



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS *LIFECYCLE* BIOETANOL BERBASIS SINGKONG DAN  
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DI INDONESIA**

**SKRIPSI**

**NIRWANTO HONSONO**

**0806340170**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI BIOPROSES  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS *LIFECYCLE* BIOETANOL BERBASIS SINGKONG DAN  
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DI INDONESIA**

**SKRIPSI**

**NIRWANTO HONSONO**

**0806340170**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI BIOPROSES  
DEPOK  
JANUARI 2012**

## LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Nirwanto Honsono**

**NPM : 0806340170**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 2 Januari 2012**

## LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Nirwanto Honsono  
NPM : 0806340170  
Program Studi : Teknologi Bioproses  
Judul Skripsi :

### **ANALISIS *LIFECYCLE* BIOETANOL BERBASIS SINGKONG DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DI INDONESIA**

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

#### **DEWAN PENGUJI**

Pembimbing I	: Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA	(.....)
Penguji I	: Dr. Ir. Asep Handaya S., M. Eng	(.....)
Penguji II	: Dr. Ir. Praswasti P.D.K. Wulan, MT	(.....)
Penguji III	: Dr. Tania Surya Utami, ST. MT.	(.....)

Ditetapkan di : Depok, Jawa Barat, Indonesia

Tanggal : 18 Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yesus Kristus, karena atas rahmat dan bimbingan-Nya Penulis dapat menyelesaikan makalah ini. Makalah yang berjudul “**Analisis Lifecycle Bioetanol Berbasis Singkong Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit di Indonesia**” dibuat untuk memenuhi tugas skripsi S1. Makalah ini merupakan proposal penelitian yang diajukan untuk seminar. Adapun penelitian akan dilakukan pada semester terakhir untuk mata kuliah skripsi.

Pada penyusunan makalah skripsi ini, Penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku pembimbing yang bersedia membimbing dan memberi arahan kepada Penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- Kedua orang tua Penulis, yang telah mensupport secara materi dan non-materi
- Prof. Dr. Ir Widodo W. Purwanto DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia dan pembimbing skripsi penulis yang telah memberikan banyak inspirasi dan bimbingan.
- Dr. Heri Hermansyah, ST, M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknologi Bioproses yang telah memberikan banyak support kepada mahasiswanya
- Ir. Rita Arbianti M.Si selaku pembimbing akademik penulis yang telah memberikan banyak nasehat kepada penulis selama ini
- Semua dosen-dosen DTK yang tanpa mereka penulis tidak akan menjadi seperti saat ini
- Rekan-rekan kuliah yang telah menjadi teman-teman yang baik selama ini
- Ester, monica, Vina yang telah mereview skripsi ini, anak-anak kontrakan dan teman-teman Bioproses UI yang menjadi teman-teman yang baik selama ini

Penulis menyadari bahwa makalah ini masih belum sempurna, kritik dan saran yang membangun selalu penulis harapkan agar dapat menyempurnakan tulisan ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Depok, 2 Januari 2012

Penulis

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

---

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

Nama : Nirwanto Honsono  
NPM : 0806340170  
Program Studi : Teknologi Bioproses  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik

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:

**ANALISIS LIFECYCLE BIOETANOL BERBASIS SINGKONG DAN  
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DI INDONESIA**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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: 2 Januari 2012

Yang menyatakan



(Nirwanto Honsono)

## ABSTRAK

Nama : Nirwanto Honsono  
Program Studi : Teknologi Bioproses  
Judul : Analisis *Lifecycle* Dari Bioetanol Berbasis Singkong  
Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Di Indonesia

Pengembangan energi baru dan terbarukan di Indonesia menjadi salah satu program strategis pemerintah Indonesia untuk mereduksi emisi CO<sub>2</sub> dan mengurangi ketergantungan akan bahan bakar minyak. Salah satu sumber energi alternatif yang prospektif untuk dikembangkan adalah bioetanol yang merupakan satu-satunya pengganti bensin yang dikenal saat ini. Singkong dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi sumber bioetanol yang sangat potensial dikarenakan persediaannya yang melimpah di Indonesia. Studi ini meninjau daur hidup (*lifecycle*) dari bioetanol berbasis singkong dan TKKS di Indonesia dengan output berupa reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi. Batasan yang digunakan dalam studi LCA ini adalah *plantation to tank* dengan mempertimbangkan pemanfaatan produk samping dan alih fungsi lahan. Hasil Studi ini menunjukkan bahwa pengembangan singkong dan TKKS sebagai sumber bioetanol di Indonesia menghasilkan reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi yang positif. Didapatkan pula bahwa pemanfaatan produk samping dari proses produksi bioetanol akan meningkatkan performa lingkungan dan net energi bioetanol hingga 30-70%. Studi ini juga menunjukkan bahwa pengembangan bioetanol dari kedua bahan baku ini di Indonesia menghasilkan hasil yang baik jika dibandingkan dengan hasil serupa di negara lain.

Kata kunci: *lifecycle*, singkong, tandan kosong kelapa sawit, net energi, reduksi emisi CO<sub>2</sub>

## ABSTRACT

Nama : Nirwanto Honsono  
Program Studi : Bioprocess Technology  
Judul : *Lifecycle* Analysis of Cassava and Empty Fruit Bunch  
Based Bioethanol In Indonesia *By*

The development of new and renewable energy resources in Indonesia is one of Indonesia government's strategic programs to reduce CO<sub>2</sub> emission and national dependence for oil. Bioethanol is one of the most promising renewable energy today for its status as the only known substitute for gasoline. Cassava and Empty Fruit Bunch (EFB) become two of the most promising *feedstock* for Indonesia based on the crops abundant supply. This study observes the *lifecycle* of cassava and EFBbasedboethanol in Indonesia with output as CO<sub>2</sub> emission reduction and net energy. The study uses the plantation to tank scope with consideration of *by-products* utilization and land use change. This study shows that the development of both cassava and EFB as bioethanol *feedstock* in Indonesia produce a positive net energy and CO<sub>2</sub> emission reduction. It is also shown that the utilization of *by-products* from bioethanol *production* process will increase the net energy and environmental performance of bioethanol up to 30-70%. This study also shows that the development of bioethanol from both *feedstock* in Indonesia give a good results compared to results from research in other countries.

keywords: *lifecycle*, cassava, empty fruit bunch, net energy, CO<sub>2</sub> emissions reduction

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
I. 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
II. LANDASAN TEORI .....	5
2.1. Analisis LCA .....	5
2.2. Metodologi LCA .....	5
2.2.1. Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup LCA .....	6
2.2.2. Analisis inventarisasi <i>Lifecycle</i> .....	7
2.2.3. Penilaian Dampak <i>Lifecycle</i> .....	7
2.2.4. Interpretasi Data LCA.....	9
2.3. Bioetanol .....	9
2.4. Singkong.....	10
2.5. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).....	12
2.6. Pretreatment dan Konversi Singkong Menjadi Bioetanol.....	15
2.7. Pretreatment dan Konversi TKKS Menjadi Bioetanol.....	17
2.8. Pemanfaatan <i>By-Product</i> Bioetanol .....	20
2.8.1. <i>By-product</i> Bioetanol dari Singkong .....	20
2.8.2. <i>By-product</i> Bioetanol dari TKKS .....	21
2.9 Perkembangan Analisis <i>Lifecycle</i> Bioetanol .....	22

III. METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Penentuan Goal and Scope .....	29
3.2 Inventarisasi <i>Lifecycle</i> Bioetanol (LCI) .....	29
3.3. Penilaian Dampak <i>Lifecycle</i> .....	30
3.4. Analisis dan Interpretasi .....	30
IV. PERMODELAN LCA BIOETANOL .....	31
4.1. Batasan LCA ( <i>scope</i> LCA).....	31
4.2. Kalkulasi Input-Output Energi dan Output-Reduksi CO <sub>2</sub> LCA .....	32
4.2.1. Kalkulasi Input-Output Energi.....	33
4.2.2. Kalkulasi Output - Reduksi CO <sub>2</sub> .....	34
4.3. <i>Lifecycle Inventory Analysis</i> (Analisis LCI) untuk Setiap Skenario .....	35
4.3.1. LCI Utilitas Pertanian .....	35
4.3.2. Bioetanol dari Singkong .....	37
4.3.3. Bioetanol dari TKKS .....	41
4.4. Inventory Lain dan Informasi Tambahan .....	46
4.4.1. Peta Logistik .....	46
4.4.2. Utilitas Energi .....	46
4.3.3. Analisis <i>Feedstock</i> dan Lahan .....	48
4.4. Variabel <i>Lifecycle</i> Bioetanol .....	48
V. HASIL PEMBAHASAN.....	49
5.1. Skenario Simulasi.....	49
5.2. Hasil Simulasi.....	49
5.2.1. Bioetanol dari Singkong .....	49
5.2.2. Bioetanol dari TKKS .....	51
5.3. Pembahasan dan Evaluasi.....	53
5.3.1. Bioetanol dari Singkong .....	53
5.3.2. Bioetanol dari TKKS .....	56
VI. PENUTUP .....	61
6.1. Kesimpulan.....	61
6.2. Saran .....	61
DAFTAR PUSTAKA .....	62
LAMPIRAN.....	66

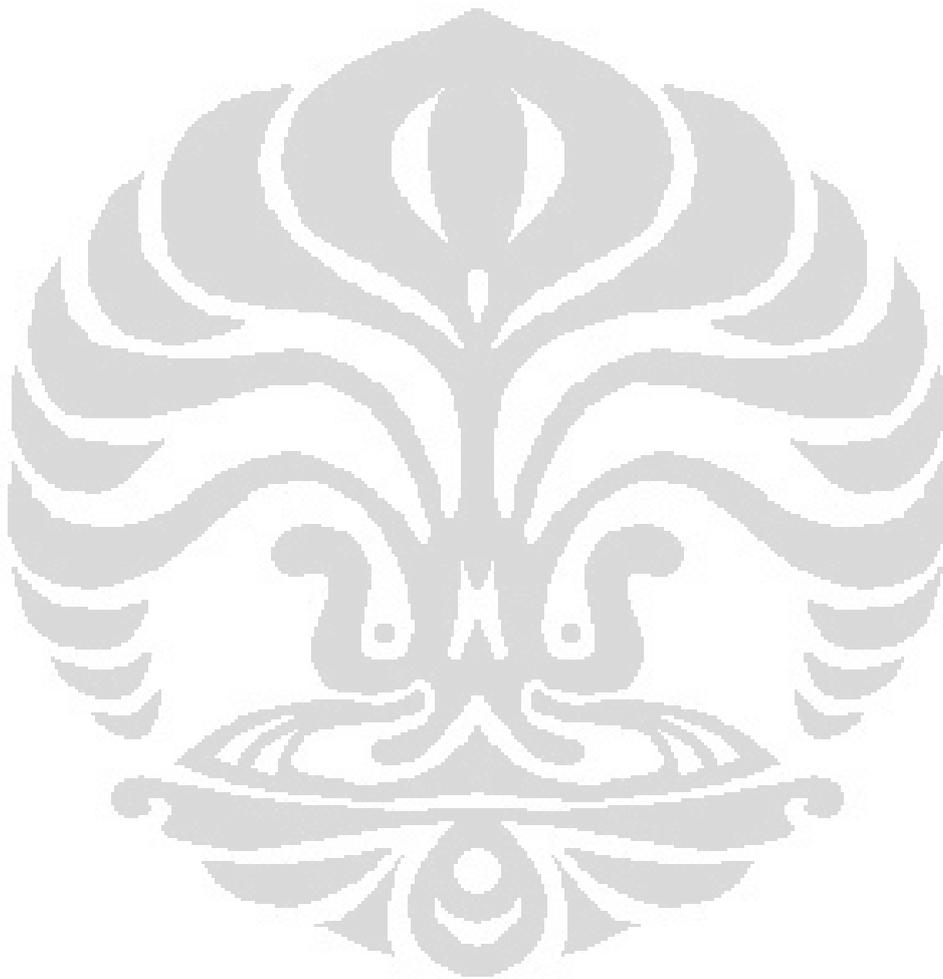
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Pertukaran aliran Dalam LCA.....	5
Gambar 2. 2. Framework LCA Menurut ISO 14040 .....	6
Gambar 2. 3 Akar Singkong yang Belum Diproses.....	11
Gambar 2. 4 TKKS .....	13
Gambar 2. 5 Diagram alir konversi singkong menjadi Bioetanol <i>FuelGrade</i> .....	17
Gambar 2. 6 Diagram alir konversi TKKS menjadi Bioetanol <i>FuelGrade</i> .....	19
Gambar 2. 7 Diagram alir dan Skema Pembuatan Biogas .....	21
Gambar 2. 8 Struktur Lignoselulosa .....	22
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	28
Gambar 4. 1 Batasan Sistem <i>Lifecycle</i> Bioetanol dari Singkong.....	31
Gambar 4. 2 Batasan Sistem <i>Lifecycle</i> Bioetanol dari TKKS.....	32
Gambar 4. 3 Peta Logistik yang Digunakan Dalam Skenario .....	46
Gambar 4. 4 Energi Mix untuk Menghasilkan Listrik di Jawa.....	47
Gambar 5. 1 Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol Berbasis Singkong...54	
Gambar 5. 2 Breakdown Input-Output Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> dari Bioetanol Berbasis Singkong .....	55
Gambar 5. 3 Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol Berbasis TKKS.....57	
Gambar 5. 4 Breakdown Input-Output Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> dari Bioetanol Berbasis Singkong .....	58

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Sifat Fisik Bioetanol pada 20°C 1 atm .....	10
Tabel 2. 2 Budidaya Singkong di Indonesia .....	12
Tabel 2. 3 Komposisi Basah dari Akar Singkong .....	12
Tabel 2. 4 Komposisi TKKS .....	14
Tabel 2. 5 Data <i>Heating Value</i> dan Kelembapan pada Limbah Kelapa Sawit .....	15
Tabel 2. 6. Kandungan Nutrisi pada DDGS.....	20
Tabel 2. 7 Perbandingan dari Beberapa Studi Analisis LCA yang Telah Ada .....	23
Tabel 3. 1 Pembagian Antara Inventori Sekunder dan Inventori Perhitungan Sendiri Untuk Kedua <i>Feedstock</i> .....	29
Tabel 4. 1 Beberapa Hasil Publikasi Mengenai Nilai Energi Equivalent Utilitas Pertanian .....	36
Tabel 4. 2 Perbandingan Data-Data Sekunder untuk Input Utilitas Pertanian Singkong .....	38
Tabel 4. 3 Perbandingan Data-Data Sekunder untuk Konversi Singkong Menjadi Bioetanol.....	39
Tabel 4. 4 Perbandingan Data Sekunder untuk Pretreatment TKKS .....	43
Tabel 4. 5 Perbandingan Beberapa Data Sekunder Input Produksi Biodiesel .....	45
Tabel 4. 6 Faktor emisi untuk utilitas energi.....	47
Tabel 4. 7 Densitas Energi dari Utilitas Energi.....	48
Tabel 5. 1 Neraca Massa dan Energi Bioetanol dari Singkong.....	49
Tabel 5. 2 Analisis Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> untuk Skenario 1 per 100.000 L bioetanol.....	50
Tabel 5. 3 Analisis Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> untuk Skenario 2 per 100.000 L bioetanol.....	50
Tabel 5. 4 Neraca Massa dan Energi Bioetanol dari TKKS .....	51
Tabel 5. 5 Analisis Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> untuk Skenario 1 per 100.000 L bioetanol .....	52
Tabel 5. 6 Analisis Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> untuk Skenario 2 per 100.000 L bioetanol .....	52

Tabel 5. 7 Analisis Energi dan Emisi CO <sub>2</sub> untuk skenario 3 per 100.000 L bioetanol.....	53
Tabel 5. 8 Hasil Analisa Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol dari Singkong.....	53
Tabel 5. 9 Perbandingan Hasil Studi dengan Penelitian Lainnya .....	56
Tabel 5. 10 Hasil Analisa Variabel LCA Tiap Skenario Bioetanol dari TKKS ...	57
Tabel 5. 11 Perbandingan Hasil Studi dengan Penelitian Lainnya .....	60



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dalam Perpres No. 5 tahun 2006, pemerintah Indonesia mendorong konsumsi *biofuel* sebesar 5% dari konsumsi minyak Indonesia atau 1,33% dari total *energy mix* tahun 2025 (Tatang *et al.*, 2005). Sesuai dengan rencana ini, dibutuhkan peningkatan dalam produksi *biofuel* di Indonesia dari kondisi saat ini yang masih mencapai 0,1% dari konsumsi *energy mix* Indonesia. Salah satu jenis *biofuel* yang telah dikembangkan adalah bioetanol. Bioetanol merupakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari hasil fermentasi glukosa menjadi etanol oleh mikroorganisme atau enzim. Keunggulan dari bioetanol sebagai bahan bakar alternatif adalah sifat fisiknya yang menyerupai gasolin sehingga tidak memerlukan banyak modifikasi pada mesin dan infrastruktur jika digunakan sebagai campuran bahan bakar bersama gasolin. Pengembangan bioetanol dipilih karena Indonesia memiliki sumber daya yang cukup besar dalam menumbuhkan tumbuhan dan bahan baku untuk produksi bioetanol.

