

**PENGARUH SKENARIO PRODUKSI TERHADAP DAMPAK
LINGKUNGAN BIODIESEL BERBAHAN BAKU KELAPA
SAWIT DI INDONESIA DENGAN ANALISIS *LIFECYCLE*
(LCA)**

SKRIPSI

**HADI YAHYA ALDIN FADHLOLLAH
0606076412**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2010**

**PENGARUH SKENARIO PRODUKSI TERHADAP DAMPAK
LINGKUNGAN BIODIESEL BERBAHAN BAKU KELAPA
SAWIT DI INDONESIA DENGAN ANALISIS *LIFECYCLE*
(LCA)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**HADI YAHYA ALDIN FADHLOLLAH
0606076412**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah

NPM : 0606076425

Tanda Tangan :

Tanggal : 24 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah
NPM : 0606076425
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA ()

Pembimbing : Dr. rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, M.T. ()

DEWAN PENGUJI

Penguji : Ir. Praswasti PDK Wulan, M.T. ()

Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat, rahmat, penyertaan, dan bimbingan-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Skripsi dengan judul **“Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)”** ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademis untuk meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI.

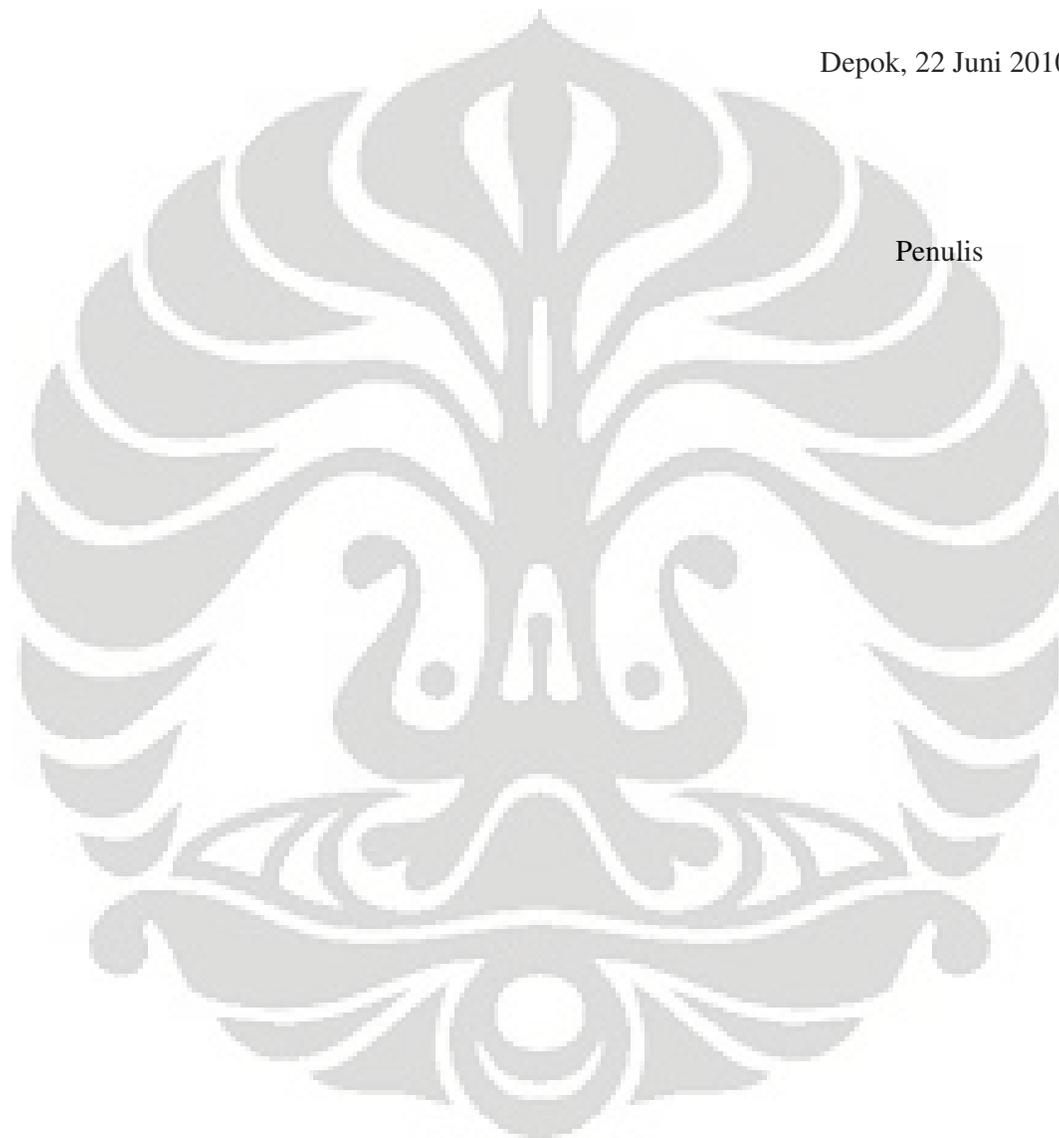
Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA, selaku dosen pembimbing, yang selalu sabar dan bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing dan mengarahkan selama proses penyusunan skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, M.T. selaku pembimbing ke-2 yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan solusi dalam penyelesaian permasalahan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Ir. Yuliusman M.Eng., selaku kordinator mata kuliah skripsi, Pembimbing Akademis, Ir. Dijan Supramono, M.Sc., dan seluruh staff pengajar yang telah bersedia membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berguna bagi penulis.
3. Mang Jajat, Mang Ijal, Mas Heri, Mas Mugeni, Mas Sriyono, dan semua karyawan DTK.
4. Falah, Fira, Nita, Anin, dan semua sahabat Teknik Kimia UI 2006 yang selalu memberi semangat, mendukung, dan menghibur selama 4 tahun kuliah.
5. Mamah yang tidak pernah bosan bertanya: “kapan lulus?”, Bapa yang selalu mensupport, *All of my sisters* atas doa untuk *your only brother*.
6. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala bantuan, pengorbanan, dan usaha yang telah diberikan.

Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi setiap orang yang membacanya. Disadari masih banyak terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan agar perbaikan dapat terus dilakukan untuk mencapai hasil yang lebih baik lagi.

Depok, 22 Juni 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah
NPM : 06060676425
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Juni 2010

Yang menyatakan

(Hadi Yahya A F)

ABSTRAK

Nama : Hadi Yahya
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

Lifecycle biodiesel memiliki emisi gas rumah kaca yang lebih besar dibandingkan dengan emisi gas rumah kaca *petroleum* diesel. Penelitian ini meneliti tentang pengaruh skenario produksi terhadap dampak lingkungan biodieseldi Indonesia. *Lifecycle* biodiesel memiliki rasio energi primer sebesar 0,59 dan rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 3,07. Padang rumput menghasilkan net emisi gas terkecil dibandingkan dengan hutan tropis dan hutan gambut. Pada variasi pemanfaatan produk samping, skenario A memiliki nilai rasio *eco-efficiency* terbesar yaitu 1,481 dibandingkan dengan skenario B sebesar 0,379. Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan.

Kata kunci:
analisis *lifecycle*, biodiesel, energi berkelanjutan

ABSTRACT

Name : Hadi Yahya
Study Program : Chemical Engineering
Tittle : The Effect of Production Scenario to Environmental Impact of Indonesian Palm Oil Biodiesel using Lifecycle Analysis (LCA)

The greenhouse gas emission of biodiesel lyfecycle is bigger than petroleum diesel. this research is emphasizing on the effect of biodiesel production scenario to Indonesian Biodiesel environment. Biodiesel lifecycle has primary energy ratio 0.59 and fossil energy ratio 3.07. Degraded land produces the least nett emission gas compared to tropical jungle dan peadlane. In varying by-product utilization, scenario A yields the highest eco-efficiency ratio, 1.481 compared to scenario B, which is only 0.379. If the biodiesel selling price were higher than cooking oil than the greenhouse gas emission would increase as long as the food allocation does.

Keywords:
Lifecycle analysis, biodiesel, sustainable energy

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI | vi |
| ABSTRAK | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xii |
| BAB 1 | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG | 1 |
| 1.2 PERUMUSAN MASALAH | 3 |
| 1.3 TUJUAN PENELITIAN | 3 |
| 1.4 BATASAN MASALAH | 3 |
| 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN | 4 |
| BAB 2 | 5 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 BIODIESEL | 5 |
| 2.2 MINYAK KELAPA SAWIT (CPO) | 6 |
| 2.3 INDUSTRI KELAPA SAWIT DAN BIODIESEL DI INDONESIA | 6 |
| 2.4 PERMASALAHAN BIODIESEL BERBASIS CPO: FOOD VS FUEL | 8 |
| 2.5 ANALISIS LIFECYCLE | 9 |
| 2.6 METODOLOGI ANALISIS LIFECYCLE (LCA) | 10 |
| 2.6.1 Definisi Tujuan dan <i>Scoping</i> | 10 |
| 2.6.2 Analisis Inventaris <i>Lifecycle</i> | 11 |
| 2.6.3 Penilaian Dampak <i>Lifecycle</i> (<i>Impact Assessment</i>) | 12 |
| 2.6.4 Penilaian dan Interpretasi Hasil | 12 |
| 2.7 LIFECYCLE BIODIESEL BERBASIS CPO | 12 |
| 2.7.1 Alih Fungsi Lahan | 12 |
| 2.7.1 Perkebunan Kelapa Sawit | 14 |
| 2.7.2 Proses Pembuatan CPO | 16 |
| 2.7.3 Proses Penyulingan CPO | 18 |
| 2.7.4 Konversi Bahan Baku Menjadi Biodiesel | 19 |
| 2.8 PEMANFAATAN PRODUK SAMPING BIODIESEL | 21 |
| 2.8.1 Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Bahan Bakar Biomassa | 22 |
| 2.8.2 Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Kompos/Pupuk | 23 |
| 2.8.3 <i>Recovery</i> Gas Metana dari POME dengan Produksi Energi | 23 |
| 2.8.3 Pemanfaatan Minyak Inti Sawit Sebagai Bahan Baku Surfaktan | 24 |
| 2.8.4 Potensi Pemanfaatan PFAD | 24 |
| 2.8.4 Potensi Pemanfaatan Gliserol | 25 |
| 2.8.5 Pemanfaatan Produk Samping sebagai Bahan Baku <i>Biofuel/Bioenergy</i> | 25 |
| 2.9 PERKEMBANGAN ANALISIS LIFECYCLE BIOFUEL | 28 |
| BAB 3 | 30 |

| | |
|---|----|
| METODE PENELITIAN..... | 30 |
| 3.1 PENENTUAN TUJUAN DAN LINGKUP | 31 |
| 3.2 INVENTARISASI LIFECYCLE BODIESEL (LCI) | 31 |
| 3.2.1 Alih Fungsi Lahan Menjadi Perkebunan Kelapa Sawit..... | 32 |
| 3.2.2 Penanaman Kelapa Sawit..... | 33 |
| 3.2.3 Proses Ekstraksi Minyak Kelapa Sawit..... | 34 |
| 3.2.4 Proses Penyulingan Minyak Kelapa Sawit | 35 |
| 3.2.5 Proses Transesterifikasi Biodiesel..... | 36 |
| 3.3 PENILAIAN DAMPAK LIFECYCLE (IMPACT ASSESSMENT) | 37 |
| 3.3.1 Dampak Potensi Pemanasan Global..... | 38 |
| 3.3.2 Konsumsi Energi <i>Lifecycle</i> | 38 |
| 3.4 PENILAIAN DAN INTERPRETASI..... | 39 |
| 3.5 ALTERNATIF SKENARIO PADA LIFECYCLE BODIESEL | 39 |
| 3.5.1 Variasi Asal Lahan untuk Perkebunan Kelapa Sawit..... | 39 |
| 3.5.2 Variasi Pemanfaatan Produk Sampung | 40 |
| 3.5.3 Alokasi Bahan Baku untuk Biodiesel dan Produk Pangan..... | 43 |
| BAB 4 | 45 |
| PEMBAHASAN..... | 45 |
| 4.1 INVENTARISASI LIFECYCLE (LCI) BODIESEL | 45 |
| 4.2 PENILAIAN DAMPAK <i>LIFECYCLE</i> BODIESEL (BASE CASE)..... | 46 |
| 4.2.1 Potensi Pemanasan Global <i>Lifecycle</i> Biodiesel..... | 46 |
| 4.2.2 Konsumsi Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel..... | 49 |
| 4.3 PENGARUH VARIASI SKENARIO PADA LCA BODIESEL..... | 52 |
| 4.3.1 Pengaruh Asal Lahan Perkebunan Kelapa Sawit | 52 |
| 4.3.2 Pengaruh Pemanfaatan Produk Sampung | 53 |
| 4.3.3 Pengaruh Alokasi Kelapa Sawit untuk Biodiesel dan Produk Pangan | 59 |
| BAB 5 | 62 |
| KESIMPULAN | 62 |
| DAFTAR REFERENSI | 63 |
| LAMPIRAN | 67 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Pohon industri kelapa sawit (Suryana, 2007)..... | 7 |
| Gambar 2.2. Konsep analisis <i>lifecycle</i> proses | 9 |
| Gambar 2.3. Ilustrasi konsep sistem <i>lifecycle</i> (Curran, M. A., 1996) | 11 |
| Gambar 2.4. Skema proses penanaman kelapa sawit | 15 |
| Gambar 2.5. Skema proses ekstraksi CPO..... | 16 |
| Gambar 2.6. Skema proses <i>refining</i> CPO | 19 |
| Gambar 2.7. Reaksi transesterifikasi | 19 |
| Gambar 2.8. Diagram alir proses produksi biodiesel | 20 |
| Gambar 2.9 Produk utama, produk samping, dan residu yang diperoleh dari kelapa sawit (Gutierrez, L.F., 2009)..... | 26 |
| | |
| Gambar 3.1. Diagram alir penelitian | 30 |
| Gambar 3. 2 Alternatif alokasi pemanfaatan produk samping pada sistem produksi biodiesel | 41 |
| | |
| Gambar 4.1 Emisi Gas Rumah Kaca untuk lifecycle Biodiesel..... | 48 |
| Gambar 4. 2 Neraca energi <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 51 |
| Gambar 4. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan. | 52 |
| Gambar 4. 4 Breakdown kredit emisi skenario A | 55 |
| Gambar 4. 5 Breakdown kredit emisi skenario B..... | 56 |
| Gambar 4. 6 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap emisi gas rumah kaca lifecycle biodiesel. | 56 |
| Gambar 4. 7 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy primer <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 57 |
| Gambar 4. 8 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy fosil <i>lifecycle</i> biodiesel. | 58 |
| Gambar 4.9 Pengaruh alokasi bahan baku terhadap emisi gas rumah kaca..... | 60 |
| Gambar 4. 10 Pengaruh alokasi bahan baku untuk produk pangan terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil | 61 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1. Karakteristik Fisik Biodiesel (USDE, 2007) | 5 |
| Tabel 2.2. Parameter fisiologis kelapa sawit dan hutan tropis (Tan, K.T., 2009) . | 13 |
| Tabel 2.3. Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (Wicke et al., 2008)..... | 13 |
| Tabel 2.4. Faktor emisi pupuk nitrogen (Wicke et al., 2008) | 15 |
| Tabel 2.5. Parameter dan faktor emisi pada proses produksi biodiesel (Wicke et al., 2008) | 21 |
| Tabel 2.6 Produk samping pada setiap tahapan proses <i>lifecycle</i> biodiesel | 22 |
| Tabel 2.7 Data <i>heating value</i> dan <i>moisture</i> pada produk samping (Panapanaan, V. et al, 2009) | 22 |
| Tabel 2.8 Komposisi nutrient pada tandan buah kosong kelapa sawit (Chavalparit, 2006)..... | 23 |
| Tabel 2.9 Emisi Faktor AE PKO dan AE Petrokimia (Wicke, B., 2008)..... | 24 |
| Tabel 2.10 <i>Yield</i> dan kebutuhan energi proses produksi biofuel (Spath, P.L., 2003) | 27 |
| Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA..... | 28 |
| | |
| Tabel 3. 1 Parameter proses pada lifecycle biodiesel | 32 |
| Tabel 3.2 Aliran input output sistem penanaman kelapa sawit untuk 1 ton FFB (Andita, 2008) | 34 |
| Tabel 3.3 Aliran input output proses ekstraksi untuk menghasilkan 1 ton CPO (Chavalparit, 2006)..... | 35 |
| Tabel 3. 4 Aliran input output proses penyulingan minyak kelapa sawit (Wicke, et al., 2008) | 36 |
| Tabel 3. 5 Aliran input output proses transesterifikasi biodiesel (Pleanjai, S., 2004)..... | 37 |
| Tabel 3.6 Skenario pemanfaatan produk samping..... | 42 |
| Tabel 3.7 Harga CPO, minyak goreng dan biodiesel | 44 |
| | |
| Tabel 4. 1 LCI rantai suplai biodiesel overall. | 45 |
| Tabel 4. 2 Jumlah Emisi Gas Rumah Kaca pada Setiap Tahapan <i>Lifecycle</i> Biodiesel | 47 |
| Tabel 4.3 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Overall..... | 50 |
| Tabel 4.4 Jumlah produk samping pada <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 53 |
| Tabel 4. 5 Kredit emisi <i>lifecycle</i> biodiesel skenario A | 54 |
| Tabel 4. 6 Kredit emisi <i>lifecycle</i> biodiesel skenario B..... | 54 |
| Tabel 4.7 Perhitungan <i>Eco-efficiency</i> skenario A dan skenario B | 59 |
| Tabel 4. 8 Basis harga biodiesel dan minyak goreng | 60 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca | 67 |
| 1.1 Faktor Emisi Bahan Bakar | 67 |
| 1.2 Parameter Input Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan | 68 |
| 1.3 Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan | 68 |
| 1.4 Faktor Emisi Pupuk dan Kandungan Nutrient EFB | 69 |
| 1.5 Parameter Input Perhitungan Emisi Penanaman Kelapa Sawit | 69 |
| 1.6 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Penanaman Kelapa Sawit | 69 |
| 1.7 Parameter Input Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit | 70 |
| 1.8 Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit | 70 |
| 1.9 Parameter Input Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit | 70 |
| 1.10 Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit | 71 |
| 1.11 Parameter Input Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel | 71 |
| 1.12 Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel | 71 |
| Lampiran 2 Perhitungan Neraca Energi | 72 |
| 2.1 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel (<i>Basecase</i>) | 72 |
| 2.2 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Skenario A | 73 |
| 2.3 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Skenario B | 74 |
| Lampiran 3 Perhitungan Alokasi Bahan Baku | 75 |
| 3.1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 kg Bahan Baku (kg CO ₂ -eq/kg RBDPO) | 75 |
| 3.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 USD\$ Penjualan Produk (kg CO ₂ -eq/USD\$) | 76 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Saat ini, masyarakat dunia telah mulai serius menyikapi permasalahan pemanasan global dan penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi primer. Untuk mengatasi permasalahan tersebut sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan harus dikembangkan untuk mengurangi dan menggantikan penggunaan energi fosil. Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Bahan baku biodiesel adalah minyak nabati atau senyawa trigliserida seperti minyak kelapa sawit, minyak kedelai, bunga matahari, dan sebagainya. Kelapa sawit memiliki keunggulan dibandingkan bahan baku minyak nabati lainnya karena memiliki hasil panen yang lebih besar dan kebutuhan lahan yang lebih sedikit dibandingkan dengan minyak nabati lainnya. Penggunaan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel dipilih karena produksi minyak kelapa sawit cukup besar di Indonesia. Indonesia memiliki 5,6 juta hektar lahan kebun sawit dari 11 juta hektar kebun sawit dunia pada tahun 2004. Di Indonesia, pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku sudah banyak dilakukan, dan biodiesel yang diproduksi telah banyak digunakan dan dijual sebagai *biosolar* oleh PT Pertamina (Rahmat, S., 2007). Penilaian suatu energi alternatif yang menggantikan bahan bakar fosil harus memiliki kemampuan untuk mengurangi dampak lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil.

Pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel telah mendorong peningkatan permintaan kelapa sawit sehingga mendorong pembukaan lahan baru untuk kelapa sawit dengan alih fungsi lahan (contoh, hutan tropis menjadi perkebunan). Perubahan fungsi hutan secara langsung mempengaruhi kandungan karbon pada suatu lahan, serta melepaskan emisi karbon akibat pembukaan lahan (Koh, L.P., 2008). Selain itu, pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel akan mengakibatkan kompetisi bahan baku kelapa sawit sebagai bahan pangan (Corley, R.H.V., 2008). Proses ekstraksi

minyak kelapa sawit menghasilkan beberapa produk samping dan residu yang memiliki potensi ekonomi maupun kredit emisi dengan mensubstitusi produk berbasis bahan bakar fosil. Hal ini sangat bergantung pada pendekatan yang diterapkan untuk mengalokasikan by-produk itu sendiri (Guitierrez, L. et al., 2008). Dengan memperhitungkan faktor-faktor diatas biodiesel yang digunakan untuk mereduksi penggunaan bahan bakar fosil, harus memiliki kemampuan mereduksi dampak lingkungan secara keseluruhan dibandingkan bahan bakar fosil. Untuk itu, diperlukan analisis *lifecycle* untuk memilih pendekatan proses yang diterapkan pada skenario produksi biodiesel.

Analisis *lifecycle* (LCA) merupakan suatu analisis penilaian dampak lingkungan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan konsumsi energi suatu produk atau proses mulai dari ekstraksi bahan baku hingga menjadi produk akhir. Analisis *lifecycle* ini telah digunakan di negara-negara lain. Analisis *lifecycle* dilakukan oleh Departemen Pertanian dan Departemen Energi Amerika Serikat untuk membandingkan antara soybean biodiesel dengan petroleum diesel (Seehan, 1998). Analisis *lifecycle* dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai biofuel yang digunakan di Swiss, dengan mempertimbangkan rantai proses keseluruhan (Zah, Raiener et al., 2004). Dalam penelitian tersebut, biofuel dengan bahan baku hasil pertanian tropis memiliki dampak terhadap lingkungan yang cukup besar akibat adanya alih fungsi hutan dengan cara penebangan dan pembakaran. Hal ini mempengaruhi sustainability dari biofuel tersebut (Zah, Raiener et al., 2004).

Sebuah penelitian untuk melakukan simulasi analisis *lifecycle* skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit di Indonesia dengan memperhitungkan faktor alih fungsi lahan, pengalokasian bahan baku produk pangan, pemilihan pendekatan teknologi untuk mengalokasi produk samping. Analisis ini akan mengevaluasi dampak lingkungan sistem berupa emisi gas rumah kaca dan jumlah konsumsi energi pada *lifecycle*. Pendekatan ini akan menjadi terobosan baru dalam pengembangan industri kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel di Indonesia.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan akan dijawab dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari alih fungsi lahan dan praktek pembukaan lahan pada perkebunan kelapa sawit, pengaruh skenario pemanfaatan produk samping, dan pengaruh pengalokasian minyak kelapa sawit sebagai produk bahan pangan terhadap dampak lingkungan/pemanasan global serta konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel. Analisis ini dibuat ke dalam suatu model perhitungan LCA. Analisis ini diharapkan dapat menghasilkan perhitungan total emisi gas rumah kaca serta konsumsi energi dari proses keseluruhan dan skenario produksi biodiesel yang berkelanjutan.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

- Memodelkan skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit.
- Menganalisis neraca emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi dari setiap skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit.
- Menganalisis pengaruh skenario produksi biodiesel terhadap dampak lingkungan *lifecycle* biodiesel.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan-batasan yang dipakai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metodologi dari analisis *lifecycle* hanya memperhitungkan dampak lingkungan dari inventarisasi neraca massa dan energi.
2. Kategori dampak yang diperhitungkan dalam analisis *lifecycle* adalah dampak potensi pemanasan global yaitu emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi *lifecycle* biodiesel.
3. Parameter dampak yang diperhitungkan adalah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan maupun yang dikontribusikan dalam setiap inventarisasi material dalam analisis *lifecycle*. Emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam jumlah gas karbon dioksida equivalent (gram CO₂-eq) per satuan unit fungsional.
4. Model *lifecycle* energi dilakukan berawal dari perkebunan kelapa sawit, proses minyak kelapa sawit, proses penyulingan minyak kelapa sawit,

proses pengolahan menjadi biodiesel, pembentukan produk samping, penggunaannya serta transportasi yang menyertainya, hingga penggunaan akhir biodiesel.

5. Model *lifecycle* biodiesel yang digunakan diasumsikan berada di dalam satu kompleks terintegrasi, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk transportasi antar unit proses *lifecycle* dapat diabaikan.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

BAB I : Pendahuluan

Berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah.

BAB II : Tinjauan Pustaka

Berisi dasar teori yang menjelaskan tentang biodiesel dan minyak kelapa sawit secara umum, perkembangan industri kelapa sawit dan biodiesel, permasalahan mengenai industri kelapa sawit, deskripsi LCA, metodologi analisis *lifecycle*, siklus *lifecycle* biodiesel berbasis CPO, perbandingan teknologi proses produksi, dan perkembangan analisis *lifecycle* biofuel.

BAB III : Metode Penelitian

Berisi alur penelitian secara keseluruhan, batasan system *lifecycle* yang ditinjau pada setiap subproses, variasi skenario produksi yang dilakukan, interpretasi dampak lingkungan, deskripsi dampak lingkungan yang dievaluasi.

BAB IV : Pembahasan

Pembahasan inventarisasi neraca massa dan energi *lifecycle* biodiesel untuk setiap subproses, penilaian dampak lingkungan *lifecycle* biodiesel, pengaruh variasi asal lahan perkebunan, pengaruh variasi pemanfaatan produk samping, pengaruh alokasi bahan baku untuk produksi bahan pangan.

BAB V : Kesimpulan

DAFTAR REFERENSI

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 BIODIESEL

Biodiesel adalah bahan bakar yang terdiri atas mono-alkil ester dari *fatty acid* rantai panjang, yang diperoleh dari minyak tumbuhan atau lemak binatang (BPPT, 2009). Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif untuk mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi mesin. Dalam penggunaannya biodiesel dapat dicampur dengan bahan bakar solar ataupun murni.

Campuran 5% sampai 20% biodiesel dengan solar berhasil digunakan di segala macam mesin diesel kendaraan, maupun genset yang juga tanpa modifikasi (Seehan, J. et al., 1998). Penggunaan biodiesel di dalam mesin diesel konvensional dapat mengurangi emisi hidrokarbon aromatik polisiklik, nitrat aromatik polisiklik, dan zat partikulat. Reduksi emisi ini meningkat sesuai dengan meningkatnya jumlah biodiesel yang dicampur dengan bahan bakar solar. Biodiesel (B100) dapat mengurangi emisi gas karbon dioksida hingga mencapai 75% yang melebihi bahan bakar solar, sedangkan B20 mengurangi emisi CO₂ sebesar 15% (USDE, 2007). Karakteristik fisik biodiesel atau metal este ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik Fisik Biodiesel (USDE, 2007)

| Sifat Fisik | Nilai |
|-------------------------------------|---------------|
| Gravitasi spesifik | 0,87 – 0,89 |
| Viskositas kinematik @ 40°C | 3,7 – 5,8 |
| Angka stana | 46 – 70 |
| Nilai pemanasan tertinggi (btu/lb) | 16928 – 17996 |
| Sulfur, wt% | 0,0 – 0,0024 |
| Titik asap (<i>Cloud pint</i>) °C | -11 – 16 |
| Titik tuang (<i>Pour pint</i>) °C | -15 – 13 |
| Angka iodine | 60 – 135 |
| Nilai pemanasan terendah (Btu/lb) | 15700 – 16735 |

2.2 MINYAK KELAPA SAWIT (CPO)

Kelapa sawit merupakan *monocotyledon* yang termasuk genus *Elaeis*. Genus *Elaeis* terdiri atas dua spesies, yaitu *E. Guineensis* dan *E. Oleifera*. Memiliki nama binomial *Elaeis jacq.* Bunga dan buahnya berupa tandan dan bercabang banyak. Bagian buahnya terdiri atas tiga lapisan yaitu:

1. *pericarp* : bagian kulit buah yang berwarna kemerahan dan licin.
2. *mesocarp* : bagian serabut buah
3. *endocarp* : bagian cangkang pelindung inti

Mesocarp mengandung kadar minyak rata-rata sebanyak 56%, inti mengandung minyak sebesar 44%, dan *endocarp* tidak mengandung minyak. Minyak yang dihasilkan dari spesies *Elaeis* ini terdiri dari dua tipe. Minyak yang biasa disebut *Palm Oil* atau minyak kelapa sawit adalah minyak yang diambil dari *mesocarp* kelapa sawit. Tipe kedua adalah *Palm Kernel Oil*, yaitu minyak yang diambil dari bagian inti sawit.

Minyak kelapa sawit seperti umumnya minyak nabati lainnya merupakan senyawa yang tidak larut dalam air, dengan komponen penyusunnya yang utama adalah trigliserida dan nontrigliserida (Pasaribu, N., 2004).

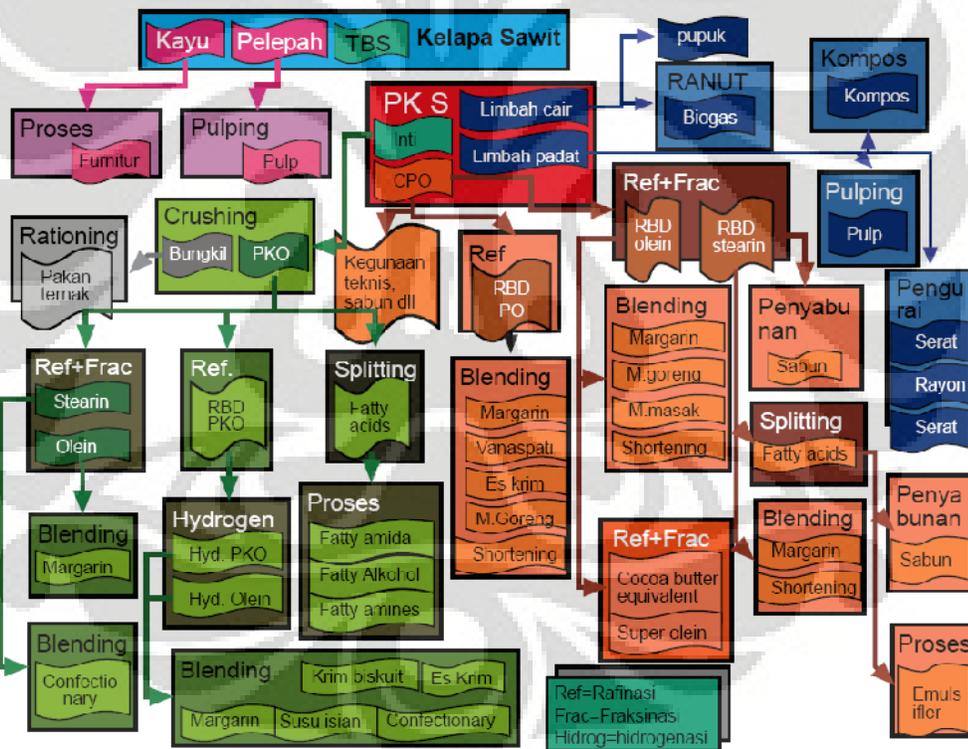
2.3 INDUSTRI KELAPA SAWIT DAN BIODIESEL DI INDONESIA

Indonesia merupakan negara penghasil minyak nabati terbesar dunia. Produksi minyak sawit dewasa ini cenderung meningkat dan diperkirakan akan berlanjut satu dan dua dekade ke depan (Crutchfield, J., 2007). Pengembangan tanaman kelapa sawit telah dilakukan secara luas di Indonesia, baik di kawasan barat maupun timur Indonesia. Penyebaran areal yang berpotensi untuk pengembangan kelapa sawit terdapat di Provisinsi Nangroe Aceh Darussalam (47.796 ha), Sumatra Utara (285.652 ha), Sumatra Barat (47.796 ha), Riau (1.557.863 ha), Jambi (511.433 ha), Sumatra Selatan (1.350.276 ha), Kalimantan Barat (1.252.371 ha), Kalimantan Tengah (956.544 ha), Irian Jaya (1.511.276 ha), dan Sulawesi Tengah (215.728 ha) (Timnas Pengembangan BBN, 2007).

Kapasitas produksi setiap lahan Kelapa Sawit berbeda, 1 hektare kebun sawit di Sumatera per tahun (124 ton Tandan Buah Segar) mampu menghasilkan biodiesel sebanyak 1,5 – 2,3 kilo liter per tahun, dan di Kalimantan hanya

mencapai sekitar 1,2 - 1,7 kilo liter per tahun. Pada tahun 2004 produksi CPO di Sumatera mencapai 9,89 juta Ton, dan Kalimantan sebesar 1,51 Juta Ton, dengan produksi CPO rata-rata di Indonesia sebesar 2,176 ton per Hektare. (Rahayau, 2007)

Produk-produk yang dapat dihasilkan dari minyak sawit sangat luas dengan intensitas modal dan teknologi yang bervariasi. Produksi CPO Indonesia yang diolah di dalam negeri sebagian besar masih dalam bentuk produk antara seperti RBD *palm oil*, *stearin* dan *olein*, yang nilai tambahnya tidak begitu besar dan baru sebagian kecil yang diolah menjadi produk-produk oleokimia dengan nilai tambah yang cukup tinggi (Suryana, 2007). Pohon industry kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Pohon industri kelapa sawit (Suryana, 2007)

Minyak kelapa sawit sangat berpotensi sebagai bahan baku biodiesel dan bagi Indonesia sebagai penghasil CPO terbesar dunia mempunyai peluang untuk menghasilkan bahan bakar biodiesel. Tujuan utama adalah bagaimana kita dapat

memanfaatkan sumber bahan baku yang melimpah menjadi produk maupun komoditas yang lebih bermanfaat. Jika hal ini dapat dilaksanakan, maka selain dapat mengendalikan produksi sawit di saat panen besar, keuntungan lainnya adalah mengurangi impor minyak diesel yang menyita cadangan devisa negara. (BPPT, 2009)

Perkebunan kelapa sawit di Indonesia pada 2010 diperkirakan mencapai areal seluas 10 juta ha dengan total produksi CPO 15 juta ton. Melimpahnya produksi CPO di pasar dunia akan mengganggu stabilitas harga CPO, maka pemanfaatannya untuk produksi biodiesel minyak sawit diharapkan bisa menjadi stabilisator harga CPO. (Rahayau, 2007)

Pilihan terhadap pembangunan industri biodiesel diharapkan mengurangi ketergantungan pada produk impor BBM. Sumber daya alam kelapa sawit yang melimpah di Indonesia dan ketersediaan teknologi proses serta SDM dapat diharapkan hasil produksi industri biodiesel dapat menggantikan kedudukan BBM. (Rahayau, 2007)

2.4 PERMASALAHAN BODIESEL BERBASIS CPO: *FOOD VS FUEL*

Minyak kelapa sawit merupakan minyak nabati yang paling banyak dikonsumsi di dunia. Minyak kelapa sawit digunakan oleh hampir 3 juta penduduk di 150 negara. Produk pangan turunan dari kelapa sawit, seperti minyak goreng, margarin, lemak kue, masih menjadi kebutuhan pokok dari masyarakat terutama di negara berkembang (Lam, M.K. et al., 2008). Permintaan terhadap minyak kelapa sawit sebagai bahan pangan akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan pendapatan perkapita.

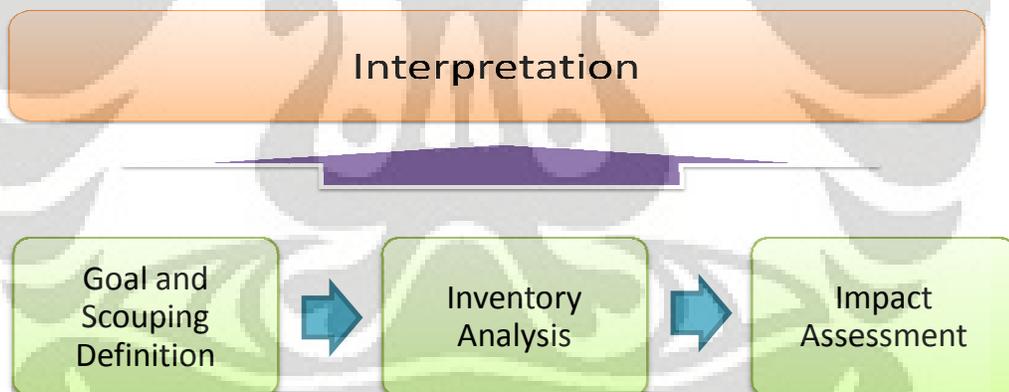
Dengan meningkatnya permintaan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel, ketahanan pangan dari minyak kelapa sawit dapat terganggu. Pasar terbesar dari biodiesel berada di Eropa. Uni Eropa meningkatkan kebijakan penggunaan biodiesel di sektor transportasi sebesar 5.75% di tahun 2010. Diperkirakan permintaan biodiesel di Eropa mencapai 10 juta ton/tahun pada 2010 (Lam et al., 2008). Permasalahan *food v. fuel* timbul seiring berkembangnya teknologi bahan bakar nabati yang menggunakan sumber pangan sebagai bahan baku (Srinivasan, 2008). Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya harga minyak

kelapa sawit yang berimbas pada meingkatnya harga bahan pangan, terutama yang berbasis minyak kelapa sawit. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut *supply* minyak kelapa sawit harus ditingkatkan, tetapi hal ini terhambat dengan terbatasnya lahan yang tersedia untuk mengekspansi produksi kelapa sawit. Peningkatan produksi kelapa sawit dengan cara intensifikasi saat ini masih dalam tahap pengembangan. (Lam et al., 2008)

2.5 ANALISIS LIFECYCLE

Analisis *lifecycle* (LCA) adalah pembahasan mengenai *lifecycle* suatu materi dari pembentukannya sampai pengkonsumsiannya dilihat dari jumlah energi dan aliran emisi ke lingkungan (Seehan, J. et al., 1998). Konsep analisis *lifecycle* dari suatu proses dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Analisis *lifecycle* memberikan informasi tentang pengekstraksian bahan mentah dari lingkungan, sumber energi yang dikonsumsi, dan emisi yang terbentuk.



Gambar 2.2. Konsep analisis *lifecycle* proses

Analisis *lifecycle* menggunakan konsep “*cradle to grave*”, yaitu semua langkah dari ekstrasi pertama bahan mentah dari lingkungan ke penggunaan akhir produk. Setiap proses dari sistem produksi, mulai dari pengambilan bahan mentah, ekstraksi, sterilisasi, *digestion*, ekstraksi bahan baku, konversi menjadi produk, transportasi, hingga penggunaan akhir (Seehan et al., 1998).

Dalam analisis *lifecycle*, aliran energi yang dihitung tidak hanya pada material input secara langsung, tetapi juga penggunaan bahan-bahan pembantu lainnya.

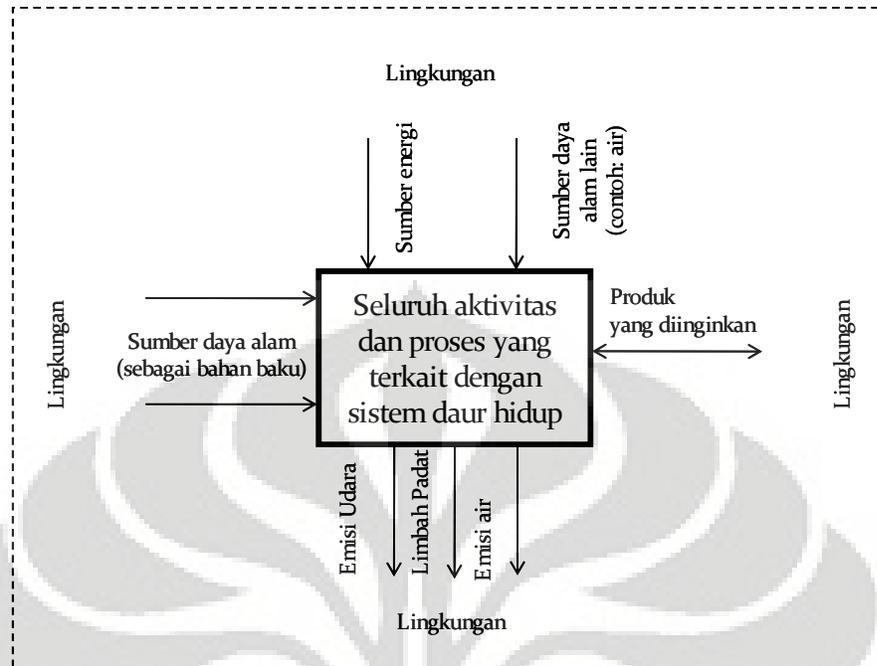
2.6 METODOLOGI ANALISIS LIFECYCLE (LCA)

Secara garis besar metodologi analisis *lifecycle* terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan metodologi dimulai dari penentuan definisi tujuan dan *scope* LCA, inventarisasi *lifecycle* (LCI/*lifecycle inventory*), penilaian dampak (*impact assessment*), dan interpretasi hasil. (Curran, M. A., 1996)

2.6.1 Definisi Tujuan dan Scoping

Sebelum analisis *lifecycle* dimulai, tujuan dari analisis ini harus di definisikan terlebih dahulu. Tujuan dari analisis *lifecycle* antara lain, membandingkan suatu produk atau proses baru dengan kompetitifnya, memilih alternatif produk atau proses yang lebih ramah lingkungan, dan sebagainya (Curran, M. A., 1996).

Ketika tujuan umum dari studi analisis *lifecycle* telah ditetapkan, batasan dari studi ini harus ditentukan. *Lifecycle* produk, proses, maupun aktivitas yang sedang dipelajari dinyatakan sebagai sistem. Seluruh operasi yang berkontribusi dalam *lifecycle* produk, proses, maupun aktivitas yang dianalisis, tergolong ke dalam batasan sistem. Lingkungan berada di sekitar sistem. Input ke dalam sistem adalah sumber daya alam, termasuk sumber energi. Output dari sistem adalah keseluruhan pelepasan akhir ke lingkungan (udara, perairan, atau tanah). Jika sistem mewakili pembuatan dan kegunaan dari suatu produk, maka output mencakup *postconsumer* atau produk yang dibuang. Konsep sistem ini terilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Ilustrasi konsep sistem *lifecycle* (Curran, M. A., 1996)

Batasan sistem untuk suatu studi analisis *lifecycle* dari suatu sistem produk, biasa digambarkan dengan diagram aliran massa umum (*cradle-to-grave*). Batasan dari analisis *lifecycle* meliputi penambahan bahan baku, pembentukan bahan intermediate, pembentukan produk yang dianalisis, penggunaan produk, dan disposisi akhir produk. Penggunaan kembali atau *recycling* dari suatu produk merupakan bagian dari analisis *lifecycle*. (Curran, M. A., 1996)

2.6.2 Analisis Inventaris *Lifecycle*

Terdapat lima tahapan dasar dalam analisis inventaris *lifecycle*. Pertama, mendefinisikan jangkauan dan batasan dari sistem yang dianalisis. Kedua, mengumpulkan data input dan output dari setiap proses produksi. Ketiga, membuat suatu model komputer. Keempat, menganalisis hasil studi. Kelima, menginterpretasikan hasil dan membuat kesimpulan. Setiap data yang dibutuhkan dalam proses produksi dapat diperoleh dari literatur maupun diestimasi dengan simulator proses. (Curran, M. A., 1996)

2.6.3 Penilaian Dampak *Lifecycle* (*Impact Assessment*)

Terdapat tahapan dasar dalam melakukan penilaian dampak *lifecycle*. Pertama, pendefinisian kategori dampak yang dianalisis. Kedua identifikasi indikator kategori. Keempat, klasifikasi penilaian dampak *lifecycle*. Kelima, karakterisasi dampak *lifecycle*.

