untuk jarak pagar lebih besar karena minyak jarak pagar mempunyai nilai asam lemak bebas yang tinggi, sehingga untuk produksi biodiesel membutuhkan proses esterifikasi sebelum

dilakukan proses transesterifikasi. Nilai total konsumsi energi pada kelapa sawit dan jarak pagar sebelum produksi stabil masing-masing sebesar 46307,60 MJ/ton-BDF dan 44093,90 MJ/ton-BDF.

Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai konsumsi energi kelapa sawit dari mulai pembukaan lahan, pembibitan, penanaman, pemupukan, proteksi, pemanenan, pabrik kelapa sawit, dan produksi biodiesel masing-masing sebesar 0,58%; 1,28%; 0,54%; 52,54%; 5,84%; 0,49%; 3,12% dan 35,61%. Untuk jarak pagar dari Gambar 8 masing-masing sebesar 0,29%; 1,09%; 10,92%; 25,45%; 2,67%; 0,25%; 0,48%; dan 58,85%.



Gambar 7. Nilai total konsumsi energi fosil untuk kelapa sawit sebelum produksi stabil



Gambar 8. Nilai total konsumsi energi untuk jarak pagar sebelum produksi stabil

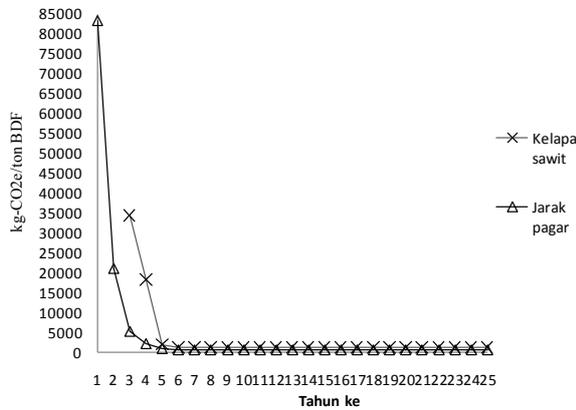
Pada Tabel 4 diperlihatkan proporsi konsumsi energi setiap tahapan jika dibagi menjadi pra-panen, panen, dan pasca panen. Prueksakorn dan Gheewala (2006) juga menjelaskan bahwa konsumsi energi yang dibutuhkan untuk transesterifikasi lebih tinggi daripada pemupukan, namun pemupukan lebih tinggi nilai emisi GRK nya. Itu terjadi karena senyawa N dan penggunaan N₂O memiliki efek yang kuat pada GRK. James *et al.* (2006) menjelaskan bahwa jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan biodiesel, relatif terhadap kandungan energinya, karena disamping energi terbarukan yang melekat pada bahan bakunya (seperti jarak pagar dan kelapa sawit, dimana ampasnya masih dapat digunakan sebagai sumber energi dalam proses pengolahannya) juga karena sebagian besar analisis energi pertanian melihat energi matahari ditangkap oleh biomassa dengan bebas.

Tabel 4. Persentasi nilai konsumsi energi fosil dalam kelompok pra-panen, panen, dan pasca panen untuk kelapa sawit dan jarak pagar

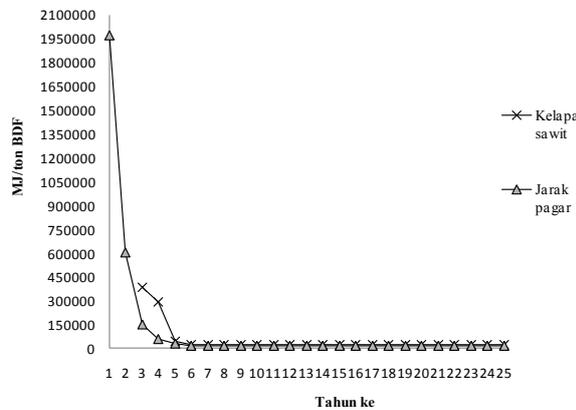
| Tahapan proses | Persentasi (%) | |
|----------------|----------------|-------------|
| | Kelapa Sawit | Jarak Pagar |
| Pra-panen | 60,78 | 40,42 |
| Panen | 0,49 | 0,25 |
| Pasca panen | 38,73 | 59,33 |