Terdapat tiga (3) jenis bahan baku untuk produksi bioetanol, yaitu berbasis gula, berbasis pati, dan berbasis selulosa. Namun dalam perkembangan global, di masa mendatang, sumber bahan baku yang akan paling banyak dipakai untuk pengembangan bioetanol adalah berbasis pati atau berbasis selulosa (Heather L. Wakeley, Chris T. Hendrickson *et al.* 2009). Hal ini antara lain dikarenakan tingginya kebutuhan akan gula saat ini dan di masa depan, baik untuk pangan, maupun industri seperti industri asam amino. Utilisasi pati sebagai sumber bahan baku bioetanol terkendala oleh adanya kekhawatiran persaingan antara penggunaan sumber daya pati untuk pangan serta untuk energi (Giselrod, V *et al.* 2008) . Oleh karena itu, banyak pihak menanggapi bahwa bioetanol berbasis selulosa yang seringkali merupakan limbah pertanian merupakan solusi untuk menghindari persaingan antara pangan dengan energi (Larson 2008). Penilaian terhadap bahan baku dari suatu energi alternatif harus memperhatikan keunggulan dari bahan baku tersebut dalam mengurangi dampak lingkungan dibandingkan bahan baku lainnya serta bahan bakar konvensional.

Dalam menganalisis dampak lingkungan dari setiap bahan baku produksi bioetanol yang diinginkan perlu dilakukan analisis *lifecycle* terhadap setiap skenario produksi yang mungkin. Dalam penelitian ini skenario produksi yang dirancang adalah berdasarkan bahan baku yang banyak diteliti secara teknis untuk diutilisasi di Indonesia. Singkong digunakan sebagai *feedstock* pertama yang berbasis pati karena merupakan sumber pati yang potensial namun dikonsumsi sebagai makanan oleh orang Indonesia (Zhang, Han *et al.* 2003). *Feedstock* kedua adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) (Piarpuzán, Quintero *et al.* 2011) sebagai bahan baku bioetanol berbasis selulosa. Penggunaan TKKS sebagai bahan baku skenario dua dikarenakan persediaannya yang sangat melimpah dan utilitasnya yang masih rendah di Indonesia. Analisis *lifecycle* merupakan suatu analisis penilaian dampak dari suatu produk dengan mengevaluasi dampak lingkungan dan konsumsi energi serta energi yang dihasilkan dari setiap skenario mulai dari proses penanaman bahan baku hingga menjadi produk akhir dan limbah (ISO 14040:1997). Analisis *lifecycle* banyak dipakai untuk membandingkan suatu produk atau proses baru dengan pendahulunya dan juga dalam mencari alternatif proses yang lebih baik dalam hal ekonomi atau lingkungan (Curran, 1996) Analisis *Lifecycle* telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian mengenai potensi bioetanol di berbagai belahan dunia, antara lain analisis efek lingkungan dan ekonomi dari transportasi bioetanol di AS (Heather L. Wakeley, Chris T. Hendrickson *et al.* 2009) dan untuk membuat berbagai model alternatif produksi bioetanol oleh MIT (Groode and Heywood 2007).

Faktor-faktor yang akan turut diperhatikan dalam analisis ini adalah (1) pengalokasian produk samping, (2) transportasi dan (3) penanaman bahan baku bioetanol serta (4) pendekatan teknologi untuk pengalokasian *by-product* dari tiap skenario produksi. Dari hasil analisis *lifecycle* ini akan didapatkan data berupa total keluaran gas rumah kaca CO<sub>2</sub> serta jumlah konsumsi energi dari setiap skenario dibandingkan dengan penelitian serupa yang dilakukan di negara lain. Hasil analisis ini dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam memilih jenis bahan baku yang akan dipilih dalam investasi pabrik pengolahan bioetanol dan sebagai perbandingan potensi pengembangan bioenergi di Indonesia dibandingkan dengan

negara lain. Hal ini akan menjadi suatu terobosan baru dalam industri bioetanol di Indonesia.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang ingin dijawab dalam penelitian ini adalah apakah pengembangan bioetanol berbasis singkong dan TKKS di Indonesia akan menghasilkan dampak lingkungan yang baik berupa reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi yang positif dan apakah pengembangan bioetanol berbasis singkong dan TKKS di Indonesia menghasilkan dampak lingkungan sebaik pengembangan serupa di negara lain. Dengan memperhatikan faktor seperti teknologi konversi, transportasi dan penanaman bahan baku bioetanol serta pendekatan teknologi untuk pengalokasian *by-product* dari tiap skenario produksi. Analisis ini akan dibuat dalam suatu model perhitungan LCA.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1 Menghitung reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi dari *lifecycle* bioetanol berbasis singkong dan tandan kelapa sawit di Indonesia
  - Membuat model *lifecycle analysis* (LCA) dari masing-masing *feedstock* untuk produksi bioetanol.
  - Menghitung input utilitas yang dibutuhkan dalam model LCA bioetanol untuk kedua *feedstock*
  - Melakukan analisis dampak berupa reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi untuk tiap *feedstock* bioetanol
- 2 Membandingkan hasil yang didapat dengan hasil penelitian serupa di negara lain.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan yang dipakai dalam penelitian ini adalah:

1. Model *lifecycle* energi dilakukan berawal dari perkebunan bahan baku, pretreatment dan proses konversi *feedstock*, pemanfaatan *by-product*, transportasi bioetanol ke konsumen, hingga bioetanol sampai ke tangki bahan

bakar konsumen. Transportasi yang diperhitungkan dalam model ini hanya mencakup transportasi jalur darat saja.

2. Model LCA dalam penelitian ini hanya memvariasikan (1) skenario penggunaan *by-product* untuk tiap *feedstock* dan (2) faktor emisi CO<sub>2</sub> dari alih fungsi lahan untuk kelapa sawit.
3. Analisis *lifecycle* ini hanya memperhitungkan dampak lingkungan berupa reduksi emisi CO<sub>2</sub> dan net energi dari inventarisasi neraca massa dan energi untuk tiap *feedstock* dan skenario produksi bioetanol.
4. Analisis *lifecycle* ini secara spesifik mengasumsikan lokasi pertanian Singkong di Pacitan, Jawa Timur. Lokasi perkebunan kelapa sawit di Muaro Jambi, Jambi. Konsumen akhir diasumsikan berada di Jabodetabek.

## 1.5 Sistematika Penulisan

### **BAB I: Pendahuluan**

Berisi kerangka penelitian, berupa latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

### **BAB II: Tinjauan Pustaka**

Berisi dasar teori yang menjelaskan tentang produk, *feedstock* yang diuji, teknologi produksi, deskripsi dan metodologi analisis *lifecycle*, dan perkembangan analisis *lifecycle* bioetanol.

### **BAB III: Metode Penelitian**

Berisi alur dan framework penelitian yang dilakukan secara keseluruhan beserta dengan framework dan kerangka kerja yang dipakai.