Secara garis besar, kategori dampak yang dianalisis terbagi menjadi tiga, yaitu emisi udara, limbah padat, dan emisi air. Kategori indikator yang digunakan merujuk pada *sustainable development indicator*, yaitu ekonomi, lingkungan, sosial, dan *safety*. Akan tetapi dalam studi ini hanya akan mengevaluasi faktor lingkungan dan ekonomi. Hal ini merupakan keterbatasan dari analisis *lifecycle* yang dilakukan. Indikator faktor lingkungan mencakup dampak lingkungan dari proses produksi. Sedangkan faktor ekonomi mencakup efisiensi produk energi yang dihasilkan. (Curran, M. A., 1996)

2.6.4 Penilaian dan Interpretasi Hasil

Setiap dampak yang dianalisis dilakukan *valuation* kemudian diinterpretasi sesuai dengan kategori yang digunakan. Hasil dari analisis akan digunakan untuk mengevaluasi setiap proses untuk membantu dalam pemilihan proses yang akan digunakan. (Curran, M. A., 1996)

2.7 LIFECYCLE BIODIESEL BERBASIS CPO

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai setiap fase yang terdapat dalam analisis *lifecycle* biodiesel, termasuk produk turunan CPO lainnya. Fase yang terdapat pada siklus *lifecycle* biodiesel antara lain alih fungsi lahan, penanaman dan produksi kelapa sawit, produksi CPO, proses *refining* CPO, proses produksi biodiesel. (Wicke, B. et al., 2008)

2.7.1 Alih Fungsi Lahan

Tahap pertama *lifecycle* biodiesel adalah alih fungsi lahan yang diperlukan untuk membuat perkebunan kelapa sawit. Alih fungsi lahan merupakan perubahan satu tipe lahan ke tipe lahan lainnya, seperti hutan menjadi perkebunan kelapa sawit. Perubahan fungsi lahan mempengaruhi cadangan karbon

(*carbon stocks*) yang terdapat pada tanaman (*standing biomass*), *biomass* di dalam tanah, karbon tanah (*soil carbon*), dan karbon yang tersimpan di dalam zat organik mati (*dead oranic matter*). (Wicke et al., 2008)

Dalam perhitungan siklus *lifecycle* perubahan cadangan karbon akibat alih fungsi lahan sangat berpengaruh terhadap interpretasi hasil. Perbandingan fisiologis kelapa sawit dengan hutan tropis dapat dilihat pada Tabel 2.2. Data Alih fungsi lahan untuk berbagai jenis lahan ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Parameter fisiologis kelapa sawit dan hutan tropis (Tan, K.T., 2009)

| Parameter | Kelapa Sawit | Hutan Tropis |
|--|--------------|--------------|
| Gross assimilation (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 161,0 | 163,5 |
| Total respiration (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 96,5 | 121,1 |
| Net assimilation (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 64,5 | 42,4 |
| Leaf area index | 5,6 | 7,3 |
| Photosythetic efficiency (%) | 3,2 | 1,7 |
| Radiation conversion efficiency (%) | 1,7 | 0,9 |
| Standing biomass (tonnes/ha) | 100,0 | 431,0 |
| Biomass increment/year (tonnes) | 8,3 | 5,8 |
| Dry matter productivity/year (tonnes) | 36,5 | 25,7 |

Tabel 2.3. Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|--|-----------------------|-------|
| Kandungan biomassa di atas tanah (AGB) sebelum konversi | | |
| Hutan tropis (<i>tropical rain forest</i>) | tdm ha ⁻¹ | 350 |
| Padang rumput (<i>degraded land</i>) | tdm ha ⁻¹ | 6,2 |
| AGB tanaman kelapa sawit setelah 25 tahun | tdm ha ⁻¹ | 118 |
| Kandungan biomassa di bawah tanah (BGB) sebelum konversi | | |
| Hutan tropis (<i>tropical rain forest</i>) | tC ha ⁻¹ | 41 |
| Padang rumput (<i>degraded land</i>) | tC ha ⁻¹ | 5 |
| BGB tanaman kelapa sawit setelah 25 tahun | tC ha ⁻¹ | 19 |
| <i>Carbon faction</i> | | |
| Hutan hujan tropis | kgCt ⁻¹ dm | 490 |
| Tanaman Kelapa Sawit | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| Padang rumput | kgCt ⁻¹ dm | 400 |

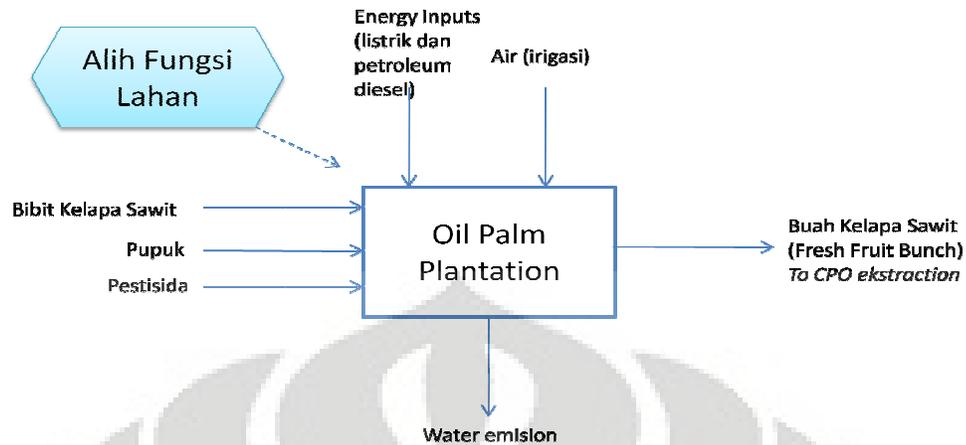
Tabel 2.3 Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (lanjutan)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|--|--|-------|
| Kandungan karbon pada daun dan batang mati | | |
| Sebelum Konversi | tC ha ⁻¹ | 2,1 |
| Setelah Konversi | tC ha ⁻¹ | 0 |
| Tanaman Kelapa Sawit | tC ha ⁻¹ | 5,9 |
| Karbon tanah organik | | |
| Reference | tC ha ⁻¹ | 60 |
| Tanaman Kelapa Sawit | tC ha ⁻¹ | 40 |
| Faktor Emisi | | |
| C lahan gambut | tC ha ⁻¹ thn ⁻¹ | 10,7 |
| N ₂ O dari lahan gambut | kg N ₂ O-N ha ⁻¹ thn ⁻¹ | 8 |
| periode alokasi emisi dari LUC | tahun | 25 |
| umur tanaman kelapa sawit | tahun | 25 |
| yield areal kebun kelapa sawit | ton FFB/ha tahun | 20 |
| Laju ekstraksi CPO dari kelapa sawit | ton CPO/ton FFB | 0,23 |
| Efisiensi penyulingan CPO | ton RBDPO/ton CPO | 0,95 |
| Efisiensi konversi CPO menjadi biodiesel | ton biodiesel/ton RBDPO | 0,96 |
| net heating value biodiesel | MJ/kg biodiesel | 40,2 |

*dm: *dry matter*; RBDPO: *refined bleached deodorized palm oil*

2.7.1 Perkebunan Kelapa Sawit

Pada bagian perkebunan dari penelitian *lifecycle* ini akan mengidentifikasi bahan-bahan dan lingkungan yang mendukung dalam proses perolehan buah kelapa sawit. Identifikasi ini termasuk bahan-bahan kimia dan bahan bakar yang digunakan, emisi yang dihasilkan, termasuk juga manufaktur, pengepakan, dan proses dari bahan-bahan yang digunakan dalam proses penanaman kelapa sawit sampai saat panennya. Skema proses penanaman kelapa sawit serta aliran material dan energi yang tercakup, ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Skema proses penanaman kelapa sawit

Dari skema proses produksi kelapa sawit pada Gambar 2.4, beberapa aliran input yang mengemisikan gas rumah kaca/GHG (contoh: pupuk dan diesel) dibutuhkan untuk memproduksi buah kelapa sawit (FFB). Setiap kendaraan dan mesin operasional yang digunakan dalam perkebunan membutuhkan bahan bakar fosil. Besarnya emisi yang dihasilkan dapat dihitung dari jumlah bahan bakar fosil yang dibutuhkan. Tanaman kelapa sawit membutuhkan unsur hara dalam jumlah besar untuk pertumbuhan vegetatif dan generatif. (Wicke et al., 2008)

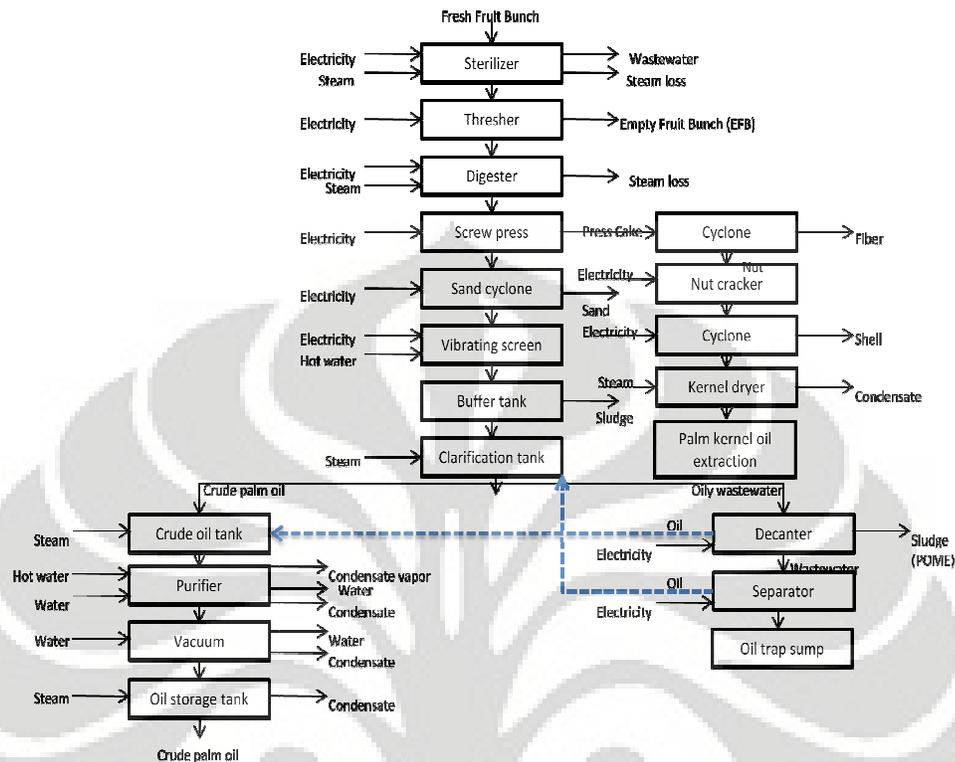
Pupuk nitrogen yang digunakan dalam penanaman kelapa sawit mengakibatkan emisi GHG selama proses produksinya serta emisi N_2O saat penggunaannya pada lahan. Emisi yang dihasilkan dari pupuk nitrogen dapat dihitung dengan mengalikan jumlah pupuk nitrogen spesifik yang digunakan dengan besarnya faktor emisi dari proses produksi pupuk tersebut. Data faktor emisi dari pupuk nitrogen dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Faktor emisi pupuk nitrogen (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Unit | Value |
|---------------------------|--|-------|
| EF fertilizer production | | |
| Ammonium sulphate | $kgCO_2\text{-eq } kg^{-1} N \text{ produced}$ | 2.7 |
| Urea | $kgCO_2\text{-eq } kg^{-1} N \text{ produced}$ | 1.9 |
| EF fertilizer application | | |
| Ammonium sulphate | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 70 |
| Urea | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 79 |
| Organic fertilizer | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 31 |

*EF: emission factor

2.7.2 Proses Pembuatan CPO



Gambar 2.5. Skema proses ekstraksi CPO

Pembuatan CPO disini maksudnya adalah mengolah kelapa sawit untuk memperoleh minyak sawit yang berasal dari daging buah (*pericarp*). Produk yang dihasilkan selain CPO merupakan produk samping ataupun residu. Gambar skema proses ekstraksi CPO dapat dilihat pada Gambar 2.5. Uraian proses pembuatan CPO adalah sebagai berikut.

Tandan buah segar (FFB) dari kebun diangkut ke pabrik menggunakan truk dan trailer yang ditarik dengan *wheel tractor*. FFB selanjutnya akan dibersihkan dari pasir dan kotoran lainnya di *loading ramp* dengan cara menyiramkan air dari atas. Setelah bersih, FFB dimasukkan ke dalam lori-lori rebusan berkapasitas 2,5 ton FFB. Lori-lori berisi FFB dimasukkan ke dalam ketel rebusan, FFB tersebut dipanaskan menggunakan uap air dengan tekanan 2,6 kg/cm² kurang lebih selama 1 jam. Proses perebusan (sterilisasi) ini bertujuan diantaranya untuk memudahkan buah lepas dari tandan, menurunkan kadar air daging buah dan memperbaiki proses penjernihan minyak. Lori-lori tandan minyak yang sudah direbus, ditarik keluar, lalu diangkat menggunakan *hoisting*

crane dan diletakkan di atas mesin penebah (*thresher*) dengan tujuan melepaskan buah dari tandannya. Buah yang lepas dari mesin bantingan langsung dimasukkan ke dalam ketel adukan (*digester*). Ketel ini memiliki dinding rangkan dan as putar yang dilengkapi dengan pisau-pisau pengaduk, buah dihancurkan sehingga daging buah (*pericarp*) pecah dan terlepas dari bijinya. Temperatur massa buah diupayakan lebih rendah dari 90°C dengan waktu selama 20-25 menit.(Sunarko, 2007)

Setelah itu dilakukan proses pengempaan (*pressing*) untuk mengambil minyak dari massa adukan buah di dalam mesin *press* secara bertahap dengan bantuan pisau-pisau pelempar dari ketel ke adukan. Minyak yang keluar ditampung di sebuah talang dan dialirkan ke *crude oil tank*. Selanjutnya, minyak yang masih mengandung *sludge* (lumpur, air, dan kotoran lainnya) akan dipisahkan dengan metode sentrifugal dan pengabutan. Minyak hasil proses inilah yang bisa disebut dengan *crude palm oil* (Sunarko, 2007).

Unit produksi CPO menghasilkan limbah cair (*Palm oil mill effluent/POME*) serta produk samping/limbah (*by-product*) dalam jumlah yang besar, seperti tandan buah kosong (*Empty Fruit Bunch/EFB*), serat, cangkang buah, tandan, dan abu dari boiler. Hanya 23% dari bahan mentah yang menjadi produk, sisanya merupakan limbah/*by-product*. Sebagian besar *by-product* dapat digunakan untuk proses produksi atau industri yang lainnya. Akan tetapi, sebagian limbah padat tersebut harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang. Penyimpanan dan penanganan material *byproduct* serta teknik penggunaan lahan dengan tidak benar menyebabkan pencemaran pada lingkungan, yaitu menimbulkan debu dan bau tidak sedap yang mengganggu (Chavalparit, 2006).

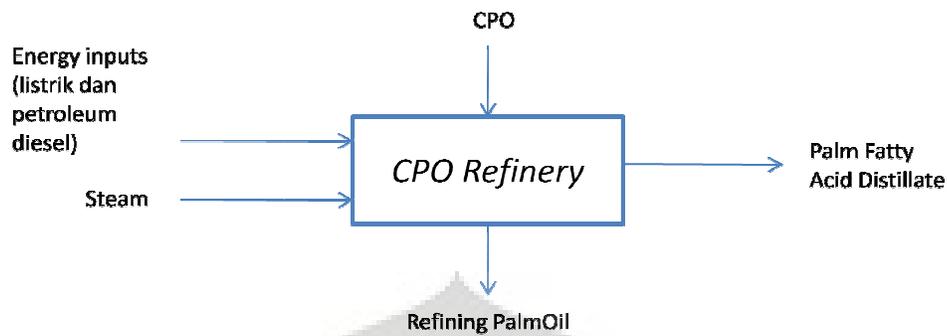
Unit produksi CPO dapat mencukupi kebutuhan energinya sendiri dengan memanfaatkan banyaknya material biomassa, yang berasal dari limbah padat, untuk digunakan sebagai bahan bakar *steam boiler*. Permasalahan yang timbul adalah pembakaran dari bahan bakar biomassa ini menghasilkan emisi karbon dioksida dan asap hitam. Emisi asap dari biomassa ini mengandung partikulat, CO₂, NO_x, dan CO. Akan tetapi hal ini dapat dicegah dengan menggunakan *cyclone* untuk menghilangkan partikulat pada emisi gas pembakaran (Chavalparit, 2006).

Pada unit ekstraksi CPO, emisi GHG dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil dan POME, sementara kredit emisi didapatkan dari *by-product*. Kredit emisi GHG hanya dihasilkan jika *byproduct* digunakan untuk menggantikan produk lain diluar batasan sistem (contoh: *kernel* digunakan untuk menghasilkan surfaktan dan pakan ternak). Kredit emisis GHG didapatkan dengan asumsi *byproduct* tersebut dapat menggantikan bahan produk setara yang berbahan baku petrokimia. (Wicke, B. et al., 2008)

Pada unit pengolahan *wastewater*/POME, bagian permukaan dari limbah tersebut menghasilkan gas metana dan karbon dioksida, dan melepaskannya ke udara. Karbon dioksida dan metana, yang biasa disebut dengan gas rumah kaca (*green house gases*/GHGs), dapat mengakibatkan pemanasan global. Hasil analisis kuantitas GHGs yang dihasilkan oleh kolam anaerobik menunjukkan metana dan CO₂ yang dihasilkan sejumlah 9 dan 3,7 m³/ton TBS atau sekitar 6,3 dan 2,6 juta m³/tahun. POME mengandung lemak dan minyak dalam jumlah besar, yang tidak dapat terdekomposisi oleh bakteri anaerobik pada keadaan tersebut. Lemak dan minyak tersebut akan terakumulasi dan menutupi permukaan kolam air. Oleh karena itu, limbah industri CPO merupakan masalah serius terhadap lingkungan dan masyarakat yang tinggal disekitarnya (Chavalparit, 2006). Emisi GHG yang dihasilkan dari POME bergantung dari faktor emisi dari gas yang dihasilkan. (Wicke, B. et al., 2008)

2.7.3 Proses Penyulingan CPO

Olein (palm olein) merupakan bahan baku pembuatan produk oleokimia. Olein dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel selain CPO. Olein merupakan hasil fraksinasi dari CPO setelah dikristalisasi pada temperatur tertentu. Skema proses *refining* CPO dapat dilihat pada Gambar 2.6. Proses penyulingan CPO ini juga bertujuan untuk meningkatkan kualitas *edibility* dari CPO sehingga dapat diproduksi menjadi produk pangan. Karakteristik fisik dari olein sangat berbeda dari CPO. Olein berwujud lebih cair pada suhu kamar, mempunyai rantai gliserida yang lebih pendek dan dapat tercampur sempurna dengan minyak nabati lainnya. (Pantzaris, 1997)

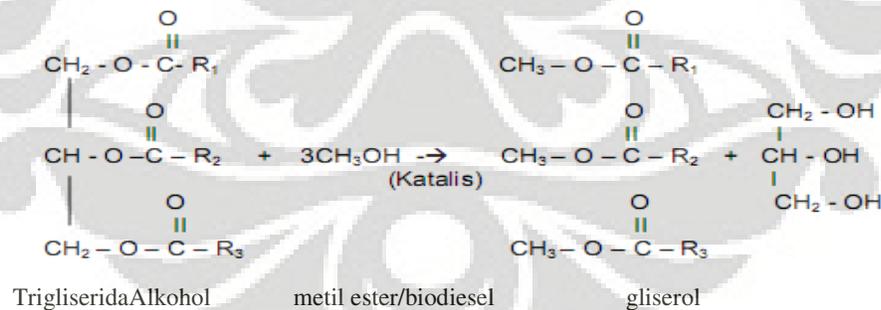


Gambar 2.6. Skema proses *refining* CPO

Proses *refining* CPO membutuhkan steam dan energi listrik. Steam dan listrik dapat dihasilkan dari generator diesel maupun dengan memanfaatkan pembakaran biomass/byproduct (Wicke et al., 2008).

2.7.4 Konversi Bahan Baku Menjadi Biodiesel

Biodiesel dibuat melalui suatu proses kimia yang disebut transesterifikasi (*transesterification*) dimana reaksi antara senyawa ester (CPO/minyak kelapa sawit) dengan senyawa alkohol (*methanol*). Proses ini menghasilkan dua produk yaitu metil esters (biodiesel) dan gliserol (Rahayau, 2007). Reaksi kimia pada proses pembuatan biodiesel dapat dilihat pada Gambar 2.7.

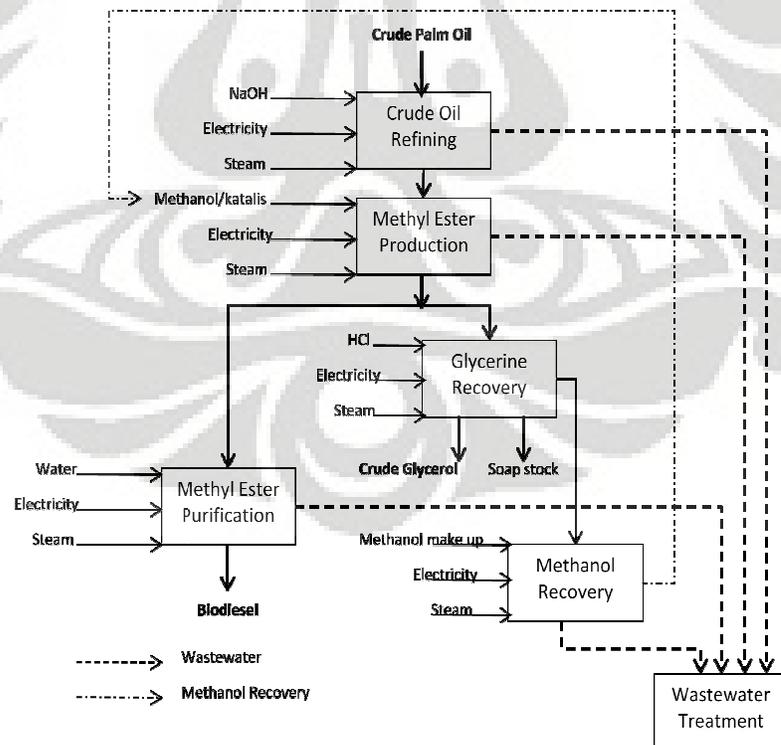


Gambar 2.7. Reaksi transesterifikasi

Proses produksi biodiesel yang paling umum digunakan saat ini adalah proses dengan katalis alkali (Kiwjaroun et al., 2009). Bahan baku utama pembuatan biodiesel adalah CPO atau olein dengan bahan pendukung metanol dan katalis NaOH. Metanol merupakan alkohol yang digunakan dalam proses

transesterifikasi dilihat dari segi harganya yang murah, sifatnya yang polar dan merupakan rantia alkohol terpendek. Metanol dapat bereaksi cepat dengan trigliserida dan NaOH dapat dengan mudah larut di dalamnya. Untuk menyelesaikan proses transesterifikasi secara stoikiometri diperlukan rasio molar alkohol:trigliserida = 3:1. Akan tetapi, karena reaksi transesterifikasi ini *reversible* maka dibutuhkan alkohol lebih banyak dari pada stoikiometrinya (Prihandana, 2006). Secara garis besar tahapan produksi biodiesel ditunjukkan pada Gambar 2.8.

Kondisi operasi dari proses katalis alkali telah banyak diteliti dari berbagai aspek (Kiwjaroun et al., 2009). Dari studi tersebut didapatkan rekomendasi kondisi reaksi optimum yaitu mendekati titik didih dari alkohol serta menggunakan perbandingan molar alkohol terhadap trigliserida sebesar 6:1. Kondisi ini dapat menghasilkan konversi biodiesel antara 90-98% dalam 90 menit. Kondisi operasi ini telah diadaptasi untuk reaktor batch dengan kapasitas 20.000 liter, dimana *feed* dipanaskan terlebih dahulu hingga 55 °C dan reaktor bereaksi pada suhu 50-60 °C untuk 8 jam dengan rasio molar alkohol terhadap palm oil yang digunakan adalah 5:1.



Gambar 2.8. Diagram alir proses produksi biodiesel

Proses katalis alkali sangat sensitif terhadap air dan asam lemak bebas. Kandungan air dalam *CPO/feed* dapat menimbulkan saponifikasi ester dalam kondisi alkali dan menghasilkan *soap* dan air. Dalam konsentrasi yang rendah, kandungan asam lemak bebas dapat diabaikan. Akan tetapi bila konsentrasinya lebih besar dari 5%, *soap* akan menghambat pemisahan gliserol dari biodiesel dan membentuk emulsi.

Emisi GHG yang dihasilkan dari proses produksi biodiesel berasal dari penggunaan bahan bakar fosil, produksi dan penggunaan metanol serta katalis. Kredit emisi bisa didapatkan dari *byproduct* gliserin yang diasumsikan menggantikan penggunaan gliserin sintetis. Parameter dan nilai emisi faktor yang terdapat pada proses produksi biodiesel dapat dilihat pada Tabel 2.5. (Wicke et al., 2008)

Tabel 2.5. Parameter dan faktor emisi pada proses produksi biodiesel (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|------------------------------------|---|-------|
| Densitas biodiesel | kg m ⁻³ | 880 |
| Efisiensi konversi | Kg PME t ⁻¹ CPO | 960 |
| Kebutuhan energi transesterifikasi | kWh m ⁻³ PME | 250 |
| Emisis metanol | Kg CO ₂ -eq t ⁻¹ methanol | 786 |
| Katalis (NaOH) | Kg CO ₂ -eq kg ⁻¹ NaOH | 1,2 |
| Penggunaan akhir biodiesel | g CO ₂ -eq MJ ⁻¹ PME | 5,9 |

2.8 PEMANFAATAN PRODUK SAMPING BIODIESEL

Setiap tahapan proses dalam *lifecycle* biodiesel menghasilkan produk samping maupun limbah/residu yang masih bisa dimanfaatkan atau diproses lebih lanjut untuk mendapatkan nilai jual lebih ataupun kredit emisi terkait dengan pemanfaatannya. Produk samping yang dihasilkan dari *lifecycle* biodiesel terdapat pada proses ekstraksi CPO, penyulingan CPO, dan transesterifikasi biodiesel. Produk samping yang dihasilkan dari setiap proses terdapat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Produk samping pada setiap tahapan proses *lifecycle* biodiesel

| Proses | produk samping |
|--------------------------|-------------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> |
| | <i>palm shell</i> |
| | EFB |
| | PKO |
| | PKE |
| | POME slurry |
| | POME biogas |
| Proses refining | PFAD |
| Proses transesterifikasi | gliserol |

*EFB: *empty fruit bunch*; PKO: *palm kernel oil*; PKE: *palm kernel expeller*; POME: *palm oil mill effluent*; PFAD: *palm fatty acid distillate*

2.8.1 Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Bahan Bakar Biomassa

Tandan buah kosong (EFB), cangkang kelapa sawit (PKS), serat kelapa sawit (*fiber*), dan cangkang inti sawit (PKE) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit. PKS dan *fiber* yang dihasilkan, biasanya digunakan untuk sebagai bahan bakar boiler, sementara EFB dibiarkan agar terdekomposisi secara alami. Residu biomassa memiliki kandungan energi yang cukup sebagai bahan bakar boiler. Nilai kandungan energi dan *moisture* dari EFB, *fiber* dan PKS dapat dilihat pada Tabel 2.7. (Panapanaan, V. et al, 2009)

Tabel 2.7 Data *heating value* dan *moisture* pada produk samping (Panapanaan, V. et al, 2009)

| | HHV (MJ/kg) | Moisture (%) | LHV (MJ/kg) |
|-------|-------------|--------------|-------------|
| EFB | 19.40 | 60.00 | 9.90 |
| Fibre | 18.20 | 40.00 | 5.80 |
| PKS | 19.30 | 10.00 | 17.10 |

Karakteristik bahan bakar dari EFB tidak cukup baik sebagai bahan bakar boiler. EFB memiliki nilai *heating value* rendah dan kandungan *moisture* tinggi, sehingga EFB tidak digunakan sebagai bahan bakar boiler. Di sisi lain, PKS dan *fiber* memiliki karakteristik yang masih dapat diterima untuk digunakan langsung sebagai bahan bakar (Panapanaan, V. et al, 2009). Bahan bakar biomassa ini kemudian dapat diaplikasikan ke dalam sistem untuk menghasilkan energi listrik. Hal ini akan menghasilkan kredit emisi ke dalam sistem *lifecycle* biodiesel.

2.8.2 Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Kompos/Pupuk

Fasilitas *green waste composting* merupakan komponen pemeliharaan dari sistem manajemen agrikultural untuk memanfaatkan material limbah organik dari kelapa sawit. Material limbah organik yang dapat dimanfaatkan untuk proses composting adalah EFB, POME, dan *decanter sludge*. Tujuan dari pemanfaatan ini adalah untuk mengurangi potensi pencemaran dari limbah agrikultural organik terhadap perairan, baik air tanah maupun permukaan. Selain itu, produk pupuk organik/kompos yang dihasilkan dapat digunakan untuk menggantikan kebutuhan pupuk organik untuk penanaman kelapa sawit (Panapanaan, V. et al, 2009). EFB merupakan salah satu limbah organik yang memiliki kandungan nutrient untuk dimanfaatkan sebagai pupuk. Komposisi nutrient pada EFB dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Komposisi nutrient pada tandan buah kosong kelapa sawit (Chavalparit, 2006)

| Nutrient | Kandungan Nutrien | Unit |
|----------|-------------------|----------|
| N | 3,20 | kg/t EFB |
| P | 0,38 | kg/t EFB |
| K | 9,60 | kg/t EFB |

2.8.3 Recovery Gas Metana dari POME dengan Produksi Energi

POME merupakan limbah cair dari proses ekstraksi CPO memiliki kandungan zat organik yang sangat tinggi dengan rata-rata level BOD dan COD sebesar 25000 dan 55000 mg/liter. Biasanya POME diolah terlebih dahulu di dalam kolam/danau terbuka sebelum kemudian dibuang ke perairan. Dekomposisi anaerobik dari zat organik di dalam kolam disertai juga dengan produksi biogas yang memiliki kandungan metana yang cukup besar. Biogas tersebut kemudian terlepas ke atmosfer dan tidak terkontrol. Biogas ini memiliki dampak potensi gas rumah kaca yang cukup besar. Oleh karena itu, biogas ini harus dicegah agar tidak teremisikan ke udara. Selain itu, biogas ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Biogas ini dimanfaatkan dengan menggunakan fasilitas pengolahan limbah tertutup agar biogas yang terproduksi dari POME dapat dikumpulkan yang kemudian digunakan untuk pembakaran generator. (Chavalparit, 2006)

2.8.3 Pemanfaatan Minyak Inti Sawit Sebagai Bahan Baku Surfaktan

Minyak inti kelapa sawit (PKO) didapatkan dari bagian *endosperm* atau biji kelapa sawit. PKO dihasilkan dengan proses penggilingan biji/*kernel* dan kemudian dipisahkan dari *expeller* (PKE). PKO dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku surfaktan. Dalam proses ini PKO diasumsikan sebagai bahan baku produksi surfaktan alkohol etoksilat dan sebagai produk akhir, alkohol etoksilat dari PKO ini menggantikan 3 mol alkohol etoksilat (AE) petrokimia. Kredit emisi dihasilkan dari perbedaan emisi faktor dari AE PKO dan AE petrokimia. Emisi faktor AE PKO dan AE petrokimia dapat dilihat pada Tabel 2.9. (Wicke, B. 2008)

Tabel 2.9 Emisi Faktor AE PKO dan AE Petrokimia (Wicke, B., 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---------------------------------|-------|---------------------------------------|
| Produksi Alkohol Etoksilat PKO | 1,7 | t AE PKO/t PKO |
| EF Alkohol Etoksilat PKO | 2,7 | t CO ₂ -eq/t AE PKO |
| EF Alkohol Etoksilat petrokimia | 5,2 | t CO ₂ -eq/t AE Petrokimia |
| EF Surfaktan mix | 3,4 | t CO ₂ -eq/t surfaktan |

2.8.4 Potensi Pemanfaatan PFAD

Proses penyulingan kelapa sawit menghasilkan minyak kelapa sawit yang telah dipisahkan dari asam lemak atau *fatty acid*. Produk samping dari proses ini adalah PFAD (*palm fatty acid distillate*), yang merupakan hasil pemisahan asam lemak dan berjumlah kurang dari 5% berat total CPO yang diproses. PFAD biasa digunakan untuk memproduksi sabun, pakan ternak, plastik, dan produk intermediate lainnya untuk industry oleokimia. PFAD juga memiliki kandungan energi yang cukup tinggi dan dapat dibakar bersama gas alam atau bahan bakar minyak untuk membangkitkan tenaga listrik dengan generator. PFAD dapat memberikan kredit emisi dari produksi energi untuk menggantikan energi fosil, ataupun menggantikan penggunaan bahan baku sabun dan deterjen. (Wicke, B., 2008)

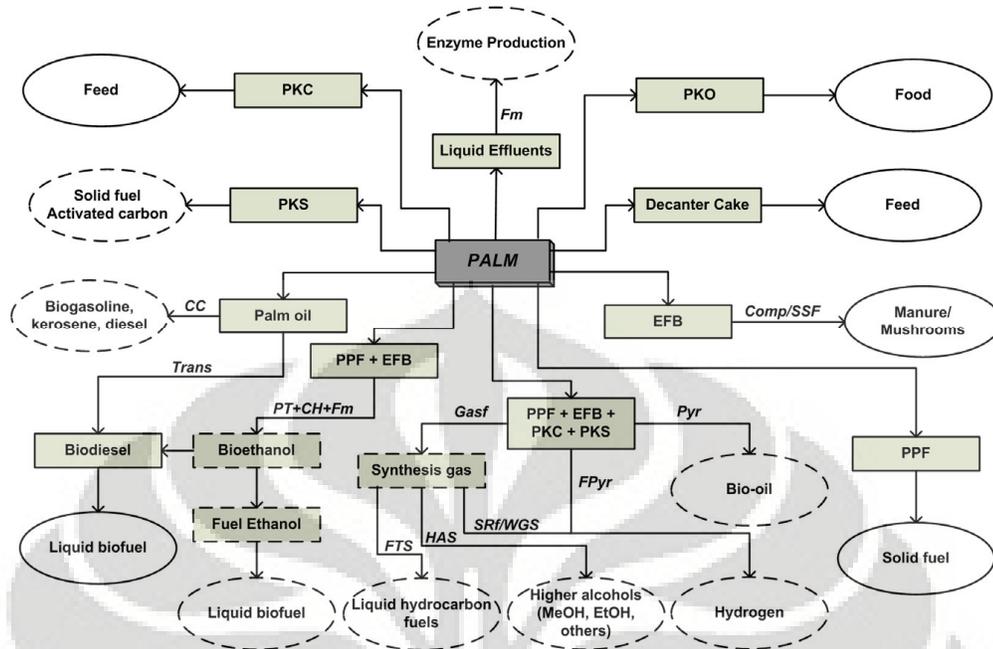
2.8.4 Potensi Pemanfaatan Gliserol

Gliserol merupakan produk samping dari reaksi transesterifikasi biodiesel. Dari produksi 1 liter biodiesel, 84 gram gliserol juga ikut terproduksi. Gliserol dapat dimurnikan lebih lanjut menjadi gliserin yang dapat digunakan di dalam berbagai jenis industri proses, seperti farmasi, makanan dan kosmetik. Akan tetapi, dengan ekspansi produksi industri biodiesel, suplai gliserol akan jauh melebihi permintaan. Kelebihan suplai menyebabkan ketidakstabilan dari harga pasar gliserin. Saat harga gliserin turun, gliserol dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak. Akan tetapi, sebagai pengganti bahan baku gliserin, gliserol dapat memberikan kredit emisi lebih besar dibandingkan sebagai pengganti pakan ternak. (Wicke, B., 2008)

Dalam penelitian yang telah dilakukan Departement Pertanian Amerika Serikat (USDA), kandungan energi gliserol jauh lebih kecil dibandingkan minyak nabati ataupun lemak hewan dan hampir mendekati kandungan energi jagung. Gliserol dapat diformulasikan dengan gandum atau pun kedelai untuk digunakan sebagai pakan ternak. Kredit emisi dari pemanfaatan gliserol dapat dihasilkan dari substitusi gliserin sintetis ataupun gandum. (Wicke, B., 2008)

2.8.5 Pemanfaatan Produk Samping sebagai Bahan Baku *Biofuel/Bioenergy*

Proses produksi biodiesel berbasis kelapa sawit menghasilkan produk samping yang memiliki potensi untuk mendapatkan nilai tambah (*added value*). Produk samping dari biodiesel dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku *biofuel* (Gutierrez, L.F., 2009). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.9 dengan potensi pemanfaatan sebagai *biofuel*. EFB merupakan residua atau produk samping yang paling banyak dihasilkan dari proses ekstraksi kelapa sawit yaitu 0,27 ton EFB/ton FFB. Seperti yang telah dibahas pada sub-bab 2.8.4, EFB memiliki kandungan *moisture* yang cukup besar sehingga tidak dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar secara langsung.



*Garis sambung menyatakan pemanfaatan yang telah dilakukan, garis putus-putus menyatakan potensi pemanfaatan lebih lanjut.

**Gasf: gasification, Pyr: pyrolysis, FPyr: fast pyrolysis, Comp: composting, SSF: solid-stage fermentation, SRf: steam reforming, WGS: water-gas-shift reaction, FTS: Fischer-Tropsch synthesis, PT: pretreatment, CH: cellulose hydrolysis, Fm: fermentation, Trans: transesterification, CC: catalytic cracking, HAS: higher alcohol synthesis.

Gambar 2.9 Produk utama, produk samping, dan residu yang diperoleh dari kelapa sawit (Gutierrez, L.F., 2009)

Serat kelapa sawit, cangkang kelapa sawit dan *Palm kernel expeller* (PKE) dapat dimanfaatkan sebagai bioetanol dengan proses hidrolisis selulosa dan fermentasi. Proses ini dapat dilakukan karena produk samping ini memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang cukup untuk proses fermentasi. (Gutierrez, L.F., 2009)

EFB memiliki kandungan *lignocellulosics* yang dapat dimanfaatkan menjadi bio-oil melalui proses pirolisis. Bio-oil yang dihasilkan merupakan campuran dari senyawa asam, alkohol, aldehida, keton, ester, *heterocyclic derivatives* dan fenol. Bio-oil ini kemudian dapat dikonversi menjadi berbagai biofuel dengan menggunakan katalisis anorganik. (Gutierrez, L.F., 2009)

Palm Kernel Oil (PKO) merupakan senyawa trigliserida yang dapat diperoleh dari proses penggilingan biji kelapa sawit. PKO biasanya dimanfaatkan sebagai bahan baku surfaktan ataupun makanan. Akan tetapi, PKO juga dapat dimanfaatkan menjadi biodiesel melalui proses yang sama dengan CPO.

Ketika *fast pyrolysis* dilakukan pada gliserol, yang dihasilkan dari proses transesterifikasi biodiesel, gas hydrogen dapat dihasilkan dengan menggunakan waktu tinggal rendah dan katalis yang tepat pada reaktor. Produk bahan bakar yang lain dapat diproduksi jika menggunakan proses gasifikasi. Pembentukan *syngas* merupakan tahap awal yang diperlukan. Selanjutnya dengan proses *steam reforming* yang dilanjutkan dengan *water-gas-shift*, gas hidrogen dapat dihasilkan. (Gutierrez, L.F., 2009)

Berbagai jenis *biofuel* yang diproduksi di dalam satu bahan baku merupakan konsep *biorefinery*. Dengan berbagai potensi yang telah dijelaskan, produk samping kelapa sawit dapat dimanfaatkan dengan pendekatan *biorefinery*. Dalam pemanfaatan produk samping menjadi *biofuel*, parameter yang harus diperhitungkan adalah *yield* dan kebutuhan energi dari setiap proses produksi *biofuel*. *Yield* dan kebutuhan energi masing-masing proses ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 *Yield* dan kebutuhan energi proses produksi biofuel (Spath, P.L., 2003)

| Biofuel | Yield | Fossil energy ratio | Primary energy ratio |
|-----------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| biomass to ethanol | 0,85 | 4,3 | 0,35 |
| biomass to biooil | 0,72 | 15,00 | 0,29 |
| biomass to H2 | 0,0785 | 17,00 | 0,53 |
| biomass to biodiesel | 0,96 | 4,22 | 0,81 |

2.9 PERKEMBANGAN ANALISIS *LIFECYCLE* BIOFUEL

Seiring berkembangnya penelitian dan pengembangan teknologi produksi *biofuel*, analisis *lifecycle* telah banyak digunakan untuk membandingkan teknologi yang telah ada dengan yang baru. Selain itu analisis *lifecycle* untuk digunakan sebagai pertimbangan pengambilan keputusan dalam pemilihan teknologi maupun proses produksi yang lebih berkelanjutan. Pada Tabel 2.11. terdapat perbandingan dari studi analisis *lifecycle* yang pernah dilakukan.

Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA

| Nama | Parameter | Hasil penelitian |
|-----------------------------|--|--|
| Seehan, J. et al (1998) | Perbandingan siklus <i>lifecycle</i> biodiesel dengan petroleum diesel untuk penggunaan bus kota | Biodiesel memiliki kebutuhan energi fosil dan emisi GHGs yang lebih rendah dibandingkan dengan petroleum diesel (35% reduksi dibandingkan dengan petroleum diesel). Konsumsi energi <i>lifecycle</i> tereduksi 95% dengan penggunaan B100 pada bus kota. |
| Tan, Culaba (2003) | Implikasi intaris karbon dioksida dari biodiesel berbasis kelapa di Filipina | Penggunaan biodiesel mereduksi hampir 80% dari emisi CO ₂ jika residu digunakan untuk memenuhi kebutuhan panas dari Plant biodiesel tersebut. 90% untuk penggunaan residu sebagai sumber energi. |
| Pascual, L.M. (2004) | Perbandingan LCA biodiesel dengan konvensional diesel untuk pengaplikasian pada transportasi mobil dan boiler, serta pengaplikasian pemanfaatan <i>coproduct</i> pada sistem | Pemanfaatan <i>coproduct</i> pada automotif dan boiler menghasilkan pengurangan total emisi yang dihasilkan hingga 60%. Sedangkan penggunaan biodiesel mereduksi hingga 96% pada konsumsi total energi. |
| Orathai Chavalparit (2006) | Sistem produksi CPO, proses pengolahan dan limbah, pemanfaatan <i>byproduct</i> pada industri CPO. | Aplikasi pendekatan <i>clean technology</i> untuk produksi CPO. Sistem produksi CPO dengan alokasi limbah dan by-produk untuk mengurangi limbah yang dibuang ke lingkungan. |
| Zah, R. et al (2006) | Analisis <i>lifecycle</i> terhadap berbagai jenis biofuel dengan mengevaluasi emisi GHG dan polutan dari <i>lifecycle</i> biofuel tersebut. | Tidak semua biofuel dapat mengurangi dampak lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Biofuel dengan proses produksi dengan melakukan alih fungsi lahan memiliki dampak lingkungan yang lebih besar dibandingkan dengan energi fosil |
| Guiterez, L.F. et al (2008) | Proses integrasi produksi biodiesel dengan etanol yang dihasilkan dari <i>lignocellulosic</i> residu dari industri kelapa sawit. Proses integrasi ini dibandingkan dengan produksi dari etanol yang berasal dari tebu. | Proses integrasi ini menghasilkan nilai tambah dari proses produksi biodiesel. Yaitu mengurangi jumlah limbah padat yang dihasilkan dari proses produksi CPO. EFB dan <i>press fibre</i> yang dihasilkan memiliki kandungan <i>lignocellulosic</i> yang memadai untuk dikonversi menjadi etanol. |

Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA (lanjutan)

| Nama | Parameter | Hasil penelitian |
|----------------------------|---|---|
| Kiwjaroun, C. et al (2008) | Studi LCA yang membandingkan proses produksi biodiesel konvensional dengan teknologi superkritikal. | Proses superkritikal memiliki keunggulan pada besarnya yield dan emisi limbah dan polutan yang lebih sedikit dibandingkan dengan proses konvensional. Proses superkritikal memiliki kebutuhan energi yang lebih besar (38%) |
| Hugraha, Dadan (2007) | Analisis <i>lifecycle</i> biodiesel berbahan baku minyak sawit di Indonesia. Parameter dampak yang ditinjau adalah konsumsi energi <i>lifecycle</i> . | Jarak transportasi antar rantai suplai biodiesel mempengaruhi total energi primer dalam <i>lifecycle</i> . Hasil efisiensi energi <i>lifecycle</i> tertinggi diperoleh di Bandung (33%) |
| Andita (2008) | Simulasi Daur Hidup Energi dan Rantai Suplai Biodiesel untuk Sektor Transportasi di Propinsi DKI Jakarta. | Total energi primer biodiesel sangat sensitive terhadap kenaikan energi proses konversi biodiesel dibandingkan dengan kenaikan biaya lainnya seperti energi pengolahan lainnya. |



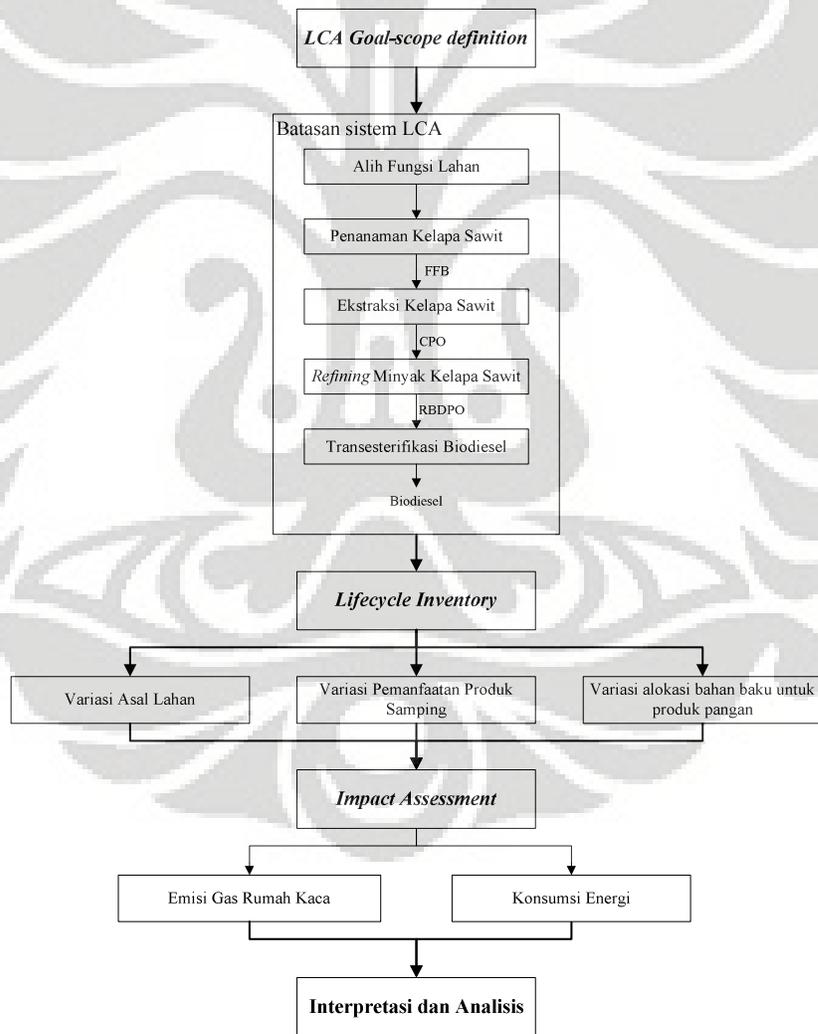
BAB 3

METODE PENELITIAN

Dalam permodelan dan simulasi *lifecycle* sistem produksi biodiesel ini akan digunakan rangkaian metode pelaksanaan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan tujuan dan lingkup dari penelitian yang dilakukan
2. Inventarisasi *lifecycle* biodiesel (*Lifecycle Inventory – LCI*)
3. Penilaian dampak (*Impact Assesment*)

Adapun diagram alir dari tahap metode pelaksanaan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.1 PENENTUAN TUJUAN DAN LINGKUP

Pada tahap ini dilakukan penentuan tujuan (*goal*) dan lingkup (*scope*) dari penelitian yang akan dilakukan. Penetapan *Goal* dan *scope* dari penelitian ini adalah untuk memberikan arahan dan batasan jelas dari penelitian ini. *Goal* dan *scope* yang ditentukan berpengaruh terhadap hasil evaluasi analisis *lifecycle*. *Goal* dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan memilih skema produksi biodiesel berdasarkan dampak potensi pemanasan global atau emisi gas rumah kaca dan total konsumsi energi dalam *lifecycle* untuk setiap 1 MJ biodiesel yang dihasilkan dari masing-masing alternatif skenario.

Scope sistem dari *lifecycle* biodiesel terdiri dari alih fungsi lahan yang dibutuhkan untuk membuat perkebunan kelapa sawit, produksi dari buah kelapa sawit, proses ekstraksi minyak kelapa sawit, penyulingan/*refining* minyak kelapa sawit, produksi biodiesel. Variasi dalam *lifecycle* biodiesel untuk masing-masing skenario dilakukan berdasarkan pendekatan teknologi yang diterapkan dalam pemanfaatan produk samping, jumlah pembagian alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan.

3.2 INVENTARISASI LIFECYCLE BIODIESEL (LCI)

Aliran massa dan energi input dan output dari setiap skenario produksi biodiesel diperoleh dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari proses pengumpulan data sebelumnya. Sebagian data input dan output, terutama dekontaminasi dan pembuangan limbah produk, diperoleh dengan mengasumsikan berdasarkan referensi terkait. Data masing-masing proses dari data sekunder kemudian diolah untuk mendapatkan inventarisasi neraca massa energi untuk produksi 1 MJ biodiesel. Parameter proses terkait dalam *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter proses pada lifecycle biodiesel

| Parameter | Keterangan | Unit | Value |
|--------------------|--|-----------------------|-------|
| T_{LUC} | periode alokasi emisi dari LUC | tahun | 25 |
| T_{plant} | umur tanaman kelapa sawit | tahun | 25 |
| Y | yield areal kebun kelapa sawit | ton FFB/ha tahun | 20 |
| OER | Laju ekstraksi CPO dari kelapa sawit | ton CPO/ton FFB | 0,23 |
| REF | Laju penyulingan minyak kelapa sawit | ton RBDPO/ton CPO | 0,95 |
| $conv_{biodiesel}$ | Efisiensi konversi CPO menjadi biodiesel | ton biodiesel/ton CPO | 0,96 |
| $NHV_{biodiesel}$ | net heating value biodiesel | MJ/kg biodiesel | 40,17 |

3.2.1 Alih Fungsi Lahan Menjadi Perkebunan Kelapa Sawit

Alih fungsi lahan merupakan perubahan suatu jenis lahan menjadi lahan lainnya (contoh: hutan menjadi kebun kelapa sawit). Setiap perubahan lahan mempengaruhi stok karbon dalam *standing biomass*, *belowground biomass*, dan karbon yang tersimpan pada materi sisa organik (*dead organic matter*). Penangkapan CO₂ pada tanaman kelapa sawit berlaku untuk CO₂ yang terdapat di dalam batang kelapa sawit dan dedaunan yang tidak terpotong pada saat pemanasan. Dengan pendekatan ini maka, diasumsikan bahwa buah kelapa sawit dan produk turunan maupun produk samping memiliki kandungan karbon netral, yang berarti kandungan dalam karbon dalam produk-produk tersebut tidak diperhitungkan sebagai emisi dalam analisis *lifecycle*. Untuk setiap kelapa sawit yang dipanen untuk memproduksi biodiesel memiliki kontribusi dalam emisi gas rumah kaca yang berasal dari alih fungsi lahan, praktek pembakaran dan penebangan lahan, serta asimilasi karbon dioksida oleh tanaman kelapa sawit (IPCC, 2006). Perhitungan jumlah perubahan stok karbon pada lahan akibat konversi lahan ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$L_{conversion} = C_{before}/T_{LUC} - C_{after}/T_{oil\ palm} \quad (3.1)$$

- $L_{conversion}$ = perubahan stok karbon untuk perubahan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- C_{before} = jumlah stok karbon sebelum perubahan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- C_{after} = jumlah stok karbon pada perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- T_{LUC} = alokasi waktu dari emisi LUC (tahun)
- T_{plant} = umur tanaman kelapa sawit (tahun)

Total perubahan stok karbon akibat konversi lahan kemudian dikali dengan jumlah lahan kelapa sawit yang diperlukan untuk menghasilkan 1 MJ biodiesel setiap tahunnya. Sedangkan untuk emisi karbon akibat praktek pembukaan lahan dengan pembakaran lahan didapatkan dari jumlah gas rumah kaca yang dilepas dari pembakaran sejumlah lahan yang digunakan sebagai perkebunan kelapa sawit. Acuan yang digunakan sebagai *base case* asal lahan perkebunan pada *lifecycle* biodiesel adalah hutan tropis.