Analisis pada saat produksi stabil (6-25 tahun) diperlihatkan pada Gambar 9, 10, 11, 12, dan 13. Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa emisi GWP pada saat produksi stabil adalah 1109,42 kg-CO₂eq./ton-BDF-CPO dan 662,85 kg-CO₂eq./ton-BDF-CJCO. Penelitian yang dilakukan oleh Sekiguchi (2011) menunjukkan bahwa total emisi CO₂eq. adalah 0,46 kg-CO₂eq./kg-BDF-CJCO untuk metode SMV, dan 0,79 kg-CO₂eq./kg-BDF-CJCO untuk metode *alkali-catalyzed* dan 3,4 kg-

CO₂eq./kg-minyak diesel. Perbedaan hasil ini mungkin karena perbedaan asumsi-asumsi yang diadopsi, serta kelengkapan inventarisasi data dari lapangan. Inventarisasi data yang dilakukan pada penelitian ini lebih ril menggunakan data sesuai kondisi di lapangan, karena dilakukan pengambilan data langsung, serta data-data sekunder dari Indonesia.



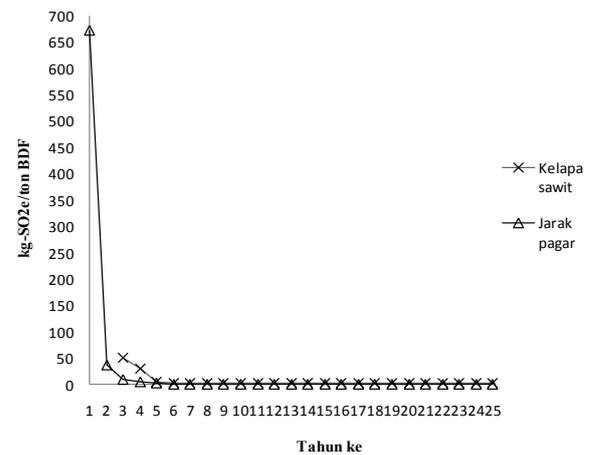
Gambar 9. Nilai GWP sebelum dan sesudah produksi stabil (1-25 tahun) untuk kelapa sawit dan jarak pagar



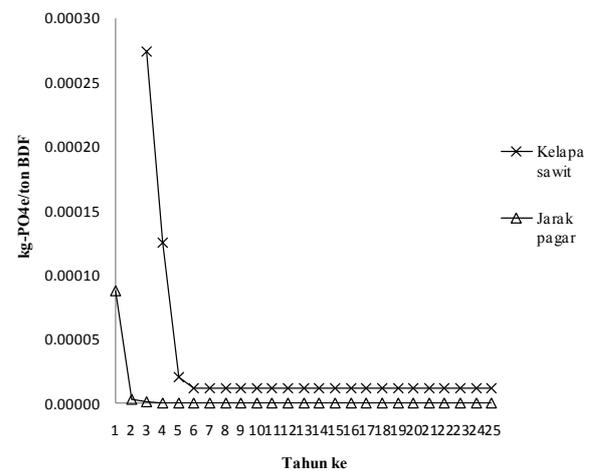
Gambar 10. Nilai konsumsi energi fosil sebelum dan sesudah produksi stabil (1-25 tahun) untuk kelapa sawit dan jarak pagar

Konsumsi energi untuk bahan bakar fosil pada saat produksi stabil masing-masing sebesar 25468,13 MJ/ton-BDF untuk kelapa sawit dan 18957,63 MJ/ton-BDF untuk jarak pagar. Nilai emisi GWP dan konsumsi energi untuk kelapa sawit dan jarak pagar terus menurun sampai tahun ke-5 dan stabil dari tahun ke-6 sampai ke-25, khusus untuk kelapa sawit karena mulai memproduksi pada tahun ke-3, sehingga nilainya mulai dihitung dari tahun ke-3. Tren yang sama juga terjadi pada penilaian *acidification*, *eutrofication*, dan *waste landfill*