### **BAB IV: Permodelan *Lifecycle* Bioetanol**

Berisi permodelan dan asumsi-asumsi yang diambil dalam analisis *lifecycle* ini. Secara umum terdiri dari tiga bagian utama, yaitu batasan masalah, *lifecycle* inventory, dan variabel *lifecycle*

### **BAB V: Hasil dan Pembahasan**

Berisi hasil analisa *lifecycle* yang telah dilakukan beserta dengan analisis untuk setiap hasil yang telah didapatkan. Analisis untuk setiap skenario dalam tiap *feedstock* dan dilakukan berdasarkan variabel-variabel *lifecycle* dipakai

### **BAB VI: Kesimpulan dan Saran**

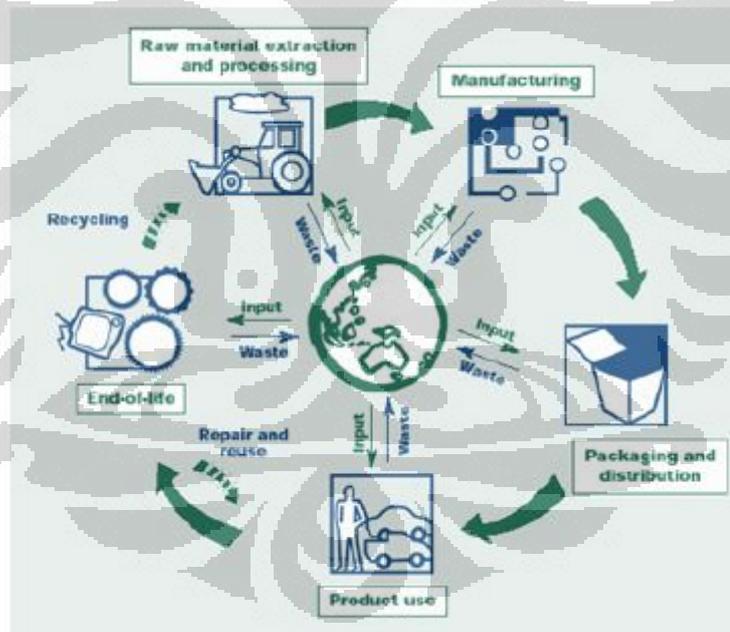
Berisi simpulan dan saran dari Studi ini

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Analisis LCA

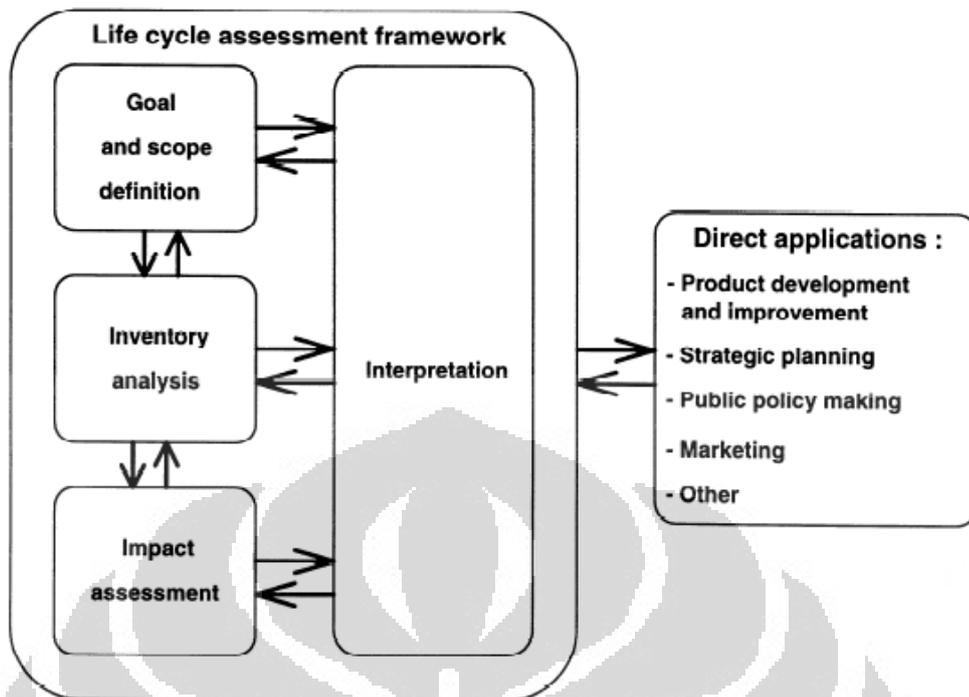
Analisis *Lifecycle* atau *Lifecycle Analysis* (LCA) adalah sebuah mekanisme untuk menganalisa dan memperhitungkan dampak lingkungan total dari suatu produk dalam setiap tahapan daur hidupnya. Dimulai dari persiapan bahan mentah, proses produksi, penjualan dan transportasi, serta pembuangan produk (ISO 14040:1997). Konsep dalam analisa *lifecycle* ini disebut juga sebagai konsep “*cradle to grave*”. Dalam proses analisa *lifecycle* dilakukan suatu prosedur objektif dalam mengevaluasi dampak lingkungan dengan melakukan determinasi kuantitatif dari semua aliran masuk/keluar (*exchange flow*) dari sistem terhadap lingkungan dalam tiap tahap kehidupan sistem.



Gambar 2. 1. Pertukaran aliran Dalam LCA ([www.environment.gov.au](http://www.environment.gov.au))

#### 2.2. Metodologi LCA

LCA menurut framework ISO 14040 terdiri dari empat tahapan utama, yaitu: penentuan definisi dan ruang lingkup LCA, inventarisasi data LCA, penilaian dampak, serta interpretasi data (ISO 14040:1997)



Gambar 2. 2. Framework LCA Menurut ISO 14040 (ISO 14040:1997)

### 2.2.1. Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup LCA

Sebelum dilakukan analisis *lifecycle*, maka yang pertama kali harus dilakukan adalah pendefinisian dari tujuan analisis *lifecycle* ini. Menurut Curran, tujuan dari analisis LCA antara lain, adalah membandingkan suatu produk atau proses baru dengan kompetitifnya, memilih alternatif produk atau proses yang lebih ramah lingkungan, dan menganalisis dampak lingkungan dan ekonomi dari suatu proses kerja (Curran, M.A., 1996).

Setelah dilakukan pendefinisian terhadap tujuan dari analisis LCA, maka berikutnya adalah pembatasan ruang lingkup dari analisis LCA. Dalam analisis *lifecycle*, ruang lingkup dibagi dalam sistem dan lingkungan. Segala produk, proses, operasi serta aktifitas yang sedang dipelajari termasuk dalam sistem. Segala sesuatu diluar sistem adalah lingkungan. Input dari suatu sistem adalah segala sumber daya dari lingkungan, termasuk didalamnya materi dan energi. Output dari sistem adalah segala sesuatu yang dilepaskan ke dalam lingkungan. Termasuk didalamnya, energi, emisi, serta *postconsumer* dari produk.

### 2.2.2. Analisis inventarisasi *Lifecycle*

Dalam analisis inventarisasi *lifecycle* dilakukan pengumpulan data terhadap semua input atau output yang relevan terhadap analisis LCA. Sebagai contoh energi yang dikonsumsi, dan jumlah emisi. Kemudian semua data yang ada dikuantifikasikan dan ditambahkan. Semua data yang diinventarisasi dapat dikumpulkan berdasarkan hasil penelitian (literatur) maupun melalui simulator proses.

### 2.2.3. Penilaian Dampak *Lifecycle*

Data-data yang telah dikumpulkan sebelumnya diterjemahkan dalam dampak lingkungan yang dihasilkan. Tahapan dasar dalam melakukan penilaian dampak *lifecycle* adalah, pertama pendefinisian dari kategori dampak yang dianalisa. Kedua identifikasi indikator kategori. Ketiga klasifikasi penilaian dampak *lifecycle*. Serta keempat adalah karakterisasi dampak *lifecycle*.

Secara garis besar, kategori dampak yang dianalisis terbagi dalam tiga, yaitu emisi udara, limbah padat, dan emisi air. Kategori indikator yang digunakan merujuk pada *sustainable development indicator*, yaitu ekonomi, lingkungan, *safety*, dan sosial. Dalam analisis ini dampak yang akan dinilai hanya merujuk pada indikator lingkungan. (Curran, M.A., 1996). Indikator lingkungan yang digunakan disini adalah emisi Gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan net energi dari proses produksi bioetanol.