3.2.2 Penanaman Kelapa Sawit

Pada proses penanaman kelapa sawit LCI meliputi identifikasi aliran input output massa dan energi dari dan ke lingkungan yang terasosiasi pada proses ini. Aliran input dari lingkungan terdiri dari bibit kelapa sawit, bahan agrokimia (pupuk dan pestisida), air irigasi, bahan bakar diesel, dan listrik. Aliran output dari proses penanaman kelapa sawit adalah buah kelapa sawit/tandan buah segar (FFB). Dalam pengumpulan data, jumlah buah kelapa sawit yang dihasilkan ditetapkan sebesar 1 ton FFB. Salah satu parameter yang terkait mengenai penanaman kelapa sawit adalah produktivitas lahan atau *yield* produksi kelapa sawit. Dalam penelitian ini, asumsi *yield* kelapa sawit yang digunakan adalah sebesar 20 ton FFB/ha tahun, yang merupakan rata-rata produktivitas perkebunan kelapa sawit di Indonesia (Suryana, 2007).

Dari aliran input ini terdapat material yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (GHGs) seperti pupuk, pestisida dan *petroleum diesel*. Emisi yang dihasilkan dari penggunaan pupuk nitrogen baik secara langsung maupun tidak langsung, dihitung berdasarkan asumsi yang digunakan pada IPCC *guidelines* (IPCC, 2006). Sedangkan untuk emisi yang berasal dari penggunaan energi fosil, seperti listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil, dan bahan bakar diesel, dihitung dari jumlah kebutuhan energi untuk areal dan operasional perkebunan dan dikalikan dengan emisi faktor dari penggunaan energi tersebut. Seluruh aliran massa dan energi untuk memproduksi 1 ton FFB dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Aliran input output sistem penanaman kelapa sawit untuk 1 ton FFB (Andita, 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--|---------|------------------|
| Yield perkebunan kelapa sawit (Deptan, 2009) | 20 | ton FFB/ha tahun |
| Input Bahan Mentah | | |
| Bibit | 100 | Kg |
| Input Bahan Tambahan | | |
| Pupuk | | |
| - N | 16,12 | Kg |
| - P | 22,34 | Kg |
| - K | 9,23 | Kg |
| - Mg | 8,08 | Kg |
| - B | - | Kg |
| Insektisida | | |
| Herbisida | | |
| - Paraquat | 0,15 | Kg |
| - Glyphosate | 0,30 | Kg |
| Air | 1250,00 | m ³ |
| Input Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 27 | Liter |
| Listrik | 0,38 | kWh |
| Output/Produk | | |
| FFB | 1000 | Kg |

3.2.3 Proses Ekstraksi Minyak Kelapa Sawit

Pada proses ekstraksi kelapa sawit LCI meliputi aliran input massa energi dari lingkungan ke sistem dan produk dari sistem ke lingkungan. Aliran input material pada proses ini terdiri dari buah kelapa sawit (FFB), air, bahan bakar diesel, dan energi listrik. Aliran output terdiri dari produk utama, yaitu minyak kelapa sawit (CPO), produk samping (by-produk) dan limbah. Produk samping yang dihasilkan terdiri inti kelapa sawit (*kernel*), tandan buah kosong (EFB), serat buah kelapa sawit (*fiber*), cangkang kelapa sawit (*shell*), ampas dekanter, sedangkan limbah yang dihasilkan merupakan residu dari proses ekstraksi yaitu POME (*palm oil mill effluent*). Pada data yang dikumpulkan, basis jumlah CPO yang dihasilkan sebesar 1 ton CPO. Data rantai suplai pada proses ekstraksi CPO dapat dilihat pada Tabel 3.3. Pada proses ini laju proses ekstraksi CPO sebesar 0.23 ton CPO/ton FFB.

Pada proses ekstraksi minyak kelapa sawit, emisi gas rumah kaca dihasilkan dari penggunaan petroleum diesel sebagai bahan bakar generator listrik

maupun pada reboiler, dengan perhitungan seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Selain itu, emisi GHG dihasilkan dari POME (*palm oil mill effluent*) atau limbah organik yang dihasilkan dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit, dimana limbah ini dapat menghasilkan gas metana ke udara.

Tabel 3.3 Aliran input output proses ekstraksi untuk menghasilkan 1 ton CPO (Chavalparit, 2006)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|-----------------------------|-------|-----------------|
| Rasio Ekstraksi CPO | 0,23 | ton CPO/ton FFB |
| Input Bahan Baku | | |
| Tandan Buah Segar (FFB) | 4,27 | ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| Air | 3,42 | m ³ |
| Input Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 6,15 | liter |
| Listrik | 88,06 | kWh |
| Output/Produk | | |
| - CPO | 1 | ton |
| - Kernel | 0,23 | ton |
| Produk samping/Limbah | | |
| - EFB | 1,16 | ton |
| - Fiber | 0,53 | ton |
| - Shell | 0,30 | ton |
| - <i>Decanter cake</i> | 0,11 | ton |
| Wastewater | 2,38 | m ³ |

3.2.4 Proses Penyulingan Minyak Kelapa Sawit

Proses penyulingan minyak kelapa sawit merupakan proses untuk menghilangkan asam lemak bebas (*free fatty acid*) pada minyak kelapa sawit. Pada umumnya proses ini dilakukan untuk meningkatkan kualitas minyak kelapa sawit agar dapat diolah menjadi produk pangan. Selain itu, proses penyulingan kelapa sawit dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi transesterifikasi biodiesel (Renita, 2006). Proses penyulingan minyak kelapa sawit menghasilkan minyak kelapa sawit RBD (*refined, bleached, deodorized*) atau yang kemudian terbagi menjadi dua produk utama yaitu RBD olein dan stearin. Produk samping yang dihasilkan dari proses ini adalah PFAD (*palm fatty acid distillate*). Proses penyulingan ini membutuhkan sejumlah energi, baik dari sumber listrik maupun dari bahan bakar fosil, untuk pengoperasian sejumlah

peralatan proses. Konsumsi energi ini akan memberikan kontribusi dalam emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Sedangkan emisi yang dihasilkan dari penggunaan bahan kimia tambahan tidak diikutsertakan dalam analisis ini karena emisi yang dihasilkan relatif sangat kecil dibandingkan emisi sistem keseluruhan.

Pada proses ini aliran input terdiri dari CPO, asam fosfat, *bleaching earth*, bahan bakar biomass, bahan bakar diesel, dan listrik. Aliran output terdiri dari produk dan produk samping. Produk utama adalah minyak kelapa sawit yang telah disuling/*refining bleached, deodorized palm oil* (RBDPO) dan produk samping berupa residu asam lemak/*palm fatty acid distillate* (PFAD). Data yang dikumpulkan menggunakan basis produksi 1 ton RBDPO. Laju penyulingan minyak kelapa sawit sebesar 0,95 ton RBDPO/ton CPO. Data rantai suplai proses penyulingan kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Aliran input output proses penyulingan minyak kelapa sawit (Wicke, et al., 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--|--------|-------------------|
| Rasio penyulingan minya kelapa sawit | 0,95 | ton RBDPO/ton CPO |
| Input Bahan baku | | |
| CPO | 1,05 | Ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 1,05 | Kg |
| <i>Bleaching Earth/acid activated clay</i> | 20,98 | Kg |
| Steam | 41,95 | Kg |
| Input Energi | | |
| Biomass | 682,50 | MJ |
| Bahan bakar | 6,86 | Liter |
| Energi listrik | 24,57 | kWh |
| Output/Produk | | |
| RBDPO | 1,00 | Ton |
| PFAD | 50,00 | Kg |

3.2.5 Proses Transesterifikasi Biodiesel

Proses konversi minyak kelapa sawit menjadi biodiesel dilakukan dengan menggunakan reaksi transesterifikasi dengan katalis basa. Pada proses ini aliran input terdiri dari RBDPO, NaOH, methanol, air, dan energi listrik. Aliran output terdiri dari produk, produk samping dan limbah. Produk yang dihasilkan adalah biodiesel, sedangkan produk samping adalah gliserol. Pada proses ini emisi gas

rumah kaca yang dihasilkan berasal dari penggunaan energi fosil yang dibutuhkan dalam pembuatan metanol dan katalis. Perhitungan emisi gas rumah kaca dilakukan dengan mengkalikan jumlah kebutuhan material dan energi fosil untuk menghasilkan 1 MJ biodiesel dengan emisi faktor masing-masing material. Produk akhir dari proses transesterifikasi ini adalah biodiesel sebagai produk utama dan gliserol sebagai produk samping. Data rantai suplai proses transesterifikasi biodiesel dapat dilihat pada Tabel 3.5. Basis data produksi yang digunakan pada data ini adalah produksi 1 ton biodiesel. Konversi yang digunakan pada data ini adalah sebesar 96%.

Tabel 3. 5 Aliran input output proses transesterifikasi biodiesel (Pleanjai, S., 2004)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---|--------|-------------------------|
| Konversi reaksi transesterifikasi biodiesel | 0,96 | ton biodiesel/ton RBDPO |
| Input Bahan Baku | | |
| RBDPO | 1.08 | Ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| NaOH | 8.00 | kg |
| Metanol | 150.00 | kg |
| Air | 200.00 | kg |
| Input Energi | | |
| Energi listrik | 256.50 | kWh |
| Output/Produk | | |
| Biodiesel | 1.00 | ton |
| Glycerol | 0.32 | ton |
| Limbah | | |
| Wastewater | 0.20 | m ³ |

3.3 PENILAIAN DAMPAK *LIFECYCLE* (*IMPACT ASSESSMENT*)

Penilaian dampak *lifecycle* dilakukan dengan tujuan mengevaluasi dampak yang dihasilkan dari penggunaan sumber daya (*resource*), emisi dari limbah yang dihasilkan pada proses produksi, konsumsi energi yang dibutuhkan, tingkat efisiensi energi, serta rasio energi fosil yang digunakan. Kategori dampak yang akan dianalisis ditetapkan sesuai dengan *sustainable development indicator*. Faktor yang dianalisis pada penelitian ini adalah faktor lingkungan. Kategori dampak lingkungan yang dievaluasi adalah dampak pemanasan global, yang

dinyatakan dalam jumlah emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi *lifecycle* biodiesel, yang dinyatakan dalam rasio energi primer dan rasio energi fosil.

3.3.1 Dampak Potensi Pemanasan Global

Dalam penilaian dampak potensi pemanasan global, hasil perhitungan akan merepresentasikan jumlah gas rumah kaca yang diemisikan oleh *lifecycle* biodiesel. Model perhitungan emisi gas rumah kaca yang digunakan merupakan model yang telah dikembangkan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) untuk mendefinisikan potensi pemanasan global dari berbagai gas rumah kaca yang berbeda. Emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam gram CO₂-eq/MJ produk energi. Emisi gas rumah kaca dipengaruhi oleh emisi faktor dari penggunaan dan produksi material maupun energi dalam *lifecycle*.

$$\text{emisi gas rumah kaca} = \sum_i GWP_{a,j} \times m_i \quad (3.2)$$

$GWP_{a,j}$ = emisi faktor untuk umpan ataupun produk

m_i = jumlah umpan atau produk

3.3.2 Konsumsi Energi *Lifecycle*

Persamaan matematis untuk menghitung rasio energi primer *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Persamaan 3.3.

$$\eta = \frac{E_p}{P} \quad (3.3)$$

Pada persamaan tersebut terlihat bahwa efisiensi *lifecycle* biodiesel ini merupakan perbandingan antara besarnya energi pembakaran yang dihasilkan biodiesel (E_p) dengan total energi primer yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel tersebut. (Seehan, J. et al., 1998)

Sedangkan persamaan matematis untuk menghitung total energi primer yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel dapat dilihat pada Persamaan 3.4.

$$P = E_{\text{Plantation}} + E_{\text{CPO}} + E_{\text{Ref}} + E_{\text{trans}} + E' \quad (3.4)$$

Pada Persamaan 3.4 dapat dilihat bahwa total energi primer merupakan hasil penjumlahan dari energi produksi kelapa sawit ($E_{plantation}$), energi produksi CPO (E_{CPO}), energi proses *refinery* CPO (E_{ref}), energi produksi biodiesel (E_{trans}), energi tambahan dari masing-masing skenario (E'). Dimana setiap energi proses produksi merupakan fungsi dari kebutuhan (D_a) dan kapasitas dari tiap-tiap unit proses.

Persamaan matematis untuk menghitung rasio penggunaan energi fosil dapat dilihat pada Persamaan 3.5.

$$REF = \frac{E_P}{(E_A + E_B + E_C)} \quad (3.5)$$

Dengan A, B, C adalah energi fosil yang digunakan dalam sistem. (Seehan, J. et al., 1998)

3.4 PENILAIAN DAN INTERPRETASI

Analisis hasil ini akan membahas sustainabilitas dari setiap alternatif skenario yang ada berdasarkan perhitungan dampak *lifecycle* yang telah dilakukan. Sustainabilitas dari skema produksi ini ditentukan berdasarkan *sustainable development indicator*. Skenario produksi yang diharapkan adalah skema produksi yang berkelanjutan, dengan dampak lingkungan rendah, konsumsi energi minimal, efisiensi energi tinggi, rasio penggunaan energi fosil rendah.

3.5 ALTERNATIF SKENARIO PADA LIFECYCLE BODIESEL

Alternatif skenario yang digunakan dalam analisis *lifecycle* biodiesel ini adalah variasi lahan asal yang dikonversi menjadi biodiesel, pemanfaatan produk samping dari *lifecycle*, serta alokasi pembagian bahan baku minyak kelapa sawit untuk produksi biodiesel dan bahan pangan.

3.5.1 Variasi Asal Lahan untuk Perkebunan Kelapa Sawit

Variasi alternatif ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari lahan yang digunakan untuk perkebunan kelapa sawit pada dampak pemanasan global atau emisi gas rumah kaca yang dihasilkan akibat alih fungsi lahan. Untuk perhitungan emisi gas rumah kaca akibat alih fungsi lahan (LUC) terdapat tiga jenis lahan

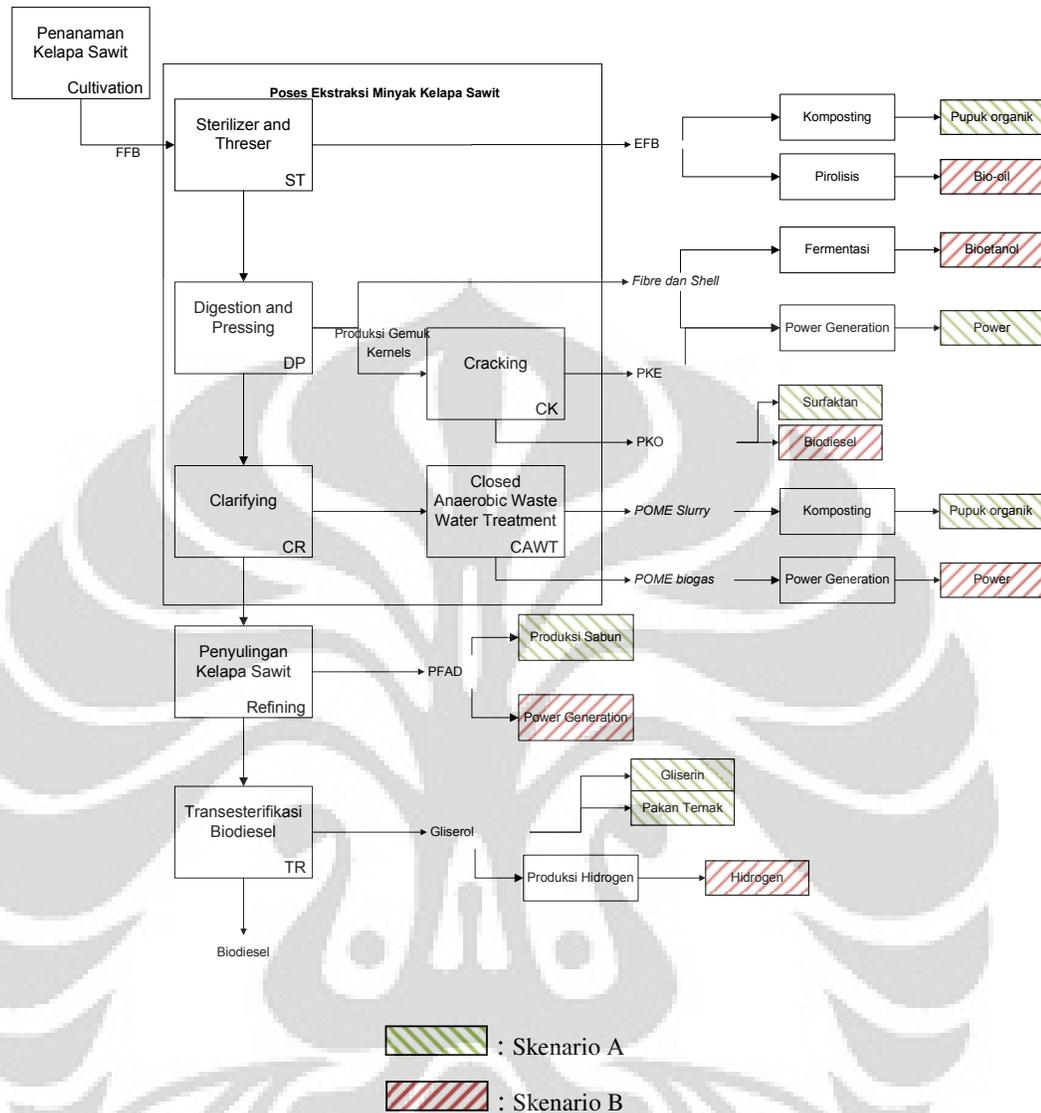
yang akan digunakan sebagai lahan asal yang dikonversi menjadi perkebunan kelapa sawit.

- a. Hutan tropis (*natural forest land*)
- b. Lahan gambut (*peatland*)
- c. Padang rumput (*degraded land*)

Untuk keadaan dimana lahan gambut yang dirubah/dikonversi menjadi lahan kelapa sawit tambahan emisi stok karbon yang hilang dan N₂O dari dekomposisi gambut setelah pengeringan harus diperhitungkan. Data alih fungsi lahan untuk ketiga lahan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 pada sub-bab 2.7.1.

3.5.2 Variasi Pemanfaatan Produk Samping

Variasi alternatif ini dilakukan untuk melihat pengaruh pendekatan pemanfaatan produk samping yang dilakukan berdasarkan potensi ekonomis maupun kandungan energi yang dimiliki dari setiap produk samping untuk menggantikan produk maupun energi dari bahan baku yang lainnya. Hal ini akan memberikan kredit emisi dengan menghitung jumlah emisi gas rumah kaca yang dapat dicegah dari pemanfaatan produk samping itu sendiri. Berikut adalah variasi skenario pemanfaatan produk samping. Produk samping yang dihasilkan dalam *lifecycle* ini adalah *palm fiber*, *palm shell*, tandan buah kosong (EFB), *palm oil mill effluent* (POME) *slurry*, POME biogas dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit *palm fatty acid distillate* (PFAD) dari proses penyulingan minyak kelapa sawit, dan gliserol dari proses transesterifikasi biodiesel. Potensi pemanfaatan produk samping *lifecycle* biodiesel dan pembagian skenarionya ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Alternatif alokasi pemanfaatan produk samping pada sistem produksi biodiesel

Dari Gambar 3.2, secara garis besar skenario pemanfaatan produk samping terbagi menjadi dua skenario, yaitu skenario A dan skenario B. Rincian pembagian skenario pemanfaatan produk samping dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Skenario pemanfaatan produk samping

| Proses | Produk samping | Skenario A | Skenario B |
|--------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> | bahan bakar biomassa | bahan baku bioetanol |
| | <i>palm shell</i> | bahan bakar biomassa | bahan baku bioetanol |
| | EFB | pupuk organik | bahan baku bio-oil |
| | PKO | bahan baku surfaktan | bahan baku biodiesel |
| | PKE | bahan bakar biomassa | bahan bakar bioetanol |
| | POME slurry | pupuk organik | |
| | POME biogas | bahan bakar biogas | biogas |
| Proses refining | PFAD | bahan baku sabun dan deterjen | bahan bakar |
| Proses transesterifikasi | Gliserol opsi 1 | substitusi gliserin sintetis | bahan baku hidrogen |
| | Gliserol opsi 2 | bahan baku pakan ternak | |

Pemanfaatan produk samping pada skenario A terdiri dari pemanfaatan *fiber, shell, PKE* sebagai bahan bakar biomassa untuk menggantikan pemakaian bahan bakar fosil pada boiler, pemanfaatan EFB dan endapan POME sebagai pupuk organik untuk menggantikan penggunaan pupuk nonorganik, pemanfaatan biogas yang diproduksi dari POME, pemanfaatan gliserol dan PKO untuk menggantikan bahan baku gliserin dan surfaktan. Cangkang dan serat kelapa sawit (*palm shell and fiber*) memiliki potensi untuk menjadi bahan bakar boiler karena nilai LHV yang cukup memadai (*fiber* 5,80 MJ/kg dan *shell* 17,10 MJ/kg). Tandan buah kosong (EFB) dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik karena memiliki kandungan nutrient. pada pemanfaatan gliserol terdapat dua guah opsi, yaitu memanfaatkan gliserol sebagai pengganti gliserin sintetis untuk opsi 1 dan sebagai pengganti pakan ternak untuk opsi 2. Hal ini dilakukan karena gliserin sintetis memiliki produksi yang cukup melimpah di pasar internasional (Smeets, E., 2005). Kelebihan suplai gliserin dapat menurunkan harga pasar gliserin, sehingga digunakan alternatif untuk memanfaatkan giserin sebagai bahan baku pakan ternak. Kredit emisi yang dihasilkan dihitung dari potensi kredit emisi dari setiap produk samping untuk menggantikan bahan baku produk tertentu.

Skenario B terdiri dari penerapan pendekatan teknologi *advance* dalam pemanfaatan produk samping sebagai bahan baku *biofuel*. Palm fiber dan shell akan digunakan sebagai bahan baku bioetanol dengan proses fermentasi. Sedangkan tandan buah kosong atau EFB akan dialokasikan sebagai bahan baku

bio-oil dalam proses *pyrolysis*. Kredit emisi skenario B akan dihitung berdasarkan potensi setiap *biofuel* yang dihasilkan untuk menggantikan energi fosil dan dikurangi emisi yang dihasilkan untuk produksi *biofuel* tersebut.

Dari kedua skenario tersebut terdapat perbedaan mengenai adanya nilai tambah yang dihasilkan dari pemanfaatan produk samping. Sehingga dalam perhitungan ini parameter dampak lingkungan saja tidak mencukupi untuk melakukan perbandingan di antara kedua skenario tersebut. Oleh karena itu, perbandingan ini akan menggunakan parameter tambahan yaitu *eco-efficiency*. Parameter ini membandingkan rasio nilai tambah ekonomis dengan rasio dampak lingkungan. Perhitungan parameter *eco-efficiency* adalah sebagai berikut (Alloca, C., 2000). Skenario dengan nilai *eco-efficiency* lebih besar merupakan skenario yang dipilih.

$$Eco - efficiency = \frac{Economic\ value\ added}{Environmental\ impact\ ratio} \quad (3.6)$$

$$Economic\ value\ added = \frac{Market\ value\ of\ products}{Cost\ of\ raw\ material\ \&\ fuel} \quad (3.7)$$

$$Environmental\ impact\ ratio = \frac{Environmental\ impact}{Environmental\ credit} \quad (3.8)$$

3.5.3 Alokasi Bahan Baku untuk Biodiesel dan Produk Pangan

Pembagian alokasi ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari pengintegrasian produksi biodiesel dengan bahan pangan dalam satu industri. Bahan pangan yang dimaksud dalam analisis ini adalah minyak goreng berasal dari produk turunan minyak kelapa sawit yang telah melalui proses penyulingan (RBDPO). Dalam analisis ini, proses pengolahan minyak kelapa sawit menjadi produk pangan tidak termasuk ke dalam batasan sistem *lifecycle*, minyak kelapa sawit tersebut hanya dialokasikan ke dalam unit proses pengolahan lebih lanjut di luar sistem pada *lifecycle*. Asumsi yang digunakan di dalam analisis ini adalah jumlah inventarisasi neraca massa energi *lifecycle* biodiesel yang digunakan sama dengan *lifecycle* biodiesel tanpa alokasi produk pangan.

Dalam perhitungan pengaruh alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan, unit fungsional yang diperhitungkan terhadap dampak tidak dapat

disamakan dengan perhitungan sebelumnya yaitu per 1 MJ biodiesel yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan biodiesel dan produk pangan, dalam hal ini adalah minyak goreng, tidak dapat diekuivalensikan dampak yang dihasilkan untuk setiap MJ produk. Oleh karena itu, pengaruh alokasi bahan baku terhadap dampak lingkungan untuk setiap keuntungan yang diperoleh dari penjualan biodiesel ataupun minyak goreng. Penjualan biodiesel dan minyak goreng dilakukan berdasarkan harga pasar domestik dan international. Khusus untuk harga biodiesel domestik, analisis akan dilakukan terhadap harga pasar yang ditetapkan oleh pemerintah dengan harga eks-produsen biodiesel. Hal ini dilakukan karena adanya perbedaan pendapat mengenai harga jual biodiesel (Mursanti, E., 2008). Basis harga biodiesel, CPO, dan minyak goreng yang digunakan dalam perhitungan ini dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Harga CPO, minyak goreng dan biodiesel

| Harga Jual | CPO | Biodiesel | Minyak goreng | Sumber |
|-----------------------------|---------|-----------|---------------|--------------------|
| Pasar Ekspor (US\$/ton) | 700,28 | 830,97 | 730,74 | Wahid, B., 2010 |
| Pasar Domestik (IDR/kg) | 6591,85 | 4319,77 | 7800,00 | Mursanti, E., 2007 |
| Harga eks-produsen (IDR/kg) | - | 11.027,63 | - | Mursanti, E., 2007 |

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 INVENTARISASI *LIFECYCLE* (LCI) BIODIESEL

Dari data sekunder yang ada diolah menjadi data siap pakai untuk melakukan perhitungan. Tabel 4.1 menunjukkan keseluruhan inventarisasi rantai suplai tahapan *lifecycle* biodiesel.

Tabel 4. 1 LCI rantai suplai biodiesel overall.

| Parameter | Kuantitas | Satuan |
|--|-----------|----------------|
| Bahan Mentah | | |
| Bibit | 0,0119 | kg |
| Pupuk N | 1,9131 | gram |
| Pupuk P | 2,6513 | gram |
| Pupuk K | 1,0954 | gram |
| Pupuk Mg | 0,9589 | gram |
| Air | 0,1483 | m ³ |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 0,0272 | gram |
| <i>Bleaching Earth/acid activated clay</i> | 0,5439 | gram |
| NaOH | 0,1992 | gram |
| Metanol | 3,7341 | gram |
| Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 0,0035 | liter |
| Listrik | 0,0095 | kWh |
| Biomass | 0,0177 | MJ |
| Produk Samping | | |
| <i>Kernel</i> | 0,0316 | kg |
| - EFB | 0,0144 | kg |
| - Fiber | 0,0083 | kg |
| - Shell | 0,0030 | kg |
| - <i>Decanter cake</i> | 0,0062 | kg |
| - <i>Ash</i> | 0,0005 | kg |
| Wastewater | 0,0001 | m ³ |
| PFAD | 0,0013 | kg |
| Gliserol | 0,0080 | kg |
| Produk | | |
| Biodiesel | 0,0249 | kg |

Inventarisasi ini dilakukan dengan mengumpulkan data aliran input output material yang digunakan dan produk-produk yang dihasilkan serta energi yang dikonsumsi pada setiap sub-proses yang kemudian dikuantifikasi berdasarkan unit fungsional yang digunakan dengan menggunakan faktor konversi masing-masing sistem.

Unit fungsional yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 MJ biodiesel. Untuk itu semua data inventerisasi pada sub-bab 3.2 sebelumnya dirubah untuk produksi 1 MJ biodiesel dengan menggunakan parameter produksi yang digunakan pada setiap sub-proses sistem.

4.2 PENILAIAN DAMPAK *LIFECYCLE* BODIESEL (BASE CASE)

Kategori dampak pertama yang di analisis pada *lifecycle* biodiesel adalah dampak potensi pemanasan global, yaitu emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dalam *lifecycle* biodiesel secara keseluruhan yang dinyatakan dalam jumlah gas karbondioksida equivalent untuk setiap 1 MJ biodiesel yang dihasilkan. Hasil pengumpulan data LCI kemudian dikuantifikasi berdasarkan kategori dampak yang dievaluasi. Dampak yang dievaluasi adalah potensi pemanasan global dan konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel.

4.2.1 Potensi Pemanasan Global *Lifecycle* Biodiesel

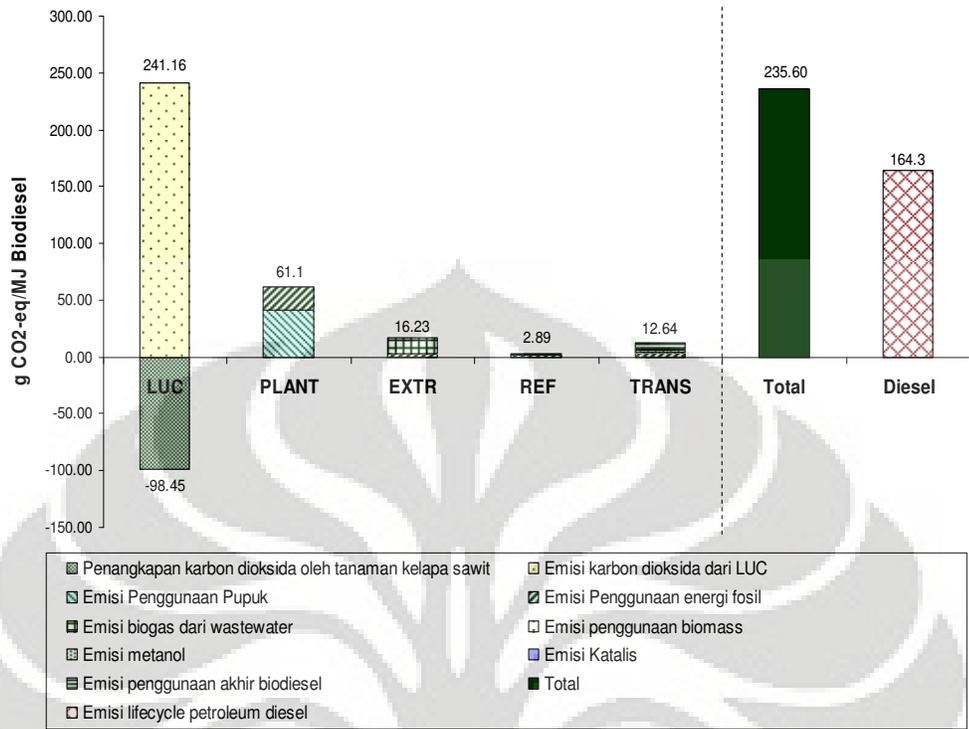
Pada perhitungan ini digunakan asumsi bahwa buah kelapa sawit dan produk turunannya maupun produk samping memiliki kandungan karbon netral, yang berarti kandungan dalam karbon dalam produk-produk tersebut tidak diperhitungkan sebagai emisi dalam analisis *lifecycle*. Pada perhitungan ini juga mencakup emisi yang dihasilkan dari penggunaan energi fosil, baik berupa bahan bakar diesel maupun energi listrik. Hasil perhitungan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari setiap tahapan *lifecycle* biodiesel ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Jumlah Emisi Gas Rumah Kaca pada Setiap Tahapan *Lifecycle* Biodiesel

| Lifecycle stage | g CO₂/MJ biodiesel |
|---|--------------------------------------|
| Alih fungsi lahan | |
| Penangkapan CO ₂ oleh tanaman kelapa sawit | -98,45 |
| Emisi karbon dioksida dari LUC | 241,16 |
| Penanaman Kelapa Sawit | |
| Emisi Penggunaan Pupuk | 40,81 |
| Emisi Penggunaan energi fosil | 20,31 |
| Proses Ekstraksi CPO | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 2,40 |
| Emisi biogas dari wastewater | 13,83 |
| Proses Penyulingan CPO | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 1,47 |
| Emisi penggunaan biomass | 1,42 |
| Proses Transesterifikasi Biodiesel | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 3,57 |
| Emisi metanol | 2,94 |
| Emisi Katalis | 0,24 |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 5,90 |
| Total | 235,60 |

Perbandingan hasil emisi gas rumah kaca pada setiap tahap *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dari hasil perhitungan ini dapat dilihat peranan setiap tahapan atau subproses pada *lifecycle* biodiesel terhadap emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. Total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari *lifecycle* biodiesel adalah sebesar 235,60 gram CO₂-eq. Alih fungsi lahan memiliki kontribusi terbesar terhadap emisi gas rumah kaca keseluruhan, yaitu sebesar 56,31% atau sebesar 142,71 gram CO₂-eq. Sedangkan proses penyulingan CPO memiliki kontribusi emisi gas rumah kaca terkecil, yaitu sebesar 1,14% atau sebesar 3,89 gram CO₂-eq.

Alih fungsi lahan memberikan kontribusi yang paling besar karena pada tahap ini, sejumlah karbon atau gas rumah kaca dilepaskan akibat dari konversi lahan awal menjadi perkebunan kelapa sawit. Pada perhitungan ini, kondisi lahan awal yang digunakan adalah hutan tropis (*forestland*). Hutan tropis banyak dikonversi menjadi lahan kelapa sawit pada beberapa tahun terakhir (Deptan, 2009).



Gambar 4.1 Emisi Gas Rumah Kaca untuk lifecycle Biodiesel.

Pada Gambar 4.1 ini juga menunjukkan perbandingan emisi gas rumah kaca total lifecycle biodiesel dengan emisi yang dihasilkan dari bahan bakar solar atau *petroleum diesel*. Pada Gambar 4.1 terdapat perbandingan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari masing-masing proses. Data emisi *lifecycle* bahan bakar solar didapatkan dari IPCC *report* untuk bahan bakar fosil (IPCC, 2006). Dari perbandingan ini nilai emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel (253,42 gram CO₂-eq/MJ) lebih besar dibandingkan emisi gas rumah kaca *lifecycle* petroleum diesel/solar (164,33 gram CO₂-eq/MJ). Perbandingan ini dilakukan dengan menggunakan data inventarisasi *lifecycle* petroleum diesel, dari mulai proses eksplorasi hingga produksi solar, yang dilakukan oleh US *Departement of Energy* (Seehan, J., 1998). Hal ini disebabkan oleh pengaruh emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan yang dimasukkan kedalam *scope* LCA. Hasil penelitian LCA biodiesel yang tidak memperhitungkan alih fungsi lahan pada *scope* LCA menghasilkan perbandingan emisi gas rumah kaca yang lebih kecil untuk biodiesel dibandingkan dengan *petroleum diesel/solar*. (Seehan, J et al., 1998)

Lifecycle biodiesel pada penelitian ini tidak memperhitungkan kebutuhan bahan bakar untuk transportasi antar proses dalam rantai suplai *lifecycle* biodiesel. Hal ini dikarenakan kontribusi proses transportasi antar proses dalam rantai suplai tidak terlalu signifikan terhadap emisi gas rumah kaca biodiesel keseluruhan. Sebagai contoh, jika transportasi antar proses dalam rantai suplai *lifecycle* biodiesel dimasukkan ke dalam batasan sistem *lifecycle*, maka kebutuhan bahan bakar untuk transportasi akan meningkat sesuai dengan jarak transportasi yang ditempuh. Asumsi kebutuhan energi bahan bakar yang digunakan untuk proses transportasi dengan menggunakan truk tangki adalah sebesar 0,00037 MJ/kg muatan/km (Hugraha, 2007). Dengan menggunakan model rantai suplai untuk pabrik biodiesel yang berada di Kota Medan dengan jarak tempuh antar proses 150 km, peningkatan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan sebesar 1,65 gram CO₂-eq/MJ biodiesel atau hanya meningkat sebesar 0,7 % dari emisi gas rumah kaca semula. Karena peningkatan emisi gas rumah kaca yang tidak signifikan, maka asumsi model *lifecycle* biodiesel yang berada dalam satu kompleks yang terintegrasi dapat diterima.

4.2.2 Konsumsi Energi *Lifecycle* Biodiesel

Dalam data LCI terdapat kemungkinan untuk menghitung total kebutuhan energi dan efisiensi energi overall proses dan produk. Dengan hasil perhitungan total kebutuhan energi maka aspek keterbarukan dari *lifecycle* biodiesel dapat dievaluasi dan memberikan informasi mengenai besaran energi tambahan yang digunakan untuk mengkonversi bahan baku menjadi bahan bakar.

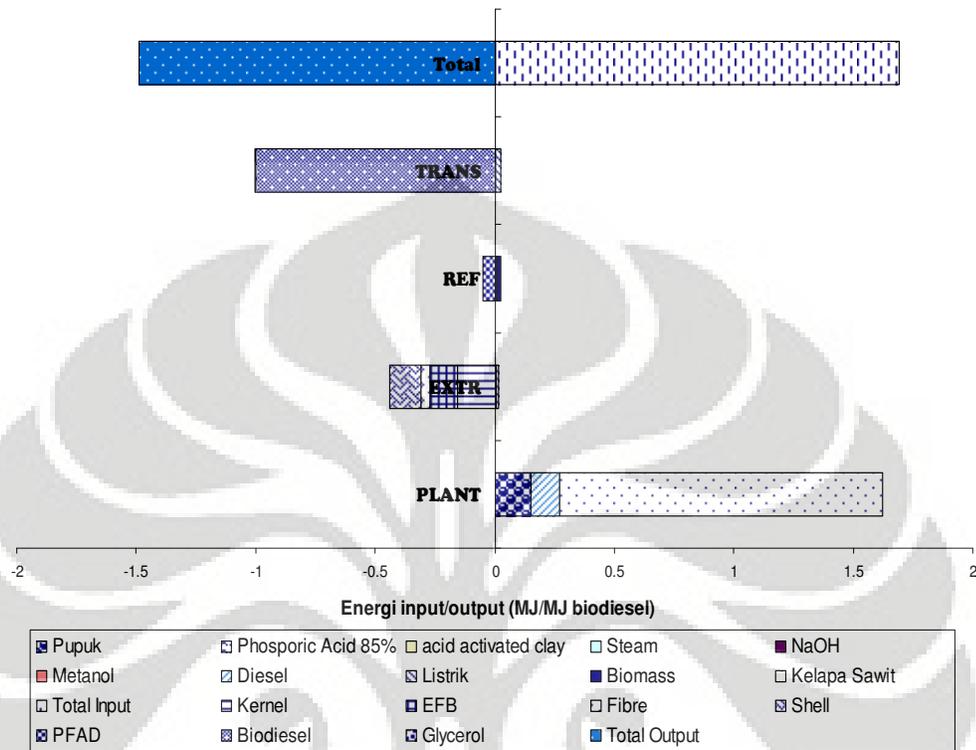
Pada setiap tahapan *lifecycle* biodiesel, masukan input energi terdiri dari energi dari bahan bakar dan energi yang terkandung pada setiap aliran material, sedangkan output energi berupa produk energi bahan bakar dan kandungan energi yang terkandung pada setiap aliran produk samping/limbah yang dihasilkan. Hasil perhitungan neraca energi *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Overall

| Komponen | Energi Input (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | Energi Output (MJ/MJ biodiesel) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Penanaman Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk N | 0,0936 | Kernel | 0,1564 |
| Pupuk P | 0,0462 | EFB | 0,1138 |
| Pupuk K | 0,0114 | Fibre | 0,0414 |
| Diesel | 0,1226 | Shell | 0,1265 |
| Listrik | 0,0002 | Produksi Olein | |
| Fotosintesis kelapa sawit | 1,3474 | PFAD | 0,0499 |
| Ekstraksi CPO | | Produksi Biodiesel | |
| Diesel | 0,0077 | Biodiesel | 1,0000 |
| Energi listrik | 0,0087 | Glycerol | 0,0015 |
| Produksi Olein | | | |
| Phosporic Acid 85% | 2,07805E-06 | | |
| acid activated clay | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

Rasio energi primer merupakan perbandingan antara produk energi yang dihasilkan dibandingkan dengan total energi primer, dimana total energi primer adalah keseluruhan energi yang digunakan di dalam sistem. Satu MJ biodiesel yang dihasilkan membutuhkan 1,69 MJ input energi dan menghasilkan rasio energi primer sebesar 0,59 atau efisiensi energi sebesar 59%. Kontribusi terbesar terhadap input energi pada *lifecycle* biodiesel berasal dari penanaman kelapa sawit, yaitu energi matahari pada proses fotosintesis kelapa sawit sebesar 79,69% atau sebesar 1,35 MJ/MJ biodiesel. Proses fotosintesis pada kelapa sawit menghasilkan buah kelapa sawit yang kemudian diekstraksi dan diproses menjadi biodiesel. Energi fotosintesis merupakan jumlah energi matahari yang dapat

terserap oleh tanaman kelapa sawit. Gambar 4.2 menggambarkan perbandingan input dan output energi pada *lifecycle* biodiesel.



Gambar 4. 2 Neraca energi *lifecycle* biodiesel

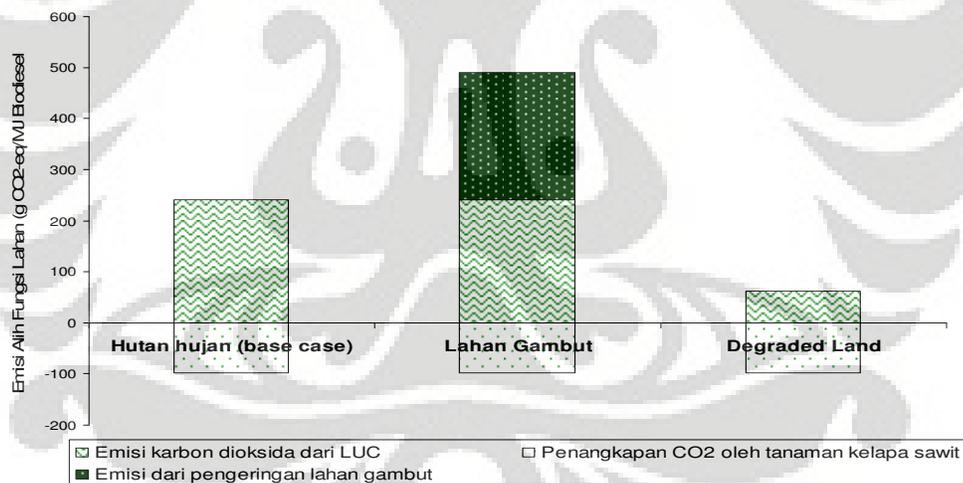
Pada Tabel 4.3 dapat diketahui rasio energi fosil pada *lifecycle* biodiesel. Rasio energi fosil adalah perbandingan antara jumlah kandungan energi produk yang dihasilkan dengan total energi fosil yang digunakan di dalam proses. Energi fosil disini adalah energi yang berasal dari input material yang berasal dari turunan bahan bakar fosil atau material sintetis. Dalam 1 MJ produk biodiesel terdapat 0,326 MJ energi fosil, atau sebanding dengan rasio energi fosil sebesar 3.07. Dengan kata lain, *lifecycle* biodiesel menghasilkan produk energi 3,07 kali lebih besar dibandingkan dengan energi fosil yang digunakan. Penggunaan pupuk menyumbang 46,4%, sedangkan penggunaan bahan bakar diesel dan listrik 52,6% dari total energi fosil pada *lifecycle* bioidiesel.

4.3 PENGARUH VARIASI SKENARIO PADA LCA BIODIESEL

Pada perhitungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel pada bagian 4.2.1 menunjukkan emisi gas rumah kaca biodiesel lebih tinggi dibandingkan dengan emisi gas rumah kaca bahan bakar solar. Oleh karena itu, variasi skenario *lifecycle* biodiesel dilakukan untuk melihat pengaruh dari masing-masing skenario terhadap dampak *lifecycle* biodiesel. Variasi skenario pada *lifecycle* biodiesel dilakukan terhadap asal lahan perkebunan kelapa sawit, pemanfaatan produk samping, dan alokasi kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel dan produk pangan.

4.3.1 Pengaruh Asal Lahan Perkebunan Kelapa Sawit

Dari hasil perhitungan emisi gas rumah kaca pada proses alih fungsi lahan didapatkan perbandingan nilai emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari konversi perkebunan kelapa sawit berdasarkan setiap jenis asal lahan. Perbandingan nilai emisi gas rumah kaca dari ketiga lahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan.

Perkebunan kelapa sawit dengan asal lahan hutan tropis memiliki net emisi gas rumah kaca sebesar 142,71 gram CO₂-eq/MJ biodiesel, untuk hutan gambut sebesar 391,69 gram CO₂-eq/MJ biodiesel, dan padang rumput sebesar -37,34 gram CO₂-eq/MJ biodiesel. Dari ketiga jenis lahan yang diperhitungkan, perkebunan kelapa sawit yang berasal dari ladang rumput (*degraded land*) memiliki net emisi

gas rumah kaca terkecil, sedangkan lahan gambut memiliki emisi gas rumah kaca terbesar. Hasil penggunaan variasi asal lahan perkebunan kelapa sawit menunjukkan asal lahan perkebunan kelapa sawit tidak mempengaruhi konsumsi energi biodiesel.

Lahan gambut memiliki nilai emisi gas rumah kaca yang paling besar karena adanya proses pengeringan lahan gambut sebelum dilakukan proses penanaman kelapa sawit. Pada proses pengeringan tersebut terdapat tambahan emisi gas CO₂ dan N₂O dari dekomposisi gambut (IPCC, 2006). Hal ini menyebabkan terdapat selisih 132,4% dibandingkan dengan hutan tropis. Padang rumput (*degraded land*) memiliki emisi gas rumah kaca paling kecil karena kandungan biomassa, baik di atas tanah maupun di bawah tanah, yang paling kecil relatif terhadap hutan tropis dan lahan gambut, sehingga jumlah karbon yang dilepas ke atmosfer akibat alih fungsi lahan menjadi lebih kecil.