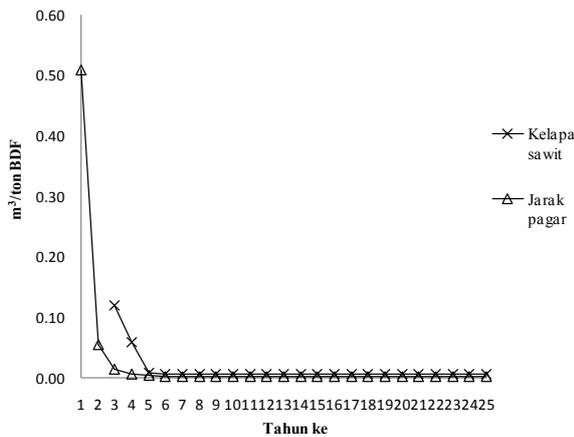
volume, seperti diperlihatkan pada Gambar 11, 12 dan 13. Diawal produksi terlihat nilainya sangat tinggi, hal ini terjadi karena diawal produksi nilai produksi per ton BDF nya masih sangat kecil, sehingga jika dibagi terhadap nilai produksi biodiesel saat itu, maka nilai materi dan energinya sangat tinggi (tahun pertama), sehingga hasil penilaian dampaknya pun sangat tinggi. Alasan lain adalah bahwa ditahun pertama untuk jarak pagar dan tahun ke 3 untuk kelapa sawit masih memperhitungkan delapan tahapan sub proses yang dikaji, sedangkan berikutnya tinggal lima tahapan lagi, karena tahapan pembukaan lahan, pembibitan dan penanaman sudah tidak diperhitungkan lagi.



Gambar 11. Nilai *acidification* sebelum dan sesudah produksi stabil (1-25 tahun) untuk kelapa sawit dan jarak pagar



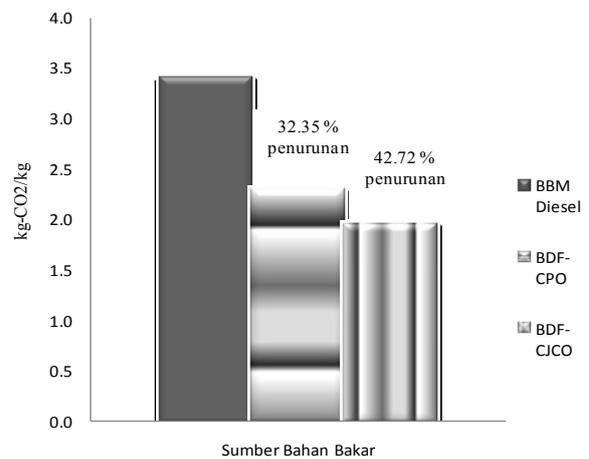
Gambar 12. Nilai *eutrofication* sebelum dan sesudah produksi stabil (1-25 tahun) untuk kelapa sawit dan jarak pagar



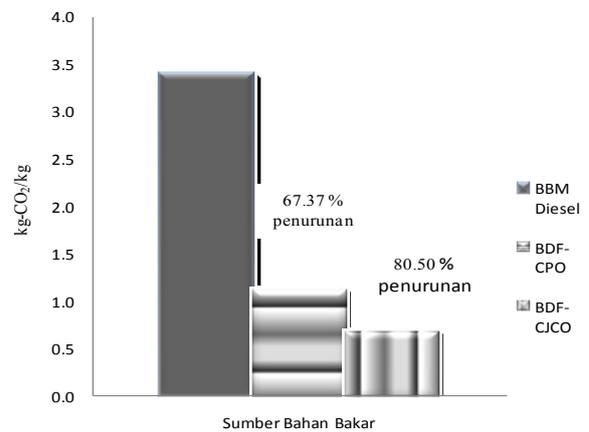
Gambar 13. Nilai waste landfill volume sebelum dan sesudah produksi stabil (1-25 tahun) untuk kelapa sawit dan jarak pagar

Selanjutnya pada Gambar 14, 15, dan 16 menunjukkan perbandingan antara penurunan nilai emisi CO₂eq. biodiesel yang dihasilkan dari CPO dan CJCO terhadap bahan bakar minyak diesel. Perbandingan antara Gambar 14 dan 15 memperlihatkan bahwa penurunan nilai emisi CO₂eq. lebih besar pada saat produksi sudah stabil karena penggunaan material dan energi sudah berkurang dan hanya digunakan untuk tahapan proses pemupukan, proteksi, pemanenan, ekstraksi minyak mentah dan produksi biodiesel. Tahapan proses untuk pembukaan lahan, pembibitan, dan penanam sudah tidak dilakukan lagi. Kajian perhitungan ini memperlihatkan bahwa jika melakukan analisa yang salah, maka hasil yang dihasilkan pun sangat jauh berbeda, apalagi siklus hidup sepanjang 25 tahun, ternyata yang tinggi nilai emisinya sampai umur 5 tahun, sedangkan sisa 20 tahun lagi sudah rendah. Perhitungan ini diharapkan memberikan masukan terhadap nilai yang dikeluarkan oleh EPA-NODA, dimana biodiesel hanya dapat menurunkan emisi sampai 17%, walaupun memang dalam penelitian ini belum memperhitungkan nilai LUC (*land use change*) dan *methane capture*.