#### 2.2.3.1. Dampak Emisi CO<sub>2</sub>

Dalam penilaian dampak emisi karbon dioksida(CO<sub>2</sub>), hasil perhitungan akan merepresentasikan jumlah gas CO<sub>2</sub> yang diemisikan oleh *lifecycle*bioetanol. Model perhitungan emisi gas CO<sub>2</sub> yang digunakan merupakan model yang telah dikembangkan oleh *Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC,2006)* untuk mendefinisikan potensi pemanasan global dari berbagai gas rumah kaca yang berbeda. Emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam kilogram CO<sub>2</sub>-eq/Lbioetanol. Emisi CO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh faktor emisi CO<sub>2</sub> yang berasal dari penggunaan dan produksi utilitas maupun energi dalam *lifecycle*.

$$CO_{2o,p} = CO_{2eq} \times m_i \quad (2.1.)$$

$CO_{2o,p}$  = faktor emisi CO<sub>2</sub> per satuan utilitas

$m_i$  = jumlah input utilitas

Untuk analisis dampak emisi Gas Rumah Kaca CO<sub>2</sub>, digunakan parameter-parameter *lifecycle* sebagai berikut:

$$NCV = CO_{2r,LCA} - CO_{2o,LCA} \quad (2.2.)$$

$$NCR = \frac{CO_{2r,LCA}}{CO_{2o,LCA}} \quad (2.3.)$$

$NCV$  = Net CO<sub>2</sub> Value per liter bioetanol

$NCR$  = Net CO<sub>2</sub> Ratio per liter bioetanol

$CO_{2r,LCA}$  = reduksi CO<sub>2</sub> oleh sistem LCA per liter bioetanol

$CO_{2o,LCA}$  = output CO<sub>2</sub> oleh sistem LCA per liter bioetanol

Dari definisi diatas maka peforma emisi CO<sub>2</sub> yang baik dari sistem *lifecycle* ditunjukkan oleh nilai NCV yang positif dan NCR diatas 1.

### 2.2.3.2 Net Energi Lifecycle

Dalam penilaian net energi dari sistem *lifecycle* bioetanol, hasil perhitungan akan merepresentasikan jumlah energi yang dihasilkan dan dimasukan ke dalam sistem *lifecycle* bioetanol. Model perhitungan net energi yang digunakan merupakan model yang telah dikembangkan oleh *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) untuk mendefinisikan potensi penghematan energi yang mampu diberikan oleh penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif. Net energi dinyatakan dalam MJ/Lbioetanol. Net energi bioetanol dipengaruhi oleh emisi faktor dari penggunaan dan produksi utilitas maupun energi dalam *lifecycle*.

Analisis net energi yang dilakukan dalam studi *lifecycle* ini dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter *lifecycle* berikut:

$$NEV = E_{o,LCA} - E_{i,LCA} \quad (2.4.)$$

$$NER = \frac{E_{o,LCA}}{E_{i,LCA}} \quad (2.5.)$$

$NEV$	= Net Energi Value per liter bioetanol
$NER$	= Net Energi Ratio per liter bioetanol
$E_{i,LCA}$	= input energi oleh sistemLCAper liter bioetanol
$E_{o,LCA}$	= output energioleh sistemLCA per liter bioetanol

Dari definisi diatas maka peforma net energi yang baik dari sistem *lifecycle* ditunjukkan oleh nilai NEV yang positif dan NER diatas 1.

#### 2.2.4. Interpretasi Data LCA

Setiap dampak yang akan dianalisis dilakukan *valuation* kemudian diinterpretasi sesuai dengan kategori yang digunakan. Hasil dari analisis yang dilakukan akan dikembangkan untuk melakukan *process improvement* atau pemilihan terbaik dari proses yang sudah ada.

### 2.3. Bioetanol

Bioetanol adalah ethanol ( $C_2H_5OH$ ) yang diproduksi dari biomassa terbarukan. Oleh karena itu, penggunaan bioetanol sebagai *biofuel* disebut sebagai bahan bakar yang terbarukan. Bioetanol didapatkan dari hasil hidrolisis (jika perlu) dari gula kompleks, kemudian dilanjutkan dengan fermentasi oleh mikroorganisme dan pemurnian menggunakan distilasi. Pada tahun 2008, diperkirakan penggunaan bioetanol untuk bahan bakar secara global mencapai 3,2 juta GJ atau mencapai 0,7% dari produksi minyak dunia, 2% dari konsumsi gasoline dunia serta menggunakan 1% lahan pertanian secara global. Tiga perempat dari angka ini dihasilkan oleh Amerika Serikat (berbahan baku jagung) dan Brazil (berbahan baku tebu). (Goldemberg and Guardabassi 2009).

Secara teknis, penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif memiliki keunggulan karena dapat dicampur dengan gasoline dalam berbagai tingkat kemurnian ataupun dibakar secara murni tanpa menyebabkan kerusakan atau perubahan konfigurasi mesin pada mesin busi biasa. Nilai kalor dari bioetanol mencapai 66% dari nilai kalor gasoline, namun memiliki nilai oktan yang lebih tinggi. Sehingga apabila dicampur dengan bensin dalam mesin, akan meningkatkan peforma bahan bakar dibandingkan dengan penggunaan bahan

bakar gasoline biasa. Selain itu, karena menggunakan hasil pertanian sebagai bahan bakunya, maka bioetanol juga mengandung jauh lebih sedikit pencemar seperti sulfur oksida yang banyak ditemukan pada gasoline dan merupakan salah satu polutan kota. (Goldemberg and Guardabassi 2009)

Secara umum, bahan baku dari bioetanol adalah semua hasil pertanian yang mengandung gula. Baik gula sederhana (cth: molasses di tebu), amilum (pati di singkong), serta selulosa (Tandan Kosong Kelapa Sawit). Penggunaan berbagai macam bahan baku menghasilkan kualitas produk yang tetap seragam, karena substrat yang digunakan dalam fermentasi menjadi alkohol adalah gula sederhana. Perbedaan antara teknik produksi dari tiap bahan baku adalah perbedaan dalam mengkonversi gula kompleks (amilum dan selulosa) menjadi gula sederhana siap di fermentasi. Sifat fisik dari bioetanol ditunjukkan oleh Tabel 2.1. berikut:

Tabel 2. 1. Sifat Fisik Bioetanol pada 20°C dan 1 atm (Zaini 2009)

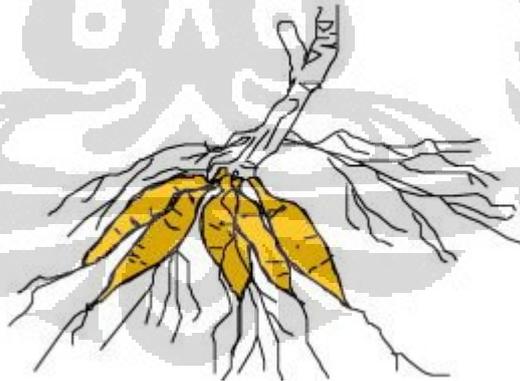
Sifat	Satuan	Nilai
Rumus Molekul	-	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Berat molekul	g. mol <sup>-1</sup>	46,07
Densitas	g. cm <sup>-3</sup>	0,789
Tekanan uap	kPa	5,95
Viskositas	Pa.s	0,012
<i>Flash point</i>	°C	13
Titik nyala	°C	362
<i>Heating value</i>	Cal/g	6900

#### 2.4. Singkong

Singkong (*Manihot esculenta*) adalah tumbuhan berkayu yang yang berasal dari keluarga *Euphorbiaceae*. Tanaman ini aslinya berasal dari Amerika Selatan, dan sejak jaman pra sejarah telah menjadi makanan bagi penduduk asli Amerika Selatan. Bagian yang paling banyak dimanfaatkan dari tanaman ini adalah bagian akarnya yang mengandung pati dalam jumlah besar sehingga banyak dimakan sebagai makanan pokok. Saat ini produsen singkong terbesar dunia adalah Nigeria.