4.3.2 Pengaruh Pemanfaatan Produk Samping

Dengan menggunakan perhitungan yang dilakukan pada bagian sebelumnya, masing-masing skenario A dan skenario B dievaluasi dampak yang dihasilkan terhadap emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel. Untuk pengaruh skenario terhadap emisi gas rumah kaca, pengaruh dinyatakan dalam jumlah pengurangan/reduksi emisi gas rumah kaca pada *lifecycle* biodiesel. Jumlah produk samping yang dihasilkan dalam *lifecycle* biodiesel ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Jumlah produk samping pada *lifecycle* biodiesel

| Proses | produk samping | Kuantitas | Satuan |
|--------------------------|-------------------|-----------|----------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> | 0,0155 | kg |
| | <i>palm shell</i> | 0,0089 | kg |
| | EFB | 0,0089 | kg |
| | PKO | 0,0029303 | kg |
| | PKE | 0,0037294 | kg |
| | POME slurry | 0,0054 | m ³ |
| | POME biogas | 0,06048 | m ³ |
| Proses refining | PFAD | 0,0014 | kg |
| Proses transesterifikasi | gliserol | 0,0086 | kg |

Variasi skenario pemanfaatan produk samping yang dilakukan terdiri dari dua skenario, yaitu skenario A dan skenario B, yang telah dijelaskan pada bab metodologi. Untuk skenario A, terdapat dua opsi pemanfaatan gliserol, yaitu sebagai pengganti bahan baku gliserin sintetis untuk opsi 1, dan sebagai pengganti pakan ternak untuk opsi 2. Hasil perhitungan kredit emisi yang dihasilkan dari kedua skenario dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan 4.6.

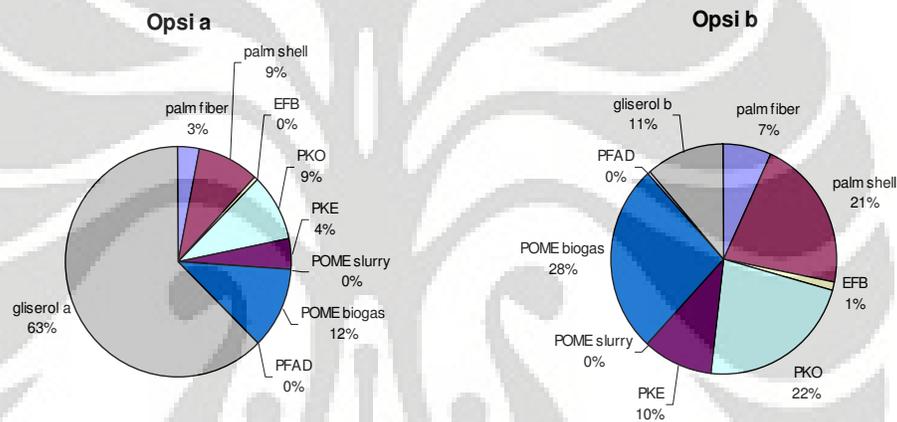
Tabel 4. 5 Kredit emisi *lifecycle* biodiesel skenario A

| Produk Samping | Skenario A | Kredit Emisi (g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel) |
|---|-----------------------------|--|
| <i>palm fiber</i> | bahan bakar biomassa | -3,63885 |
| <i>palm shell</i> | bahan bakar biomassa | -11,1358 |
| EFB | pupuk organik | -0,56681 |
| PKO | bahan baku surfaktan | -11,536 |
| PKE | bahan bakar biomassa | -5,16811 |
| POME slurry | pupuk organik | -0,00028 |
| POME biogas | bahan bakar biogas | -13,8333 |
| PFAD | bahan baku gemuk | -0,13873 |
| gliserol opsi a | subtitusi gliserin sintetis | -76,475 |
| gliserol opsi b | bahan baku pakan ternak | -5,92681 |
| Total opsi 1 | | -122,493 |
| Total opsi 2 | | -51,9446 |
| Reduksi Emisi Lifecycle Opsi 1 (%) | | 22,05% |
| Reduksi Emisi Lifecycle Opsi 2 (%) | | 51,99% |

Tabel 4. 6 Kredit emisi *lifecycle* biodiesel skenario B.

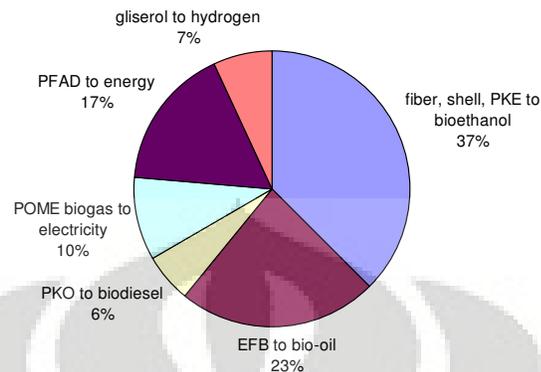
| Produk Samping | Skenario B | Emisi/Kredit Emisi (g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel) |
|--|-----------------------|--|
| <i>palm fiber</i> | bahan baku bioetanol | -29,4489 |
| <i>palm shell</i> | bahan baku bioetanol | -16,9639 |
| EFB | bahan baku bio-oil | -33,3496 |
| PKO | bahan baku biodiesel | -8,1539 |
| PKE | bahan baku bioethanol | -7,0856 |
| POME slurry | - | - |
| POME biogas | Listrik dari biogas | -13,8333 |
| PFAD | bahan bakar | -23,9107 |
| gliserol | bahan baku hidrogen | -9,8526 |
| Emisi tambahan dari pemanfaatan produk samping | | 22.4212 |
| Total | | -120,1773 |
| Reduksi Emisi Lifecycle | | 51% |

Dari hasil perhitungan kredit emisi kedua skenario tersebut, skenario A menghasilkan kredit emisi sebesar 122,49 gram CO₂-eq atau mereduksi 52% emisi *lifecycle* biodiesel, jika gliserol dimanfaatkan untuk menggantikan gliserin sintetis (opsi 1). Akan tetapi, skenario hanya menghasilkan kredit emisi sebesar 51,95 gram CO₂-eq atau hanya mereduksi 22% emisi *lifecycle* biodiesel, jika gliserol dimanfaatkan sebagai pakan ternak (opsi 2). Hal ini disebabkan oleh emisi faktor gliserin sintetis hampir dua kali lebih besar, dibandingkan dengan emisi faktor pakan ternak (Wicke, 2008). Breakdown kredit emisi skenario A ditunjukkan pada Gambar 4.4.



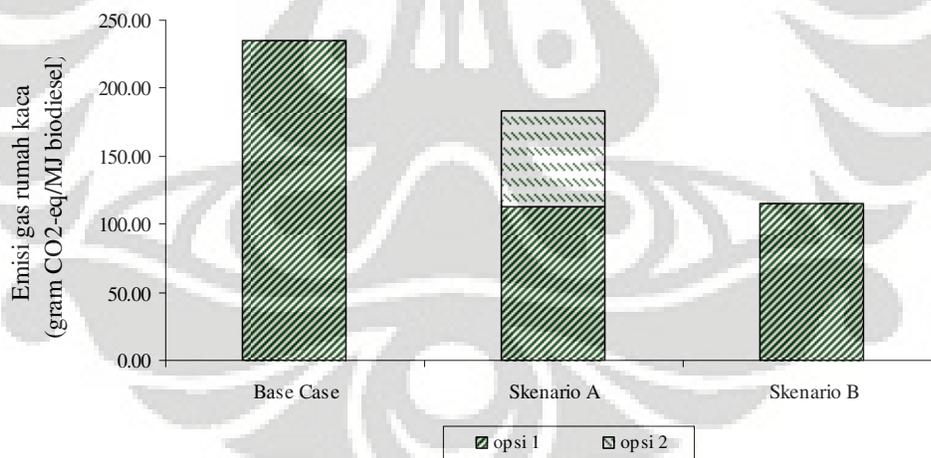
Gambar 4. 4 Breakdown kredit emisi skenario A

Untuk Skenario B, kredit emisi yang dihasilkan adalah sebesar 122,18 gram CO₂-eq atau mereduksi emisi *lifecycle* sebesar 51%. Pemanfaatan produk samping dan residu biomassa menjadi bioetanol memiliki kontribusi terbesar dalam kredit emisi skenario B, yaitu sebesar 53,45 gram CO₂-eq. Kredit emisi yang dihasilkan dari pemanfaatan metana sekitar 37,5% dari total kredit emisi skenario B. Breakdown kredit emisi pada skenario B ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Breakdown kredit emisi skenario B

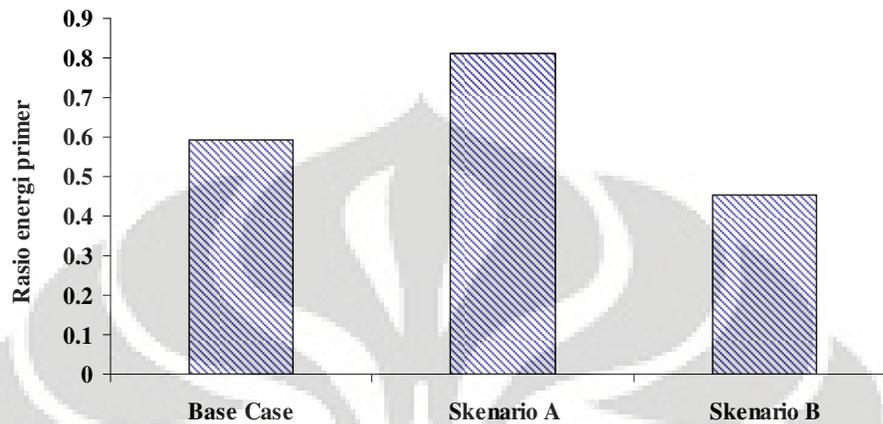
Perbandingan emisi lifecycle skenario A dan skenario B ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari perbandingan ini, skenario A-opsi 1 memiliki nilai emisi gas rumah kaca yang hampir sama dengan skenario B. Sedangkan emisi gas rumah kaca skenario A-opsi 2 menghasilkan emisi gas rumah kaca yang paling besar.



Gambar 4. 6 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap emisi gas rumah kaca lifecycle biodiesel.

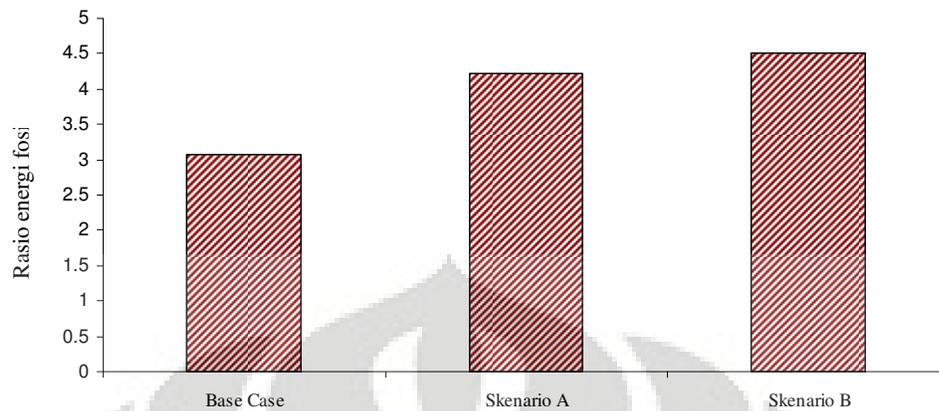
Untuk pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap konsumsi energi *lifecycle* biodiesel, parameter yang ditinjau adalah rasio energi primer dan rasio energi fosil dari masing-masing skenario. Perbandingan rasio energi primer

masing-masing skenario dapat dilihat pada Gambar 4.7. Sedangkan perbandingan rasio energi fosil masing-masing skenario ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 7 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy primer *lifecycle* biodiesel.

Skenario A memiliki rasio energi primer yang paling tinggi dibandingkan dari Skenario B. Skenario A memiliki rasio energi sebesar 0,81 MJ produk energi/MJ energi primer input, atau 37,4% lebih besar dari rasio energi primer *basecase*. Untuk skenario B, rasio energi primer yang dihasilkan sebesar 0,45 MJ produk energi/MJ energi primer input, atau 23% lebih kecil dibandingkan rasio energi primer *basecase*. Skenario B memiliki kebutuhan energi proses tambahan yang lebih besar untuk memproduksi *biofuel* dari produk samping. Proses produksi *biofuel* tersebut membutuhkan masukan energi yang besar. Untuk skenario A, tidak ada energi proses tambahan dalam pemanfaatan produk samping, sehingga kebutuhan energi skenario A lebih kecil dibandingkan Skenario B.



Gambar 4. 8 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy fosil *lifecycle* biodiesel.

Skenario A memiliki rasio energi fosil lebih rendah dibandingkan dari Skenario B. Skenario A memiliki rasio energi fosil sebesar 4,22 MJ produk energi/MJ energi fosil input, atau 37,4% lebih besar dari rasio energi primer *basecase*. Untuk skenario B, rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 4,52 MJ produk energi/MJ energi fosil input, atau 47% lebih besar dibandingkan rasio energi primer *basecase*. Skenario B menghasilkan produk energi yang lebih besar dibandingkan dengan skenario A, untuk setiap MJ energi fosil yang digunakan.

Skenario A dan skenario B memiliki perbedaan besar dalam hal *added value* pada produk samping. Secara keseluruhan skenario B memiliki nilai tambah lebih besar karena harga pasar dari produk samping lebih besar dibandingkan dengan skenario B. Akan tetapi, skenario B memerlukan biaya energi tambahan untuk memproses bahan baku menjadi *biofuel*. Untuk itu, digunakan suatu parameter *eco-efficiency* untuk membandingkan pengaruh kedua skenario terhadap dampak lingkungan dengan memperhitungkan aspek *added value* dari produk samping. Perhitungan *eco-efficiency* untuk skenario A dan skenario B ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perhitungan *Eco-efficiency* skenario A dan skenario B

| | Skenario A | Skenario B |
|---|-------------------|-------------------|
| Nilai ekonomis produk (USD\$/MJ biodiesel) | 0,044 | 0,028 |
| Biaya bahan baku dan bahan bakar (USD\$/MJ biodiesel) | 0,015 | 0,037 |
| Dampak lingkungan/emisi gas rumah kaca (g CO ₂ -eq/MJ biodiesel) | 235,596 | 235,596 |
| Kredit emisi (g CO ₂ -eq/MJ biodiesel) | 122,493 | 120,177 |
| <i>Economic value added ratio</i> | 2,849 | 0,743 |
| <i>Environmental impact ratio</i> | 1,923 | 1,960 |
| <i>Eco-efficiency</i> | 1,481 | 0,379 |

Dari hasil perhitungan di atas, skenario A memiliki nilai rasio *eco-efficiency* terbesar yaitu 1,481 dibandingkan dengan skenario B sebesar 0,379. Dengan kata lain, skenario A lebih berkelanjutan dibandingkan dengan skenario B. Hal ini disebabkan biaya bahan baku dan energi untuk skenario B lebih besar dibandingkan dengan skenario A. Nilai tambah produk skenario B tidak terlalu besar karena produk yang dihasilkan memiliki kuantitas yang tidak terlalu besar.

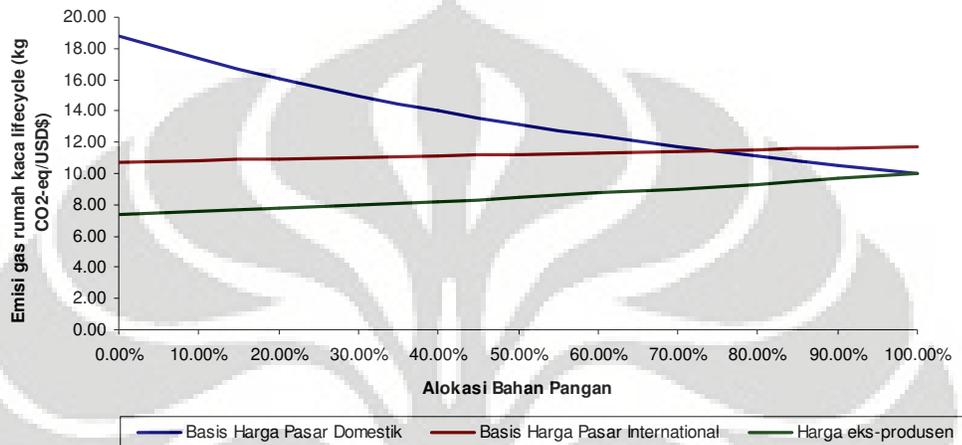
4.3.3 Pengaruh Alokasi Kelapa Sawit untuk Biodiesel dan Produk Pangan

Pada perhitungan pengaruh alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan, rentang alokasi produk pangan yang digunakan adalah dari 0 – 10 % . Produk pangan yang dimaksud dalam pembahasan ini adalah minyak goreng dari minyak kelapa sawit halus (RBDPO).

Basis harga biodiesel dan minyak goreng yang digunakan berdasarkan harga pasar domestik dan internasional. Untuk harga biodiesel domestik terdiri dari harga jual yang ditetapkan pemerintah dan harga yang dikeluarkan dari produsen biodiesel. Adanya perbedaan harga biodiesel untuk pasar domestik ini terkait dengan adanya perbedaan harga yang ditetapkan pemerintah dengan harga dari produsen biodiesel. Harga yang ditetapkan pemerintah sesuai dengan PP No. 71/2005, yaitu berdasarkan harga MOPS (*Mean Oil Platt of Singapore*) diesel, sedangkan harga yang diklaim oleh produsen mengacu pada harga pasar Asia Tenggara (Affrianto, R., 2010). Basis harga yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.8. Basis harga ini digunakan untuk melihat pengaruh harga produk terhadap kecenderungan emisi gas rumah kaca. Perhitungan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan untuk setiap penjualan produk dapat dilihat pada Gambar 4.9.

Tabel 4. 8 Basis harga biodiesel dan minyak goreng

| Harga Jual | CPO | Biodiesel | Minyak goreng | Sumber |
|-----------------------------|---------|-----------|---------------|--------------------|
| Pasar Ekspor (US\$/ton) | 700,28 | 830,97 | 730,74 | Wahid, B., 2010 |
| Pasar Domestik (IDR/kg) | 6591,85 | 4319,77 | 7800,00 | Mursanti, E., 2007 |
| Harga eks-produsen (IDR/kg) | - | 11.027,63 | - | Mursanti, E., 2007 |

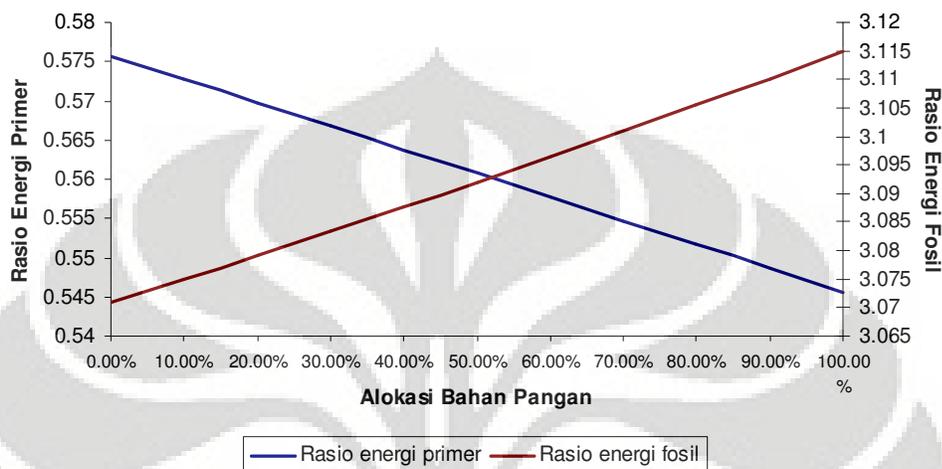


Gambar 4.9 Pengaruh alokasi bahan baku terhadap emisi gas rumah kaca

Basis harga domestik dengan harga biodiesel eks-produsen menghasilkan rata-rata hasil penjualan yang lebih besar dibandingkan dengan harga internasional dan pasar domestik. Dari hasil perhitungan emisi gas rumah kaca biodiesel dari hasil penjualan produk yang diperoleh berdasarkan peningkatan jumlah alokasi bahan baku, basis harga biodiesel dan minyak goreng mempengaruhi emisi gas rumah kaca *lifecycle*. Pada basis harga pasar domestik, emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan semakin meningkatnya persentase alokasi bahan pangan, sedangkan emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel meningkat pada basis harga internasional dan harga eks-produsen.

Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan. Sedangkan sebaliknya, jika harga jual biodiesel lebih rendah dari harga minyak goreng, maka kecenderungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan bertambahnya alokasi pangan. Emisi gas rumah kaca *lifecycle* bernilai constant jika harga biodiesel sama dengan harga minyak goreng.

Berbeda dengan emisi gas rumah kaca, konsumsi energi tidak dipengaruhi oleh besaran penjualan produk pada *lifecycle*. Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh alokasi bahan baku terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil.



Gambar 4. 10 Pengaruh alokasi bahan baku untuk produk pangan terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil

Konsumsi energi primer menurun dengan bertambahnya alokasi bahan baku untuk produksi minyak goreng. Hal ini disebabkan oleh penurunan kebutuhan energi untuk proses transesterifikasi biodiesel. Rasio energi fosil meningkat dengan bertambahnya alokasi bahan baku untuk produksi minyak goreng. Hal ini berarti kontribusi energi fosil menurun dengan bertambahnya alokasi.

Pengambilan keputusan mengenai alokasi bahan baku untuk produk pangan dipengaruhi oleh aspek ketahanan pangan terkait dengan peningkatan produksi biodiesel. Peningkatan produksi *biofuel* berbasis minyak nabati seperti biodiesel akan berimplikasi terhadap berkurangnya ketersediaan bahan baku untuk produk pangan (Srinivasan, 2008). Pengintegrasian produksi biodiesel dengan minyak goreng merupakan salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan bisa disimpulkan beberapa hal berikut ini:

- Hasil analisis *lifecycle* biodiesel berbahan baku kelapa sawit memberikan nilai emisi gas rumah kaca sebesar 235,6 gram CO₂-eq/MJ biodiesel dan nilai rasio energi primer sebesar 0,59, sedangkan rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 3,07.
- Perkebunan kelapa sawit dengan asal lahan padang rumput (*degraded land*) menghasilkan net emisi gas terkecil dibandingkan dengan penggunaan hutan tropis dan hutan gambut. Asal lahan perkebunan kelapa sawit tidak berpengaruh terhadap konsumsi energi *lifecycle* biodiesel.
- Hasil analisis *lifecycle* biodiesel untuk pengaruh pemanfaatan produk samping biodiesel menunjukkan skenario A-opsi 1 merupakan skenario terbaik. Skenario A-opsi 1 memiliki emisi gas rumah kaca paling rendah dan rasio energi primer paling tinggi dibandingkan dengan skenario B, selain itu nilai *eco-efficiency* skenario A lebih tinggi dibandingkan dengan skenario B.
- Harga jual produk mempengaruhi kecenderungan emisi gas rumah kaca biodiesel terhadap alokasi bahan baku untuk minyak goreng. Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan. Jika harga jual biodiesel lebih rendah dari harga minyak goreng, maka kecenderungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan bertambahnya alokasi pangan. Emisi gas rumah kaca *lifecycle* bernilai konstan jika harga biodiesel sama dengan harga minyak goreng.

DAFTAR REFERENSI

- Affrianto, Rudi. “Si Kecil Tergusur dari Pelumpang”. <http://web.bisnis.com/article/21d1721.htm>. Diakses pada tanggal 20 Juni 2010.
- Allocca, C. 2000. *Eco-Efficiency and Sustainable Product Development*. Sustainable Energy. http://web.mit.edu/10.391J/www/proceedings/Eco-efficiency_Allocca2000.pdf. Diakses pada tanggal 19 Juni 2010.
- Anonim, 2007. *Energy Efficiency and Renewable Energy, Alternative Fuels Data. Alternative Fuels: Biodiesel*. U.S. Departement of Energy, www.eere.energy.gov. Diakses tanggal 12 Febuari 2009.
- Anonim, 2004. *Kelapa Sawit*, www.wikipedia.co.id. Diakses tanggal 6 Maret 2007.
- Basha, S. A. 2009. *A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance*. Renewable and Sustainable Energy Review.
- Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (BP-PEN) 2005 – 2025*.
- BPPT, 2009. *Biodiesel*. <http://ec.bppt.go.id/biodiesel/index.htm>. Diakses tanggal 12 Febuari 2009.
- Buttler, AR., 2006. *Why is oil palm replacing tropical rainforests? Why are biofuels fueling deforestation?*. <http://www.mongabay.com>. Diakses tanggal 25 Febuari 2009.
- Chavalparit, O. 2006. *Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand*. PhD Thesis, Wageningen University.
- Corley, R.H.V. 2008. *How much palm oil do we need?* environmental science & policy 12 (2009) 134 – 139.
- Crutchfield, J. 2007. *Indonesia: Palm Oil Production Prospects Continue to Grow*. U.S. Departement of Agriculture, www.fas.usda.gov. Diakses tanggal 25 Febuari 2009.
- Dewi, A. K. 2008. *Simulasi Daur Hidup Energi dan Rantai Suplai Biodiesel untuk Sektor Transportasi di Propinsi DKI Jakarta*. Depok: Universitas Indonesia.

- Friends of the Earth. 2006. *The use of palm oil for biofuel and as biomass for energy*, www.foe.co.uk. Diakses tanggal 25 Februari 2009.
- Gheewala, S. Pleanjai, S., and Garivait, S. 2004. *Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective*. The joint international conference on “Sustainable energy and environment (SEE)”. 1-3 December 2004, Hua Hin, Thailand.
- Gutierrez, L. F. et al. 2008. *Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol*. *Bioresource Technology* 100 (2009) 1227 – 1237.
- Hameed, B.H. 2008. *Production of biodiesel from palm oil using heterogeneous catalyst: An optimized process*. *Fuel processing technology* xxx(2009) xxx – xxx.
- Hugraha, Dadan. 2007. *Analisis Life Cycle Biodiesel Berbahan Baku Minyak Sawit/CPO di Indonesia*. Tesis Program Pasca Sarjana. Depok: Universitas Indonesia
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Jepang: Institute for Global Environmental Strategies. www.ipcc-nggip.iges.or.jp. Diakses tanggal 5 April 2010.
- Kiwjaroun, C. et al. 2008. *LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods*. *Journal of cleaner production* 17 (2009) 143 – 153.
- Koh, L.P. et al. 2008. *Biofuel, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities*. *Biological Conservation* 141 (2008) 2450-2460.
- Lam, M.K. et al., 2008. *Malaysian palm oil: surviving the food versus fuel dispute for a sustainable future*. *Renewable and sustainable energy reviews* xxx (2008) xxx-xxx.
- Mursanti, E. 2007. *Proses Produksi dan Substitusi Biodiesel dan Subsidi Biodiesel dalam Mensubstitusi Solar untuk Mengurangi Ketergantungan Terhadap Solar*. Parallel Session IIIB: Energy, Natural Resource & Environment.

- Panapanaan, V., 2009. *Sustainability of palm oil production and opportunities for Finnish technology and know-how transfer*. Finland: Lappeenranta University of Technology. www.doria.fi/lutpub. Diakses tanggal 28 Mei 2009.
- Pantzaris, T. 1997. *Pocketnook of Palm Oil Uses*. Malaysia: Palm Oil Research Institute of Malaysia.
- Pascual, L., Tan, R., 2004, *Comparative Life Cycle Assesment of Coconut Biodoesel and Conventional Diesel for Philippine Automotive Transportation and Industruial Boiler Appëication*. Manila, Philippines.
- Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006 Tentang Kebijakan Energi Nasional.
- Prihandana, R, dll., 2006, *Menghasilkan Biodiesel Murah Mengatasi Polusi dan Kelangkaan BBM*. Jakarta: Agromedia Pustaka, 2006.
- Pasaribu, N., 2004, *Minyak Buah Kelapa Sawit*, Sumatera Utara: Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara.
- Rahayau, M., 2007, *Prospek Pengembangan Bio-fuel sebagai Substitusi Bahan Bakar Minyak: Teknologi Proses Produksi Biodiesel*. 2007.
- Rahmat, S., *Prospek Pengembangan Produk Sawit*, www.Tribun-timur.com. Diakses tanggal 24 Febuari 2009.
- Seehan, J et al., 1998. *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*. NREL/SR-580-24089 UC Category 1503. Colorado: A national laboratory of U.S. Department of Energy.
- Srinivasan, S., 2008. *The Food v. fuel debate: A nuanced view of incentive structures*. Renewable energy 34 (2009) 950-954.
- Smeets, E. et al., 2005. *Supportive Study for the OECD on alternative developments in biofuel production across the world*. NWS-E-2005-141. Utrecht, the Netherlands: Department of Science, Utrecht University, www.chem.uu.nl. Diakses tanggal 20 November 2009.
- Spath, P.L. et al., 2003. *Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas*. NREL/TP-510-34929. Colorado:

National Renewable Energy Laboratory, <http://www.osti.gov/bridge>.

Diakses tanggal 2 Febuari 2010.

Sunarko, *Petunjuk Praktis Budi Daya dan Pengolahan Kelapa Sawit*, Jakarta:

AgroMedia Pustaka, 2007

Suryana, A., et al, 2007, *Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Kelapa Sawit di Indonesia*, Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian Republik Indonesia.

Taiwo, K.A., et al. 2000. *Technological Assessment of Palm Oil Production in Osum and Ondo in Nigeria, Technovation*, (20), Elsevier Science Ltd.

Tan, K.T. et al., 2009. *Palm oil: Addressing issues and towards sustainable development*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 420–427

Tan, R., Culaba, A. and Purvis, M. 2003. *Carbon balance Implications of Coconut Biodiesel utilization in the Philippine Automotive Transport Sector*. *Biomass and Bioenergy* 2003.10.002.

Timnas Pengembangan BBN, 2007. *BBN Bahan Bakar Nabati*, Jakarta: Penebar Swadaya.

Wahid, B. 2010. *Overview of the Malaysian Oil Palm Industry 2007-2009*. www.mpob.gov.my. Diakses tanggal 20 Juni 2010.

Wicke, B. et al. 2008. *Different Palm Oil Production Systems for Energy Purposes and Their Greenhouse Gas Implication*. *Biomass and Bioenergy* 32(2008) 1322 – 1337.

Zah, Raiener et al. 2004. *Life Cycle Assesment of Energy Product: Environmental Assesment of Biofuel*. Empa, www.empa.ch/tml. Diakses tanggal 18 Febuari 2009.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

1.1 Faktor Emisi Bahan Bakar

| Fuel type English description | Default carbon content ¹ (kg/GJ) | Lower | Upper |
|--|--|-------|-------|
| Municipal Wastes (non-biomass fraction) ⁸ | 25.0 | 20.0 | 33.0 |
| Industrial Wastes | 39.0 | 30.0 | 50.0 |
| Waste Oils ⁹ | 20.0 | 19.7 | 20.3 |
| Peat | 28.9 | 28.4 | 29.5 |
| Wood/Wood Waste ¹⁰ | 30.5 | 25.9 | 36.0 |
| Sulphite lyes (black liquor) ¹¹ | 26.0 | 22.0 | 30.0 |
| Other Primary Solid Biomass ¹² | 27.3 | 23.1 | 32.0 |
| Charcoal ¹³ | 30.5 | 25.9 | 36.0 |
| Biogasoline ¹⁴ | 19.3 | 16.3 | 23.0 |
| Biodiesels ¹⁵ | 19.3 | 16.3 | 23.0 |
| Other Liquid Biofuels ¹⁶ | 21.7 | 18.3 | 26.0 |
| Landfill Gas ¹⁷ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Sludge Gas ¹⁸ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Other Biogas ¹⁹ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Municipal Wastes (biomass fraction) ²⁰ | 27.3 | 23.1 | 32.0 |

Notes:

¹ The lower and upper limits of the 95 percent confidence intervals, assuming lognormal distributions, fitted to a dataset, based on national inventory reports, IEA data and available national data. A more detailed description is given in section 1.5

² Japanese data; uncertainty range: expert judgement;

³ EFDB; uncertainty range: expert judgement

⁴ Coke Oven Gas; uncertainty range: expert judgement

⁵ Japan & UK small number data; uncertainty range: expert judgement

⁶ 7. Japan & UK small number data; uncertainty range: expert judgement

⁸ Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

⁹ Lubricants ; uncertainty range: expert judgement

¹⁰ EFDB; uncertainty range: expert judgement

¹¹ Japanese data; uncertainty range: expert judgement

¹² Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

¹³ EFDB; uncertainty range: expert judgement

¹⁴ Ethanol theoretical number; uncertainty range: expert judgement

¹⁵ Ethanol theoretical number; uncertainty range: expert judgement

¹⁶ Liquid Biomass; uncertainty range: expert judgement

¹⁷⁻¹⁹ Methane theoretical number; uncertainty range: expert judgement

²⁰ Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

Sumber: (IPCC, 2006)

1.2 Parameter Input Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan

| Parameter | Unit | Value |
|--|---|-------|
| Aboveground biomass (AGB) before land conversion | | |
| Natural rainforest | tdm ha ⁻¹ | 350 |
| Logged-over forest | tdm ha ⁻¹ | 175 |
| Degraded land | tdm ha ⁻¹ | 6,2 |
| AGB at oil palm plantation after 25 year | tdm ha ⁻¹ | 118 |
| Belowground biomass (BGB) before land conversion | | |
| Natural rainforest | tC ha ⁻¹ | 41 |
| Degraded land | tC ha ⁻¹ | 5 |
| BGB at oil palm plantation after 25 year | tC ha ⁻¹ | 19 |
| Carbon faction | | |
| Natural rainforest | kgCt ⁻¹ dm | 490 |
| Palm plantation | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| Grass land | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| C stocks of litter and dead wood | | |
| Before conversion | tC ha ⁻¹ | 2,1 |
| After conversion | tC ha ⁻¹ | 0 |
| Palm plantation | tC ha ⁻¹ | 5,9 |
| Soil organic C | | |
| Reference | tC ha ⁻¹ | 60 |
| Oil palm plantation | tC ha ⁻¹ | 40 |
| Emission factor | | |
| C from drained peatland | tC ha ⁻¹ yr ⁻¹ | 10,7 |
| N ₂ O from drained peatland | kg N ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ | 8 |

Sumber: (IPCC, 2006)

1.3 Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan

| Parameter | Unit | Asal Lahan | | |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------|---------------|
| | | Hutan hujan (<i>base case</i>) | Lahan Gambut | Degraded Land |
| Net LUC _{emissions} | g CO ₂ -eq/FU | 142,7120 | 391,6896 | -37,3422 |
| LUC | g CO ₂ -eq/FU | 241,1613 | 241,1613 | 61,1070 |
| Assim | g CO ₂ -eq/FU | -98,4493 | -98,4493 | -98,4493 |
| Drain _{Peatland} | g CO ₂ -eq/FU | - | 248,9776 | - |
| 3.7 | <i>dimensionless</i> | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| LUC C | ton C/ha | 274,6 | 274,6 | 69,58 |
| C _{uptake} | ton C/ha | 112,1 | 112,1 | 112,1 |

1.4 Faktor Emisi Pupuk dan Kandungan Nutrient EFB

| Nutrient | Nutrient Content | Equivalent chemical fertilisers | CO2 emission factors | Unit |
|----------|------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------|
| N | 3,20 | 30% Urea: 0,84 kgN/t EFB | 3,29 | kg CO2eq/kg N |
| | | 70% Ammonium sulphate: 2,36 kgN/t EFB | 2,68 | kg CO2eq/kg N |
| P | 0,38 | 0,89 kg P2O5/t EFB | 2,46 | kg CO2eq/ kg P2O5 |
| K | 9,60 | 11,6 kg K2O/t EFB | 0,50 | kg CO2eq/ kg K2O |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.5 Parameter Input Perhitungan Emisi Penanaman Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|---|-------|-------------------|
| EF produksi pupuk | | |
| Ammonium sulphate | 2,7 | kg CO2-eq/kg N |
| Urea | 1,3 | kg CO2-eq/kg N |
| P2O5 | 2,46 | kg CO2-eq/kg P2O5 |
| K2O | 0,5 | kg CO2-eq/kg K2O |
| Molar rasio P to P2O5 | 4,6 | dimensionless |
| Molar rasio K to K2O | 2,4 | dimensionless |
| EF managed soil/penggunaan pupuk N | | |
| EF/GWP N2O | 10 | kg N2O-N/ton N |
| EF/GWP N2O | 296 | kg CO2-eq/kg N2O |
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| Densitas diesel fuel | 0,836 | kg/liter |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO2-eq/kWh |
| EF produksi bahan bakar diesel | 88 | g CO2-eq/MJ |

Sumber: (IPCC, 2006)

1.6 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Penanaman Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|---|--------------|--------------------|
| Emisi Produksi Pupuk | | |
| Pupuk N | 3,83 | g CO2-eq/FU |
| Pupuk K | 1,31 | g CO2-eq/FU |
| Pupuk P | 30,00 | g CO2-eq/FU |
| Emisi Penggunaan Pupuk/managed soil | | |
| Pupuk N | 5,66 | g CO2-eq/FU |
| Total | 40,81 | g CO2-eq/FU |
| Parameter | | |
| Value | | |
| Unit | | |
| Emisi Penggunaan bahan bakar diesel | 10,79 | g CO2-eq/FU |
| Emisi Penggunaan listrik | 0,03 | g CO2-eq/FU |
| Emisi total pembakaran diesel pada peralatan perkebunan | 9,50 | g CO2-eq/FU |
| Total | 20,31 | g CO2-eq/FU |

1.7 Parameter Input Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---|-------|---|
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| EF produksi diesel fuel | 88 | g CO ₂ -eq/MJ diesel |
| EF penggunaan diesel fuel | 76,3 | g CO ₂ -eq/MJ |
| | | |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |
| EF produksi listrik dari CH ₄ turbin | 400 | g CO ₂ -eq/kWh |
| GWP CO | 8,5 | CO ₂ -eq |
| GWP NO _x | 5 | CO ₂ -eq |
| | | |
| Jumlah biogas per wastewater/POME | 28 | m ³ biogas/m ³ POME |
| rasio CH ₄ dalam POME | 40% | |
| Emisi Faktor CH ₄ | 24,5 | CO ₂ -eq |
| | | |
| PKE rasio | 56% | |
| PKO rasio | 44% | |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.8 Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit

| Emisi | Nilai | Satuan |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|
| Emisi Penggunaan bahan bakar diesel | 1,054508222 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Emisi Penggunaan listrik | 1,343673707 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Emisi biogas dari wastewater | 13,83331019 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Total | 16,23149212 | g CO ₂ -eq/MJ |

1.9 Parameter Input Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--------------------------------------|-------|----------------------------------|
| Kandungan Energi PFAD | 38,5 | MJ/kg |
| | | |
| Emisi Faktor produksi lemak | 107 | kg CO ₂ -eq/ton lemak |
| | | |
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| EF produksi diesel fuel | 88 | g CO ₂ -eq/MJ diesel |
| EF penggunaan diesel fuel | 76,3 | g CO ₂ -eq/MJ |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |
| EF Penggunaan biomass pada boiler | 80 | g CO ₂ -eq/MJ |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.10 Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|-------------------------------------|-------|------------------------------------|
| Emisi penggunaan bahan bakar diesel | 1,12 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan listrik | 0,36 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan biomassa | 1,42 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Total | 2,89 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |

1.11 Parameter Input Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel

| Parameter | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------------------|
| EF metanol | 786 | g CO ₂ -eq/kg metanol |
| EF katalis/NaOH | 1,2 | kg CO ₂ -eq/kg NaOH |
| EF sintetik gliserin | 9,6 | kg CO ₂ -eq/kg gliserin |
| EF pakan ternak | 744 | kg CO ₂ -eq/ton pakan |
| EF Penggunaan akhir biodiesel | 5,9 | g CO ₂ -eq/MJ biodiesel |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |

Sumber: (IPCC,2006)

1.12 Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel

| Output | | |
|----------------------------------|-------|------------------------------------|
| Emisi penggunaan listrik | 3,57 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi metanol | 2,94 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi Katalis | 0,24 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 5,90 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| total | 12,64 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |

Lampiran 2 Perhitungan Neraca Energi

2.1 Neraca Energi Lifecycle Biodiesel (Basecase)

| Energi Input | | Energi Output | |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Komponen | (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | (MJ/MJ biodiesel) |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk | | Kernel | 0,1564 |
| N | 0,0936 | EFB | 0,1138 |
| P | 0,0462 | Fibre | 0,0414 |
| K | 0,0114 | Shell | 0,1265 |
| Diesel | 0,1226 | Produksi Olein | |
| Listrik | 0,0002 | PFAD | 0,0499 |
| Energi fotosintesis Kelapa Sawit | 1,3473 | Produksi Biodiesel | |
| Ekstraksi CPO | | Biodiesel | 1 |
| Diesel | 0,0077 | Glycerol | 0,0014 |
| Energi listrik | 0,0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 2,07805E-06 | | |
| <i>acid activated clay</i> | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

2.2 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Skenario A

| Energi Input | | Energi Output | |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Komponen | (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | (MJ/MJ biodiesel) |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk | | Kernel | 0,1564 |
| N | 0,0936 | EFB | 0,1138 |
| P | 0,0462 | Fibre | 0,0414 |
| K | 0,0114 | Shell | 0,1265 |
| Diesel | 0,1226 | Produksi Olein | |
| Listrik | 0,0002 | PFAD | 0,0499 |
| Energi fotosintesis Kelapa Sawit | 1,3473 | Produksi Biodiesel | |
| Ekstraksi CPO | | Biodiesel | 1 |
| Diesel | 0,0077 | Glycerol | 0,0014 |
| Energi listrik | 0,0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 2,07805E-06 | | |
| <i>acid activated clay</i> | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

2.3 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Skenario B

| Energi Input | | Energi Output | |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Komponen | Energi | Komponen | Energi |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Biodiesel | 1.0000 |
| Pupuk | | PKO diesel | 0.0994 |
| N | 0.0936 | bioetanol | 0.6665 |
| P | 0.0462 | bio-oil | 0.3626 |
| K | 0.0114 | Hidrogen | 0.0887 |
| Diesel | 0.1226 | biogas | 0.0707 |
| Listrik | 0.0002 | PFAD | 0.0499 |
| Energi pada fotosintesis Kelapa Sawit | 1.3474 | | |
| Ekstraksi CPO | | | |
| Diesel | 0.0077 | | |
| Energi listrik | 0.0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| Phosporic Acid 85% | 2.07805E-06 | | |
| acid activated clay | 1.42332E-05 | | |
| Steam | 0.0004 | | |
| Biomass | 0.0177 | | |
| Diesel | 0.0068 | | |
| Listrik | 0.0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1.66763E-05 | | |
| Methanol | 0.0029 | | |
| Energi listrik | 0.0230 | | |
| Input Energi Tambahan | | | |
| <i>palm fiber to bioetanol</i> | 1.0705 | | |
| <i>palm shell to bioetanol</i> | 0.6166 | | |
| EFB to biooil | 1.2503 | | |
| PKO to biodiesel | 0.1223 | | |
| PKE to bioetanol | 0.2171 | | |
| gliserol to H2 | 0.1673 | | |
| Total | 5.1349 | Total | 2.3378 |

Lampiran 3 Perhitungan Alokasi Bahan Baku

3.1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 kg Bahan Baku (kg CO₂-eq/kg RBDPO)

| <i>Lifecycle stage</i> | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Alih fungsi lahan | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% | |
| Asimilasi CO ₂ dari tanaman kelapa sawit | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | |
| Emisi karbon dioksida dari LUC | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | |
| Penanaman Kelapa Sawit | | | | | | | | | | | | |
| Emisi Penggunaan Pupuk | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | |
| Emisi Penggunaan energi fosil | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | |
| Proses Ekstraksi CPO | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | |
| Emisi biogas dari wastewater | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | |
| Proses Penyulingan CPO | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | |
| Emisi penggunaan biomass | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | |
| Proses Transesterifikasi Biodiesel | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0964 | 0,0867 | 0,0771 | 0,0674 | 0,0578 | 0,0482 | 0,0385 | 0,0289 | 0,0193 | 0,0096 | 0,0000 | |
| Emisi metanol | 0,0792 | 0,0713 | 0,0634 | 0,0555 | 0,0475 | 0,0396 | 0,0317 | 0,0238 | 0,0158 | 0,0079 | 0,0000 | |
| Emisi Katalis | 0,0065 | 0,0058 | 0,0052 | 0,0045 | 0,0039 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0019 | 0,0013 | 0,0006 | 0,0000 | |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 0,1593 | 0,1433 | 0,1274 | 0,1115 | 0,0956 | 0,0796 | 0,0637 | 0,0478 | 0,0319 | 0,0159 | 0,0000 | |
| Total | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 | |

3.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 USD\$ Penjualan Produk (kg CO₂-eq/USD\$)

| Basis Harga Pasar International | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 0,8310 | 0,8209 | 0,8109 | 0,8009 | 0,7909 | 0,7808 | 0,7708 | 0,7608 | 0,7508 | 0,7407 | 0,7307 |
| Penjualan USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 10,7574 | 10,8472 | 10,9393 | 11,0336 | 11,1303 | 11,2295 | 11,3313 | 11,4358 | 11,5431 | 11,6532 | 11,7664 |
| emisi/penjualan | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| Basis Harga Pasar Domestik | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 0,4747 | 0,5129 | 0,5512 | 0,5894 | 0,6277 | 0,6659 | 0,7042 | 0,7424 | 0,7807 | 0,8189 | 0,8571 |
| Penjualan (USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 18,8310 | 17,3605 | 16,0940 | 14,9919 | 14,0240 | 13,1674 | 12,4038 | 11,7188 | 11,1010 | 10,5409 | 10,0307 |
| emisi/penjualan | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| Basis Harga eks-Produsen | 1,0000 | 0,9000 | 0,8000 | 0,7000 | 0,6000 | 0,5000 | 0,4000 | 0,3000 | 0,2000 | 0,1000 | 0,0000 |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 1,2118 | 1,1764 | 1,1409 | 1,1054 | 1,0700 | 1,0345 | 0,9990 | 0,9635 | 0,9281 | 0,8926 | 0,8571 |
| Penjualan (USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 7,3765 | 7,5699 | 7,7754 | 7,9940 | 8,2271 | 8,4761 | 8,7429 | 9,0293 | 9,3376 | 9,6704 | 10,0307 |
| emisi/penjualan | | | | | | | | | | | |



**PENGARUH SKENARIO PRODUKSI TERHADAP DAMPAK
LINGKUNGAN BIODIESEL BERBAHAN BAKU KELAPA
SAWIT DI INDONESIA DENGAN ANALISIS *LIFECYCLE*
(LCA)**

SKRIPSI

**HADI YAHYA ALDIN FADHLOLLAH
0606076412**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2010**

**PENGARUH SKENARIO PRODUKSI TERHADAP DAMPAK
LINGKUNGAN BIODIESEL BERBAHAN BAKU KELAPA
SAWIT DI INDONESIA DENGAN ANALISIS *LIFECYCLE*
(LCA)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**HADI YAHYA ALDIN FADHLOLLAH
0606076412**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah

NPM : 0606076425

Tanda Tangan :

Tanggal : 24 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah
NPM : 0606076425
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA ()

Pembimbing : Dr. rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, M.T. ()

DEWAN PENGUJI

Penguji : Ir. Praswasti PDK Wulan, M.T. ()

Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat, rahmat, penyertaan, dan bimbingan-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Skripsi dengan judul **“Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)”** ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademis untuk meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI.