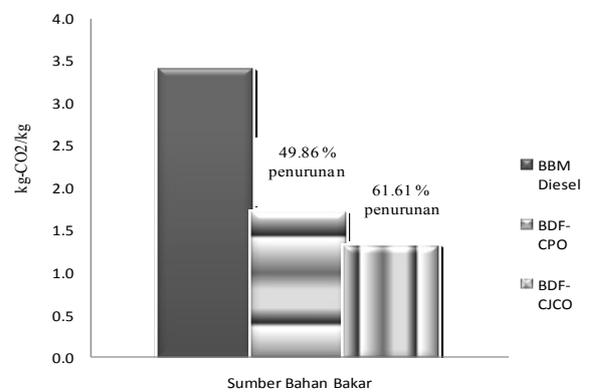
Gambar 15 menunjukkan total nilai penurunan emisi CO₂eq., yaitu penjumlahan sebelum dan sesudah produksi stabil dengan nilai masing-masing 49,96% untuk BDF-CPO dan 61,61% untuk BDF-CJCO. Penelitian yang dilakukan oleh Gomma (2011) menyebutkan bahwa biodiesel dari jarak pagar menurunkan emisi GRK sebesar 66% jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak diesel. Prueksakorn (2006) juga menyatakan bahwa emisi GRK lebih rendah 77% jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak diesel.



Gambar 14. Persentasi penurunan nilai emisi CO₂eq. sebelum produksi stabil antara BBM diesel terhadap BDF-CPO dan BDF-CJCO



Gambar 15. Persentasi penurunan nilai emisi CO₂eq. setelah produksi stabil antara BBM diesel terhadap BDF-CPO dan BDF-CJCO



Gambar 16. Total persentasi penurunan nilai emisi CO₂eq. (sebelum dan sesudah produksi stabil) antara BBM diesel terhadap BDF-CPO dan BDF-CJCO

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Total dampak lingkungan untuk produksi biodiesel dari CPO lebih tinggi daripada CJCO, khususnya emisi potensi pemanasan global (GWP). Pemanfaatan *agro-chemical* berupa pupuk, insektisida, pestisida dan fungisida menghasilkan kontribusi yang cukup signifikan terhadap dampak lingkungan untuk produksi biodiesel yaitu 68,14% untuk kelapa sawit dan 37,56% untuk jarak pagar. Nilai emisi GWP pada saat produksi sudah stabil sebesar 1109,42 kg-CO₂eq./ton-BDF_CPO untuk kelapa sawit dan 662,85 kg-CO₂eq./ton-BDF_CJCO untuk jarak pagar. Pada saat produksi sudah stabil, nilai penurunan emisi CO₂eq. jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak diesel yaitu 67,37% untuk BDF-CPO dan 80,50% untuk BDF-CJCO.