Singkong pertama kali diperkenalkan di Indonesia pada tahun 1850, ketika dilakukan ekspor singkong dari Amerika Selatan ke Pulau Jawa. Pada mulanya, di Indonesia perkebunan singkong mendapatkan perhatian yang tinggi untuk diolah menjadi tepung. Pada masa sebelum perang dunia II. Pulau Jawa pernah menyuplai hingga 98% kebutuhan singkong dunia.

Saat ini, singkong telah dibudidayakan di hampir seluruh bagian Indonesia. Luas perkebunan singkong pada tahun 2004 telah mencapai 1,23 juta hektar seperti tertera dalam Tabel 2.2. Kandungan patinya yang tinggi hingga mencapai 90 % berat kering membuatnya potensial untuk bahan pangan serta energi bioetanol. Daya tarik lain dari singkong sebagai bahan baku pembuatan bioetanol adalah kemampuan singkong untuk tumbuh di lingkungan yang sulit serta kekurangan air, serta kandungan kalornya yang tinggi per hektar tanah. Saat ini, di seluruh dunia singkong merupakan makanan pokok utama nomor lima. Hal ini menyulitkan pemanfaatan singkong sebagai sumber energi nabati (Jansson, Westerbergh *et al.* 2009). Komposisi basah dari singkong dinyatakan dalam Tabel 2.3. Pada Gambar 2.3 ditunjukkan gambaran dari umbi singkong yang masih mentah sebagai bahan baku untuk diproduksi menjadi bioetanol.



Gambar 2. 3 Umbi Singkong yang Belum Diproses (Jansson, Westerbergh *et al.* 2009)

Tabel 2. 2Budidaya Singkong di Indonesia (BPS, 2010)

Provinsi	Luas Area (juta hektar)	Produktivitas (ton/tahun)	Produktivitas rata-rata (Ton/ha)
Sumatera Utara	27,6	411,94	14,90
Lampung	298,48	4.984,62	16,70
Jawa Barat	114,69	1.651,48	14,40
Jawa Tengah	215,52	3.469,8	16,10
Jogjakarta	47,48	764,41	16,10
Jawa Timur	241,20	3.786,88	15,70
Banten	10,75	154,82	14,40
Sulawesi Selatan	41,88	607,29	14,50
NTB	8,28	88,57	10,70
NTT	75,51	808,00	10,70
Papua	3,83	40,93	10,69
Lain-Lain	114,44	1.705,23	14,90
Total	1.239,86	18.473,96	14,90

Tabel 2. 3. Komposisi Basah dari Akar Singkong (Jansson, Westerbergh *et al.* 2009)

Kandungan	Persen berat
Air	70,25
Pati	21,45
Gula	5,13
Protein	1,12
Lemak	0,41
Serat	1,11
Abu	0,54

## 2.5. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan Kosong Kelapa Sawit merupakan produk limbah dari tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas perkebunan utama di Indonesia dengan tingkat produksi 13,5 Juta ton per Tahun

pada tahun 2010 dan luas lahan 5 juta hektar dan pertumbuhan produksi mencapai 10% per tahun (Tatang, *et al*, 2005). Sejak tahun 2007 Indonesia menggeser Malaysia sebagai penghasil kelapa sawit nomor 1 dunia. Minyak kelapa sawit digunakan secara masif dalam industri untuk keperluan konsumsi, energi, bahan baku bahan *oleochemical*.

Tandan kosong kelapa sawit merupakan produk limbah dari industri kelapa sawit. Merupakan bagian luar dari buah kelapa sawit yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa dan lignin. Sebanyak 23% dari tandan buah segar yang diproses oleh industri kelapa sawit merupakan tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Gambar TKKS ditunjukkan oleh Gambar 2.4. TKKS dari keluaran *waste* industri kelapa sawit berupa serat-serat yang bersifat higroskopis dan sangat ringan. Oleh industri kelapa sawit TKKS dihargai sangat murah sekali. Karena dinilai sebagai produk yang tidak memiliki *added value*. Oleh industri lain, TKKS digunakan sebagai bahan baku untuk serat bahan baku industri mebel dan properti serta dalam industri makanan sebagai peningkat nilai serat makanan. (Abdul Khalil, Nurul Fazita *et al*. 2010). Namun, utilitasnya masih sangat rendah dibandingkan dengan ketersediaannya sebagai limbah industri, sehingga TKKS masih dianggap sebagai limbah yang mengganggu oleh perusahaan dan penanganan yang tidak tepat terhadap TKKS mengakibatkan pencemaran lingkungan. Komposisi dari TKKS ditunjukkan oleh Tabel 2.4.



Gambar 2. 4TKKS (Zaini, 2009)

Tabel 2. 4Komposisi TKKS(Zaini, 2009)

Komponen	Basis kering		Basis basah (rata-rata)
	Range	Rata-rata	
Abu (%)	4,8-8,7	6,3	2,52
Minyak (%)	8,1-9,4	8,9	3,56
C (%)	42,0-43,0	42,8	17,12
N(%)	0,65-0,94	0,80	0,32
P <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	0,18-0,27	0,22	0,09
K <sub>2</sub> O (%)	2,0-3,9	2,90	1,16
MgO (%)	0,25-0,40	0,30	0,12
CaO (%)	0,15-0,48	0,25	0,10
B (mg/l)	9-11	10	4
Cu (mg/l)	22-25	23	9
Zn (mg/l)	49-55	51	20
Fe (mg/l)	310-595	473	189
Mn (mg/l)	26-61	48	19
C/N ratio	45-64	54	54
Selulosa	40-60	50	-
Hemiselulosa	20-40	30	-
Lignin	10-24	17	-

Selain TKKS, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah lainnya berupa serat kelapa sawit dari daging buah (*pericarp*) kelapa sawit serta cangkang inti sawit (PKS). Namun kedua jenis limbah ini dapat digunakan secara langsung sebagai bahan bakar berbasis biomassa dalam pabrik. Hal ini dikarenakan kandungan air serat kelapa sawit serta cangkang inti sawit yang menunjang untuk langsung dibakar. Nilai kalor serta kandungan air dari limbah-limbah industri kelapa sawit ditunjukkan oleh Tabel 2.5. berikut ini:

Tabel 2. 5Data *Heating Value* dan Kelembapan pada Limbah Kelapa Sawit  
(Virgilio Panapanaan, 2009)

	HHV (MJ/kg)	Kelembapan (%)	LHV (MJ/kg)
TKKS	19,40	60,00	9,90
Serat	18,20	40,00	5,80
PKS	19,30	10,00	17,10

Karakteristik bahan bakar dari TKKS tidak cukup baik sebagai bahan bakar boiler secara langsung. TKKS memiliki nilai *heating value* rendah dan kelembapan yang tinggi. Di sisi lain, PKS dan fiber memiliki karakteristik yang masih dapat diterima sebagai bahan bakar secara langsung. (Virgilio Panapanaan 2009). Pengubahan TKKS menjadi bioetanol akan meningkatkan nilai *heating value* TKKS hingga 3 kali. Oleh karena itu, pemanfaatan TKKS menjadi bahan baku bioetanol merupakan solusi yang baik karena selain mengurangi dampak pencemaran lingkungan dari TKKS juga memberikan nilai tambah produk yang cukup besar.