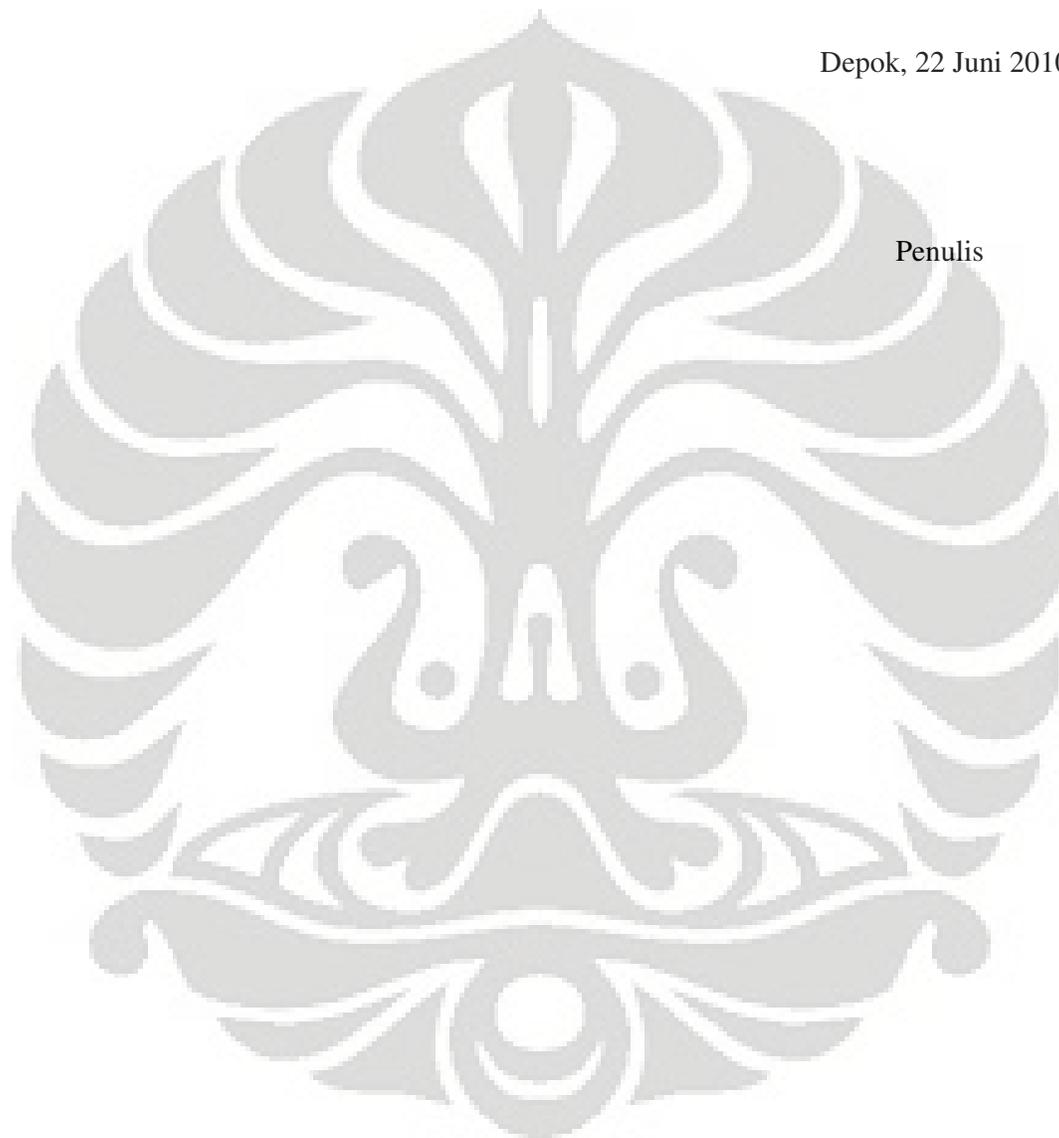
Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA, selaku dosen pembimbing, yang selalu sabar dan bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing dan mengarahkan selama proses penyusunan skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, M.T. selaku pembimbing ke-2 yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan solusi dalam penyelesaian permasalahan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Ir. Yuliusman M.Eng., selaku kordinator mata kuliah skripsi, Pembimbing Akademis, Ir. Dijan Supramono, M.Sc., dan seluruh staff pengajar yang telah bersedia membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berguna bagi penulis.
3. Mang Jajat, Mang Ijal, Mas Heri, Mas Mugeni, Mas Sriyono, dan semua karyawan DTK.
4. Falah, Fira, Nita, Anin, dan semua sahabat Teknik Kimia UI 2006 yang selalu memberi semangat, mendukung, dan menghibur selama 4 tahun kuliah.
5. Mamah yang tidak pernah bosan bertanya: “kapan lulus?”, Bapa yang selalu mensupport, *All of my sisters* atas doa untuk *your only brother*.
6. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala bantuan, pengorbanan, dan usaha yang telah diberikan.

Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi setiap orang yang membacanya. Disadari masih banyak terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan agar perbaikan dapat terus dilakukan untuk mencapai hasil yang lebih baik lagi.

Depok, 22 Juni 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hadi Yahya Aldin Fadhlollah
NPM : 06060676425
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Juni 2010

Yang menyatakan

(Hadi Yahya A F)

ABSTRAK

Nama : Hadi Yahya
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Skenario Produksi terhadap Dampak Lingkungan Biodiesel Berbahan Baku Kelapa Sawit di Indonesia dengan Analisis *Lifecycle* (LCA)

Lifecycle biodiesel memiliki emisi gas rumah kaca yang lebih besar dibandingkan dengan emisi gas rumah kaca *petroleum* diesel. Penelitian ini meneliti tentang pengaruh skenario produksi terhadap dampak lingkungan biodieseldi Indonesia. *Lifecycle* biodiesel memiliki rasio energi primer sebesar 0,59 dan rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 3,07. Padang rumput menghasilkan net emisi gas terkecil dibandingkan dengan hutan tropis dan hutan gambut. Pada variasi pemanfaatan produk samping, skenario A memiliki nilai rasio *eco-efficiency* terbesar yaitu 1,481 dibandingkan dengan skenario B sebesar 0,379. Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan.

Kata kunci:
analisis *lifecycle*, biodiesel, energi berkelanjutan

ABSTRACT

Name : Hadi Yahya
Study Program : Chemical Engineering
Tittle : The Effect of Production Scenario to Environmental Impact of Indonesian Palm Oil Biodiesel using Lifecycle Analysis (LCA)

The greenhouse gas emission of biodiesel lyfecycle is bigger than petroleum diesel. this research is emphasizing on the effect of biodiesel production scenario to Indonesian Biodiesel environment. Biodiesel lifecycle has primary energy ratio 0.59 and fossil energy ratio 3.07. Degraded land produces the least nett emission gas compared to tropical jungle dan peadlane. In varying by-product utilization, scenario A yields the highest eco-efficiency ratio, 1.481 compared to scenario B, which is only 0.379. If the biodiesel selling price were higher than cooking oil than the greenhouse gas emission would increase as long as the food allocation does.

Keywords:
Lifecycle analysis, biodiesel, sustainable energy

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI | vi |
| ABSTRAK | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xii |
| BAB 1 | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG | 1 |
| 1.2 PERUMUSAN MASALAH | 3 |
| 1.3 TUJUAN PENELITIAN | 3 |
| 1.4 BATASAN MASALAH | 3 |
| 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN | 4 |
| BAB 2 | 5 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 BIODIESEL | 5 |
| 2.2 MINYAK KELAPA SAWIT (CPO) | 6 |
| 2.3 INDUSTRI KELAPA SAWIT DAN BIODIESEL DI INDONESIA | 6 |
| 2.4 PERMASALAHAN BIODIESEL BERBASIS CPO: FOOD VS FUEL | 8 |
| 2.5 ANALISIS LIFECYCLE | 9 |
| 2.6 METODOLOGI ANALISIS LIFECYCLE (LCA) | 10 |
| 2.6.1 Definisi Tujuan dan <i>Scoping</i> | 10 |
| 2.6.2 Analisis Inventaris <i>Lifecycle</i> | 11 |
| 2.6.3 Penilaian Dampak <i>Lifecycle (Impact Assessment)</i> | 12 |
| 2.6.4 Penilaian dan Interpretasi Hasil | 12 |
| 2.7 LIFECYCLE BIODIESEL BERBASIS CPO | 12 |
| 2.7.1 Alih Fungsi Lahan | 12 |
| 2.7.1 Perkebunan Kelapa Sawit | 14 |
| 2.7.2 Proses Pembuatan CPO | 16 |
| 2.7.3 Proses Penyulingan CPO | 18 |
| 2.7.4 Konversi Bahan Baku Menjadi Biodiesel | 19 |
| 2.8 PEMANFAATAN PRODUK SAMPING BIODIESEL | 21 |
| 2.8.1 Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Bahan Bakar Biomassa | 22 |
| 2.8.2 Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Kompos/Pupuk | 23 |
| 2.8.3 <i>Recovery</i> Gas Metana dari POME dengan Produksi Energi | 23 |
| 2.8.3 Pemanfaatan Minyak Inti Sawit Sebagai Bahan Baku Surfaktan | 24 |
| 2.8.4 Potensi Pemanfaatan PFAD | 24 |
| 2.8.4 Potensi Pemanfaatan Gliserol | 25 |
| 2.8.5 Pemanfaatan Produk Samping sebagai Bahan Baku <i>Biofuel/Bioenergy</i> | 25 |
| 2.9 PERKEMBANGAN ANALISIS LIFECYCLE BIOFUEL | 28 |
| BAB 3 | 30 |

| | |
|---|----|
| METODE PENELITIAN..... | 30 |
| 3.1 PENENTUAN TUJUAN DAN LINGKUP | 31 |
| 3.2 INVENTARISASI LIFECYCLE BIODIESEL (LCI) | 31 |
| 3.2.1 Alih Fungsi Lahan Menjadi Perkebunan Kelapa Sawit..... | 32 |
| 3.2.2 Penanaman Kelapa Sawit..... | 33 |
| 3.2.3 Proses Ekstraksi Minyak Kelapa Sawit..... | 34 |
| 3.2.4 Proses Penyulingan Minyak Kelapa Sawit | 35 |
| 3.2.5 Proses Transesterifikasi Biodiesel..... | 36 |
| 3.3 PENILAIAN DAMPAK LIFECYCLE (IMPACT ASSESSMENT) | 37 |
| 3.3.1 Dampak Potensi Pemanasan Global..... | 38 |
| 3.3.2 Konsumsi Energi <i>Lifecycle</i> | 38 |
| 3.4 PENILAIAN DAN INTERPRETASI..... | 39 |
| 3.5 ALTERNATIF SKENARIO PADA LIFECYCLE BIODIESEL | 39 |
| 3.5.1 Variasi Asal Lahan untuk Perkebunan Kelapa Sawit..... | 39 |
| 3.5.2 Variasi Pemanfaatan Produk Samping | 40 |
| 3.5.3 Alokasi Bahan Baku untuk Biodiesel dan Produk Pangan..... | 43 |
| BAB 4 | 45 |
| PEMBAHASAN..... | 45 |
| 4.1 INVENTARISASI LIFECYCLE (LCI) BIODIESEL..... | 45 |
| 4.2 PENILAIAN DAMPAK <i>LIFECYCLE</i> BIODIESEL (BASE CASE)..... | 46 |
| 4.2.1 Potensi Pemanasan Global <i>Lifecycle</i> Biodiesel..... | 46 |
| 4.2.2 Konsumsi Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel..... | 49 |
| 4.3 PENGARUH VARIASI SKENARIO PADA LCA BIODIESEL..... | 52 |
| 4.3.1 Pengaruh Asal Lahan Perkebunan Kelapa Sawit | 52 |
| 4.3.2 Pengaruh Pemanfaatan Produk Samping | 53 |
| 4.3.3 Pengaruh Alokasi Kelapa Sawit untuk Biodiesel dan Produk Pangan | 59 |
| BAB 5 | 62 |
| KESIMPULAN | 62 |
| DAFTAR REFERENSI | 63 |
| LAMPIRAN | 67 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Pohon industri kelapa sawit (Suryana, 2007)..... | 7 |
| Gambar 2.2. Konsep analisis <i>lifecycle</i> proses | 9 |
| Gambar 2.3. Ilustrasi konsep sistem <i>lifecycle</i> (Curran, M. A., 1996) | 11 |
| Gambar 2.4. Skema proses penanaman kelapa sawit | 15 |
| Gambar 2.5. Skema proses ekstraksi CPO..... | 16 |
| Gambar 2.6. Skema proses <i>refining</i> CPO | 19 |
| Gambar 2.7. Reaksi transesterifikasi | 19 |
| Gambar 2.8. Diagram alir proses produksi biodiesel | 20 |
| Gambar 2.9 Produk utama, produk samping, dan residu yang diperoleh dari kelapa sawit (Gutierrez, L.F., 2009)..... | 26 |
| | |
| Gambar 3.1. Diagram alir penelitian | 30 |
| Gambar 3. 2 Alternatif alokasi pemanfaatan produk samping pada sistem produksi biodiesel | 41 |
| | |
| Gambar 4.1 Emisi Gas Rumah Kaca untuk lifecycle Biodiesel..... | 48 |
| Gambar 4. 2 Neraca energi <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 51 |
| Gambar 4. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan. | 52 |
| Gambar 4. 4 Breakdown kredit emisi skenario A | 55 |
| Gambar 4. 5 Breakdown kredit emisi skenario B..... | 56 |
| Gambar 4. 6 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap emisi gas rumah kaca lifecycle biodiesel. | 56 |
| Gambar 4. 7 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy primer <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 57 |
| Gambar 4. 8 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy fosil <i>lifecycle</i> biodiesel. | 58 |
| Gambar 4.9 Pengaruh alokasi bahan baku terhadap emisi gas rumah kaca..... | 60 |
| Gambar 4. 10 Pengaruh alokasi bahan baku untuk produk pangan terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil | 61 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1. Karakteristik Fisik Biodiesel (USDE, 2007) | 5 |
| Tabel 2.2. Parameter fisiologis kelapa sawit dan hutan tropis (Tan, K.T., 2009) . | 13 |
| Tabel 2.3. Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (Wicke et al., 2008)..... | 13 |
| Tabel 2.4. Faktor emisi pupuk nitrogen (Wicke et al., 2008) | 15 |
| Tabel 2.5. Parameter dan faktor emisi pada proses produksi biodiesel (Wicke et al., 2008) | 21 |
| Tabel 2.6 Produk samping pada setiap tahapan proses <i>lifecycle</i> biodiesel | 22 |
| Tabel 2.7 Data <i>heating value</i> dan <i>moisture</i> pada produk samping (Panapanaan, V. et al, 2009) | 22 |
| Tabel 2.8 Komposisi nutrient pada tandan buah kosong kelapa sawit (Chavalparit, 2006)..... | 23 |
| Tabel 2.9 Emisi Faktor AE PKO dan AE Petrokimia (Wicke, B., 2008)..... | 24 |
| Tabel 2.10 <i>Yield</i> dan kebutuhan energi proses produksi biofuel (Spath, P.L., 2003) | 27 |
| Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA..... | 28 |
| | |
| Tabel 3. 1 Parameter proses pada lifecycle biodiesel | 32 |
| Tabel 3.2 Aliran input output sistem penanaman kelapa sawit untuk 1 ton FFB (Andita, 2008) | 34 |
| Tabel 3.3 Aliran input output proses ekstraksi untuk menghasilkan 1 ton CPO (Chavalparit, 2006)..... | 35 |
| Tabel 3. 4 Aliran input output proses penyulingan minyak kelapa sawit (Wicke, et al., 2008) | 36 |
| Tabel 3. 5 Aliran input output proses transesterifikasi biodiesel (Pleanjai, S., 2004)..... | 37 |
| Tabel 3.6 Skenario pemanfaatan produk samping..... | 42 |
| Tabel 3.7 Harga CPO, minyak goreng dan biodiesel | 44 |
| | |
| Tabel 4. 1 LCI rantai suplai biodiesel overall. | 45 |
| Tabel 4. 2 Jumlah Emisi Gas Rumah Kaca pada Setiap Tahapan <i>Lifecycle</i> Biodiesel | 47 |
| Tabel 4.3 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Overall..... | 50 |
| Tabel 4.4 Jumlah produk samping pada <i>lifecycle</i> biodiesel..... | 53 |
| Tabel 4. 5 Kredit emisi <i>lifecycle</i> biodiesel skenario A | 54 |
| Tabel 4. 6 Kredit emisi <i>lifecycle</i> biodiesel skenario B..... | 54 |
| Tabel 4.7 Perhitungan <i>Eco-efficiency</i> skenario A dan skenario B | 59 |
| Tabel 4. 8 Basis harga biodiesel dan minyak goreng | 60 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca | 67 |
| 1.1 Faktor Emisi Bahan Bakar | 67 |
| 1.2 Parameter Input Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan | 68 |
| 1.3 Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan | 68 |
| 1.4 Faktor Emisi Pupuk dan Kandungan Nutrient EFB | 69 |
| 1.5 Parameter Input Perhitungan Emisi Penanaman Kelapa Sawit | 69 |
| 1.6 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Penanaman Kelapa Sawit | 69 |
| 1.7 Parameter Input Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit | 70 |
| 1.8 Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit | 70 |
| 1.9 Parameter Input Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit | 70 |
| 1.10 Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit | 71 |
| 1.11 Parameter Input Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel | 71 |
| 1.12 Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel | 71 |
| Lampiran 2 Perhitungan Neraca Energi | 72 |
| 2.1 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel (<i>Basecase</i>) | 72 |
| 2.2 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Skenario A | 73 |
| 2.3 Neraca Energi <i>Lifecycle</i> Biodiesel Skenario B | 74 |
| Lampiran 3 Perhitungan Alokasi Bahan Baku | 75 |
| 3.1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 kg Bahan Baku (kg CO ₂ -eq/kg RBDPO) | 75 |
| 3.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 USD\$ Penjualan Produk (kg CO ₂ -eq/USD\$) | 76 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Saat ini, masyarakat dunia telah mulai serius menyikapi permasalahan pemanasan global dan penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi primer. Untuk mengatasi permasalahan tersebut sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan harus dikembangkan untuk mengurangi dan menggantikan penggunaan energi fosil. Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Bahan baku biodiesel adalah minyak nabati atau senyawa trigliserida seperti minyak kelapa sawit, minyak kedelai, bunga matahari, dan sebagainya. Kelapa sawit memiliki keunggulan dibandingkan bahan baku minyak nabati lainnya karena memiliki hasil panen yang lebih besar dan kebutuhan lahan yang lebih sedikit dibandingkan dengan minyak nabati lainnya. Penggunaan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel dipilih karena produksi minyak kelapa sawit cukup besar di Indonesia. Indonesia memiliki 5,6 juta hektar lahan kebun sawit dari 11 juta hektar kebun sawit dunia pada tahun 2004. Di Indonesia, pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku sudah banyak dilakukan, dan biodiesel yang diproduksi telah banyak digunakan dan dijual sebagai *biosolar* oleh PT Pertamina (Rahmat, S., 2007). Penilaian suatu energi alternatif yang menggantikan bahan bakar fosil harus memiliki kemampuan untuk mengurangi dampak lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil.

Pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel telah mendorong peningkatan permintaan kelapa sawit sehingga mendorong pembukaan lahan baru untuk kelapa sawit dengan alih fungsi lahan (contoh, hutan tropis menjadi perkebunan). Perubahan fungsi hutan secara langsung mempengaruhi kandungan karbon pada suatu lahan, serta melepaskan emisi karbon akibat pembukaan lahan (Koh, L.P., 2008). Selain itu, pengembangan kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel akan mengakibatkan kompetisi bahan baku kelapa sawit sebagai bahan pangan (Corley, R.H.V., 2008). Proses ekstraksi

minyak kelapa sawit menghasilkan beberapa produk samping dan residu yang memiliki potensi ekonomi maupun kredit emisi dengan mensubstitusi produk berbasis bahan bakar fosil. Hal ini sangat bergantung pada pendekatan yang diterapkan untuk mengalokasikan by-produk itu sendiri (Guitierrez, L. et al., 2008). Dengan memperhitungkan faktor-faktor diatas biodiesel yang digunakan untuk mereduksi penggunaan bahan bakar fosil, harus memiliki kemampuan mereduksi dampak lingkungan secara keseluruhan dibandingkan bahan bakar fosil. Untuk itu, diperlukan analisis *lifecycle* untuk memilih pendekatan proses yang diterapkan pada skenario produksi biodiesel.

Analisis *lifecycle* (LCA) merupakan suatu analisis penilaian dampak lingkungan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan konsumsi energi suatu produk atau proses mulai dari ekstraksi bahan baku hingga menjadi produk akhir. Analisis *lifecycle* ini telah digunakan di negara-negara lain. Analisis *lifecycle* dilakukan oleh Departemen Pertanian dan Departemen Energi Amerika Serikat untuk membandingkan antara soybean biodiesel dengan petroleum diesel (Seehan, 1998). Analisis *lifecycle* dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai biofuel yang digunakan di Swiss, dengan mempertimbangkan rantai proses keseluruhan (Zah, Raiener et al., 2004). Dalam penelitian tersebut, biofuel dengan bahan baku hasil pertanian tropis memiliki dampak terhadap lingkungan yang cukup besar akibat adanya alih fungsi hutan dengan cara penebangan dan pembakaran. Hal ini mempengaruhi sustainabilitas dari biofuel tersebut (Zah, Raiener et al., 2004).

Sebuah penelitian untuk melakukan simulasi analisis *lifecycle* skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit di Indonesia dengan memperhitungkan faktor alih fungsi lahan, pengalokasian bahan baku produk pangan, pemilihan pendekatan teknologi untuk mengalokasi produk samping. Analisis ini akan mengevaluasi dampak lingkungan sistem berupa emisi gas rumah kaca dan jumlah konsumsi energi pada *lifecycle*. Pendekatan ini akan menjadi terobosan baru dalam pengembangan industri kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel di Indonesia.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan akan dijawab dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari alih fungsi lahan dan praktek pembukaan lahan pada perkebunan kelapa sawit, pengaruh skenario pemanfaatan produk samping, dan pengaruh pengalokasian minyak kelapa sawit sebagai produk bahan pangan terhadap dampak lingkungan/pemanasan global serta konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel. Analisis ini dibuat ke dalam suatu model perhitungan LCA. Analisis ini diharapkan dapat menghasilkan perhitungan total emisi gas rumah kaca serta konsumsi energi dari proses keseluruhan dan skenario produksi biodiesel yang berkelanjutan.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

- Memodelkan skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit.
- Menganalisis neraca emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi dari setiap skenario produksi biodiesel berbahan baku kelapa sawit.
- Menganalisis pengaruh skenario produksi biodiesel terhadap dampak lingkungan *lifecycle* biodiesel.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan-batasan yang dipakai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metodologi dari analisis *lifecycle* hanya memperhitungkan dampak lingkungan dari inventarisasi neraca massa dan energi.
2. Kategori dampak yang diperhitungkan dalam analisis *lifecycle* adalah dampak potensi pemanasan global yaitu emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi *lifecycle* biodiesel.
3. Parameter dampak yang diperhitungkan adalah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan maupun yang dikontribusikan dalam setiap inventarisasi material dalam analisis *lifecycle*. Emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam jumlah gas karbon dioksida equivalent (gram CO₂-eq) per satuan unit fungsional.
4. Model *lifecycle* energi dilakukan berawal dari perkebunan kelapa sawit, proses minyak kelapa sawit, proses penyulingan minyak kelapa sawit,

proses pengolahan menjadi biodiesel, pembentukan produk samping, penggunaannya serta transportasi yang menyertainya, hingga penggunaan akhir biodiesel.

5. Model *lifecycle* biodiesel yang digunakan diasumsikan berada di dalam satu kompleks terintegrasi, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk transportasi antar unit proses *lifecycle* dapat diabaikan.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

BAB I : Pendahuluan

Berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah.

BAB II : Tinjauan Pustaka

Berisi dasar teori yang menjelaskan tentang biodiesel dan minyak kelapa sawit secara umum, perkembangan industri kelapa sawit dan biodiesel, permasalahan mengenai industri kelapa sawit, deskripsi LCA, metodologi analisis *lifecycle*, siklus *lifecycle* biodiesel berbasis CPO, perbandingan teknologi proses produksi, dan perkembangan analisis *lifecycle* biofuel.

BAB III : Metode Penelitian

Berisi alur penelitian secara keseluruhan, batasan system *lifecycle* yang ditinjau pada setiap subproses, variasi skenario produksi yang dilakukan, interpretasi dampak lingkungan, deskripsi dampak lingkungan yang dievaluasi.

BAB IV : Pembahasan

Pembahasan inventarisasi neraca massa dan energi *lifecycle* biodiesel untuk setiap subproses, penilaian dampak lingkungan *lifecycle* biodiesel, pengaruh variasi asal lahan perkebunan, pengaruh variasi pemanfaatan produk samping, pengaruh alokasi bahan baku untuk produksi bahan pangan.

BAB V : Kesimpulan

DAFTAR REFERENSI

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 BIODIESEL

Biodiesel adalah bahan bakar yang terdiri atas mono-alkil ester dari *fatty acid* rantai panjang, yang diperoleh dari minyak tumbuhan atau lemak binatang (BPPT, 2009). Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif untuk mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi mesin. Dalam penggunaannya biodiesel dapat dicampur dengan bahan bakar solar ataupun murni.

Campuran 5% sampai 20% biodiesel dengan solar berhasil digunakan di segala macam mesin diesel kendaraan, maupun genset yang juga tanpa modifikasi (Seehan, J. et al., 1998). Penggunaan biodiesel di dalam mesin diesel konvensional dapat mengurangi emisi hidrokarbon aromatik polisiklik, nitrat aromatik polisiklik, dan zat partikulat. Reduksi emisi ini meningkat sesuai dengan meningkatnya jumlah biodiesel yang dicampur dengan bahan bakar solar. Biodiesel (B100) dapat mengurangi emisi gas karbon dioksida hingga mencapai 75% yang melebihi bahan bakar solar, sedangkan B20 mengurangi emisi CO₂ sebesar 15% (USDE, 2007). Karakteristik fisik biodiesel atau metal este ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik Fisik Biodiesel (USDE, 2007)

| Sifat Fisik | Nilai |
|-------------------------------------|---------------|
| Gravitasi spesifik | 0,87 – 0,89 |
| Viskositas kinematik @ 40°C | 3,7 – 5,8 |
| Angka stana | 46 – 70 |
| Nilai pemanasan tertinggi (btu/lb) | 16928 – 17996 |
| Sulfur, wt% | 0,0 – 0,0024 |
| Titik asap (<i>Cloud pint</i>) °C | -11 – 16 |
| Titik tuang (<i>Pour pint</i>) °C | -15 – 13 |
| Angka iodine | 60 – 135 |
| Nilai pemanasan terendah (Btu/lb) | 15700 – 16735 |

2.2 MINYAK KELAPA SAWIT (CPO)

Kelapa sawit merupakan *monocotyledon* yang termasuk genus *Elaeis*. Genus *Elaeis* terdiri atas dua spesies, yaitu *E. Guineensis* dan *E. Oleifera*. Memiliki nama binomial *Elaeis jacq.* Bunga dan buahnya berupa tandan dan bercabang banyak. Bagian buahnya terdiri atas tiga lapisan yaitu:

1. *pericarp* : bagian kulit buah yang berwarna kemerahan dan licin.
2. *mesocarp* : bagian serabut buah
3. *endocarp* : bagian cangkang pelindung inti

Mesocarp mengandung kadar minyak rata-rata sebanyak 56%, inti mengandung minyak sebesar 44%, dan *endocarp* tidak mengandung minyak. Minyak yang dihasilkan dari spesies *Elaeis* ini terdiri dari dua tipe. Minyak yang biasa disebut *Palm Oil* atau minyak kelapa sawit adalah minyak yang diambil dari *mesocarp* kelapa sawit. Tipe kedua adalah *Palm Kernel Oil*, yaitu minyak yang diambil dari bagian inti sawit.

Minyak kelapa sawit seperti umumnya minyak nabati lainnya merupakan senyawa yang tidak larut dalam air, dengan komponen penyusunnya yang utama adalah trigliserida dan nontrigliserida (Pasaribu, N., 2004).

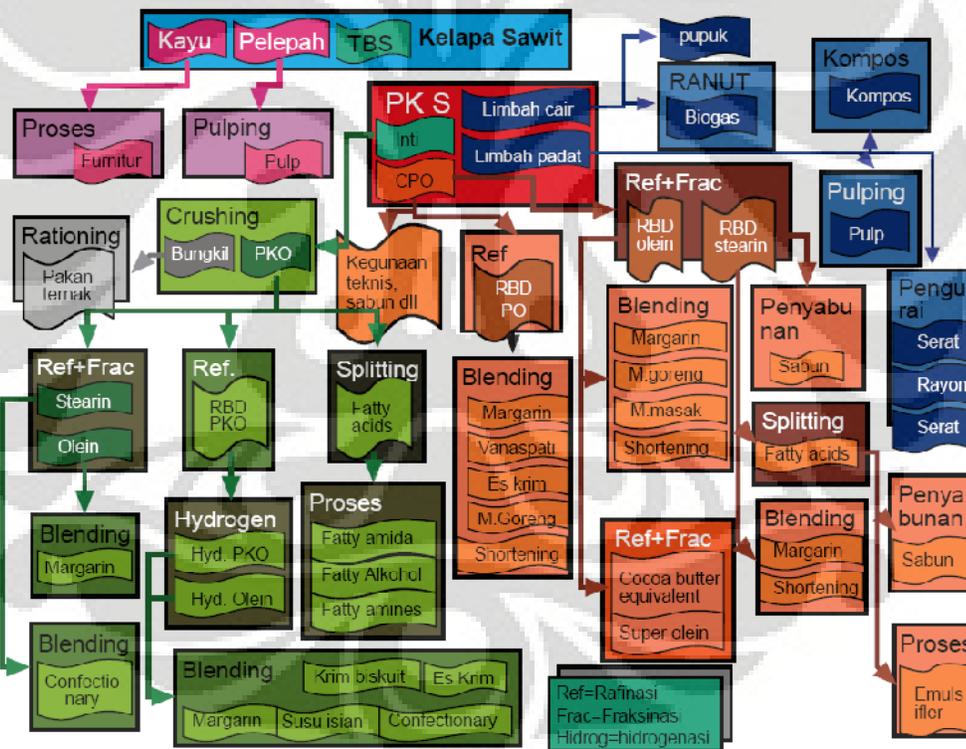
2.3 INDUSTRI KELAPA SAWIT DAN BIODIESEL DI INDONESIA

Indonesia merupakan negara penghasil minyak nabati terbesar dunia. Produksi minyak sawit dewasa ini cenderung meningkat dan diperkirakan akan berlanjut satu dan dua dekade ke depan (Crutchfield, J., 2007). Pengembangan tanaman kelapasawit telah dilakukan secara luas di Indonesia, baik di kawasan barat maupun timur Indonesia. Penyebaran areal yang berpotensi untuk pengembangan kelapa sawit terdapat di Provisinsi Nangroe Aceh Darussalam (47.796 ha), Sumatra Utara (285.652 ha), Sumatra Barat (47.796 ha), Riau (1.557.863 ha), Jambi (511.433 ha), Sumatra Selatan (1.350.276 ha), Kalimantan Barat (1.252.371 ha), Kalimantan Tengah (956.544 ha), Irian Jaya (1.511.276 ha), dan Sulawesi Tengah (215.728 ha) (Timnas Pengembangan BBN, 2007).

Kapasitas produksi setiap lahan Kelapa Sawit berbeda, 1 hektare kebun sawit di Sumatera per tahun (124 ton Tandan Buah Segar) mampu menghasilkan biodiesel sebanyak 1,5 – 2,3 kilo liter per tahun, dan di Kalimantan hanya

mencapai sekitar 1,2 - 1,7 kilo liter per tahun. Pada tahun 2004 produksi CPO di Sumatera mencapai 9,89 juta Ton, dan Kalimantan sebesar 1,51 Juta Ton, dengan produksi CPO rata-rata di Indonesia sebesar 2,176 ton per Hektare. (Rahayau, 2007)

Produk-produk yang dapat dihasilkan dari minyak sawit sangat luas dengan intensitas modal dan teknologi yang bervariasi. Produksi CPO Indonesia yang diolah di dalam negeri sebagian besar masih dalam bentuk produk antara seperti RBD *palm oil*, *stearin* dan *olein*, yang nilai tambahnya tidak begitu besar dan baru sebagian kecil yang diolah menjadi produk-produk oleokimia dengan nilai tambah yang cukup tinggi (Suryana, 2007). Pohon industri kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Pohon industri kelapa sawit (Suryana, 2007)

Minyak kelapa sawit sangat berpotensi sebagai bahan baku biodiesel dan bagi Indonesia sebagai penghasil CPO terbesar dunia mempunyai peluang untuk menghasilkan bahan bakar biodiesel. Tujuan utama adalah bagaimana kita dapat

memanfaatkan sumber bahan baku yang melimpah menjadi produk maupun komoditas yang lebih bermanfaat. Jika hal ini dapat dilaksanakan, maka selain dapat mengendalikan produksi sawit di saat panen besar, keuntungan lainnya adalah mengurangi impor minyak diesel yang menyita cadangan devisa negara. (BPPT, 2009)

Perkebunan kelapa sawit di Indonesia pada 2010 diperkirakan mencapai areal seluas 10 juta ha dengan total produksi CPO 15 juta ton. Melimpahnya produksi CPO di pasar dunia akan mengganggu stabilitas harga CPO, maka pemanfaatannya untuk produksi biodiesel minyak sawit diharapkan bisa menjadi stabilisator harga CPO. (Rahayau, 2007)

Pilihan terhadap pembangunan industri biodiesel diharapkan mengurangi ketergantungan pada produk impor BBM. Sumber daya alam kelapa sawit yang melimpah di Indonesia dan ketersediaan teknologi proses serta SDM dapat diharapkan hasil produksi industri biodiesel dapat menggantikan kedudukan BBM. (Rahayau, 2007)

2.4 PERMASALAHAN BODIESEL BERBASIS CPO: *FOOD VS FUEL*

Minyak kelapa sawit merupakan minyak nabati yang paling banyak dikonsumsi di dunia. Minyak kelapa sawit digunakan oleh hampir 3 juta penduduk di 150 negara. Produk pangan turunan dari kelapa sawit, seperti minyak goreng, margarin, lemak kue, masih menjadi kebutuhan pokok dari masyarakat terutama di negara berkembang (Lam, M.K. et al., 2008). Permintaan terhadap minyak kelapa sawit sebagai bahan pangan akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan pendapatan perkapita.

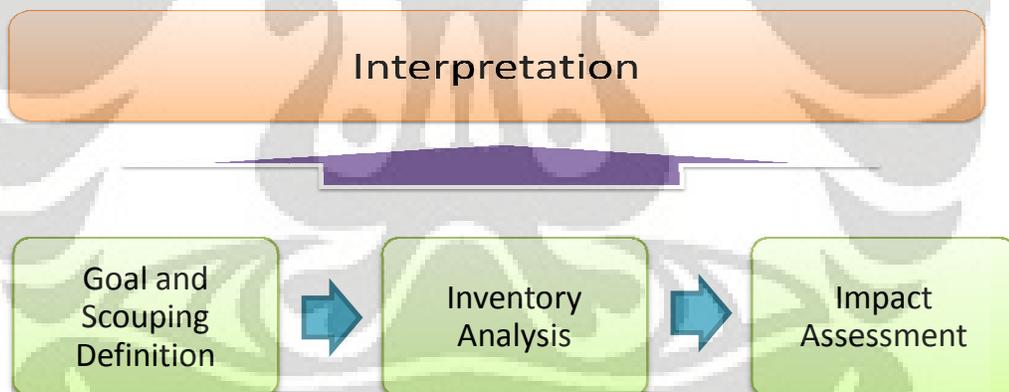
Dengan meningkatnya permintaan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel, ketahanan pangan dari minyak kelapa sawit dapat terganggu. Pasar terbesar dari biodiesel berada di Eropa. Uni Eropa meningkatkan kebijakan penggunaan biodiesel di sektor transportasi sebesar 5.75% di tahun 2010. Diperkirakan permintaan biodiesel di Eropa mencapai 10 juta ton/tahun pada 2010 (Lam et al., 2008). Permasalahan *food v. fuel* timbul seiring berkembangnya teknologi bahan bakar nabati yang menggunakan sumber pangan sebagai bahan baku (Srinivasan, 2008). Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya harga minyak

kelapa sawit yang berimbas pada meningkatnya harga bahan pangan, terutama yang berbasis minyak kelapa sawit. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut *supply* minyak kelapa sawit harus ditingkatkan, tetapi hal ini terhambat dengan terbatasnya lahan yang tersedia untuk mengekspansi produksi kelapa sawit. Peningkatan produksi kelapa sawit dengan cara intensifikasi saat ini masih dalam tahap pengembangan. (Lam et al., 2008)

2.5 ANALISIS LIFECYCLE

Analisis *lifecycle* (LCA) adalah pembahasan mengenai *lifecycle* suatu materi dari pembentukannya sampai pengkonsumsiannya dilihat dari jumlah energi dan aliran emisi ke lingkungan (Seehan, J. et al., 1998). Konsep analisis *lifecycle* dari suatu proses dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Analisis *lifecycle* memberikan informasi tentang pengekstraksian bahan mentah dari lingkungan, sumber energi yang dikonsumsi, dan emisi yang terbentuk.



Gambar 2.2. Konsep analisis *lifecycle* proses

Analisis *lifecycle* menggunakan konsep “*cradle to grave*”, yaitu semua langkah dari ekstraksi pertama bahan mentah dari lingkungan ke penggunaan akhir produk. Setiap proses dari sistem produksi, mulai dari pengambilan bahan mentah, ekstraksi, sterilisasi, *digestion*, ekstraksi bahan baku, konversi menjadi produk, transportasi, hingga penggunaan akhir (Seehan et al., 1998).

Dalam analisis *lifecycle*, aliran energi yang dihitung tidak hanya pada material input secara langsung, tetapi juga penggunaan bahan-bahan pembantu lainnya.

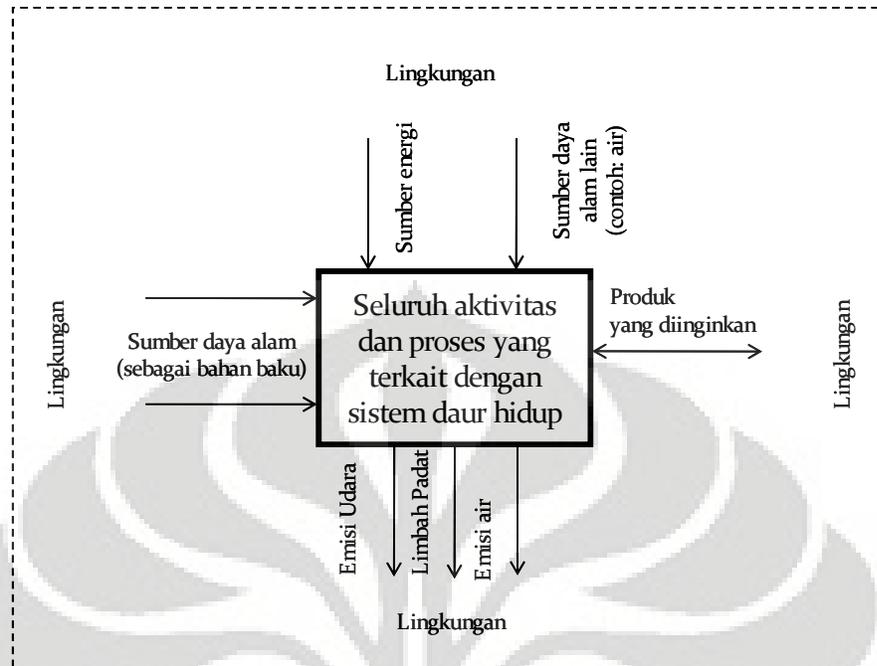
2.6 METODOLOGI ANALISIS LIFECYCLE (LCA)

Secara garis besar metodologi analisis *lifecycle* terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan metodologi dimulai dari penentuan definisi tujuan dan *scope* LCA, inventarisasi *lifecycle* (LCI/*lifecycle inventory*), penilaian dampak (*impact assessment*), dan interpretasi hasil. (Curran, M. A., 1996)

2.6.1 Definisi Tujuan dan Scoping

Sebelum analisis *lifecycle* dimulai, tujuan dari analisis ini harus di definisikan terlebih dahulu. Tujuan dari analisis *lifecycle* antara lain, membandingkan suatu produk atau proses baru dengan kompetitifnya, memilih alternatif produk atau proses yang lebih ramah lingkungan, dan sebagainya (Curran, M. A., 1996).

Ketika tujuan umum dari studi analisis *lifecycle* telah ditetapkan, batasan dari studi ini harus ditentukan. *Lifecycle* produk, proses, maupun aktivitas yang sedang dipelajari dinyatakan sebagai sistem. Seluruh operasi yang berkontribusi dalam *lifecycle* produk, proses, maupun aktivitas yang dianalisis, tergolong ke dalam batasan sistem. Lingkungan berada di sekitar sistem. Input ke dalam sistem adalah sumber daya alam, termasuk sumber energi. Output dari sistem adalah keseluruhan pelepasan akhir ke lingkungan (udara, perairan, atau tanah). Jika sistem mewakili pembuatan dan kegunaan dari suatu produk, maka output mencakup *postconsumer* atau produk yang dibuang. Konsep sistem ini terilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Ilustrasi konsep sistem *lifecycle* (Curran, M. A., 1996)

Batasan sistem untuk suatu studi analisis *lifecycle* dari suatu sistem produk, biasa digambarkan dengan diagram aliran massa umum (*cradle-to-grave*). Batasan dari analisis *lifecycle* meliputi penambahan bahan baku, pembentukan bahan intermediate, pembentukan produk yang dianalisis, penggunaan produk, dan disposisi akhir produk. Penggunaan kembali atau *recycling* dari suatu produk merupakan bagian dari analisis *lifecycle*. (Curran, M. A., 1996)

2.6.2 Analisis Inventaris *Lifecycle*

Terdapat lima tahapan dasar dalam analisis inventaris *lifecycle*. Pertama, mendefinisikan jangkauan dan batasan dari sistem yang dianalisis. Kedua, mengumpulkan data input dan output dari setiap proses produksi. Ketiga, membuat suatu model komputer. Keempat, menganalisis hasil studi. Kelima, menginterpretasikan hasil dan membuat kesimpulan. Setiap data yang dibutuhkan dalam proses produksi dapat diperoleh dari literatur maupun diestimasi dengan simulator proses. (Curran, M. A., 1996)

2.6.3 Penilaian Dampak *Lifecycle* (*Impact Assessment*)

Terdapat tahapan dasar dalam melakukan penilaian dampak *lifecycle*. Pertama, pendefinisian kategori dampak yang dianalisis. Kedua identifikasi indikator kategori. Keempat, klasifikasi penilaian dampak *lifecycle*. Kelima, karakterisasi dampak *lifecycle*.