Saran

Saran untuk perbaikan penelitian ini adalah perlu melakukan pengambilan data yang lebih komprehensif, sehingga benar-benar memperlihatkan kondisi nyata di lapangan dari seluruh kondisi perkebunan kelapa sawit dan jarak pagar di Indonesia dari pulau Sumatera, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Perlu dilakukan inventarisasi data yang lebih banyak lagi sehingga dapat digunakan sebagai database untuk LCA biodiesel di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh DGHE, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Indonesia, di bawah *International Joint Research and Publication Scheme* (No.203/SP2H/PL/Dit.Litabmas/IV/2012) and JSPS-DGHE *Bilateral Join Research Project*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2008. Direktorat Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi-Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral. Laporan Penelitian : Pemanfaatan Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik. Jakarta. Indonesia.
- Anonim. 2011. PTPN VIII (Persero) Unit Kebun Kertajaya. Laporan Kebun dan Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Unit Kebun Kertajaya. Banten. Indonesia.
- Ciambrone DF.1997. *Environmental Life Cycle Analysis*. Florida: CRC Press LLC.
- Ferry Y. 2009. *Budidaya Jarak Pagar (Jatropha curcas L)*. Bogor: Estate Crops Research and Development Centre.
- Gomaa M, Alimin AJ, dan Kamarudin KA. 2011. The effect of EGR Rates on NO_x and Smoke Emmisions of an IDI Diesel Engine Fuelled with Jatropha Biodiesel Blends. *Int J Energy and Enviroment*, 2(3):477-490.
- James AD, Shapouri H, dan Wang M. 2006. *Assessment of Biofuels. Renewables-Based Technology: Sustainability Assessment*. Washington DC: John Wiley & Sons.
- Lord S dan Clay J. 2009. *Enviromental Impacts of Oil palm-Practical Considerations in Defining Sustinaibility for Impacts on the Air, Land and Water*. Washington DC: Island Press.
- Lubis RE dan Widanarko A. 2011. *Smart Palm Oil*. Jakarta: Agromedia.
- Ndong R, Vignoles MM, Girons OS, Gabrielles B, Pirot R, Domergue M, Sablayrolles C. 2009. Life Cycle Assessment of biofuels from Jatropha Curcas in West Africa : a field study, *GCB Bioenergy*, 1:197-210, doi:10.1111/j.1757-1707.2009.01014.x. [30 July 2011].
- Nasir N dan Setyaningsih D. 2010. Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Palm Oil and Jatropha Oil in Indonesia. *7th Biomass Asia Workshop*, November 29-Desember 01, Jakarta. Indonesia.
- Prueksakorn K, Gheewala SH. 2006. Energy and Green house gas Implications of Biodiesel Production from *Jatropha curcas L*. *The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE)* Bangkok, Thailand, 21-23 November.
- Pleanjai S, Gheewala SH, dan Garivait S. 2007. Environmental Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective. *Asian J. Energi Lingkungan*, 8(1-2):15-32.
- Pranowo D. 2009. *Jatropha Cultivation Technology (Jatropha curcas L)*. Bogor : Estate Crops Research and Development Centre.
- Pahan I. 2011. *A Complete Guide Palm-Agribusiness Management from Up Stream to Down Stream*. Depok: Penebar Swadaya.
- Pramudita D. 2011. Life Cycle Inventory Analysis Of Postharvest Handling And Extraction of Jatropha Curcas Oil. *Workshop of Life Cycle Assessment of Biodiesel Production Using Non-Catalytic Super-heated Methanol Vapor Method*, Bogor, 28 October, The University of Tokyo and Bogor Agricultural Engineering.
- Pardamean M. 2011. *Sukses Membuka Kebun dan Pabrik Kelapa Sawit*. Depok: Penebar Swadaya.
- Searcy C. 2000. *An Introduction to Life Cycle Assessment*. <http://www.i-clps.com/lca/>. [29 July 2011].
- Suhartana dan Arifin Z. 2008. Pemanfaatan Minyak Jarak Pagar Sebagai Bahan Bakar Alternatif Mesin Diesel. *J Penelitian Saintek*. 13(1): 19-46.

- Siangjaeo S, Gheewala SH, Unnanon K, Chidthaisong A. 2011. Implications of Land Use Change on the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions From Palm Biodiesel Production in Thailand. *Energy for Sustainable Develop-Scient Direct-Elsevier,Inc.* [30 July 2011].
- Sekiguchi T. 2012. Life Cycle Assessment of Bio Diesel Fuel Production by SMV Method. *Workshop of Life Cycle Assessment of Biodiesel Production Using Non-Catalytic Super-heated Methanol Vapor Method*, Bogor, 28 October, The University of Tokyo and Bogor Agricultural Engineering.
- Siregar K, Tambunan AH, Irwanto AK, Wirawan SS, Araki T. 2012. A Comparison of Life Cycle Inventory of Pre-harvest, Production of Crude Oil, and Biodiesel Production on *Jatropha Curcas* and Palm Oil as A Feedstock for Biodiesel in Indonesia. *Proceeding of Ecobalance conference*, Yokohama 21 – 24 November, Japan.
- Tjahjana BE dan Pranowo D. 2010. Cultivation and Processing of Primary *Jatropha Curcas* Primary. Balitri Pakuwon Sukabumi: *Publishing and publication unit.*
- Tambunan AH, Situmorang JP, Silip JJ, Joelianingsih A, Araki T. 2012. Yield and Physicochemical Properties of Mechanically Extracted Crude *Jatropha Curcas* L Oil, *J Biomass and Bioenergy*, 43:12-17.
- Wirawan SS. 2009. Potential of *Jatropha Curcas* L. *Joint Task 40/ERIA Workshop*, Tsukuba, 28 October 2009. Japan.
- Wicke B, Sikkema R, Dornburg V, Faaij A. 2011. Exploring Land Use Changes and the Role of Palm Oil Production In Indonesia And Malaysia, *J Land Use Policy* 28 : 193-206.