Secara garis besar, kategori dampak yang dianalisis terbagi menjadi tiga, yaitu emisi udara, limbah padat, dan emisi air. Kategori indikator yang digunakan merujuk pada *sustainable development indicator*, yaitu ekonomi, lingkungan, sosial, dan *safety*. Akan tetapi dalam studi ini hanya akan mengevaluasi faktor lingkungan dan ekonomi. Hal ini merupakan keterbatasan dari analisis *lifecycle* yang dilakukan. Indikator faktor lingkungan mencakup dampak lingkungan dari proses produksi. Sedangkan faktor ekonomi mencakup efisiensi produk energi yang dihasilkan. (Curran, M. A., 1996)

2.6.4 Penilaian dan Interpretasi Hasil

Setiap dampak yang dianalisis dilakukan *valuation* kemudian diinterpretasi sesuai dengan kategori yang digunakan. Hasil dari analisis akan digunakan untuk mengevaluasi setiap proses untuk membantu dalam pemilihan proses yang akan digunakan. (Curran, M. A., 1996)

2.7 LIFECYCLE BIODIESEL BERBASIS CPO

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai setiap fase yang terdapat dalam analisis *lifecycle* biodiesel, termasuk produk turunan CPO lainnya. Fase yang terdapat pada siklus *lifecycle* biodiesel antara lain alih fungsi lahan, penanaman dan produksi kelapa sawit, produksi CPO, proses *refining* CPO, proses produksi biodiesel. (Wicke, B. et al., 2008)

2.7.1 Alih Fungsi Lahan

Tahap pertama *lifecycle* biodiesel adalah alih fungsi lahan yang diperlukan untuk membuat perkebunan kelapa sawit. Alih fungsi lahan merupakan perubahan satu tipe lahan ke tipe lahan lainnya, seperti hutan menjadi perkebunan kelapa sawit. Perubahan fungsi lahan mempengaruhi cadangan karbon

(*carbon stocks*) yang terdapat pada tanaman (*standing biomass*), *biomass* di dalam tanah, karbon tanah (*soil carbon*), dan karbon yang tersimpan di dalam zat organik mati (*dead oranic matter*). (Wicke et al., 2008)

Dalam perhitungan siklus *lifecycle* perubahan cadangan karbon akibat alih fungsi lahan sangat berpengaruh terhadap interpretasi hasil. Perbandingan fisiologis kelapa sawit dengan hutan tropis dapat dilihat pada Tabel 2.2. Data Alih fungsi lahan untuk berbagai jenis lahan ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Parameter fisiologis kelapa sawit dan hutan tropis (Tan, K.T., 2009)

| Parameter | Kelapa Sawit | Hutan Tropis |
|--|--------------|--------------|
| Gross assimilation (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 161,0 | 163,5 |
| Total respiration (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 96,5 | 121,1 |
| Net assimilation (tonnes CO ₂ /ha/yr) | 64,5 | 42,4 |
| Leaf area index | 5,6 | 7,3 |
| Photosythetic efficiency (%) | 3,2 | 1,7 |
| Radiation conversion efficiency (%) | 1,7 | 0,9 |
| Standing biomass (tonnes/ha) | 100,0 | 431,0 |
| Biomass increment/year (tonnes) | 8,3 | 5,8 |
| Dry matter productivity/year (tonnes) | 36,5 | 25,7 |

Tabel 2.3. Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|--|-----------------------|-------|
| Kandungan biomassa di atas tanah (AGB) sebelum konversi | | |
| Hutan tropis (<i>tropical rain forest</i>) | tdm ha ⁻¹ | 350 |
| Padang rumput (<i>degraded land</i>) | tdm ha ⁻¹ | 6,2 |
| AGB tanaman kelapa sawit setelah 25 tahun | tdm ha ⁻¹ | 118 |
| Kandungan biomassa di bawah tanah (BGB) sebelum konversi | | |
| Hutan tropis (<i>tropical rain forest</i>) | tC ha ⁻¹ | 41 |
| Padang rumput (<i>degraded land</i>) | tC ha ⁻¹ | 5 |
| BGB tanaman kelapa sawit setelah 25 tahun | tC ha ⁻¹ | 19 |
| <i>Carbon faction</i> | | |
| Hutan hujan tropis | kgCt ⁻¹ dm | 490 |
| Tanaman Kelapa Sawit | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| Padang rumput | kgCt ⁻¹ dm | 400 |

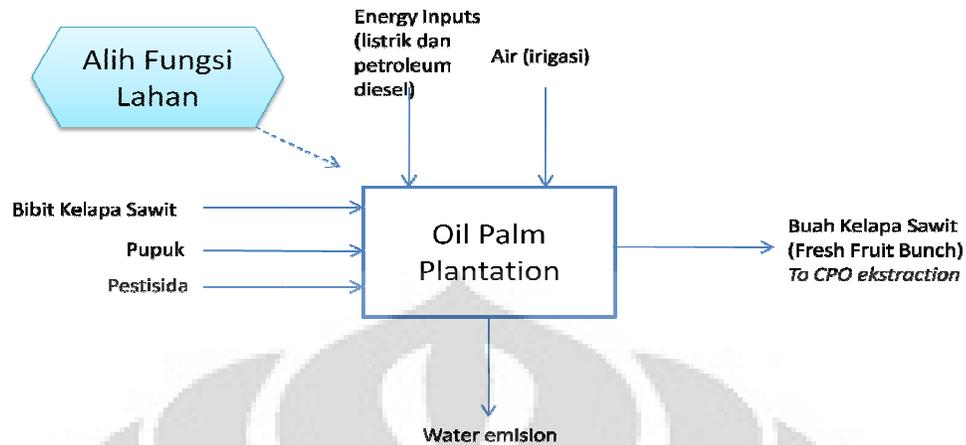
Tabel 2.3 Data alih fungsi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (lanjutan)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|--|--|-------|
| Kandungan karbon pada daun dan batang mati | | |
| Sebelum Konversi | tC ha ⁻¹ | 2,1 |
| Setelah Konversi | tC ha ⁻¹ | 0 |
| Tanaman Kelapa Sawit | tC ha ⁻¹ | 5,9 |
| Karbon tanah organik | | |
| Reference | tC ha ⁻¹ | 60 |
| Tanaman Kelapa Sawit | tC ha ⁻¹ | 40 |
| Faktor Emisi | | |
| C lahan gambut | tC ha ⁻¹ thn ⁻¹ | 10,7 |
| N ₂ O dari lahan gambut | kg N ₂ O-N ha ⁻¹ thn ⁻¹ | 8 |
| periode alokasi emisi dari LUC | tahun | 25 |
| umur tanaman kelapa sawit | tahun | 25 |
| yield areal kebun kelapa sawit | ton FFB/ha tahun | 20 |
| Laju ekstraksi CPO dari kelapa sawit | ton CPO/ton FFB | 0,23 |
| Efisiensi penyulingan CPO | ton RBDPO/ton CPO | 0,95 |
| Efisiensi konversi CPO menjadi biodiesel | ton biodiesel/ton RBDPO | 0,96 |
| net heating value biodiesel | MJ/kg biodiesel | 40,2 |

*dm: *dry matter*; RBDPO: *refined bleached deodorized palm oil*

2.7.1 Perkebunan Kelapa Sawit

Pada bagian perkebunan dari penelitian *lifecycle* ini akan mengidentifikasi bahan-bahan dan lingkungan yang mendukung dalam proses perolehan buah kelapa sawit. Identifikasi ini termasuk bahan-bahan kimia dan bahan bakar yang digunakan, emisi yang dihasilkan, termasuk juga manufaktur, pengepakan, dan proses dari bahan-bahan yang digunakan dalam proses penanaman kelapa sawit sampai saat panennya. Skema proses penanaman kelapa sawit serta aliran material dan energi yang tercakup, ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Skema proses penanaman kelapa sawit

Dari skema proses produksi kelapa sawit pada Gambar 2.4, beberapa aliran input yang mengemisikan gas rumah kaca/GHG (contoh: pupuk dan diesel) dibutuhkan untuk memproduksi buah kelapa sawit (FFB). Setiap kendaraan dan mesin operasional yang digunakan dalam perkebunan membutuhkan bahan bakar fosil. Besarnya emisi yang dihasilkan dapat dihitung dari jumlah bahan bakar fosil yang dibutuhkan. Tanaman kelapa sawit membutuhkan unsur hara dalam jumlah besar untuk pertumbuhan vegetatif dan generatif. (Wicke et al., 2008)

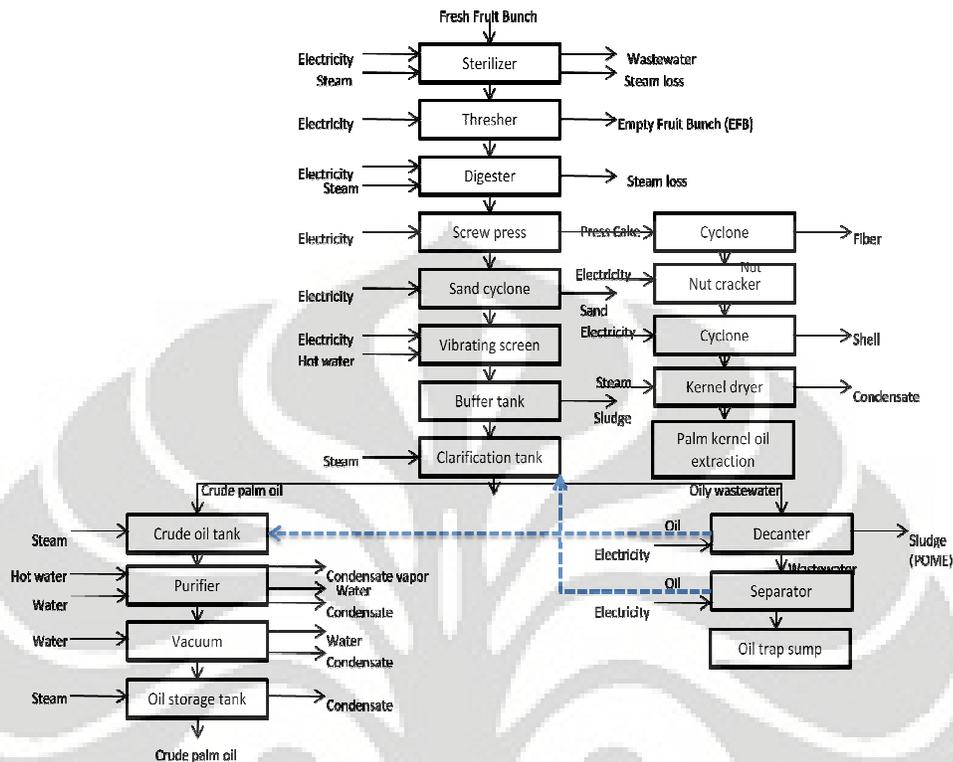
Pupuk nitrogen yang digunakan dalam penanaman kelapa sawit mengakibatkan emisi GHG selama proses produksinya serta emisi N_2O saat penggunaannya pada lahan. Emisi yang dihasilkan dari pupuk nitrogen dapat dihitung dengan mengalikan jumlah pupuk nitrogen spesifik yang digunakan dengan besarnya faktor emisi dari proses produksi pupuk tersebut. Data faktor emisi dari pupuk nitrogen dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Faktor emisi pupuk nitrogen (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Unit | Value |
|---------------------------|--|-------|
| EF fertilizer production | | |
| Ammonium sulphate | $kgCO_2\text{-eq } kg^{-1} N \text{ produced}$ | 2.7 |
| Urea | $kgCO_2\text{-eq } kg^{-1} N \text{ produced}$ | 1.9 |
| EF fertilizer application | | |
| Ammonium sulphate | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 70 |
| Urea | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 79 |
| Organic fertilizer | $Kg N ha^{-1} yr^{-1}$ | 31 |

*EF: emission factor

2.7.2 Proses Pembuatan CPO



Gambar 2.5. Skema proses ekstraksi CPO

Pembuatan CPO disini maksudnya adalah mengolah kelapa sawit untuk memperoleh minyak sawit yang berasal dari daging buah (*pericarp*). Produk yang dihasilkan selain CPO merupakan produk samping ataupun residu. Gambar skema proses ekstraksi CPO dapat dilihat pada Gambar 2.5. Uraian proses pembuatan CPO adalah sebagai berikut.

Tandan buah segar (FFB) dari kebun diangkut ke pabrik menggunakan truk dan trailer yang ditarik dengan *wheel tractor*. FFB selanjutnya akan dibersihkan dari pasir dan kotoran lainnya di *loading ramp* dengan cara menyiramkan air dari atas. Setelah bersih, FFB dimasukkan ke dalam lori-lori rebusan berkapasitas 2,5 ton FFB. Lori-lori berisi FFB dimasukkan ke dalam ketel rebusan, FFB tersebut dipanaskan menggunakan uap air dengan tekanan 2,6 kg/cm² kurang lebih selama 1 jam. Proses perebusan (sterilisasi) ini bertujuan diantaranya untuk memudahkan buah lepas dari tandan, menurunkan kadar air daging buah dan memperbaiki proses penjernihan minyak. Lori-lori tandan minyak yang sudah direbus, ditarik keluar, lalu diangkat menggunakan *hoisting*

crane dan diletakkan di atas mesin penebah (*thresher*) dengan tujuan melepaskan buah dari tandannya. Buah yang lepas dari mesin bantingan langsung dimasukkan ke dalam ketel adukan (*digester*). Ketel ini memiliki dinding rangkan dan as putar yang dilengkapi dengan pisau-pisau pengaduk, buah dihancurkan sehingga daging buah (*pericarp*) pecah dan terlepas dari bijinya. Temperatur massa buah diupayakan lebih rendah dari 90°C dengan waktu selama 20-25 menit.(Sunarko, 2007)

Setelah itu dilakukan proses pengempaan (*pressing*) untuk mengambil minyak dari massa adukan buah di dalam mesin *press* secara bertahap dengan bantuan pisau-pisau pelempar dari ketel ke adukan. Minyak yang keluar ditampung di sebuah talang dan dialirkan ke *crude oil tank*. Selanjutnya, minyak yang masih mengandung *sludge* (lumpur, air, dan kotoran lainnya) akan dipisahkan dengan metode sentrifugal dan pengabutan. Minyak hasil proses inilah yang bisa disebut dengan *crude palm oil* (Sunarko, 2007).

Unit produksi CPO menghasilkan limbah cair (*Palm oil mill effluent/POME*) serta produk samping/limbah (*by-product*) dalam jumlah yang besar, seperti tandan buah kosong (*Empty Fruit Bunch/EFB*), serat, cangkang buah, tandan, dan abu dari boiler. Hanya 23% dari bahan mentah yang menjadi produk, sisanya merupakan limbah/*by-product*. Sebagian besar *by-product* dapat digunakan untuk proses produksi atau industri yang lainnya. Akan tetapi, sebagian limbah padat tersebut harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang. Penyimpanan dan penanganan material *byproduct* serta teknik penggunaan lahan dengan tidak benar menyebabkan pencemaran pada lingkungan, yaitu menimbulkan debu dan bau tidak sedap yang mengganggu (Chavalparit, 2006).

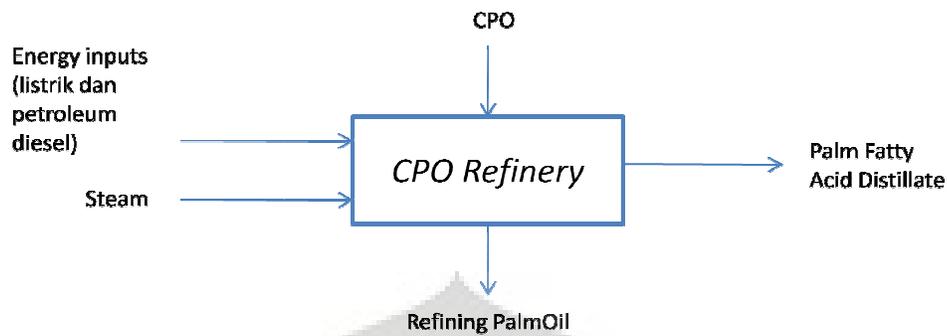
Unit produksi CPO dapat mencukupi kebutuhan energinya sendiri dengan memanfaatkan banyaknya material biomassa, yang berasal dari limbah padat, untuk digunakan sebagai bahan bakar *steam boiler*. Permasalahan yang timbul adalah pembakaran dari bahan bakar biomassa ini menghasilkan emisi karbon dioksida dan asap hitam. Emisi asap dari biomassa ini mengandung partikulat, CO₂, NO_x, dan CO. Akan tetapi hal ini dapat dicegah dengan menggunakan *cyclone* untuk menghilangkan partikulat pada emisi gas pembakaran (Chavalparit, 2006).

Pada unit ekstraksi CPO, emisi GHG dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil dan POME, sementara kredit emisi didapatkan dari *by-product*. Kredit emisi GHG hanya dihasilkan jika *byproduct* digunakan untuk menggantikan produk lain diluar batasan sistem (contoh: *kernel* digunakan untuk menghasilkan surfaktan dan pakan ternak). Kredit emisis GHG didapatkan dengan asumsi *byproduct* tersebut dapat menggantikan bahan produk setara yang berbahan baku petrokimia. (Wicke, B. et al., 2008)

Pada unit pengolahan *wastewater*/POME, bagian permukaan dari limbah tersebut menghasilkan gas metana dan karbon dioksida, dan melepaskannya ke udara. Karbon dioksida dan metana, yang biasa disebut dengan gas rumah kaca (*green house gases*/GHGs), dapat mengakibatkan pemanasan global. Hasil analisis kuantitas GHGs yang dihasilkan oleh kolam anaerobik menunjukkan metana dan CO₂ yang dihasilkan sejumlah 9 dan 3,7 m³/ton TBS atau sekitar 6,3 dan 2,6 juta m³/tahun. POME mengandung lemak dan minyak dalam jumlah besar, yang tidak dapat terdekomposisi oleh bakteri anaerobik pada keadaan tersebut. Lemak dan minyak tersebut akan terakumulasi dan menutupi permukaan kolam air. Oleh karena itu, limbah industri CPO merupakan masalah serius terhadap lingkungan dan masyarakat yang tinggal disekitarnya (Chavalparit, 2006). Emisi GHG yang dihasilkan dari POME bergantung dari faktor emisi dari gas yang dihasilkan. (Wicke, B. et al., 2008)

2.7.3 Proses Penyulingan CPO

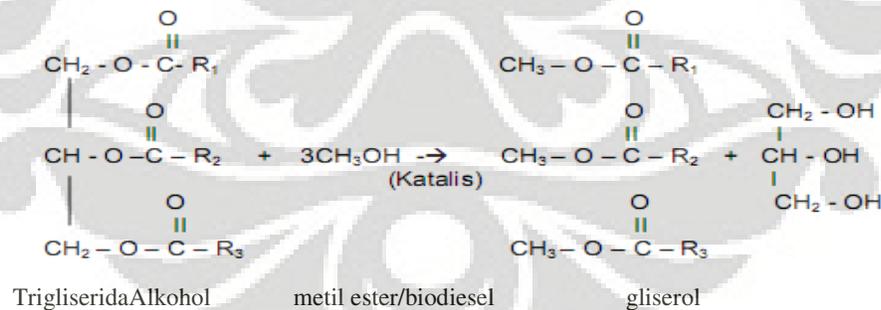
Olein (palm olein) merupakan bahan baku pembuatan produk oleokimia. Olein dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel selain CPO. Olein merupakan hasil fraksinasi dari CPO setelah dikristalisasi pada temperatur tertentu. Skema proses *refining* CPO dapat dilihat pada Gambar 2.6. Proses penyulingan CPO ini juga bertujuan untuk meningkatkan kualitas *edibility* dari CPO sehingga dapat diproduksi menjadi produk pangan. Karakteristik fisik dari olein sangat berbeda dari CPO. Olein berwujud lebih cair pada suhu kamar, mempunyai rantai gliserida yang lebih pendek dan dapat tercampur sempurna dengan minyak nabati lainnya. (Pantzaris, 1997)

Gambar 2.6. Skema proses *refining* CPO

Proses *refining* CPO membutuhkan steam dan energi listrik. Steam dan listrik dapat dihasilkan dari generator diesel maupun dengan memanfaatkan pembakaran biomass/byproduct (Wicke et al., 2008).

2.7.4 Konversi Bahan Baku Menjadi Biodiesel

Biodiesel dibuat melalui suatu proses kimia yang disebut transesterifikasi (*transesterification*) dimana reaksi antara senyawa ester (CPO/minyak kelapa sawit) dengan senyawa alkohol (*methanol*). Proses ini menghasilkan dua produk yaitu metil esters (biodiesel) dan gliserol (Rahayau, 2007). Reaksi kimia pada proses pembuatan biodiesel dapat dilihat pada Gambar 2.7.

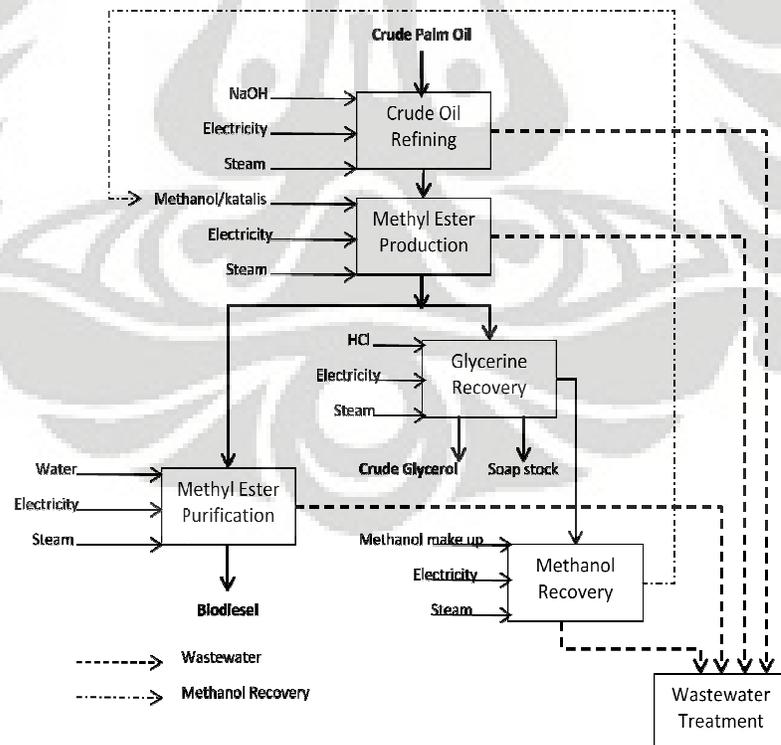


Gambar 2.7. Reaksi transesterifikasi

Proses produksi biodiesel yang paling umum digunakan saat ini adalah proses dengan katalis alkali (Kiwjaroun et al., 2009). Bahan baku utama pembuatan biodiesel adalah CPO atau olein dengan bahan pendukung metanol dan katalis NaOH. Metanol merupakan alkohol yang digunakan dalam proses

transesterifikasi dilihat dari segi harganya yang murah, sifatnya yang polar dan merupakan rantia alkohol terpendek. Metanol dapat bereaksi cepat dengan trigliserida dan NaOH dapat dengan mudah larut di dalamnya. Untuk menyelesaikan proses transesterifikasi secara stoikiometri diperlukan rasio molar alkohol:trigliserida = 3:1. Akan tetapi, karena reaksi transesterifikasi ini *reversible* maka dibutuhkan alkohol lebih banyak dari pada stoikiometrinya (Prihandana, 2006). Secara garis besar tahapan produksi biodiesel ditunjukkan pada Gambar 2.8.

Kondisi operasi dari proses katalis alkali telah banyak diteliti dari berbagai aspek (Kiwjaroun et al., 2009). Dari studi tersebut didapatkan rekomendasi kondisi reaksi optimum yaitu mendekati titik didih dari alkohol serta menggunakan perbandingan molar alkohol terhadap trigliserida sebesar 6:1. Kondisi ini dapat menghasilkan konversi biodiesel antara 90-98% dalam 90 menit. Kondisi operasi ini telah diadaptasi untuk reaktor batch dengan kapasitas 20.000 liter, dimana *feed* dipanaskan terlebih dahulu hingga 55 °C dan reaktor bereaksi pada suhu 50-60 °C untuk 8 jam dengan rasio molar alkohol terhadap palm oil yang digunakan adalah 5:1.



Gambar 2.8. Diagram alir proses produksi biodiesel

Proses katalis alkali sangat sensitif terhadap air dan asam lemak bebas. Kandungan air dalam *CPO/feed* dapat menimbulkan saponifikasi ester dalam kondisi alkali dan menghasilkan *soap* dan air. Dalam konsentrasi yang rendah, kandungan asam lemak bebas dapat diabaikan. Akan tetapi bila konsentrasinya lebih besar dari 5%, *soap* akan menghambat pemisahan gliserol dari biodiesel dan membentuk emulsi.

Emisi GHG yang dihasilkan dari proses produksi biodiesel berasal dari penggunaan bahan bakar fosil, produksi dan penggunaan metanol serta katalis. Kredit emisi bisa didapatkan dari *byproduct* gliserin yang diasumsikan menggantikan penggunaan gliserin sintetis. Parameter dan nilai emisi faktor yang terdapat pada proses produksi biodiesel dapat dilihat pada Tabel 2.5. (Wicke et al., 2008)

Tabel 2.5. Parameter dan faktor emisi pada proses produksi biodiesel (Wicke et al., 2008)

| Parameter | Satuan | Nilai |
|------------------------------------|---|-------|
| Densitas biodiesel | kg m ⁻³ | 880 |
| Efisiensi konversi | Kg PME t ⁻¹ CPO | 960 |
| Kebutuhan energi transesterifikasi | kWh m ⁻³ PME | 250 |
| Emisis metanol | Kg CO ₂ -eq t ⁻¹ methanol | 786 |
| Katalis (NaOH) | Kg CO ₂ -eq kg ⁻¹ NaOH | 1,2 |
| Penggunaan akhir biodiesel | g CO ₂ -eq MJ ⁻¹ PME | 5,9 |

2.8 PEMANFAATAN PRODUK SAMPING BIODIESEL

Setiap tahapan proses dalam *lifecycle* biodiesel menghasilkan produk samping maupun limbah/residu yang masih bisa dimanfaatkan atau diproses lebih lanjut untuk mendapatkan nilai jual lebih ataupun kredit emisi terkait dengan pemanfaatannya. Produk samping yang dihasilkan dari *lifecycle* biodiesel terdapat pada proses ekstraksi CPO, penyulingan CPO, dan transesterifikasi biodiesel. Produk samping yang dihasilkan dari setiap proses terdapat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Produk samping pada setiap tahapan proses *lifecycle* biodiesel

| Proses | produk samping |
|--------------------------|-------------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> |
| | <i>palm shell</i> |
| | EFB |
| | PKO |
| | PKE |
| | POME slurry |
| | POME biogas |
| Proses refining | PFAD |
| Proses transesterifikasi | gliserol |

*EFB: *empty fruit bunch*; PKO: *palm kernel oil*; PKE: *palm kernel expeller*; POME: *palm oil mill effluent*; PFAD: *palm fatty acid distillate*

2.8.1 Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Bahan Bakar Biomassa

Tandan buah kosong (EFB), cangkang kelapa sawit (PKS), serat kelapa sawit (*fiber*), dan cangkang inti sawit (PKE) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit. PKS dan *fiber* yang dihasilkan, biasanya digunakan untuk sebagai bahan bakar boiler, sementara EFB dibiarkan agar terdekomposisi secara alami. Residu biomassa memiliki kandungan energi yang cukup sebagai bahan bakar boiler. Nilai kandungan energi dan *moisture* dari EFB, *fiber* dan PKS dapat dilihat pada Tabel 2.7. (Panapanaan, V. et al, 2009)

Tabel 2.7 Data *heating value* dan *moisture* pada produk samping (Panapanaan, V. et al, 2009)

| | HHV (MJ/kg) | Moisture (%) | LHV (MJ/kg) |
|-------|-------------|--------------|-------------|
| EFB | 19.40 | 60.00 | 9.90 |
| Fibre | 18.20 | 40.00 | 5.80 |
| PKS | 19.30 | 10.00 | 17.10 |

Karakteristik bahan bakar dari EFB tidak cukup baik sebagai bahan bakar boiler. EFB memiliki nilai *heating value* rendah dan kandungan *moisture* tinggi, sehingga EFB tidak digunakan sebagai bahan bakar boiler. Di sisi lain, PKS dan *fiber* memiliki karakteristik yang masih dapat diterima untuk digunakan langsung sebagai bahan bakar (Panapanaan, V. et al, 2009). Bahan bakar biomassa ini kemudian dapat diaplikasikan ke dalam sistem untuk menghasilkan energi listrik. Hal ini akan menghasilkan kredit emisi ke dalam sistem *lifecycle* biodiesel.

2.8.2 Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Kompos/Pupuk

Fasilitas *green waste composting* merupakan komponen pemeliharaan dari sistem manajemen agrikultural untuk memanfaatkan material limbah organik dari kelapa sawit. Material limbah organik yang dapat dimanfaatkan untuk proses *composting* adalah EFB, POME, dan *decanter sludge*. Tujuan dari pemanfaatan ini adalah untuk mengurangi potensi pencemaran dari limbah agrikultural organik terhadap perairan, baik air tanah maupun permukaan. Selain itu, produk pupuk organik/kompos yang dihasilkan dapat digunakan untuk menggantikan kebutuhan pupuk organik untuk penanaman kelapa sawit (Panapanaan, V. et al, 2009). EFB merupakan salah satu limbah organik yang memiliki kandungan nutrient untuk dimanfaatkan sebagai pupuk. Komposisi nutrient pada EFB dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Komposisi nutrient pada tandan buah kosong kelapa sawit (Chavalparit, 2006)

| Nutrient | Kandungan Nutrien | Unit |
|----------|-------------------|----------|
| N | 3,20 | kg/t EFB |
| P | 0,38 | kg/t EFB |
| K | 9,60 | kg/t EFB |

2.8.3 Recovery Gas Metana dari POME dengan Produksi Energi

POME merupakan limbah cair dari proses ekstraksi CPO memiliki kandungan zat organik yang sangat tinggi dengan rata-rata level BOD dan COD sebesar 25000 dan 55000 mg/liter. Biasanya POME diolah terlebih dahulu di dalam kolam/danau terbuka sebelum kemudian dibuang ke perairan. Dekomposisi anaerobik dari zat organik di dalam kolam disertai juga dengan produksi biogas yang memiliki kandungan metana yang cukup besar. Biogas tersebut kemudian terlepas ke atmosfer dan tidak terkontrol. Biogas ini memiliki dampak potensi gas rumah kaca yang cukup besar. Oleh karena itu, biogas ini harus dicegah agar tidak teremisikan ke udara. Selain itu, biogas ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Biogas ini dimanfaatkan dengan menggunakan fasilitas pengolahan limbah tertutup agar biogas yang terproduksi dari POME dapat dikumpulkan yang kemudian digunakan untuk pembakaran generator. (Chavalparit, 2006)

2.8.3 Pemanfaatan Minyak Inti Sawit Sebagai Bahan Baku Surfaktan

Minyak inti kelapa sawit (PKO) didapatkan dari bagian *endosperm* atau biji kelapa sawit. PKO dihasilkan dengan proses penggilingan biji/*kernel* dan kemudian dipisahkan dari *expeller* (PKE). PKO dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku surfaktan. Dalam proses ini PKO diasumsikan sebagai bahan baku produksi surfaktan alkohol etoksilat dan sebagai produk akhir, alkohol etoksilat dari PKO ini menggantikan 3 mol alkohol etoksilat (AE) petrokimia. Kredit emisi dihasilkan dari perbedaan emisi faktor dari AE PKO dan AE petrokimia. Emisi faktor AE PKO dan AE petrokimia dapat dilihat pada Tabel 2.9. (Wicke, B. 2008)

Tabel 2.9 Emisi Faktor AE PKO dan AE Petrokimia (Wicke, B., 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---------------------------------|-------|---------------------------------------|
| Produksi Alkohol Etoksilat PKO | 1,7 | t AE PKO/t PKO |
| EF Alkohol Etoksilat PKO | 2,7 | t CO ₂ -eq/t AE PKO |
| EF Alkohol Etoksilat petrokimia | 5,2 | t CO ₂ -eq/t AE Petrokimia |
| EF Surfaktan mix | 3,4 | t CO ₂ -eq/t surfaktan |

2.8.4 Potensi Pemanfaatan PFAD

Proses penyulingan kelapa sawit menghasilkan minyak kelapa sawit yang telah dipisahkan dari asam lemak atau *fatty acid*. Produk samping dari proses ini adalah PFAD (*palm fatty acid distillate*), yang merupakan hasil pemisahan asam lemak dan berjumlah kurang dari 5% berat total CPO yang diproses. PFAD biasa digunakan untuk memproduksi sabun, pakan ternak, plastik, dan produk intermediate lainnya untuk industry oleokimia. PFAD juga memiliki kandungan energi yang cukup tinggi dan dapat dibakar bersama gas alam atau bahan bakar minyak untuk membangkitkan tenaga listrik dengan generator. PFAD dapat memberikan kredit emisi dari produksi energi untuk menggantikan energi fosil, ataupun menggantikan penggunaan bahan baku sabun dan deterjen. (Wicke, B., 2008)

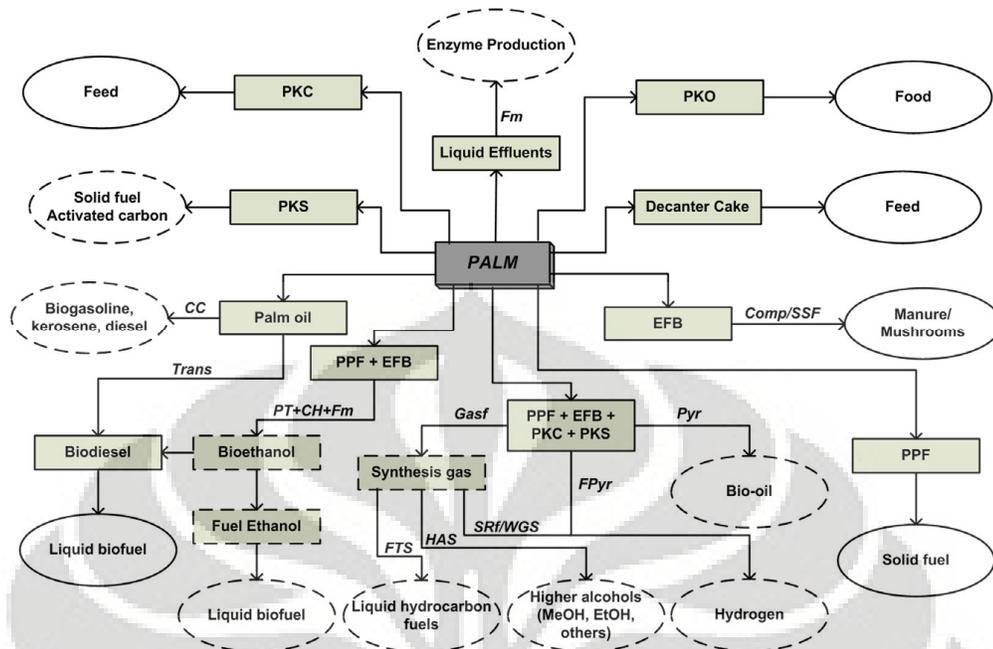
2.8.4 Potensi Pemanfaatan Gliserol

Gliserol merupakan produk samping dari reaksi transesterifikasi biodiesel. Dari produksi 1 liter biodiesel, 84 gram gliserol juga ikut terproduksi. Gliserol dapat dimurnikan lebih lanjut menjadi gliserin yang dapat digunakan di dalam berbagai jenis industri proses, seperti farmasi, makanan dan kosmetik. Akan tetapi, dengan ekspansi produksi industri biodiesel, suplai gliserol akan jauh melebihi permintaan. Kelebihan suplai menyebabkan ketidakstabilan dari harga pasar gliserin. Saat harga gliserin turun, gliserol dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak. Akan tetapi, sebagai pengganti bahan baku gliserin, gliserol dapat memberikan kredit emisi lebih besar dibandingkan sebagai pengganti pakan ternak. (Wicke, B., 2008)

Dalam penelitian yang telah dilakukan Departement Pertanian Amerika Serikat (USDA), kandungan energi gliserol jauh lebih kecil dibandingkan minyak nabati ataupun lemak hewan dan hampir mendekati kandungan energi jagung. Gliserol dapat diformulasikan dengan gandum atau pun kedelai untuk digunakan sebagai pakan ternak. Kredit emisi dari pemanfaatan gliserol dapat dihasilkan dari substitusi gliserin sintetis ataupun gandum. (Wicke, B., 2008)

2.8.5 Pemanfaatan Produk Samping sebagai Bahan Baku *Biofuel/Bioenergy*

Proses produksi biodiesel berbasis kelapa sawit menghasilkan produk samping yang memiliki potensi untuk mendapatkan nilai tambah (*added value*). Produk samping dari biodiesel dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku *biofuel* (Gutierrez, L.F., 2009). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.9 dengan potensi pemanfaatan sebagai *biofuel*. EFB merupakan residua atau produk samping yang paling banyak dihasilkan dari proses ekstraksi kelapa sawit yaitu 0,27 ton EFB/ton FFB. Seperti yang telah dibahas pada sub-bab 2.8.4, EFB memiliki kandungan *moisture* yang cukup besar sehingga tidak dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar secara langsung.



*Garis sambung menyatakan pemanfaatan yang telah dilakukan, garis putus-putus menyatakan potensi pemanfaatan lebih lanjut.

**Gasf: gasification, Pyr: pyrolysis, FPyr: fast pyrolysis, Comp: composting, SSF: solid-stage fermentation, SRf: steam reforming, WGS: water-gas-shift reaction, FTS: Fischer-Tropsch synthesis, PT: pretreatment, CH: cellulose hydrolysis, Fm: fermentation, Trans: transesterification, CC: catalytic cracking, HAS: higher alcohol synthesis.

Gambar 2.9 Produk utama, produk samping, dan residu yang diperoleh dari kelapa sawit (Gutierrez, L.F., 2009)

Serat kelapa sawit, cangkang kelapa sawit dan *Palm kernel expeller* (PKE) dapat dimanfaatkan sebagai bioetanol dengan proses hidrolisis selulosa dan fermentasi. Proses ini dapat dilakukan karena produk samping ini memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang cukup untuk proses fermentasi. (Gutierrez, L.F., 2009)

EFB memiliki kandungan *lignocellulosics* yang dapat dimanfaatkan menjadi bio-oil melalui proses pirolisis. Bio-oil yang dihasilkan merupakan campuran dari senyawa asam, alkohol, aldehida, keton, ester, *heterocyclic derivatives* dan fenol. Bio-oil ini kemudian dapat dikonversi menjadi berbagai biofuel dengan menggunakan katalisis anorganik. (Gutierrez, L.F., 2009)

Palm Kernel Oil (PKO) merupakan senyawa trigliserida yang dapat diperoleh dari proses penggilingan biji kelapa sawit. PKO biasanya dimanfaatkan sebagai bahan baku surfaktan ataupun makanan. Akan tetapi, PKO juga dapat dimanfaatkan menjadi biodiesel melalui proses yang sama dengan CPO.

Ketika *fast pyrolysis* dilakukan pada gliserol, yang dihasilkan dari proses transesterifikasi biodiesel, gas hydrogen dapat dihasilkan dengan menggunakan waktu tinggal rendah dan katalis yang tepat pada reaktor. Produk bahan bakar yang lain dapat diproduksi jika menggunakan proses gasifikasi. Pembentukan *syngas* merupakan tahap awal yang diperlukan. Selanjutnya dengan proses *steam reforming* yang dilanjutkan dengan *water-gas-shift*, gas hidrogen dapat dihasilkan. (Gutierrez, L.F., 2009)

Berbagai jenis *biofuel* yang diproduksi di dalam satu bahan baku merupakan konsep *biorefinery*. Dengan berbagai potensi yang telah dijelaskan, produk samping kelapa sawit dapat dimanfaatkan dengan pendekatan *biorefinery*. Dalam pemanfaatan produk samping menjadi *biofuel*, parameter yang harus diperhitungkan adalah *yield* dan kebutuhan energi dari setiap proses produksi *biofuel*. *Yield* dan kebutuhan energi masing-masing proses ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 *Yield* dan kebutuhan energi proses produksi biofuel (Spath, P.L., 2003)

| Biofuel | Yield | Fossil energy ratio | Primary energy ratio |
|-----------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| biomass to ethanol | 0,85 | 4,3 | 0,35 |
| biomass to biooil | 0,72 | 15,00 | 0,29 |
| biomass to H2 | 0,0785 | 17,00 | 0,53 |
| biomass to biodiesel | 0,96 | 4,22 | 0,81 |

2.9 PERKEMBANGAN ANALISIS *LIFECYCLE* BIOFUEL

Seiring berkembangnya penelitian dan pengembangan teknologi produksi *biofuel*, analisis *lifecycle* telah banyak digunakan untuk membandingkan teknologi yang telah ada dengan yang baru. Selain itu analisis *lifecycle* untuk digunakan sebagai pertimbangan pengambilan keputusan dalam pemilihan teknologi maupun proses produksi yang lebih berkelanjutan. Pada Tabel 2.11. terdapat perbandingan dari studi analisis *lifecycle* yang pernah dilakukan.

Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA

| Nama | Parameter | Hasil penelitian |
|-----------------------------|--|--|
| Seehan, J. et al (1998) | Perbandingan siklus <i>lifecycle</i> biodiesel dengan petroleum diesel untuk penggunaan bus kota | Biodiesel memiliki kebutuhan energi fosil dan emisi GHGs yang lebih rendah dibandingkan dengan petroleum diesel (35% reduksi dibandingkan dengan petroleum diesel). Konsumsi energi <i>lifecycle</i> tereduksi 95% dengan penggunaan B100 pada bus kota. |
| Tan, Culaba (2003) | Implikasi intaris karbon dioksida dari biodiesel berbasis kelapa di Filipina | Penggunaan biodiesel mereduksi hampir 80% dari emisi CO ₂ jika residu digunakan untuk memenuhi kebutuhan panas dari Plant biodiesel tersebut. 90% untuk penggunaan residu sebagai sumber energi. |
| Pascual, L.M. (2004) | Perbandingan LCA biodiesel dengan konvensional diesel untuk pengaplikasian pada transportasi mobil dan boiler, serta pengaplikasian pemanfaatan <i>coproduct</i> pada sistem | Pemanfaatan <i>coproduct</i> pada automotif dan boiler menghasilkan pengurangan total emisi yang dihasilkan hingga 60%. Sedangkan penggunaan biodiesel mereduksi hingga 96% pada konsumsi total energi. |
| Orathai Chavalparit (2006) | Sistem produksi CPO, proses pengolahan dan limbah, pemanfaatan <i>byproduct</i> pada industri CPO. | Aplikasi pendekatan <i>clean technology</i> untuk produksi CPO. Sistem produksi CPO dengan alokasi limbah dan by-produk untuk mengurangi limbah yang dibuang ke lingkungan. |
| Zah, R. et al (2006) | Analisis <i>lifecycle</i> terhadap berbagai jenis biofuel dengan mengevaluasi emisi GHG dan polutan dari <i>lifecycle</i> biofuel tersebut. | Tidak semua biofuel dapat mengurangi dampak lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Biofuel dengan proses produksi dengan melakukan alih fungsi lahan memiliki dampak lingkungan yang lebih besar dibandingkan dengan energi fosil |
| Guiterez, L.F. et al (2008) | Proses integrasi produksi biodiesel dengan etanol yang dihasilkan dari <i>lignocellulosic</i> residu dari industri kelapa sawit. Proses integrasi ini dibandingkan dengan produksi dari etanol yang berasal dari tebu. | Proses integrasi ini menghasilkan nilai tambah dari proses produksi biodiesel. Yaitu mengurangi jumlah limbah padat yang dihasilkan dari proses produksi CPO. EFB dan <i>press fibre</i> yang dihasilkan memiliki kandungan <i>lignocellulosic</i> yang memadai untuk dikonversi menjadi etanol. |

Tabel 2.11. Perbandingan parameter dan hasil penelitian dalam studi LCA (lanjutan)

| Nama | Parameter | Hasil penelitian |
|----------------------------|---|---|
| Kiwjaroun, C. et al (2008) | Studi LCA yang membandingkan proses produksi biodiesel konvensional dengan teknologi superkritikal. | Proses superkritikal memiliki keunggulan pada besarnya yield dan emisi limbah dan polutan yang lebih sedikit dibandingkan dengan proses konvensional. Proses superkritikal memiliki kebutuhan energi yang lebih besar (38%) |
| Hugraha, Dadan (2007) | Analisis <i>lifecycle</i> biodiesel berbahan baku minyak sawit di Indonesia. Parameter dampak yang ditinjau adalah konsumsi energi <i>lifecycle</i> . | Jarak transportasi antar rantai suplai biodiesel mempengaruhi total energi primer dalam <i>lifecycle</i> . Hasil efisiensi energi <i>lifecycle</i> tertinggi diperoleh di Bandung (33%) |
| Andita (2008) | Simulasi Daur Hidup Energi dan Rantai Suplai Biodiesel untuk Sektor Transportasi di Propinsi DKI Jakarta. | Total energi primer biodiesel sangat sensitive terhadap kenaikan energi proses konversi biodiesel dibandingkan dengan kenaikan biaya lainnya seperti energi pengolahan lainnya. |



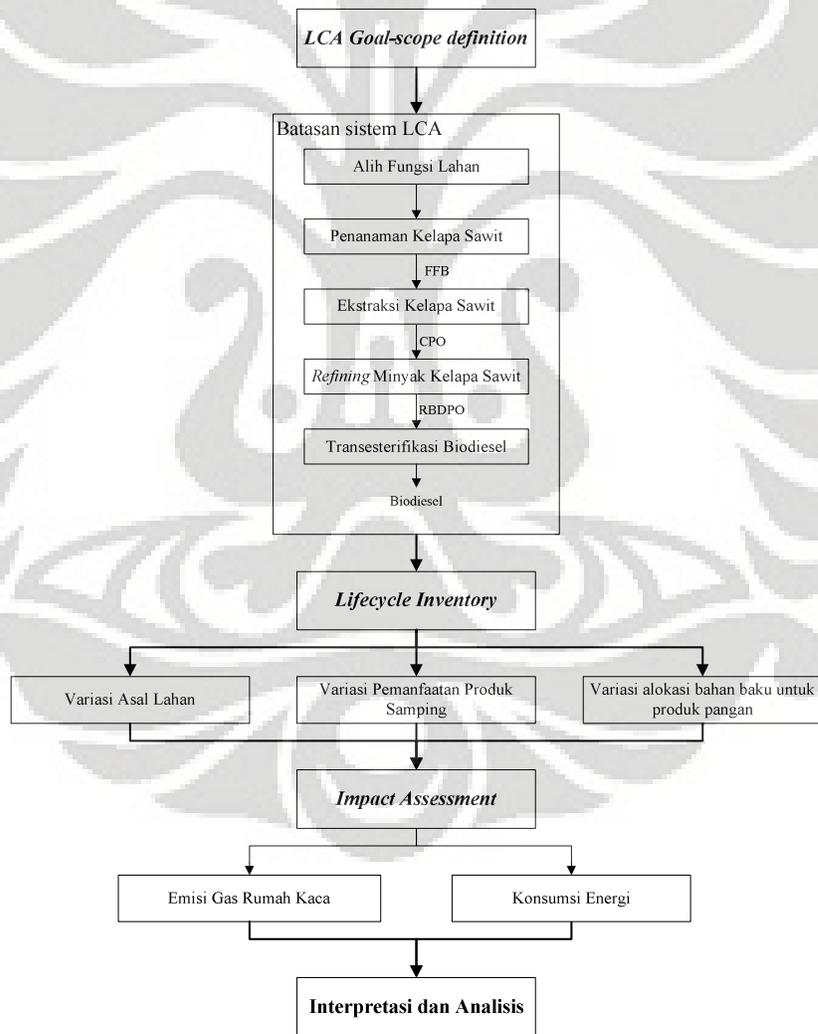
BAB 3

METODE PENELITIAN

Dalam permodelan dan simulasi *lifecycle* sistem produksi biodiesel ini akan digunakan rangkaian metode pelaksanaan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan tujuan dan lingkup dari penelitian yang dilakukan
2. Inventarisasi *lifecycle* biodiesel (*Lifecycle Inventory* – LCI)
3. Penilaian dampak (*Impact Assesment*)

Adapun diagram alir dari tahap metode pelaksanaan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.1 PENENTUAN TUJUAN DAN LINGKUP

Pada tahap ini dilakukan penentuan tujuan (*goal*) dan lingkup (*scope*) dari penelitian yang akan dilakukan. Penetapan *Goal* dan *scope* dari penelitian ini adalah untuk memberikan arahan dan batasan jelas dari penelitian ini. *Goal* dan *scope* yang ditentukan berpengaruh terhadap hasil evaluasi analisis *lifecycle*. *Goal* dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan memilih skema produksi biodiesel berdasarkan dampak potensi pemanasan global atau emisi gas rumah kaca dan total konsumsi energi dalam *lifecycle* untuk setiap 1 MJ biodiesel yang dihasilkan dari masing-masing alternatif skenario.

Scope sistem dari *lifecycle* biodiesel terdiri dari alih fungsi lahan yang dibutuhkan untuk membuat perkebunan kelapa sawit, produksi dari buah kelapa sawit, proses ekstraksi minyak kelapa sawit, penyulingan/*refining* minyak kelapa sawit, produksi biodiesel. Variasi dalam *lifecycle* biodiesel untuk masing-masing skenario dilakukan berdasarkan pendekatan teknologi yang diterapkan dalam pemanfaatan produk samping, jumlah pembagian alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan.

3.2 INVENTARISASI LIFECYCLE BIODIESEL (LCI)

Aliran massa dan energi input dan output dari setiap skenario produksi biodiesel diperoleh dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari proses pengumpulan data sebelumnya. Sebagian data input dan output, terutama dekontaminasi dan pembuangan limbah produk, diperoleh dengan mengasumsikan berdasarkan referensi terkait. Data masing-masing proses dari data sekunder kemudian diolah untuk mendapatkan inventarisasi neraca massa energi untuk produksi 1 MJ biodiesel. Parameter proses terkait dalam *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter proses pada lifecycle biodiesel

| Parameter | Keterangan | Unit | Value |
|--------------------|--|-----------------------|-------|
| T_{LUC} | periode alokasi emisi dari LUC | tahun | 25 |
| T_{plant} | umur tanaman kelapa sawit | tahun | 25 |
| Y | yield areal kebun kelapa sawit | ton FFB/ha tahun | 20 |
| OER | Laju ekstraksi CPO dari kelapa sawit | ton CPO/ton FFB | 0,23 |
| REF | Laju penyulingan minyak kelapa sawit | ton RBDPO/ton CPO | 0,95 |
| $conv_{biodiesel}$ | Efisiensi konversi CPO menjadi biodiesel | ton biodiesel/ton CPO | 0,96 |
| $NHV_{biodiesel}$ | net heating value biodiesel | MJ/kg biodiesel | 40,17 |

3.2.1 Alih Fungsi Lahan Menjadi Perkebunan Kelapa Sawit

Alih fungsi lahan merupakan perubahan suatu jenis lahan menjadi lahan lainnya (contoh: hutan menjadi kebun kelapa sawit). Setiap perubahan lahan mempengaruhi stok karbon dalam *standing biomass*, *belowground biomass*, dan karbon yang tersimpan pada materi sisa organik (*dead organic matter*). Penangkapan CO₂ pada tanaman kelapa sawit berlaku untuk CO₂ yang terdapat di dalam batang kelapa sawit dan dedaunan yang tidak terpotong pada saat pemanasan. Dengan pendekatan ini maka, diasumsikan bahwa buah kelapa sawit dan produk turunan maupun produk samping memiliki kandungan karbon netral, yang berarti kandungan dalam karbon dalam produk-produk tersebut tidak diperhitungkan sebagai emisi dalam analisis *lifecycle*. Untuk setiap kelapa sawit yang dipanen untuk memproduksi biodiesel memiliki kontribusi dalam emisi gas rumah kaca yang berasal dari alih fungsi lahan, praktek pembakaran dan penebangan lahan, serta asimilasi karbon dioksida oleh tanaman kelapa sawit (IPCC, 2006). Perhitungan jumlah perubahan stok karbon pada lahan akibat konversi lahan ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$L_{conversion} = C_{before}/T_{LUC} - C_{after}/T_{oil\ palm} \quad (3.1)$$

- $L_{conversion}$ = perubahan stok karbon untuk perubahan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- C_{before} = jumlah stok karbon sebelum perubahan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- C_{after} = jumlah stok karbon pada perkebunan kelapa sawit per satuan area per tahun (ton C/ha tahun)
- T_{LUC} = alokasi waktu dari emisi LUC (tahun)
- T_{plant} = umur tanaman kelapa sawit (tahun)

Total perubahan stok karbon akibat konversi lahan kemudian dikali dengan jumlah lahan kelapa sawit yang diperlukan untuk menghasilkan 1 MJ biodiesel setiap tahunnya. Sedangkan untuk emisi karbon akibat praktek pembukaan lahan dengan pembakaran lahan didapatkan dari jumlah gas rumah kaca yang dilepas dari pembakaran sejumlah lahan yang digunakan sebagai perkebunan kelapa sawit. Acuan yang digunakan sebagai *base case* asal lahan perkebunan pada *lifecycle* biodiesel adalah hutan tropis.

3.2.2 Penanaman Kelapa Sawit

Pada proses penanaman kelapa sawit LCI meliputi identifikasi aliran input output massa dan energi dari dan ke lingkungan yang terasosiasi pada proses ini. Aliran input dari lingkungan terdiri dari bibit kelapa sawit, bahan agrokimia (pupuk dan pestisida), air irigasi, bahan bakar diesel, dan listrik. Aliran output dari proses penanaman kelapa sawit adalah buah kelapa sawit/tandan buah segar (FFB). Dalam pengumpulan data, jumlah buah kelapa sawit yang dihasilkan ditetapkan sebesar 1 ton FFB. Salah satu parameter yang terkait mengenai penanaman kelapa sawit adalah produktivitas lahan atau *yield* produksi kelapa sawit. Dalam penelitian ini, asumsi *yield* kelapa sawit yang digunakan adalah sebesar 20 ton FFB/ha tahun, yang merupakan rata-rata produktivitas perkebunan kelapa sawit di Indonesia (Suryana, 2007).

Dari aliran input ini terdapat material yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (GHGs) seperti pupuk, pestisida dan *petroleum diesel*. Emisi yang dihasilkan dari penggunaan pupuk nitrogen baik secara langsung maupun tidak langsung, dihitung berdasarkan asumsi yang digunakan pada IPCC *guidelines* (IPCC, 2006). Sedangkan untuk emisi yang berasal dari penggunaan energi fosil, seperti listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil, dan bahan bakar diesel, dihitung dari jumlah kebutuhan energi untuk areal dan operasional perkebunan dan dikalikan dengan emisi faktor dari penggunaan energi tersebut. Seluruh aliran massa dan energi untuk memproduksi 1 ton FFB dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Aliran input output sistem penanaman kelapa sawit untuk 1 ton FFB (Andita, 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--|---------|------------------|
| Yield perkebunan kelapa sawit (Deptan, 2009) | 20 | ton FFB/ha tahun |
| Input Bahan Mentah | | |
| Bibit | 100 | Kg |
| Input Bahan Tambahan | | |
| Pupuk | | |
| - N | 16,12 | Kg |
| - P | 22,34 | Kg |
| - K | 9,23 | Kg |
| - Mg | 8,08 | Kg |
| - B | - | Kg |
| Insektisida | | |
| Herbisida | | |
| - Paraquat | 0,15 | Kg |
| - Glyphosate | 0,30 | Kg |
| Air | 1250,00 | m ³ |
| Input Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 27 | Liter |
| Listrik | 0,38 | kWh |
| Output/Produk | | |
| FFB | 1000 | Kg |

3.2.3 Proses Ekstraksi Minyak Kelapa Sawit

Pada proses ekstraksi kelapa sawit LCI meliputi aliran input massa energi dari lingkungan ke sistem dan produk dari sistem ke lingkungan. Aliran input material pada proses ini terdiri dari buah kelapa sawit (FFB), air, bahan bakar diesel, dan energi listrik. Aliran output terdiri dari produk utama, yaitu minyak kelapa sawit (CPO), produk samping (by-produk) dan limbah. Produk samping yang dihasilkan terdiri inti kelapa sawit (*kernel*), tandan buah kosong (EFB), serat buah kelapa sawit (*fiber*), cangkang kelapa sawit (*shell*), ampas dekanter, sedangkan limbah yang dihasilkan merupakan residu dari proses ekstraksi yaitu POME (*palm oil mill effluent*). Pada data yang dikumpulkan, basis jumlah CPO yang dihasilkan sebesar 1 ton CPO. Data rantai suplai pada proses ekstraksi CPO dapat dilihat pada Tabel 3.3. Pada proses ini laju proses ekstraksi CPO sebesar 0.23 ton CPO/ton FFB.

Pada proses ekstraksi minyak kelapa sawit, emisi gas rumah kaca dihasilkan dari penggunaan petroleum diesel sebagai bahan bakar generator listrik

maupun pada reboiler, dengan perhitungan seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Selain itu, emisi GHG dihasilkan dari POME (*palm oil mill effluent*) atau limbah organik yang dihasilkan dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit, dimana limbah ini dapat menghasilkan gas metana ke udara.

Tabel 3.3 Aliran input output proses ekstraksi untuk menghasilkan 1 ton CPO (Chavalparit, 2006)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|-----------------------------|-------|-----------------|
| Rasio Ekstraksi CPO | 0,23 | ton CPO/ton FFB |
| Input Bahan Baku | | |
| Tandan Buah Segar (FFB) | 4,27 | ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| Air | 3,42 | m ³ |
| Input Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 6,15 | liter |
| Listrik | 88,06 | kWh |
| Output/Produk | | |
| - CPO | 1 | ton |
| - Kernel | 0,23 | ton |
| Produk samping/Limbah | | |
| - EFB | 1,16 | ton |
| - Fiber | 0,53 | ton |
| - Shell | 0,30 | ton |
| - <i>Decanter cake</i> | 0,11 | ton |
| Wastewater | 2,38 | m ³ |

3.2.4 Proses Penyulingan Minyak Kelapa Sawit

Proses penyulingan minyak kelapa sawit merupakan proses untuk menghilangkan asam lemak bebas (*free fatty acid*) pada minyak kelapa sawit. Pada umumnya proses ini dilakukan untuk meningkatkan kualitas minyak kelapa sawit agar dapat diolah menjadi produk pangan. Selain itu, proses penyulingan kelapa sawit dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi transesterifikasi biodiesel (Renita, 2006). Proses penyulingan minyak kelapa sawit menghasilkan minyak kelapa sawit RBD (*refined, bleached, deodorized*) atau yang kemudian terbagi menjadi dua produk utama yaitu RBD olein dan stearin. Produk samping yang dihasilkan dari proses ini adalah PFAD (*palm fatty acid distillate*). Proses penyulingan ini membutuhkan sejumlah energi, baik dari sumber listrik maupun dari bahan bakar fosil, untuk pengoperasian sejumlah

peralatan proses. Konsumsi energi ini akan memberikan kontribusi dalam emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Sedangkan emisi yang dihasilkan dari penggunaan bahan kimia tambahan tidak diikutsertakan dalam analisis ini karena emisi yang dihasilkan relatif sangat kecil dibandingkan emisi sistem keseluruhan.

Pada proses ini aliran input terdiri dari CPO, asam fosfat, *bleaching earth*, bahan bakar biomass, bahan bakar diesel, dan listrik. Aliran output terdiri dari produk dan produk samping. Produk utama adalah minyak kelapa sawit yang telah disuling/*refining bleached, deodorized palm oil* (RBDPO) dan produk samping berupa residu asam lemak/*palm fatty acid distillate* (PFAD). Data yang dikumpulkan menggunakan basis produksi 1 ton RBDPO. Laju penyulingan minyak kelapa sawit sebesar 0,95 ton RBDPO/ton CPO. Data rantai suplai proses penyulingan kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Aliran input output proses penyulingan minyak kelapa sawit (Wicke, et al., 2008)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--|--------|-------------------|
| Rasio penyulingan minya kelapa sawit | 0,95 | ton RBDPO/ton CPO |
| Input Bahan baku | | |
| CPO | 1,05 | Ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 1,05 | Kg |
| <i>Bleaching Earth/acid activated clay</i> | 20,98 | Kg |
| Steam | 41,95 | Kg |
| Input Energi | | |
| Biomass | 682,50 | MJ |
| Bahan bakar | 6,86 | Liter |
| Energi listrik | 24,57 | kWh |
| Output/Produk | | |
| RBDPO | 1,00 | Ton |
| PFAD | 50,00 | Kg |

3.2.5 Proses Transesterifikasi Biodiesel

Proses konversi minyak kelapa sawit menjadi biodiesel dilakukan dengan menggunakan reaksi transesterifikasi dengan katalis basa. Pada proses ini aliran input terdiri dari RBDPO, NaOH, methanol, air, dan energi listrik. Aliran output terdiri dari produk, produk samping dan limbah. Produk yang dihasilkan adalah biodiesel, sedangkan produk samping adalah gliserol. Pada proses ini emisi gas

rumah kaca yang dihasilkan berasal dari penggunaan energi fosil yang dibutuhkan dalam pembuatan metanol dan katalis. Perhitungan emisi gas rumah kaca dilakukan dengan mengkalikan jumlah kebutuhan material dan energi fosil untuk menghasilkan 1 MJ biodiesel dengan emisi faktor masing-masing material. Produk akhir dari proses transesterifikasi ini adalah biodiesel sebagai produk utama dan gliserol sebagai produk samping. Data rantai suplai proses transesterifikasi biodiesel dapat dilihat pada Tabel 3.5. Basis data produksi yang digunakan pada data ini adalah produksi 1 ton biodiesel. Konversi yang digunakan pada data ini adalah sebesar 96%.

Tabel 3. 5 Aliran input output proses transesterifikasi biodiesel (Pleanjai, S., 2004)

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---|--------|-------------------------|
| Konversi reaksi transesterifikasi biodiesel | 0,96 | ton biodiesel/ton RBDPO |
| Input Bahan Baku | | |
| RBDPO | 1.08 | Ton |
| Input Bahan Tambahan | | |
| NaOH | 8.00 | kg |
| Metanol | 150.00 | kg |
| Air | 200.00 | kg |
| Input Energi | | |
| Energi listrik | 256.50 | kWh |
| Output/Produk | | |
| Biodiesel | 1.00 | ton |
| Glycerol | 0.32 | ton |
| Limbah | | |
| Wastewater | 0.20 | m ³ |

3.3 PENILAIAN DAMPAK *LIFECYCLE* (*IMPACT ASSESSMENT*)

Penilaian dampak *lifecycle* dilakukan dengan tujuan mengevaluasi dampak yang dihasilkan dari penggunaan sumber daya (*resource*), emisi dari limbah yang dihasilkan pada proses produksi, konsumsi energi yang dibutuhkan, tingkat efisiensi energi, serta rasio energi fosil yang digunakan. Kategori dampak yang akan dianalisis ditetapkan sesuai dengan *sustainable development indicator*. Faktor yang dianalisis pada penelitian ini adalah faktor lingkungan. Kategori dampak lingkungan yang dievaluasi adalah dampak pemanasan global, yang

dinyatakan dalam jumlah emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi *lifecycle* biodiesel, yang dinyatakan dalam rasio energi primer dan rasio energi fosil.

3.3.1 Dampak Potensi Pemanasan Global

Dalam penilaian dampak potensi pemanasan global, hasil perhitungan akan merepresentasikan jumlah gas rumah kaca yang diemisikan oleh *lifecycle* biodiesel. Model perhitungan emisi gas rumah kaca yang digunakan merupakan model yang telah dikembangkan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) untuk mendefinisikan potensi pemanasan global dari berbagai gas rumah kaca yang berbeda. Emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam gram CO₂-eq/MJ produk energi. Emisi gas rumah kaca dipengaruhi oleh emisi faktor dari penggunaan dan produksi material maupun energi dalam *lifecycle*.

$$\text{emisi gas rumah kaca} = \sum_i GWP_{a,j} \times m_i \quad (3.2)$$

$GWP_{a,j}$ = emisi faktor untuk umpan ataupun produk

m_i = jumlah umpan atau produk

3.3.2 Konsumsi Energi *Lifecycle*

Persamaan matematis untuk menghitung rasio energi primer *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Persamaan 3.3.

$$\eta = \frac{E_p}{P} \quad (3.3)$$

Pada persamaan tersebut terlihat bahwa efisiensi *lifecycle* biodiesel ini merupakan perbandingan antara besarnya energi pembakaran yang dihasilkan biodiesel (E_p) dengan total energi primer yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel tersebut. (Seehan, J. et al., 1998)

Sedangkan persamaan matematis untuk menghitung total energi primer yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel dapat dilihat pada Persamaan 3.4.

$$P = E_{\text{Plantation}} + E_{\text{CPO}} + E_{\text{Ref}} + E_{\text{trans}} + E' \quad (3.4)$$

Pada Persamaan 3.4 dapat dilihat bahwa total energi primer merupakan hasil penjumlahan dari energi produksi kelapa sawit ($E_{plantation}$), energi produksi CPO (E_{CPO}), energi proses *refinery* CPO (E_{ref}), energi produksi biodiesel (E_{trans}), energi tambahan dari masing-masing skenario (E'). Dimana setiap energi proses produksi merupakan fungsi dari kebutuhan (D_a) dan kapasitas dari tiap-tiap unit proses.

Persamaan matematis untuk menghitung rasio penggunaan energi fosil dapat dilihat pada Persamaan 3.5.

$$REF = \frac{E_P}{(E_A + E_B + E_C)} \quad (3.5)$$

Dengan A, B, C adalah energi fosil yang digunakan dalam sistem. (Seehan, J. et al., 1998)

3.4 PENILAIAN DAN INTERPRETASI

Analisis hasil ini akan membahas sustainabilitas dari setiap alternatif skenario yang ada berdasarkan perhitungan dampak *lifecycle* yang telah dilakukan. Sustainabilitas dari skema produksi ini ditentukan berdasarkan *sustainable development indicator*. Skenario produksi yang diharapkan adalah skema produksi yang berkelanjutan, dengan dampak lingkungan rendah, konsumsi energi minimal, efisiensi energi tinggi, rasio penggunaan energi fosil rendah.

3.5 ALTERNATIF SKENARIO PADA LIFECYCLE BODIESEL

Alternatif skenario yang digunakan dalam analisis *lifecycle* biodiesel ini adalah variasi lahan asal yang dikonversi menjadi biodiesel, pemanfaatan produk samping dari *lifecycle*, serta alokasi pembagian bahan baku minyak kelapa sawit untuk produksi biodiesel dan bahan pangan.

3.5.1 Variasi Asal Lahan untuk Perkebunan Kelapa Sawit

Variasi alternatif ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari lahan yang digunakan untuk perkebunan kelapa sawit pada dampak pemanasan global atau emisi gas rumah kaca yang dihasilkan akibat alih fungsi lahan. Untuk perhitungan emisi gas rumah kaca akibat alih fungsi lahan (LUC) terdapat tiga jenis lahan

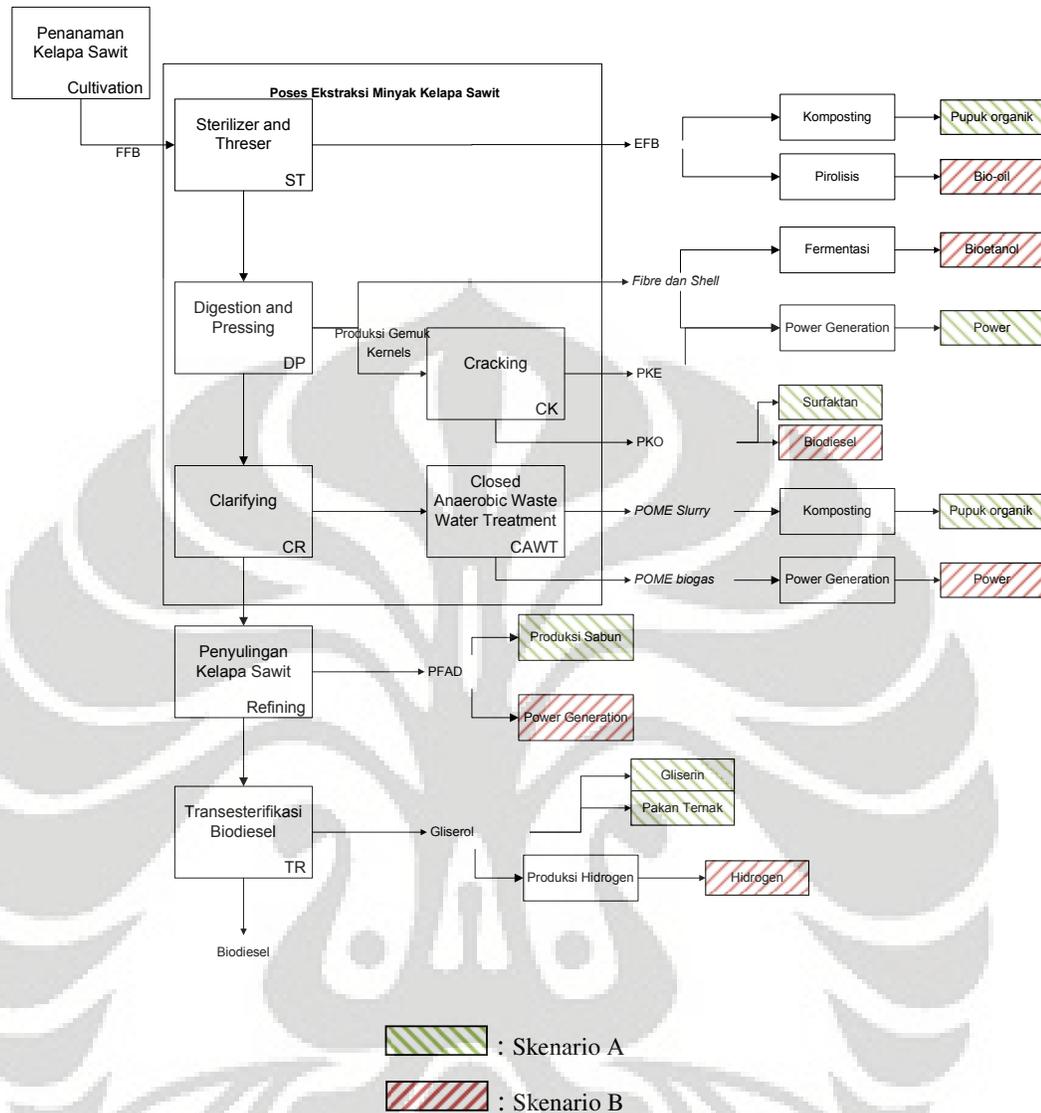
yang akan digunakan sebagai lahan asal yang dikonversi menjadi perkebunan kelapa sawit.

- a. Hutan tropis (*natural forest land*)
- b. Lahan gambut (*peatland*)
- c. Padang rumput (*degraded land*)

Untuk keadaan dimana lahan gambut yang dirubah/dikonversi menjadi lahan kelapa sawit tambahan emisi stok karbon yang hilang dan N₂O dari dekomposisi gambut setelah pengeringan harus diperhitungkan. Data alih fungsi lahan untuk ketiga lahan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 pada sub-bab 2.7.1.

3.5.2 Variasi Pemanfaatan Produk Samping

Variasi alternatif ini dilakukan untuk melihat pengaruh pendekatan pemanfaatan produk samping yang dilakukan berdasarkan potensi ekonomis maupun kandungan energi yang dimiliki dari setiap produk samping untuk menggantikan produk maupun energi dari bahan baku yang lainnya. Hal ini akan memberikan kredit emisi dengan menghitung jumlah emisi gas rumah kaca yang dapat dicegah dari pemanfaatan produk samping itu sendiri. Berikut adalah variasi skenario pemanfaatan produk samping. Produk samping yang dihasilkan dalam *lifecycle* ini adalah *palm fiber*, *palm shell*, tandan buah kosong (EFB), *palm oil mill effluent* (POME) *slurry*, POME biogas dari proses ekstraksi minyak kelapa sawit *palm fatty acid distillate* (PFAD) dari proses penyulingan minyak kelapa sawit, dan gliserol dari proses transesterifikasi biodiesel. Potensi pemanfaatan produk samping *lifecycle* biodiesel dan pembagian skenarionya ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Alternatif alokasi pemanfaatan produk samping pada sistem produksi biodiesel

Dari Gambar 3.2, secara garis besar skenario pemanfaatan produk samping terbagi menjadi dua skenario, yaitu skenario A dan skenario B. Rincian pembagian skenario pemanfaatan produk samping dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Skenario pemanfaatan produk samping

| Proses | Produk samping | Skenario A | Skenario B |
|--------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> | bahan bakar biomassa | bahan baku bioetanol |
| | <i>palm shell</i> | bahan bakar biomassa | bahan baku bioetanol |
| | EFB | pupuk organik | bahan baku bio-oil |
| | PKO | bahan baku surfaktan | bahan baku biodiesel |
| | PKE | bahan bakar biomassa | bahan bakar bioetanol |
| | POME slurry | pupuk organik | |
| | POME biogas | bahan bakar biogas | biogas |
| Proses refining | PFAD | bahan baku sabun dan deterjen | bahan bakar |
| Proses transesterifikasi | Gliserol opsi 1 | substitusi gliserin sintetis | bahan baku hidrogen |
| | Gliserol opsi 2 | bahan baku pakan ternak | |

Pemanfaatan produk samping pada skenario A terdiri dari pemanfaatan *fiber, shell, PKE* sebagai bahan bakar biomassa untuk menggantikan pemakaian bahan bakar fosil pada boiler, pemanfaatan EFB dan endapan POME sebagai pupuk organik untuk menggantikan penggunaan pupuk nonorganik, pemanfaatan biogas yang diproduksi dari POME, pemanfaatan gliserol dan PKO untuk menggantikan bahan baku gliserin dan surfaktan. Cangkang dan serat kelapa sawit (*palm shell and fiber*) memiliki potensi untuk menjadi bahan bakar boiler karena nilai LHV yang cukup memadai (*fiber* 5,80 MJ/kg dan *shell* 17,10 MJ/kg). Tandan buah kosong (EFB) dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik karena memiliki kandungan nutrient. pada pemanfaatan gliserol terdapat dua guah opsi, yaitu memanfaatkan gliserol sebagai pengganti gliserin sintetis untuk opsi 1 dan sebagai pengganti pakan ternak untuk opsi 2. Hal ini dilakukan karena gliserin sintetis memiliki produksi yang cukup melimpah di pasar internasional (Smeets, E., 2005). Kelebihan suplai gliserin dapat menurunkan harga pasar gliserin, sehingga digunakan alternatif untuk memanfaatkan giserin sebagai bahan baku pakan ternak. Kredit emisi yang dihasilkan dihitung dari potensi kredit emisi dari setiap produk samping untuk menggantikan bahan baku produk tertentu.

Skenario B terdiri dari penerapan pendekatan teknologi *advance* dalam pemanfaatan produk samping sebagai bahan baku *biofuel*. Palm fiber dan shell akan digunakan sebagai bahan baku bioetanol dengan proses fermentasi. Sedangkan tandan buah kosong atau EFB akan dialokasikan sebagai bahan baku

bio-oil dalam proses *pyrolysis*. Kredit emisi skenario B akan dihitung berdasarkan potensi setiap *biofuel* yang dihasilkan untuk menggantikan energi fosil dan dikurangi emisi yang dihasilkan untuk produksi *biofuel* tersebut.

Dari kedua skenario tersebut terdapat perbedaan mengenai adanya nilai tambah yang dihasilkan dari pemanfaatan produk samping. Sehingga dalam perhitungan ini parameter dampak lingkungan saja tidak mencukupi untuk melakukan perbandingan di antara kedua skenario tersebut. Oleh karena itu, perbandingan ini akan menggunakan parameter tambahan yaitu *eco-efficiency*. Parameter ini membandingkan rasio nilai tambah ekonomis dengan rasio dampak lingkungan. Perhitungan parameter *eco-efficiency* adalah sebagai berikut (Alloca, C., 2000). Skenario dengan nilai *eco-efficiency* lebih besar merupakan skenario yang dipilih.

$$Eco - efficiency = \frac{Economic\ value\ added}{Environmental\ impact\ ratio} \quad (3.6)$$

$$Economic\ value\ added = \frac{Market\ value\ of\ products}{Cost\ of\ raw\ material\ \&\ fuel} \quad (3.7)$$

$$Environmental\ impact\ ratio = \frac{Environmental\ impact}{Environmental\ credit} \quad (3.8)$$

3.5.3 Alokasi Bahan Baku untuk Biodiesel dan Produk Pangan

Pembagian alokasi ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari pengintegrasian produksi biodiesel dengan bahan pangan dalam satu industri. Bahan pangan yang dimaksud dalam analisis ini adalah minyak goreng berasal dari produk turunan minyak kelapa sawit yang telah melalui proses penyulingan (RBDPO). Dalam analisis ini, proses pengolahan minyak kelapa sawit menjadi produk pangan tidak termasuk ke dalam batasan sistem *lifecycle*, minyak kelapa sawit tersebut hanya dialokasikan ke dalam unit proses pengolahan lebih lanjut di luar sistem pada *lifecycle*. Asumsi yang digunakan di dalam analisis ini adalah jumlah inventarisasi neraca massa energi *lifecycle* biodiesel yang digunakan sama dengan *lifecycle* biodiesel tanpa alokasi produk pangan.

Dalam perhitungan pengaruh alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan, unit fungsional yang diperhitungkan terhadap dampak tidak dapat

disamakan dengan perhitungan sebelumnya yaitu per 1 MJ biodiesel yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan biodiesel dan produk pangan, dalam hal ini adalah minyak goreng, tidak dapat diekuivalensikan dampak yang dihasilkan untuk setiap MJ produk. Oleh karena itu, pengaruh alokasi bahan baku terhadap dampak lingkungan untuk setiap keuntungan yang diperoleh dari penjualan biodiesel ataupun minyak goreng. Penjualan biodiesel dan minyak goreng dilakukan berdasarkan harga pasar domestik dan internasional. Khusus untuk harga biodiesel domestik, analisis akan dilakukan terhadap harga pasar yang ditetapkan oleh pemerintah dengan harga eks-produsen biodiesel. Hal ini dilakukan karena adanya perbedaan pendapat mengenai harga jual biodiesel (Mursanti, E., 2008). Basis harga biodiesel, CPO, dan minyak goreng yang digunakan dalam perhitungan ini dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Harga CPO, minyak goreng dan biodiesel

| Harga Jual | CPO | Biodiesel | Minyak goreng | Sumber |
|-----------------------------|---------|-----------|---------------|--------------------|
| Pasar Ekspor (US\$/ton) | 700,28 | 830,97 | 730,74 | Wahid, B., 2010 |
| Pasar Domestik (IDR/kg) | 6591,85 | 4319,77 | 7800,00 | Mursanti, E., 2007 |
| Harga eks-produsen (IDR/kg) | - | 11.027,63 | - | Mursanti, E., 2007 |

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 INVENTARISASI *LIFECYCLE* (LCI) BIODIESEL

Dari data sekunder yang ada diolah menjadi data siap pakai untuk melakukan perhitungan. Tabel 4.1 menunjukkan keseluruhan inventarisasi rantai suplai tahapan *lifecycle* biodiesel.

Tabel 4. 1 LCI rantai suplai biodiesel overall.

| Parameter | Kuantitas | Satuan |
|--|-----------|----------------|
| Bahan Mentah | | |
| Bibit | 0,0119 | kg |
| Pupuk N | 1,9131 | gram |
| Pupuk P | 2,6513 | gram |
| Pupuk K | 1,0954 | gram |
| Pupuk Mg | 0,9589 | gram |
| Air | 0,1483 | m ³ |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 0,0272 | gram |
| <i>Bleaching Earth/acid activated clay</i> | 0,5439 | gram |
| NaOH | 0,1992 | gram |
| Metanol | 3,7341 | gram |
| Energi | | |
| Bahan Bakar Diesel | 0,0035 | liter |
| Listrik | 0,0095 | kWh |
| Biomass | 0,0177 | MJ |
| Produk Samping | | |
| <i>Kernel</i> | 0,0316 | kg |
| - EFB | 0,0144 | kg |
| - Fiber | 0,0083 | kg |
| - Shell | 0,0030 | kg |
| - <i>Decanter cake</i> | 0,0062 | kg |
| - <i>Ash</i> | 0,0005 | kg |
| Wastewater | 0,0001 | m ³ |
| PFAD | 0,0013 | kg |
| Gliserol | 0,0080 | kg |
| Produk | | |
| Biodiesel | 0,0249 | kg |

Inventarisasi ini dilakukan dengan mengumpulkan data aliran input output material yang digunakan dan produk-produk yang dihasilkan serta energi yang dikonsumsi pada setiap sub-proses yang kemudian dikuantifikasi berdasarkan unit fungsional yang digunakan dengan menggunakan faktor konversi masing-masing sistem.

Unit fungsional yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 MJ biodiesel. Untuk itu semua data inventerisasi pada sub-bab 3.2 sebelumnya dirubah untuk produksi 1 MJ biodiesel dengan menggunakan parameter produksi yang digunakan pada setiap sub-proses sistem.

4.2 PENILAIAN DAMPAK *LIFECYCLE* BIODIESEL (BASE CASE)

Kategori dampak pertama yang di analisis pada *lifecycle* biodiesel adalah dampak potensi pemanasan global, yaitu emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dalam *lifecycle* biodiesel secara keseluruhan yang dinyatakan dalam jumlah gas karbondioksida equivalent untuk setiap 1 MJ biodiesel yang dihasilkan. Hasil pengumpulan data LCI kemudian dikuantifikasi berdasarkan kategori dampak yang dievaluasi. Dampak yang dievaluasi adalah potensi pemanasan global dan konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel.

4.2.1 Potensi Pemanasan Global *Lifecycle* Biodiesel

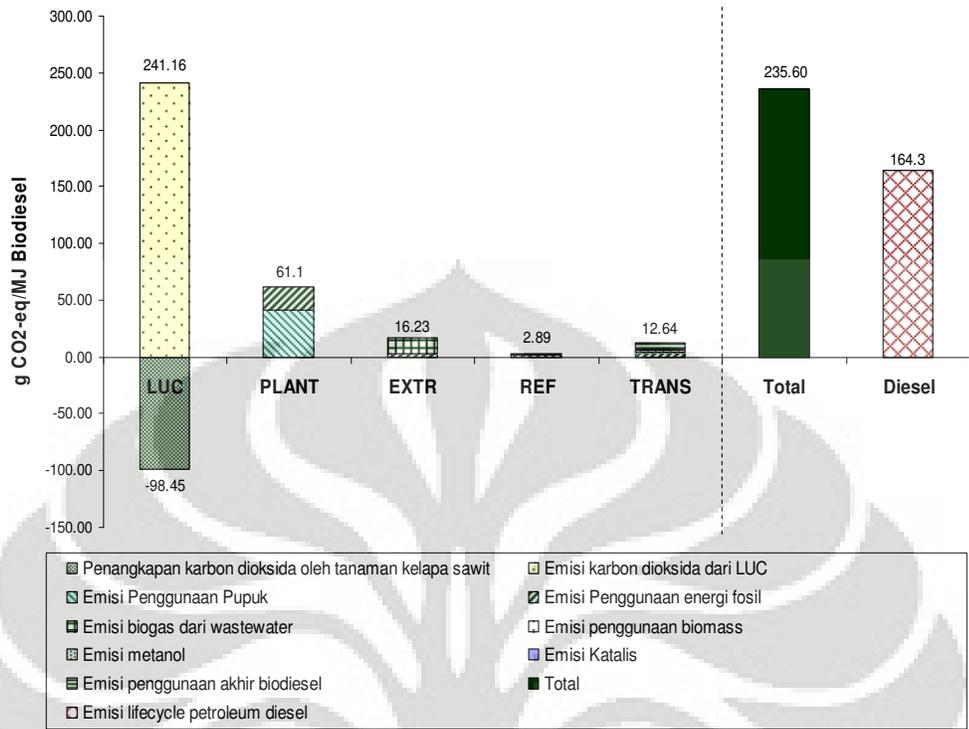
Pada perhitungan ini digunakan asumsi bahwa buah kelapa sawit dan produk turunannya maupun produk samping memiliki kandungan karbon netral, yang berarti kandungan dalam karbon dalam produk-produk tersebut tidak diperhitungkan sebagai emisi dalam analisis *lifecycle*. Pada perhitungan ini juga mencakup emisi yang dihasilkan dari penggunaan energi fosil, baik berupa bahan bakar diesel maupun energi listrik. Hasil perhitungan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari setiap tahapan *lifecycle* biodiesel ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Jumlah Emisi Gas Rumah Kaca pada Setiap Tahapan *Lifecycle* Biodiesel

| Lifecycle stage | g CO₂/MJ biodiesel |
|---|--------------------------------------|
| Alih fungsi lahan | |
| Penangkapan CO ₂ oleh tanaman kelapa sawit | -98,45 |
| Emisi karbon dioksida dari LUC | 241,16 |
| Penanaman Kelapa Sawit | |
| Emisi Penggunaan Pupuk | 40,81 |
| Emisi Penggunaan energi fosil | 20,31 |
| Proses Ekstraksi CPO | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 2,40 |
| Emisi biogas dari wastewater | 13,83 |
| Proses Penyulingan CPO | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 1,47 |
| Emisi penggunaan biomass | 1,42 |
| Proses Transesterifikasi Biodiesel | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 3,57 |
| Emisi metanol | 2,94 |
| Emisi Katalis | 0,24 |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 5,90 |
| Total | 235,60 |

Perbandingan hasil emisi gas rumah kaca pada setiap tahap *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dari hasil perhitungan ini dapat dilihat peranan setiap tahapan atau subproses pada *lifecycle* biodiesel terhadap emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. Total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari *lifecycle* biodiesel adalah sebesar 235,60 gram CO₂-eq. Alih fungsi lahan memiliki kontribusi terbesar terhadap emisi gas rumah kaca keseluruhan, yaitu sebesar 56,31% atau sebesar 142,71 gram CO₂-eq. Sedangkan proses penyulingan CPO memiliki kontribusi emisi gas rumah kaca terkecil, yaitu sebesar 1,14% atau sebesar 3,89 gram CO₂-eq.

Alih fungsi lahan memberikan kontribusi yang paling besar karena pada tahap ini, sejumlah karbon atau gas rumah kaca dilepaskan akibat dari konversi lahan awal menjadi perkebunan kelapa sawit. Pada perhitungan ini, kondisi lahan awal yang digunakan adalah hutan tropis (*forestland*). Hutan tropis banyak dikonversi menjadi lahan kelapa sawit pada beberapa tahun terakhir (Deptan, 2009).



Gambar 4.1 Emisi Gas Rumah Kaca untuk lifecycle Biodiesel.

Pada Gambar 4.1 ini juga menunjukkan perbandingan emisi gas rumah kaca total lifecycle biodiesel dengan emisi yang dihasilkan dari bahan bakar solar atau *petroleum diesel*. Pada Gambar 4.1 terdapat perbandingan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari masing-masing proses. Data emisi *lifecycle* bahan bakar solar didapatkan dari IPCC *report* untuk bahan bakar fosil (IPCC, 2006). Dari perbandingan ini nilai emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel (253,42 gram CO₂-eq/MJ) lebih besar dibandingkan emisi gas rumah kaca *lifecycle* petroleum diesel/solar (164,33 gram CO₂-eq/MJ). Perbandingan ini dilakukan dengan menggunakan data inventarisasi *lifecycle* petroleum diesel, dari mulai proses eksplorasi hingga produksi solar, yang dilakukan oleh US *Departement of Energy* (Seehan, J., 1998). Hal ini disebabkan oleh pengaruh emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan yang dimasukkan kedalam *scope* LCA. Hasil penelitian LCA biodiesel yang tidak memperhitungkan alih fungsi lahan pada *scope* LCA menghasilkan perbandingan emisi gas rumah kaca yang lebih kecil untuk biodiesel dibandingkan dengan *petroleum diesel/solar*. (Seehan, J et al., 1998)

Lifecycle biodiesel pada penelitian ini tidak memperhitungkan kebutuhan bahan bakar untuk transportasi antar proses dalam rantai suplai *lifecycle* biodiesel. Hal ini dikarenakan kontribusi proses transportasi antar proses dalam rantai suplai tidak terlalu signifikan terhadap emisi gas rumah kaca biodiesel keseluruhan. Sebagai contoh, jika transportasi antar proses dalam rantai suplai *lifecycle* biodiesel dimasukkan ke dalam batasan sistem *lifecycle*, maka kebutuhan bahan bakar untuk transportasi akan meningkat sesuai dengan jarak transportasi yang ditempuh. Asumsi kebutuhan energi bahan bakar yang digunakan untuk proses transportasi dengan menggunakan truk tangki adalah sebesar 0,00037 MJ/kg muatan/km (Hugraha, 2007). Dengan menggunakan model rantai suplai untuk pabrik biodiesel yang berada di Kota Medan dengan jarak tempuh antar proses 150 km, peningkatan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan sebesar 1,65 gram CO₂-eq/MJ biodiesel atau hanya meningkat sebesar 0,7 % dari emisi gas rumah kaca semula. Karena peningkatan emisi gas rumah kaca yang tidak signifikan, maka asumsi model *lifecycle* biodiesel yang berada dalam satu kompleks yang terintegrasi dapat diterima.

4.2.2 Konsumsi Energi *Lifecycle* Biodiesel

Dalam data LCI terdapat kemungkinan untuk menghitung total kebutuhan energi dan efisiensi energi overall proses dan produk. Dengan hasil perhitungan total kebutuhan energi maka aspek keterbarukan dari *lifecycle* biodiesel dapat dievaluasi dan memberikan informasi mengenai besaran energi tambahan yang digunakan untuk mengkonversi bahan baku menjadi bahan bakar.

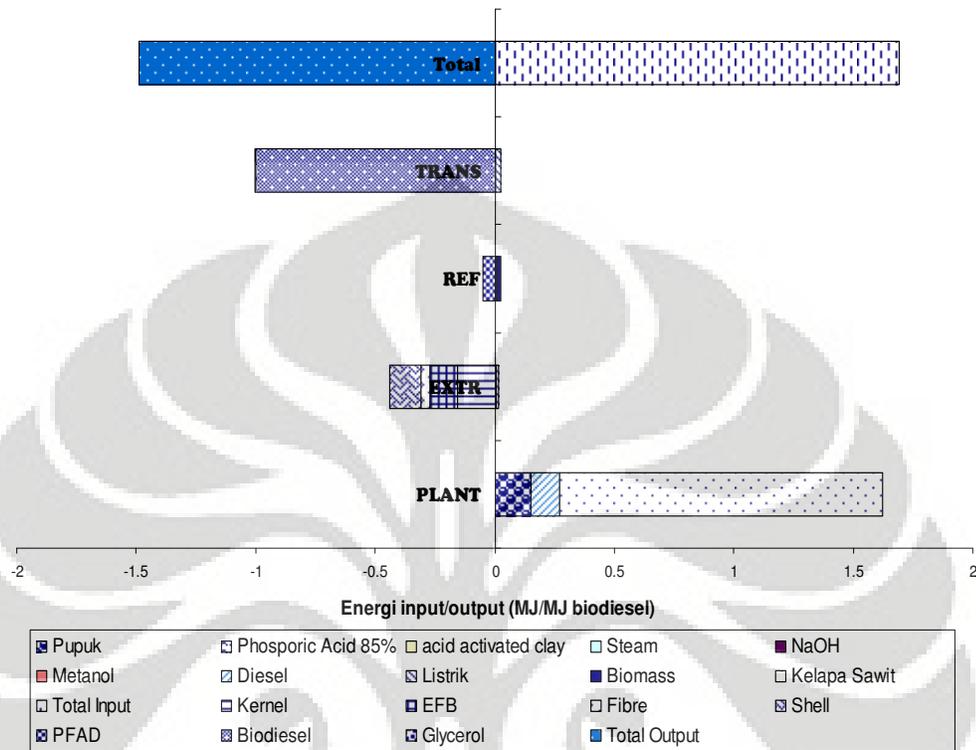
Pada setiap tahapan *lifecycle* biodiesel, masukan input energi terdiri dari energi dari bahan bakar dan energi yang terkandung pada setiap aliran material, sedangkan output energi berupa produk energi bahan bakar dan kandungan energi yang terkandung pada setiap aliran produk samping/limbah yang dihasilkan. Hasil perhitungan neraca energi *lifecycle* biodiesel dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Overall

| Komponen | Energi Input (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | Energi Output (MJ/MJ biodiesel) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Penanaman Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk N | 0,0936 | Kernel | 0,1564 |
| Pupuk P | 0,0462 | EFB | 0,1138 |
| Pupuk K | 0,0114 | Fibre | 0,0414 |
| Diesel | 0,1226 | Shell | 0,1265 |
| Listrik | 0,0002 | Produksi Olein | |
| Fotosintesis kelapa sawit | 1,3474 | PFAD | 0,0499 |
| Ekstraksi CPO | | Produksi Biodiesel | |
| Diesel | 0,0077 | Biodiesel | 1,0000 |
| Energi listrik | 0,0087 | Glycerol | 0,0015 |
| Produksi Olein | | | |
| Phosporic Acid 85% | 2,07805E-06 | | |
| acid activated clay | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

Rasio energi primer merupakan perbandingan antara produk energi yang dihasilkan dibandingkan dengan total energi primer, dimana total energi primer adalah keseluruhan energi yang digunakan di dalam sistem. Satu MJ biodiesel yang dihasilkan membutuhkan 1,69 MJ input energi dan menghasilkan rasio energi primer sebesar 0,59 atau efisiensi energi sebesar 59%. Kontribusi terbesar terhadap input energi pada *lifecycle* biodiesel berasal dari penanaman kelapa sawit, yaitu energi matahari pada proses fotosintesis kelapa sawit sebesar 79,69% atau sebesar 1,35 MJ/MJ biodiesel. Proses fotosintesis pada kelapa sawit menghasilkan buah kelapa sawit yang kemudian diekstraksi dan diproses menjadi biodiesel. Energi fotosintesis merupakan jumlah energi matahari yang dapat

terserap oleh tanaman kelapa sawit. Gambar 4.2 menggambarkan perbandingan input dan output energi pada *lifecycle* biodiesel.



Gambar 4. 2 Neraca energi *lifecycle* biodiesel

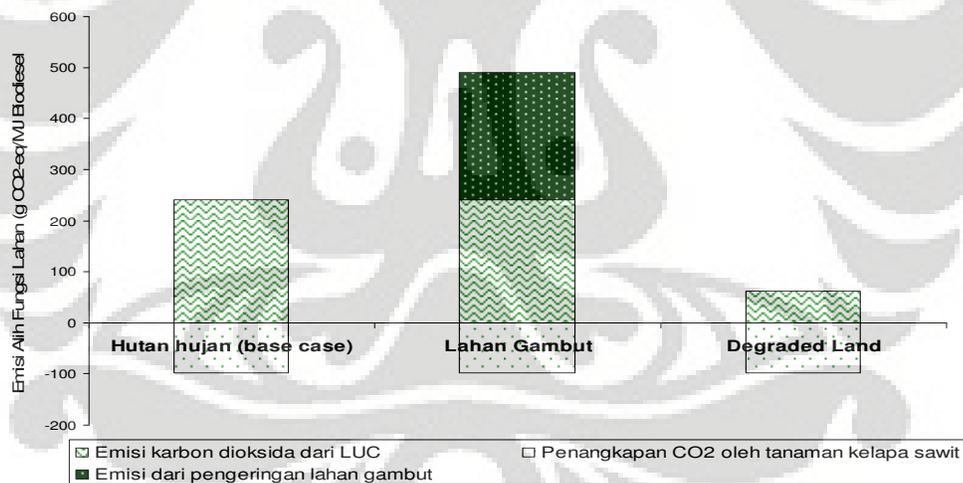
Pada Tabel 4.3 dapat diketahui rasio energi fosil pada *lifecycle* biodiesel. Rasio energi fosil adalah perbandingan antara jumlah kandungan energi produk yang dihasilkan dengan total energi fosil yang digunakan di dalam proses. Energi fosil disini adalah energi yang berasal dari input material yang berasal dari turunan bahan bakar fosil atau material sintetis. Dalam 1 MJ produk biodiesel terdapat 0,326 MJ energi fosil, atau sebanding dengan rasio energi fosil sebesar 3.07. Dengan kata lain, *lifecycle* biodiesel menghasilkan produk energi 3,07 kali lebih besar dibandingkan dengan energi fosil yang digunakan. Penggunaan pupuk menyumbang 46,4%, sedangkan penggunaan bahan bakar diesel dan listrik 52,6% dari total energi fosil pada *lifecycle* bioidiesel.

4.3 PENGARUH VARIASI SKENARIO PADA LCA BIODIESEL

Pada perhitungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel pada bagian 4.2.1 menunjukkan emisi gas rumah kaca biodiesel lebih tinggi dibandingkan dengan emisi gas rumah kaca bahan bakar solar. Oleh karena itu, variasi skenario *lifecycle* biodiesel dilakukan untuk melihat pengaruh dari masing-masing skenario terhadap dampak *lifecycle* biodiesel. Variasi skenario pada *lifecycle* biodiesel dilakukan terhadap asal lahan perkebunan kelapa sawit, pemanfaatan produk samping, dan alokasi kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel dan produk pangan.

4.3.1 Pengaruh Asal Lahan Perkebunan Kelapa Sawit

Dari hasil perhitungan emisi gas rumah kaca pada proses alih fungsi lahan didapatkan perbandingan nilai emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari konversi perkebunan kelapa sawit berdasarkan setiap jenis asal lahan. Perbandingan nilai emisi gas rumah kaca dari ketiga lahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada alih fungsi lahan.

Perkebunan kelapa sawit dengan asal lahan hutan tropis memiliki net emisi gas rumah kaca sebesar 142,71 gram CO₂-eq/MJ biodiesel, untuk hutan gambut sebesar 391,69 gram CO₂-eq/MJ biodiesel, dan padang rumput sebesar -37,34 gram CO₂-eq/MJ biodiesel. Dari ketiga jenis lahan yang diperhitungkan, perkebunan kelapa sawit yang berasal dari ladang rumput (*degraded land*) memiliki net emisi

gas rumah kaca terkecil, sedangkan lahan gambut memiliki emisi gas rumah kaca terbesar. Hasil penggunaan variasi asal lahan perkebunan kelapa sawit menunjukkan asal lahan perkebunan kelapa sawit tidak mempengaruhi konsumsi energi biodiesel.

Lahan gambut memiliki nilai emisi gas rumah kaca yang paling besar karena adanya proses pengeringan lahan gambut sebelum dilakukan proses penanaman kelapa sawit. Pada proses pengeringan tersebut terdapat tambahan emisi gas CO₂ dan N₂O dari dekomposisi gambut (IPCC, 2006). Hal ini menyebabkan terdapat selisih 132,4% dibandingkan dengan hutan tropis. Padang rumput (*degraded land*) memiliki emisi gas rumah kaca paling kecil karena kandungan biomassa, baik di atas tanah maupun di bawah tanah, yang paling kecil relatif terhadap hutan tropis dan lahan gambut, sehingga jumlah karbon yang dilepas ke atmosfer akibat alih fungsi lahan menjadi lebih kecil.

4.3.2 Pengaruh Pemanfaatan Produk Samping

Dengan menggunakan perhitungan yang dilakukan pada bagian sebelumnya, masing-masing skenario A dan skenario B dievaluasi dampak yang dihasilkan terhadap emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi pada *lifecycle* biodiesel. Untuk pengaruh skenario terhadap emisi gas rumah kaca, pengaruh dinyatakan dalam jumlah pengurangan/reduksi emisi gas rumah kaca pada *lifecycle* biodiesel. Jumlah produk samping yang dihasilkan dalam *lifecycle* biodiesel ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Jumlah produk samping pada *lifecycle* biodiesel

| Proses | produk samping | Kuantitas | Satuan |
|--------------------------|-------------------|-----------|----------------|
| Proses ekstraksi | <i>palm fiber</i> | 0,0155 | kg |
| | <i>palm shell</i> | 0,0089 | kg |
| | EFB | 0,0089 | kg |
| | PKO | 0,0029303 | kg |
| | PKE | 0,0037294 | kg |
| | POME slurry | 0,0054 | m ³ |
| | POME biogas | 0,06048 | m ³ |
| Proses refining | PFAD | 0,0014 | kg |
| Proses transesterifikasi | gliserol | 0,0086 | kg |

Variasi skenario pemanfaatan produk samping yang dilakukan terdiri dari dua skenario, yaitu skenario A dan skenario B, yang telah dijelaskan pada bab metodologi. Untuk skenario A, terdapat dua opsi pemanfaatan gliserol, yaitu sebagai pengganti bahan baku gliserin sintetis untuk opsi 1, dan sebagai pengganti pakan ternak untuk opsi 2. Hasil perhitungan kredit emisi yang dihasilkan dari kedua skenario dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan 4.6.

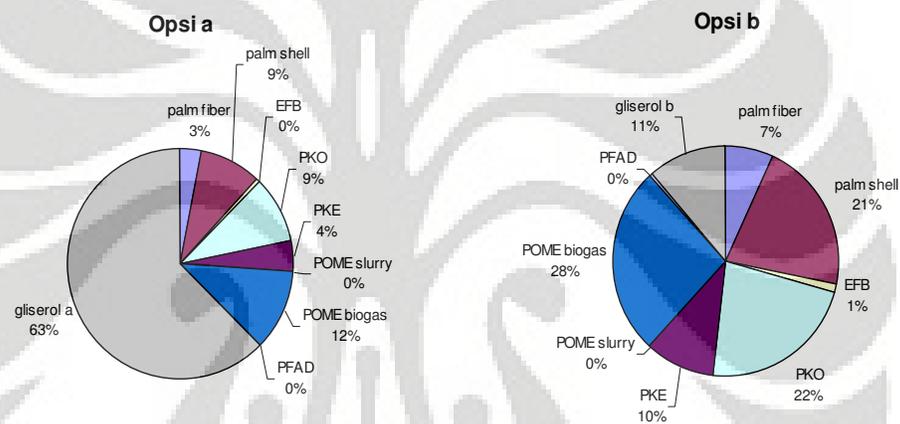
Tabel 4. 5 Kredit emisi *lifecycle* biodiesel skenario A

| Produk Samping | Skenario A | Kredit Emisi (g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel) |
|---|-----------------------------|--|
| <i>palm fiber</i> | bahan bakar biomassa | -3,63885 |
| <i>palm shell</i> | bahan bakar biomassa | -11,1358 |
| EFB | pupuk organik | -0,56681 |
| PKO | bahan baku surfaktan | -11,536 |
| PKE | bahan bakar biomassa | -5,16811 |
| POME slurry | pupuk organik | -0,00028 |
| POME biogas | bahan bakar biogas | -13,8333 |
| PFAD | bahan baku gemuk | -0,13873 |
| gliserol opsi a | subtitusi gliserin sintetis | -76,475 |
| gliserol opsi b | bahan baku pakan ternak | -5,92681 |
| Total opsi 1 | | -122,493 |
| Total opsi 2 | | -51,9446 |
| Reduksi Emisi Lifecycle Opsi 1 (%) | | 22,05% |
| Reduksi Emisi Lifecycle Opsi 2 (%) | | 51,99% |

Tabel 4. 6 Kredit emisi *lifecycle* biodiesel skenario B.

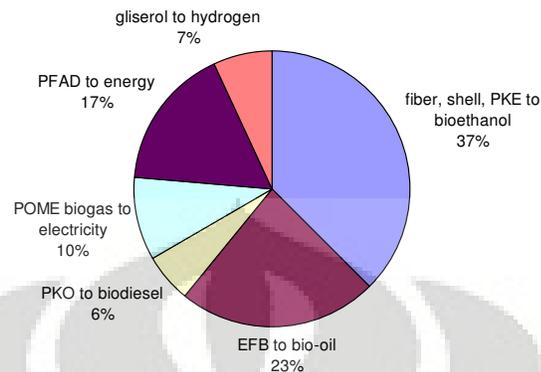
| Produk Samping | Skenario B | Emisi/Kredit Emisi (g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel) |
|--|-----------------------|--|
| <i>palm fiber</i> | bahan baku bioetanol | -29,4489 |
| <i>palm shell</i> | bahan baku bioetanol | -16,9639 |
| EFB | bahan baku bio-oil | -33,3496 |
| PKO | bahan baku biodiesel | -8,1539 |
| PKE | bahan baku bioethanol | -7,0856 |
| POME slurry | - | - |
| POME biogas | Listrik dari biogas | -13,8333 |
| PFAD | bahan bakar | -23,9107 |
| gliserol | bahan baku hidrogen | -9,8526 |
| Emisi tambahan dari pemanfaatan produk samping | | 22.4212 |
| Total | | -120,1773 |
| Reduksi Emisi Lifecycle | | 51% |

Dari hasil perhitungan kredit emisi kedua skenario tersebut, skenario A menghasilkan kredit emisi sebesar 122,49 gram CO₂-eq atau mereduksi 52% emisi *lifecycle* biodiesel, jika gliserol dimanfaatkan untuk menggantikan gliserin sintetis (opsi 1). Akan tetapi, skenario hanya menghasilkan kredit emisi sebesar 51,95 gram CO₂-eq atau hanya mereduksi 22% emisi *lifecycle* biodiesel, jika gliserol dimanfaatkan sebagai pakan ternak (opsi 2). Hal ini disebabkan oleh emisi faktor gliserin sintetis hampir dua kali lebih besar, dibandingkan dengan emisi faktor pakan ternak (Wicke, 2008). Breakdown kredit emisi skenario A ditunjukkan pada Gambar 4.4.



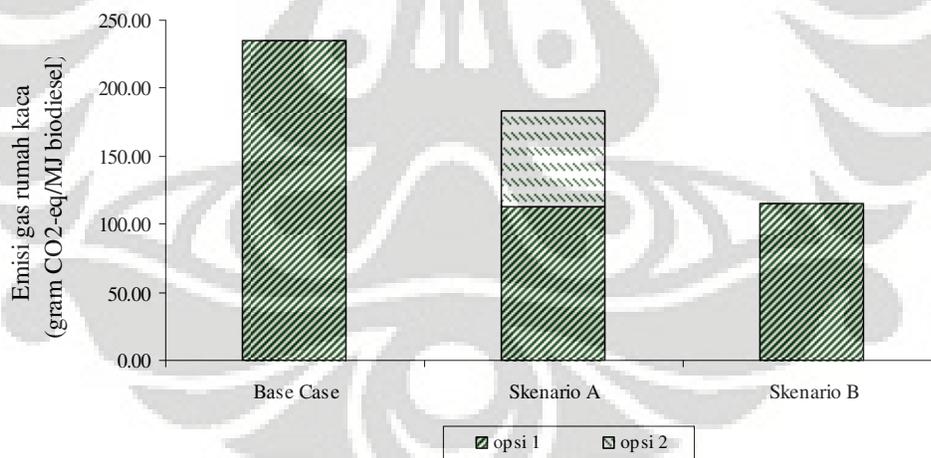
Gambar 4. 4 Breakdown kredit emisi skenario A

Untuk Skenario B, kredit emisi yang dihasilkan adalah sebesar 122,18 gram CO₂-eq atau mereduksi emisi *lifecycle* sebesar 51%. Pemanfaatan produk samping dan residu biomassa menjadi bioetanol memiliki kontribusi terbesar dalam kredit emisi skenario B, yaitu sebesar 53,45 gram CO₂-eq. Kredit emisi yang dihasilkan dari pemanfaatan metana sekitar 37,5% dari total kredit emisi skenario B. Breakdown kredit emisi pada skenario B ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Breakdown kredit emisi skenario B

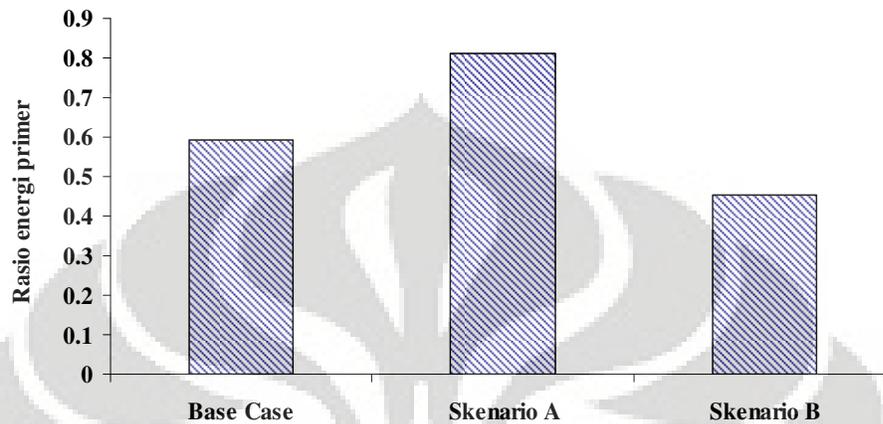
Perbandingan emisi lifecycle skenario A dan skenario B ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari perbandingan ini, skenario A-opsi 1 memiliki nilai emisi gas rumah kaca yang hampir sama dengan skenario B. Sedangkan emisi gas rumah kaca skenario A-opsi 2 menghasilkan emisi gas rumah kaca yang paling besar.



Gambar 4. 6 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap emisi gas rumah kaca lifecycle biodiesel.

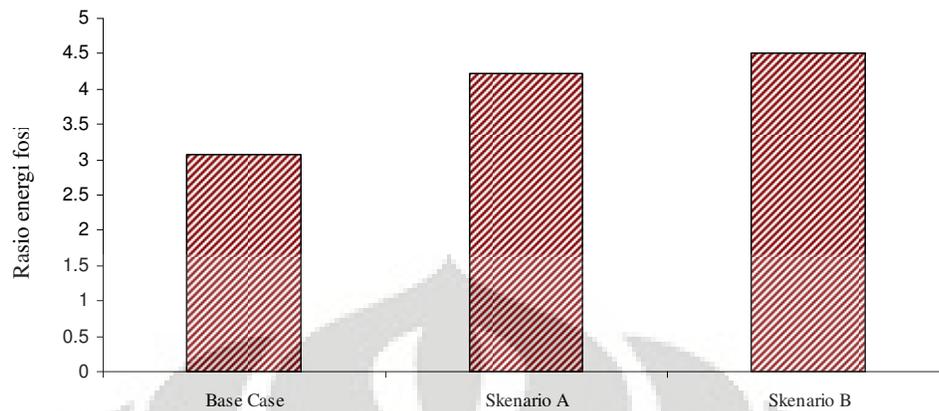
Untuk pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap konsumsi energi *lifecycle* biodiesel, parameter yang ditinjau adalah rasio energi primer dan rasio energi fosil dari masing-masing skenario. Perbandingan rasio energi primer

masing-masing skenario dapat dilihat pada Gambar 4.7. Sedangkan perbandingan rasio energi fosil masing-masing skenario ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 7 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy primer *lifecycle* biodiesel.

Skenario A memiliki rasio energi primer yang paling tinggi dibandingkan dari Skenario B. Skenario A memiliki rasio energi sebesar 0,81 MJ produk energi/MJ energi primer input, atau 37,4% lebih besar dari rasio energi primer *basecase*. Untuk skenario B, rasio energi primer yang dihasilkan sebesar 0,45 MJ produk energi/MJ energi primer input, atau 23% lebih kecil dibandingkan rasio energi primer *basecase*. Skenario B memiliki kebutuhan energi proses tambahan yang lebih besar untuk memproduksi *biofuel* dari produk samping. Proses produksi *biofuel* tersebut membutuhkan masukan energi yang besar. Untuk skenario A, tidak ada energi proses tambahan dalam pemanfaatan produk samping, sehingga kebutuhan energi skenario A lebih kecil dibandingkan Skenario B.



Gambar 4. 8 Pengaruh skenario pemanfaatan produk samping terhadap rasio energy fosil *lifecycle* biodiesel.

Skenario A memiliki rasio energi fosil lebih rendah dibandingkan dari Skenario B. Skenario A memiliki rasio energi fosil sebesar 4,22 MJ produk energi/MJ energi fosil input, atau 37,4% lebih besar dari rasio energi primer *basecase*. Untuk skenario B, rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 4,52 MJ produk energi/MJ energi fosil input, atau 47% lebih besar dibandingkan rasio energi primer *basecase*. Skenario B menghasilkan produk energi yang lebih besar dibandingkan dengan skenario A, untuk setiap MJ energi fosil yang digunakan.

Skenario A dan skenario B memiliki perbedaan besar dalam hal *added value* pada produk samping. Secara keseluruhan skenario B memiliki nilai tambah lebih besar karena harga pasar dari produk samping lebih besar dibandingkan dengan skenario B. Akan tetapi, skenario B memerlukan biaya energi tambahan untuk memproses bahan baku menjadi *biofuel*. Untuk itu, digunakan suatu parameter *eco-efficiency* untuk membandingkan pengaruh kedua skenario terhadap dampak lingkungan dengan memperhitungkan aspek *added value* dari produk samping. Perhitungan *eco-efficiency* untuk skenario A dan skenario B ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perhitungan *Eco-efficiency* skenario A dan skenario B

| | Skenario A | Skenario B |
|---|------------|------------|
| Nilai ekonomis produk (USD\$/MJ biodiesel) | 0,044 | 0,028 |
| Biaya bahan baku dan bahan bakar (USD\$/MJ biodiesel) | 0,015 | 0,037 |
| Dampak lingkungan/emisi gas rumah kaca (g CO ₂ -eq/MJ biodiesel) | 235,596 | 235,596 |
| Kredit emisi (g CO ₂ -eq/MJ biodiesel) | 122,493 | 120,177 |
| <i>Economic value added ratio</i> | 2,849 | 0,743 |
| <i>Environmental impact ratio</i> | 1,923 | 1,960 |
| <i>Eco-efficiency</i> | 1,481 | 0,379 |

Dari hasil perhitungan di atas, skenario A memiliki nilai rasio *eco-efficiency* terbesar yaitu 1,481 dibandingkan dengan skenario B sebesar 0,379. Dengan kata lain, skenario A lebih berkelanjutan dibandingkan dengan skenario B. Hal ini disebabkan biaya bahan baku dan energi untuk skenario B lebih besar dibandingkan dengan skenario A. Nilai tambah produk skenario B tidak terlalu besar karena produk yang dihasilkan memiliki kuantitas yang tidak terlalu besar.

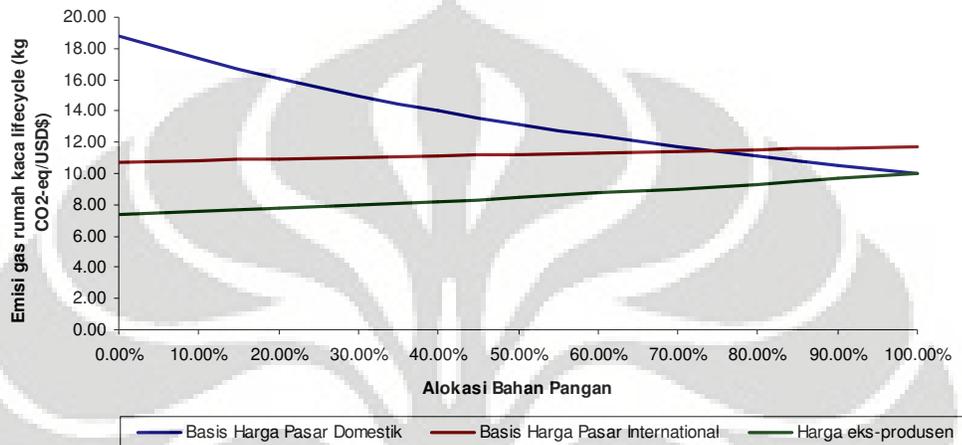
4.3.3 Pengaruh Alokasi Kelapa Sawit untuk Biodiesel dan Produk Pangan

Pada perhitungan pengaruh alokasi bahan baku untuk biodiesel dan produk pangan, rentang alokasi produk pangan yang digunakan adalah dari 0 – 10 % . Produk pangan yang dimaksud dalam pembahasan ini adalah minyak goreng dari minyak kelapa sawit halus (RBDPO).

Basis harga biodiesel dan minyak goreng yang digunakan berdasarkan harga pasar domestik dan internasional. Untuk harga biodiesel domestik terdiri dari harga jual yang ditetapkan pemerintah dan harga yang dikeluarkan dari produsen biodiesel. Adanya perbedaan harga biodiesel untuk pasar domestik ini terkait dengan adanya perbedaan harga yang ditetapkan pemerintah dengan harga dari produsen biodiesel. Harga yang ditetapkan pemerintah sesuai dengan PP No. 71/2005, yaitu berdasarkan harga MOPS (*Mean Oil Platt of Singapore*) diesel, sedangkan harga yang diklaim oleh produsen mengacu pada harga pasar Asia Tenggara (Affrianto, R., 2010). Basis harga yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.8. Basis harga ini digunakan untuk melihat pengaruh harga produk terhadap kecenderungan emisi gas rumah kaca. Perhitungan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan untuk setiap penjualan produk dapat dilihat pada Gambar 4.9.

Tabel 4. 8 Basis harga biodiesel dan minyak goreng

| Harga Jual | CPO | Biodiesel | Minyak goreng | Sumber |
|-----------------------------|---------|-----------|---------------|--------------------|
| Pasar Ekspor (US\$/ton) | 700,28 | 830,97 | 730,74 | Wahid, B., 2010 |
| Pasar Domestik (IDR/kg) | 6591,85 | 4319,77 | 7800,00 | Mursanti, E., 2007 |
| Harga eks-produsen (IDR/kg) | - | 11.027,63 | - | Mursanti, E., 2007 |

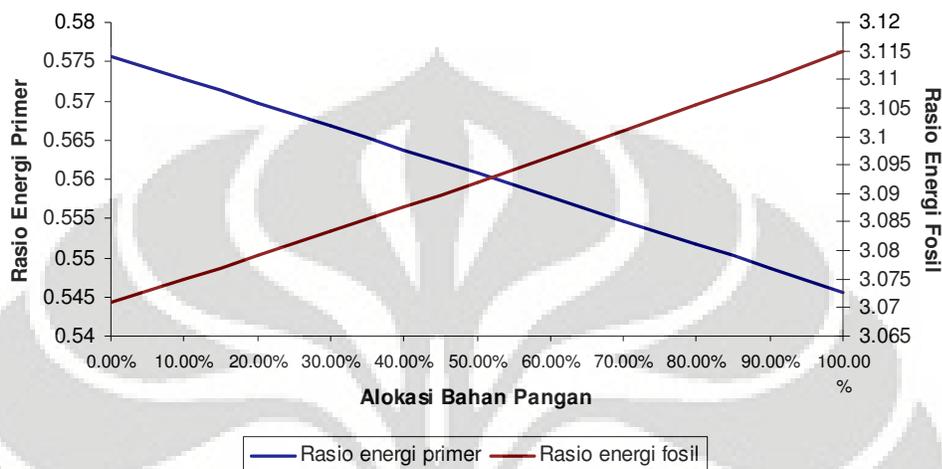


Gambar 4.9 Pengaruh alokasi bahan baku terhadap emisi gas rumah kaca

Basis harga domestik dengan harga biodiesel eks-produsen menghasilkan rata-rata hasil penjualan yang lebih besar dibandingkan dengan harga internasional dan pasar domestik. Dari hasil perhitungan emisi gas rumah kaca biodiesel dari hasil penjualan produk yang diperoleh berdasarkan peningkatan jumlah alokasi bahan baku, basis harga biodiesel dan minyak goreng mempengaruhi emisi gas rumah kaca *lifecycle*. Pada basis harga pasar domestik, emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan semakin meningkatnya persentase alokasi bahan pangan, sedangkan emisi gas rumah kaca *lifecycle* biodiesel meningkat pada basis harga internasional dan harga eks-produsen.

Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan. Sedangkan sebaliknya, jika harga jual biodiesel lebih rendah dari harga minyak goreng, maka kecenderungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan bertambahnya alokasi pangan. Emisi gas rumah kaca *lifecycle* bernilai constant jika harga biodiesel sama dengan harga minyak goreng.

Berbeda dengan emisi gas rumah kaca, konsumsi energi tidak dipengaruhi oleh besaran penjualan produk pada *lifecycle*. Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh alokasi bahan baku terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil.



Gambar 4. 10 Pengaruh alokasi bahan baku untuk produk pangan terhadap rasio energi fosil dan rasio energi fosil

Konsumsi energi primer menurun dengan bertambahnya alokasi bahan baku untuk produksi minyak goreng. Hal ini disebabkan oleh penurunan kebutuhan energi untuk proses transesterifikasi biodiesel. Rasio energi fosil meningkat dengan bertambahnya alokasi bahan baku untuk produksi minyak goreng. Hal ini berarti kontribusi energi fosil menurun dengan bertambahnya alokasi.

Pengambilan keputusan mengenai alokasi bahan baku untuk produk pangan dipengaruhi oleh aspek ketahanan pangan terkait dengan peningkatan produksi biodiesel. Peningkatan produksi *biofuel* berbasis minyak nabati seperti biodiesel akan berimplikasi terhadap berkurangnya ketersediaan bahan baku untuk produk pangan (Srinivasan, 2008). Pengintegrasian produksi biodiesel dengan minyak goreng merupakan salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan bisa disimpulkan beberapa hal berikut ini:

- Hasil analisis *lifecycle* biodiesel berbahan baku kelapa sawit memberikan nilai emisi gas rumah kaca sebesar 235,6 gram CO₂-eq/MJ biodiesel dan nilai rasio energi primer sebesar 0,59, sedangkan rasio energi fosil yang dihasilkan sebesar 3,07.
- Perkebunan kelapa sawit dengan asal lahan padang rumput (*degraded land*) menghasilkan net emisi gas terkecil dibandingkan dengan penggunaan hutan tropis dan hutan gambut. Asal lahan perkebunan kelapa sawit tidak berpengaruh terhadap konsumsi energi *lifecycle* biodiesel.
- Hasil analisis *lifecycle* biodiesel untuk pengaruh pemanfaatan produk samping biodiesel menunjukkan skenario A-opsi 1 merupakan skenario terbaik. Skenario A-opsi 1 memiliki emisi gas rumah kaca paling rendah dan rasio energi primer paling tinggi dibandingkan dengan skenario B, selain itu nilai *eco-efficiency* skenario A lebih tinggi dibandingkan dengan skenario B.
- Harga jual produk mempengaruhi kecenderungan emisi gas rumah kaca biodiesel terhadap alokasi bahan baku untuk minyak goreng. Jika harga jual biodiesel lebih tinggi daripada minyak goreng, maka emisi gas rumah kaca *lifecycle* meningkat dengan bertambahnya alokasi pangan. Jika harga jual biodiesel lebih rendah dari harga minyak goreng, maka kecenderungan emisi gas rumah kaca *lifecycle* menurun dengan bertambahnya alokasi pangan. Emisi gas rumah kaca *lifecycle* bernilai konstan jika harga biodiesel sama dengan harga minyak goreng.

DAFTAR REFERENSI

- Affrianto, Rudi. “Si Kecil Tergusur dari Pelumpang”. <http://web.bisnis.com/article/21d1721.htm>. Diakses pada tanggal 20 Juni 2010.
- Allocca, C. 2000. *Eco-Efficiency and Sustainable Product Development*. Sustainable Energy. http://web.mit.edu/10.391J/www/proceedings/Eco-efficiency_Allocca2000.pdf. Diakses pada tanggal 19 Juni 2010.
- Anonim, 2007. *Energy Efficiency and Renewable Energy, Alternative Fuels Data. Alternative Fuels: Biodiesel*. U.S. Departement of Energy, www.eere.energy.gov. Diakses tanggal 12 Febuari 2009.
- Anonim, 2004. *Kelapa Sawit*, www.wikipedia.co.id. Diakses tanggal 6 Maret 2007.
- Basha, S. A. 2009. *A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance*. Renewable and Sustainable Energy Review.
- Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (BP-PEN) 2005 – 2025*.
- BPPT, 2009. *Biodiesel*. <http://ec.bppt.go.id/biodiesel/index.htm>. Diakses tanggal 12 Febuari 2009.
- Buttler, AR., 2006. *Why is oil palm replacing tropical rainforests? Why are biofuels fueling deforestation?*. <http://www.mongabay.com>. Diakses tanggal 25 Febuari 2009.
- Chavalparit, O. 2006. *Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand*. PhD Thesis, Wageningen University.
- Corley, R.H.V. 2008. *How much palm oil do we need?* environmental science & policy 12 (2009) 134 – 139.
- Crutchfield, J. 2007. *Indonesia: Palm Oil Production Prospects Continue to Grow*. U.S. Departement of Agriculture, www.fas.usda.gov. Diakses tanggal 25 Febuari 2009.
- Dewi, A. K. 2008. *Simulasi Daur Hidup Energi dan Rantai Suplai Biodiesel untuk Sektor Transportasi di Propinsi DKI Jakarta*. Depok: Universitas Indonesia.

- Friends of the Earth. 2006. *The use of palm oil for biofuel and as biomass for energy*, www.foe.co.uk. Diakses tanggal 25 Februari 2009.
- Gheewala, S. Pleanjai, S., and Garivait, S. 2004. *Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective*. The joint international conference on “Sustainable energy and environment (SEE)”. 1-3 December 2004, Hua Hin, Thailand.
- Gutierrez, L. F. et al. 2008. *Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol*. *Bioresource Technology* 100 (2009) 1227 – 1237.
- Hameed, B.H. 2008. *Production of biodiesel from palm oil using heterogeneous catalyst: An optimized process*. *Fuel processing technology* xxx(2009) xxx – xxx.
- Hugraha, Dadan. 2007. *Analisis Life Cycle Biodiesel Berbahan Baku Minyak Sawit/CPO di Indonesia*. Tesis Program Pasca Sarjana. Depok: Universitas Indonesia
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Jepang: Institute for Global Environmental Strategies. www.ipcc-nggip.iges.or.jp. Diakses tanggal 5 April 2010.
- Kiwjaroun, C. et al. 2008. *LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods*. *Journal of cleaner production* 17 (2009) 143 – 153.
- Koh, L.P. et al. 2008. *Biofuel, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities*. *Biological Conservation* 141 (2008) 2450-2460.
- Lam, M.K. et al., 2008. *Malaysian palm oil: surviving the food versus fuel dispute for a sustainable future*. *Renewable and sustainable energy reviews* xxx (2008) xxx-xxx.
- Mursanti, E. 2007. *Proses Produksi dan Substitusi Biodiesel dan Subsidi Biodiesel dalam Mensubstitusi Solar untuk Mengurangi Ketergantungan Terhadap Solar*. Parallel Session IIIB: Energy, Natural Resource & Environment.

- Panapanaan, V., 2009. *Sustainability of palm oil production and opportunities for Finnish technology and know-how transfer*. Finland: Lappeenranta University of Technology. www.doria.fi/lutpub. Diakses tanggal 28 Mei 2009.
- Pantzaris, T. 1997. *Pocketnook of Palm Oil Uses*. Malaysia: Palm Oil Research Institute of Malaysia.
- Pascual, L., Tan, R., 2004, *Comparative Life Cycle Assesment of Coconut Biodoesel and Conventional Diesel for Philippine Automotive Transportation and Industruial Boiler Appëication*. Manila, Philippines.
- Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006 Tentang Kebijakan Energi Nasional.
- Prihandana, R, dll., 2006, *Menghasilkan Biodiesel Murah Mengatasi Polusi dan Kelangkaan BBM*. Jakarta: Agromedia Pustaka, 2006.
- Pasaribu, N., 2004, *Minyak Buah Kelapa Sawit*, Sumatera Utara: Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara.
- Rahayau, M., 2007, *Prospek Pengembangan Bio-fuel sebagai Substitusi Bahan Bakar Minyak: Teknologi Proses Produksi Biodiesel*. 2007.
- Rahmat, S., *Prospek Pengembangan Produk Sawit*, www.Tribun-timur.com. Diakses tanggal 24 Febuari 2009.
- Seehan, J et al., 1998. *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*. NREL/SR-580-24089 UC Category 1503. Colorado: A national laboratory of U.S. Department of Energy.
- Srinivasan, S., 2008. *The Food v. fuel debate: A nuanced view of incentive structures*. Renewable energy 34 (2009) 950-954.
- Smeets, E. et al., 2005. *Supportive Study for the OECD on alternative developments in biofuel production across the world*. NWS-E-2005-141. Utrecht, the Netherlands: Department of Science, Utrecht University, www.chem.uu.nl. Diakses tanggal 20 November 2009.
- Spath, P.L. et al., 2003. *Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas*. NREL/TP-510-34929. Colorado:

National Renewable Energy Laboratory, <http://www.osti.gov/bridge>.

Diakses tanggal 2 Febuari 2010.

Sunarko, *Petunjuk Praktis Budi Daya dan Pengolahan Kelapa Sawit*, Jakarta:

AgroMedia Pustaka, 2007

Suryana, A., et al, 2007, *Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Kelapa Sawit di Indonesia*, Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian Republik Indonesia.

Taiwo, K.A., et al. 2000. *Technological Assessment of Palm Oil Production in Osum and Ondo in Nigeria, Technovation, (20)*, Elsevier Science Ltd.

Tan, K.T. et al., 2009. *Palm oil: Addressing issues and towards sustainable development*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 420–427

Tan, R., Culaba, A. and Purvis, M. 2003. *Carbon balance Implications of Coconut Biodiesel utilization in the Philippine Automotive Transport Sector*. *Biomass and Bioenergy* 2003.10.002.

Timnas Pengembangan BBN, 2007. *BBN Bahan Bakar Nabati*, Jakarta: Penebar Swadaya.

Wahid, B. 2010. *Overview of the Malaysian Oil Palm Industry 2007-2009*. www.mpob.gov.my. Diakses tanggal 20 Juni 2010.

Wicke, B. et al. 2008. *Different Palm Oil Production Systems for Energy Purposes and Their Greenhouse Gas Implication*. *Biomass and Bioenergy* 32(2008) 1322 – 1337.

Zah, Raiener et al. 2004. *Life Cycle Assesment of Energy Product: Environmental Assesment of Biofuel*. Empa, www.empa.ch/tml. Diakses tanggal 18 Febuari 2009.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

1.1 Faktor Emisi Bahan Bakar

| Fuel type English description | Default carbon content ¹ (kg/GJ) | Lower | Upper |
|--|--|-------|-------|
| Municipal Wastes (non-biomass fraction) ⁸ | 25.0 | 20.0 | 33.0 |
| Industrial Wastes | 39.0 | 30.0 | 50.0 |
| Waste Oils ⁹ | 20.0 | 19.7 | 20.3 |
| Peat | 28.9 | 28.4 | 29.5 |
| Wood/Wood Waste ¹⁰ | 30.5 | 25.9 | 36.0 |
| Sulphite lyes (black liquor) ¹¹ | 26.0 | 22.0 | 30.0 |
| Other Primary Solid Biomass ¹² | 27.3 | 23.1 | 32.0 |
| Charcoal ¹³ | 30.5 | 25.9 | 36.0 |
| Biogasoline ¹⁴ | 19.3 | 16.3 | 23.0 |
| Biodiesels ¹⁵ | 19.3 | 16.3 | 23.0 |
| Other Liquid Biofuels ¹⁶ | 21.7 | 18.3 | 26.0 |
| Landfill Gas ¹⁷ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Sludge Gas ¹⁸ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Other Biogas ¹⁹ | 14.9 | 12.6 | 18.0 |
| Municipal Wastes (biomass fraction) ²⁰ | 27.3 | 23.1 | 32.0 |

Notes:

¹ The lower and upper limits of the 95 percent confidence intervals, assuming lognormal distributions, fitted to a dataset, based on national inventory reports, IEA data and available national data. A more detailed description is given in section 1.5

² Japanese data; uncertainty range: expert judgement;

³ EFDB; uncertainty range: expert judgement

⁴ Coke Oven Gas; uncertainty range: expert judgement

⁵ Japan & UK small number data; uncertainty range: expert judgement

⁶ 7. Japan & UK small number data; uncertainty range: expert judgement

⁸ Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

⁹ Lubricants ; uncertainty range: expert judgement

¹⁰ EFDB; uncertainty range: expert judgement

¹¹ Japanese data; uncertainty range: expert judgement

¹² Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

¹³ EFDB; uncertainty range: expert judgement

¹⁴ Ethanol theoretical number; uncertainty range: expert judgement

¹⁵ Ethanol theoretical number; uncertainty range: expert judgement

¹⁶ Liquid Biomass; uncertainty range: expert judgement

¹⁷⁻¹⁹ Methane theoretical number; uncertainty range: expert judgement

²⁰ Solid Biomass; uncertainty range: expert judgement

Sumber: (IPCC, 2006)

1.2 Parameter Input Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan

| Parameter | Unit | Value |
|--|---|-------|
| Aboveground biomass (AGB) before land conversion | | |
| Natural rainforest | tdm ha ⁻¹ | 350 |
| Logged-over forest | tdm ha ⁻¹ | 175 |
| Degraded land | tdm ha ⁻¹ | 6,2 |
| AGB at oil palm plantation after 25 year | tdm ha ⁻¹ | 118 |
| Belowground biomass (BGB) before land conversion | | |
| Natural rainforest | tC ha ⁻¹ | 41 |
| Degraded land | tC ha ⁻¹ | 5 |
| BGB at oil palm plantation after 25 year | tC ha ⁻¹ | 19 |
| Carbon faction | | |
| Natural rainforest | kgCt ⁻¹ dm | 490 |
| Palm plantation | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| Grass land | kgCt ⁻¹ dm | 400 |
| C stocks of litter and dead wood | | |
| Before conversion | tC ha ⁻¹ | 2,1 |
| After conversion | tC ha ⁻¹ | 0 |
| Palm plantation | tC ha ⁻¹ | 5,9 |
| Soil organic C | | |
| Reference | tC ha ⁻¹ | 60 |
| Oil palm plantation | tC ha ⁻¹ | 40 |
| Emission factor | | |
| C from drained peatland | tC ha ⁻¹ yr ⁻¹ | 10,7 |
| N ₂ O from drained peatland | kg N ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ | 8 |

Sumber: (IPCC, 2006)

1.3 Perhitungan Emisi Alih Fungsi Lahan

| Parameter | Unit | Asal Lahan | | |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------|---------------|
| | | Hutan hujan (<i>base case</i>) | Lahan Gambut | Degraded Land |
| Net LUC _{emissions} | g CO ₂ -eq/FU | 142,7120 | 391,6896 | -37,3422 |
| LUC | g CO ₂ -eq/FU | 241,1613 | 241,1613 | 61,1070 |
| Assim | g CO ₂ -eq/FU | -98,4493 | -98,4493 | -98,4493 |
| Drain _{Peatland} | g CO ₂ -eq/FU | - | 248,9776 | - |
| 3.7 | <i>dimensionless</i> | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| LUC C | ton C/ha | 274,6 | 274,6 | 69,58 |
| C _{uptake} | ton C/ha | 112,1 | 112,1 | 112,1 |

1.4 Faktor Emisi Pupuk dan Kandungan Nutrient EFB

| Nutrient | Nutrient Content | Equivalent chemical fertilisers | CO2 emission factors | Unit |
|----------|------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------|
| N | 3,20 | 30% Urea: 0,84 kgN/t EFB | 3,29 | kg CO2eq/kg N |
| | | 70% Ammonium sulphate: 2,36 kgN/t EFB | 2,68 | kg CO2eq/kg N |
| P | 0,38 | 0,89 kg P2O5/t EFB | 2,46 | kg CO2eq/ kg P2O5 |
| K | 9,60 | 11,6 kg K2O/t EFB | 0,50 | kg CO2eq/ kg K2O |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.5 Parameter Input Perhitungan Emisi Penanaman Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|---|-------|-------------------|
| EF produksi pupuk | | |
| Ammonium sulphate | 2,7 | kg CO2-eq/kg N |
| Urea | 1,3 | kg CO2-eq/kg N |
| P2O5 | 2,46 | kg CO2-eq/kg P2O5 |
| K2O | 0,5 | kg CO2-eq/kg K2O |
| Molar rasio P to P2O5 | 4,6 | dimensionless |
| Molar rasio K to K2O | 2,4 | dimensionless |
| EF managed soil/penggunaan pupuk N | 10 | kg N2O-N/ton N |
| EF/GWP N2O | 296 | kg CO2-eq/kg N2O |
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| Densitas diesel fuel | 0,836 | kg/liter |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO2-eq/kWh |
| EF produksi bahan bakar diesel | 88 | g CO2-eq/MJ |

Sumber: (IPCC, 2006)

1.6 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Penanaman Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|---|--------------|--------------------|
| Emisi Produksi Pupuk | | |
| Pupuk N | 3,83 | g CO2-eq/FU |
| Pupuk K | 1,31 | g CO2-eq/FU |
| Pupuk P | 30,00 | g CO2-eq/FU |
| Emisi Penggunaan Pupuk/managed soil | | |
| Pupuk N | 5,66 | g CO2-eq/FU |
| Total | 40,81 | g CO2-eq/FU |
| | | |
| Parameter | Value | Unit |
| Emisi Penggunaan bahan bakar diesel | 10,79 | g CO2-eq/FU |
| Emisi Penggunaan listrik | 0,03 | g CO2-eq/FU |
| | | |
| Emisi total pembakaran diesel pada peralatan perkebunan | 9,50 | g CO2-eq/FU |
| Total | 20,31 | g CO2-eq/FU |

1.7 Parameter Input Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit

| Parameter | Nilai | Satuan |
|---|-------|---|
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| EF produksi diesel fuel | 88 | g CO ₂ -eq/MJ diesel |
| EF penggunaan diesel fuel | 76,3 | g CO ₂ -eq/MJ |
| | | |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |
| EF produksi listrik dari CH ₄ turbin | 400 | g CO ₂ -eq/kWh |
| GWP CO | 8,5 | CO ₂ -eq |
| GWP NO _x | 5 | CO ₂ -eq |
| | | |
| Jumlah biogas per wastewater/POME | 28 | m ³ biogas/m ³ POME |
| rasio CH ₄ dalam POME | 40% | |
| Emisi Faktor CH ₄ | 24,5 | CO ₂ -eq |
| | | |
| PKE rasio | 56% | |
| PKO rasio | 44% | |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.8 Perhitungan Emisi Ekstraksi Kelapa Sawit

| Emisi | Nilai | Satuan |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|
| Emisi Penggunaan bahan bakar diesel | 1,054508222 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Emisi Penggunaan listrik | 1,343673707 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Emisi biogas dari wastewater | 13,83331019 | g CO ₂ -eq/MJ |
| Total | 16,23149212 | g CO ₂ -eq/MJ |

1.9 Parameter Input Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--------------------------------------|-------|----------------------------------|
| Kandungan Energi PFAD | 38,5 | MJ/kg |
| | | |
| Emisi Faktor produksi lemak | 107 | kg CO ₂ -eq/ton lemak |
| | | |
| NHV diesel fuel | 45,77 | MJ/kg |
| EF produksi diesel fuel | 88 | g CO ₂ -eq/MJ diesel |
| EF penggunaan diesel fuel | 76,3 | g CO ₂ -eq/MJ |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |
| EF Penggunaan biomass pada boiler | 80 | g CO ₂ -eq/MJ |

Sumber: (IPCC, 2006), (Wicke, 2008)

1.10 Perhitungan Emisi Penyulingan Kelapa Sawit

| Parameter | Value | Unit |
|-------------------------------------|-------|------------------------------------|
| Emisi penggunaan bahan bakar diesel | 1,12 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan listrik | 0,36 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan biomass | 1,42 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Total | 2,89 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |

1.11 Parameter Input Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel

| Parameter | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------------------|
| EF metanol | 786 | g CO ₂ -eq/kg metanol |
| EF katalis/NaOH | 1,2 | kg CO ₂ -eq/kg NaOH |
| EF sintetik gliserin | 9,6 | kg CO ₂ -eq/kg gliserin |
| EF pakan ternak | 744 | kg CO ₂ -eq/ton pakan |
| EF Penggunaan akhir biodiesel | 5,9 | g CO ₂ -eq/MJ biodiesel |
| EF produksi listrik dari power plant | 559 | g CO ₂ -eq/kWh |

Sumber: (IPCC,2006)

1.12 Perhitungan Emisi Transesterifikasi Biodiesel

| Output | | |
|----------------------------------|-------|------------------------------------|
| Emisi penggunaan listrik | 3,57 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi metanol | 2,94 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi Katalis | 0,24 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 5,90 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |
| total | 12,64 | g CO ₂ -eq/MJ Biodiesel |

Lampiran 2 Perhitungan Neraca Energi

2.1 Neraca Energi Lifecycle Biodiesel (Basecase)

| Energi Input | | Energi Output | |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Komponen | (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | (MJ/MJ biodiesel) |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk | | Kernel | 0,1564 |
| N | 0,0936 | EFB | 0,1138 |
| P | 0,0462 | Fibre | 0,0414 |
| K | 0,0114 | Shell | 0,1265 |
| Diesel | 0,1226 | Produksi Olein | |
| Listrik | 0,0002 | PFAD | 0,0499 |
| Energi fotosintesis Kelapa Sawit | 1,3473 | Produksi Biodiesel | |
| Ekstraksi CPO | | Biodiesel | 1 |
| Diesel | 0,0077 | Glycerol | 0,0014 |
| Energi listrik | 0,0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 2,07805E-06 | | |
| <i>acid activated clay</i> | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

2.2 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Skenario A

| Energi Input | | Energi Output | |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Komponen | (MJ/MJ biodiesel) | Komponen | (MJ/MJ biodiesel) |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Ekstraksi CPO | |
| Pupuk | | Kernel | 0,1564 |
| N | 0,0936 | EFB | 0,1138 |
| P | 0,0462 | Fibre | 0,0414 |
| K | 0,0114 | Shell | 0,1265 |
| Diesel | 0,1226 | Produksi Olein | |
| Listrik | 0,0002 | PFAD | 0,0499 |
| Energi fotosintesis Kelapa Sawit | 1,3473 | Produksi Biodiesel | |
| Ekstraksi CPO | | Biodiesel | 1 |
| Diesel | 0,0077 | Glycerol | 0,0014 |
| Energi listrik | 0,0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| <i>Phosporic Acid 85%</i> | 2,07805E-06 | | |
| <i>acid activated clay</i> | 1,42332E-05 | | |
| Steam | 0,0004 | | |
| Biomass | 0,0177 | | |
| Diesel | 0,0068 | | |
| Listrik | 0,0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1,66763E-05 | | |
| Methanol | 0,0029 | | |
| Energi listrik | 0,0230 | | |
| Total | 1,6907 | Total | 1,4895 |

2.3 Neraca Energi *Lifecycle* Biodiesel Skenario B

| Energi Input | | Energi Output | |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Komponen | Energi | Komponen | Energi |
| Perkebunan Kelapa Sawit | | Biodiesel | 1.0000 |
| Pupuk | | PKO diesel | 0.0994 |
| N | 0.0936 | bioetanol | 0.6665 |
| P | 0.0462 | bio-oil | 0.3626 |
| K | 0.0114 | Hidrogen | 0.0887 |
| Diesel | 0.1226 | biogas | 0.0707 |
| Listrik | 0.0002 | PFAD | 0.0499 |
| Energi pada fotosintesis Kelapa Sawit | 1.3474 | | |
| Ekstraksi CPO | | | |
| Diesel | 0.0077 | | |
| Energi listrik | 0.0087 | | |
| Produksi Olein | | | |
| Phosporic Acid 85% | 2.07805E-06 | | |
| acid activated clay | 1.42332E-05 | | |
| Steam | 0.0004 | | |
| Biomass | 0.0177 | | |
| Diesel | 0.0068 | | |
| Listrik | 0.0023 | | |
| Produksi Biodiesel | | | |
| NaOH | 1.66763E-05 | | |
| Methanol | 0.0029 | | |
| Energi listrik | 0.0230 | | |
| Input Energi Tambahan | | | |
| <i>palm fiber to bioetanol</i> | 1.0705 | | |
| <i>palm shell to bioetanol</i> | 0.6166 | | |
| EFB to biooil | 1.2503 | | |
| PKO to biodiesel | 0.1223 | | |
| PKE to bioetanol | 0.2171 | | |
| gliserol to H2 | 0.1673 | | |
| Total | 5.1349 | Total | 2.3378 |

Lampiran 3 Perhitungan Alokasi Bahan Baku

3.1 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 kg Bahan Baku (kg CO₂-eq/kg RBDPO)

| <i>Lifecycle stage</i> | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Alih fungsi lahan | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% | |
| Asimilasi CO ₂ dari tanaman kelapa sawit | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | -3,7965 | |
| Emisi karbon dioksida dari LUC | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | 9,3000 | |
| Penanaman Kelapa Sawit | | | | | | | | | | | | |
| Emisi Penggunaan Pupuk | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | 1,5736 | |
| Emisi Penggunaan energi fosil | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | 0,7834 | |
| Proses Ekstraksi CPO | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | 0,0925 | |
| Emisi biogas dari wastewater | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | |
| Proses Penyulingan CPO | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | 0,0568 | |
| Emisi penggunaan biomass | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | 0,0546 | |
| Proses Transesterifikasi Biodiesel | | | | | | | | | | | | |
| Emisi penggunaan energi fosil | 0,0964 | 0,0867 | 0,0771 | 0,0674 | 0,0578 | 0,0482 | 0,0385 | 0,0289 | 0,0193 | 0,0096 | 0,0000 | |
| Emisi metanol | 0,0792 | 0,0713 | 0,0634 | 0,0555 | 0,0475 | 0,0396 | 0,0317 | 0,0238 | 0,0158 | 0,0079 | 0,0000 | |
| Emisi Katalis | 0,0065 | 0,0058 | 0,0052 | 0,0045 | 0,0039 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0019 | 0,0013 | 0,0006 | 0,0000 | |
| Emisi penggunaan akhir biodiesel | 0,1593 | 0,1433 | 0,1274 | 0,1115 | 0,0956 | 0,0796 | 0,0637 | 0,0478 | 0,0319 | 0,0159 | 0,0000 | |
| Total | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 | |

3.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca untuk Setiap 1 USD\$ Penjualan Produk (kg CO₂-eq/USD\$)

| Basis Harga Pasar International | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 0,8310 | 0,8209 | 0,8109 | 0,8009 | 0,7909 | 0,7808 | 0,7708 | 0,7608 | 0,7508 | 0,7407 | 0,7307 |
| Penjualan USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 10,7574 | 10,8472 | 10,9393 | 11,0336 | 11,1303 | 11,2295 | 11,3313 | 11,4358 | 11,5431 | 11,6532 | 11,7664 |
| emisi/penjualan | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| Basis Harga Pasar Domestik | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 0,4747 | 0,5129 | 0,5512 | 0,5894 | 0,6277 | 0,6659 | 0,7042 | 0,7424 | 0,7807 | 0,8189 | 0,8571 |
| Penjualan (USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 18,8310 | 17,3605 | 16,0940 | 14,9919 | 14,0240 | 13,1674 | 12,4038 | 11,7188 | 11,1010 | 10,5409 | 10,0307 |
| emisi/penjualan | Alokasi Bahan Baku untuk Produk Pangan | | | | | | | | | | |
| | 0,00% | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% | 60,00% | 70,00% | 80,00% | 90,00% | 100,00% |
| Basis Harga eks-Produsen | 1,0000 | 0,9000 | 0,8000 | 0,7000 | 0,6000 | 0,5000 | 0,4000 | 0,3000 | 0,2000 | 0,1000 | 0,0000 |
| alokasi biodiesel/kg RBDPO | 1,2118 | 1,1764 | 1,1409 | 1,1054 | 1,0700 | 1,0345 | 0,9990 | 0,9635 | 0,9281 | 0,8926 | 0,8571 |
| Penjualan (USD\$/kg RBDPO) | 8,9391 | 8,9050 | 8,8708 | 8,8367 | 8,8026 | 8,7684 | 8,7343 | 8,7002 | 8,6660 | 8,6319 | 8,5978 |
| Emisi gas rumah kaca | 7,3765 | 7,5699 | 7,7754 | 7,9940 | 8,2271 | 8,4761 | 8,7429 | 9,0293 | 9,3376 | 9,6704 | 10,0307 |
| emisi/penjualan | | | | | | | | | | | |