## 2.6. Pretreatment dan Konversi Singkong Menjadi Bioetanol

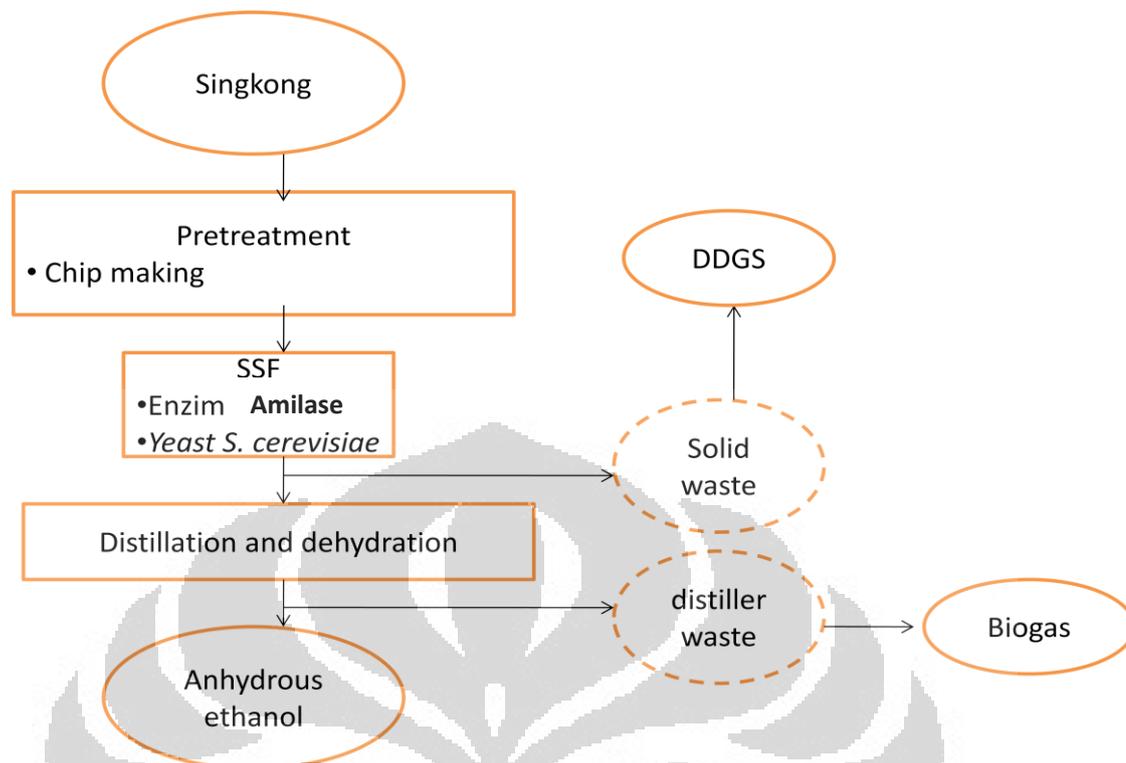
Pretreatment dan Konversi singkong menjadi bioetanol terbagi menjadi 3 buah bagian utama. Yaitu, proses pretreatment singkong menjadi *cassava chips*, proses sakarifikasi dan fermentasi singkong cacahan (*cassava chips*) menjadi bioetanol

*Pretreatment* pada singkong untuk menjadi bioetanol tergolong mudah jika dibandingkan dengan *pretreatment* pada TKKS, dikarenakan pada singkong, gula yang ada berwujud pati yang mudah untuk di sakarifikasi dan fermentasi dibandingkan dengan lignoselulosa ataupun selulosa seperti yang terdapat pada TKKS. Proses *pretreatment* yang dilakukan berupa proses pencacahan dengan menggunakan mesin pencacah berbahan bakar solar. Sementara untuk proses pengeringan menggunakan tenaga matahari dengan cara dijemur.

Untuk proses sakarifikasi dan fermentasi dari singkong untuk menjadi bioetanol digunakan bioreaktor dengan jenis CSTR. Proses yang digunakan secara enzimatik. Untuk proses sakarifikasi digunakan enzim dengan jenis  $\alpha$ -amylase dari *Bacillus subtilis* yang umum digunakan di pasaran dalam dunia industri untuk keperluan industri makanan. Proses yang digunakan adalah SSF (*Stimulated*

*Saccharification and Fermentation*) sehingga kedua proses ini menggunakan reaktor yang sama. Untuk proses fermentasi digunakan kapang *Saccharomyces cerevisiae* yang umum dikenal sebagai ragi dalam proses produksi tape dan bir. Fermentasi mengubah glukosa yang dihasilkan dari proses sakarifikasi tape menjadi ethanol. Reaktor yang digunakan memiliki suhu reaksi sekitar 40°C pada tekanan atmosfer dengan pengaduk berkecepatan 150 rpm selama 72 jam.

Pada proses pemurnian bioetanol ditujukan untuk meningkatkan konsentrasi bioetanol hingga mencapai kemurnian yang diminta oleh industri bahan bakar, yaitu sekitar >95%. Sementara dari proses fermentasi hanya didapatkan bioetanol dengan kemurnian sekitar 10%. Tahapan pertama dari proses pemisahan produk ini adalah pemisahan padatan dari keluaran fermentor. Selanjutnya, limbah padatan ini akan diolah lebih lanjut sebagai produk sampingan DDGS (*Dried Distiller's Grain with Solid*) yang berguna sebagai bahan makanan ternak. Proses pemurnian yang digunakan adalah gabungan antara distilasi dan dehidrasi bioetanol yang walaupun mahal namun sangat efektif untuk meningkatkan konsentrasi liquid secara signifikan. Menara distilasi yang digunakan adalah menara distilasi bertingkat dengan menggunakan kolom stripping dan rektifikasi. Ethanol akan berada pada aliran atas dari kolom distilasi. Sementara pada aliran bawah dari kolom akan terdapat effluen dan air. Effluen dari keluaran bawah distilasi ini pun akan diolah kembali sebagai biogas (biometana) yang digunakan kembali sebagai sumber energi. Gambar 2.5. dibawah ini menunjukkan diagram alir proses konversi singkong menjadi bioetanol



Gambar 2. 5 Diagram alir konversi singkong menjadi Bioetanol *FuelGrade*

## 2.7. Pretreatment dan Konversi TKKS Menjadi Bioetanol

Pretreatment dan Konversi TKKS menjadi bioetanol terbagi menjadi 3 bagian utama, yaitu, proses pretreatment TKKS menjadi chip TKKS, proses sakarifikasi dan fermentasi TKKS cacahan (TKKS chips) menjadi bioetanol. TKKS yang telah dipisahkan dari tandan buah sawit segar akan di berikan perlakuan pendahuluan (pre-treatment) terlebih dahulu sebelum dikonversi menjadi bioetanol. Metode pretreatment dibagi dalam 2 langkah, yaitu pencacahan TKKS menjadi chip serta pemecahan struktur kristal selulosa dan hemiselulosa. Proses pencacahan dilakukan dengan menggiling TKKS menjadi kepingan-kepingan kecil dengan menggunakan mesin pencacah atau penggiling. Tujuan pencacahan dilakukan untuk memperluas luas permukaan TKKS sebelum pretreatment kimia.

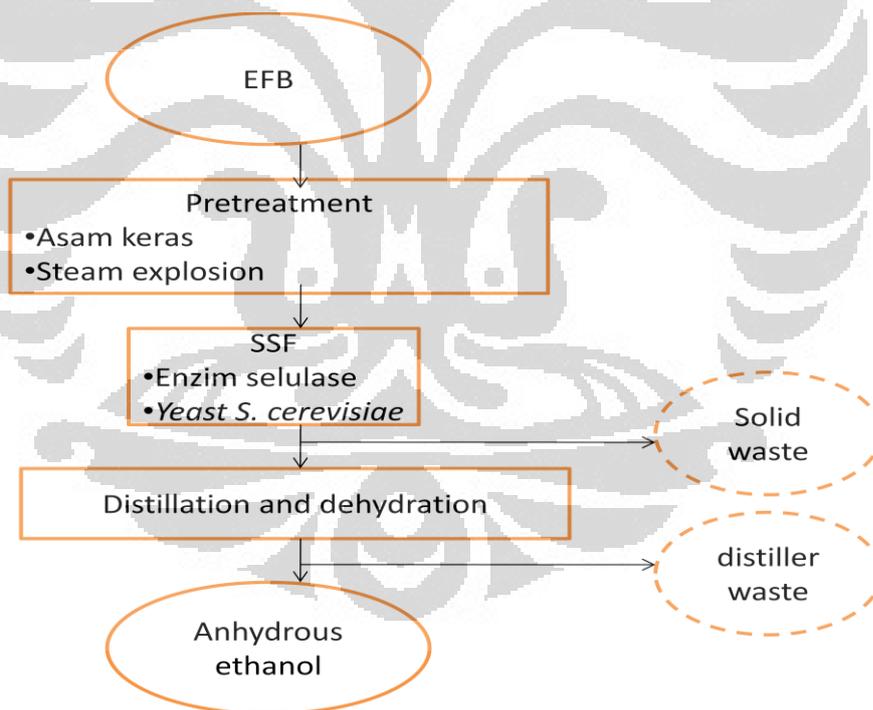
Sementara itu, pemecahan struktur selulosa dan hemiselulosa secara kimia bertujuan untuk merusak struktur lignoselulosa yang menghalangi proses fermentasi oleh enzim. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, metode-metode tersebut antara lain adalah:

- a. perlakuan dengan asam keras encer
- b. perlakuan dengan basa kuat encer
- c. menggunakan enzim
- d. metode delignifikasi
- e. pelapukan dengan jamur putih

Masing-masing metode pretreatment biomassa ini memiliki keunggulan sendiri, namun metode yang dikenal paling baik dan paling banyak diaplikasikan selama ini adalah perlakuan dengan asam keras yang dikombinasikan dengan steam explosion. Perlakuan ini dilakukan dengan menggunakan asam keras 1,1% selama 2 menit pada suhu 190°C dan tekanan 12,1 atm. Untuk mencapai suhu dan tekanan sesuai kebutuhan digunakan steam dengan tekanan 13 atm dan suhu 268°C yang diinjeksikan dalam TKKS. Informasi mengenai entalpi dan nilai energi dari steam dapat diambil dari tabel kukus. Setelah proses pemecahan kristal selulosa selesai, maka TKKS yang telah dipretreatment diberikan *lime* (batu kapur, CaCO<sub>3</sub>) untuk menetralkan pH TKKS.

TKKS yang telah di pretreatment kemudian akan menjalani proses sakarifikasi untuk mengubah hemiselulosa menjadi bentuk yang dapat difermentasi (gula selulosa). Diantara semua teknik sakarifikasi yang telah diperkenalkan, maka teknik yang paling menjanjikan untuk diimplementasikan dalam simulasi ini adalah dengan hidrolisis enzimatik. Hal ini dikarenakan proses reaksi enzimatik yang spesifik dan tidak menghasilkan reaksi sampingan yang dapat mendegradasi gula yang dihasilkan. Enzim yang digunakan adalah selulase dari *Trichoderma reesei* yang telah dikomersialkan.. Proses sakarifikasi diintegrasikan dalam suatu reaktor yang sama dengan proses fermentasi (SSF). Proses fermentasi dalam simulasi dilakukan dengan menggunakan kapang *Kluyvermyces marxianus* CECT 10875. Reaksi SSF ini akan dilangsungkan pada suhu 42°C dengan rotary shaker dengan tingkat agitasi 150 rpm selama 72 jam. Efisiensi dari proses SSF menggunakan kapang ini mencapai 0,36 kgbioetanol/ kg selulosa. Namun, untuk kapang jenis lain seperti *Saccharomyces cerevisiae* kondisi operasi yang dibutuhkan pun hampir tidak berbeda sehingga hal ini tidak berpengaruh pada analisis energi yang dihasilkan.

Hasil keluaran dari fermentor akan berupa suatu campuran yang disebut sebagai *beer*. Keluaran dari fermentor akan dipisahkan menjadi padatan dan fase cair. Fase padatan yang terdiri dari lignin akan diolah lebih lanjut sebagai *by-product* dengan cara dibakar secara langsung, hal ini dimungkinkan karena heating value/energi density lignin yang tinggi. Proses pemurnian yang digunakan adalah gabungan antara distilasi dan dehidrasi bioetanol yang walaupun mahal namun sangat efektif untuk meningkatkan konsentrasi liquid secara signifikan. Menara distilasi yang digunakan adalah menara distilasi bertingkat dengan menggunakan kolom stripping dan rektifikasi. Ethanol akan berada pada aliran atas dari kolom distilasi. Sementara pada aliran bawah dari kolom akan terdapat effluen dan air. Effluen dari keluaran bawah distilasi ini pun akan diolah kembali sebagai biogas (biometana) yang digunakan kembali sebagai sumber energi. Gambar 2.6. dibawah ini menunjukkan diagram alir proses konversi TKKS menjadi bioetanol



Gambar 2. 6Diagram alir konversi TKKS menjadi Bioetanol *FuelGrade*

## 2.8. Pemanfaatan *By-Product* Bioetanol

Pemanfaatan *by-product* dilakukan untuk kedua *feedstock*, baik singkong maupun TKKS

### 2.8.1. *By-product* Bioetanol dari Singkong

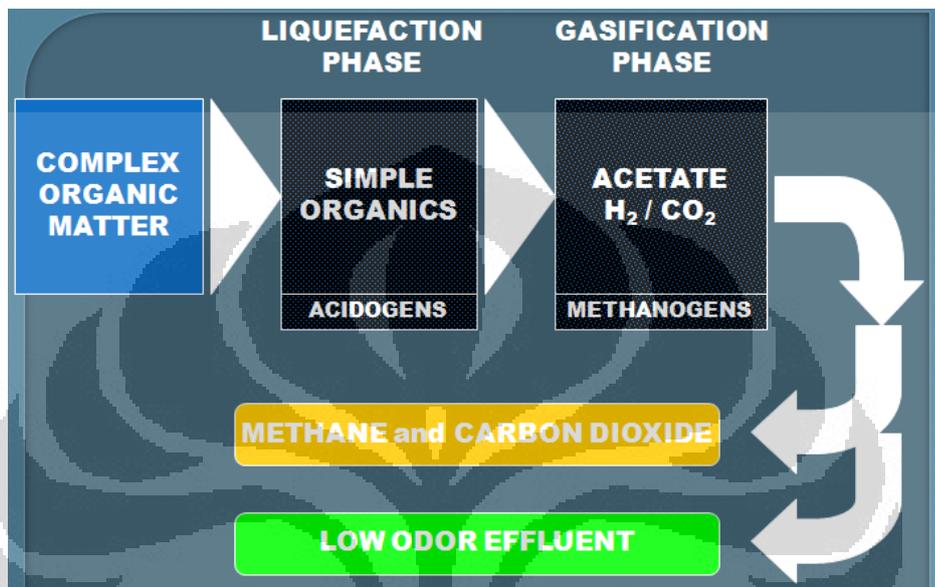
Pengolahan limbah bioetanol dari singkong ini dibagi dalam dua jenis limbah, yaitu limbah padatan dan limbah cairan. Limbah padatan berupa padatan singkong yang masih banyak mengandung protein, selulosa, pati, dan mineral. Limbah padatan ini kemudian akan dikeringkan hingga menjadi produk samping yang disebut sebagai Dried Distiller's Grain with Soluble (DDGS). Produk ini merupakan salah satu bahan makanan ternak berkualitas tinggi yang dapat digunakan sebagai substitusi dari kacang-kacangan atau biji-bijian seperti kacang kedelai sebagai bahan makanan ternak. Sementara itu limbah cair akan diolah dengan fermentasi untuk menjadi biogas (biometana) yang terdiri dari kurang lebih 65% metana. Heating value dari biogas yang cukup tinggi (22,4 MJ/m<sup>3</sup>) menjadikan biogas dapat dijadikan sumber energi yang cukup baik.

DDGS merupakan padatan singkong yang tidak terfermentasi dikurangi dengan air. Karena itu, jumlah DDGS yang dihasilkan sebagai produk samping adalah sama dengan jumlah singkong yang dikurangi dengan berat 95% pati, 100% gula, dan air. Proses pembuatan DDGS sangatlah sederhana karena hanya mengeringkan limbah padatan dari bioetanol. Proses pengeringan dapat dilakukan dengan konvensional (dijemur dibawah matahari) maupun dengan menggunakan dryer. Kandungan gizi yang terdapat dalam DDGS ditunjukkan dalam Tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2. 6. Kandungan Nutrisi pada DDGS ([www.ddgs.umn.edu](http://www.ddgs.umn.edu))

No	Nutrient	Kandungan
1	Air (% w/w)	10,5
2	Protein (% w/w)	45,6
3	Lemak (% w/w)	4,6
4	Serat (% w/w)	5,1
5	Energy (kcal/kg)	3350

Sedangkan pengolahan biogas yang dilakukan dari limbah cair proses produksi bioetanol dilakukan dengan menggunakan fermentasi yang dilakukan dalam digester. Data yang dibutuhkan untuk menghitung jumlah biogas yang dihasilkan diambil dari (Papong, *et al.* 2009). Proses pembuatan bioetanol sendiri secara sederhana digambarkan dalam Gambar 2.7. di bawah ini.



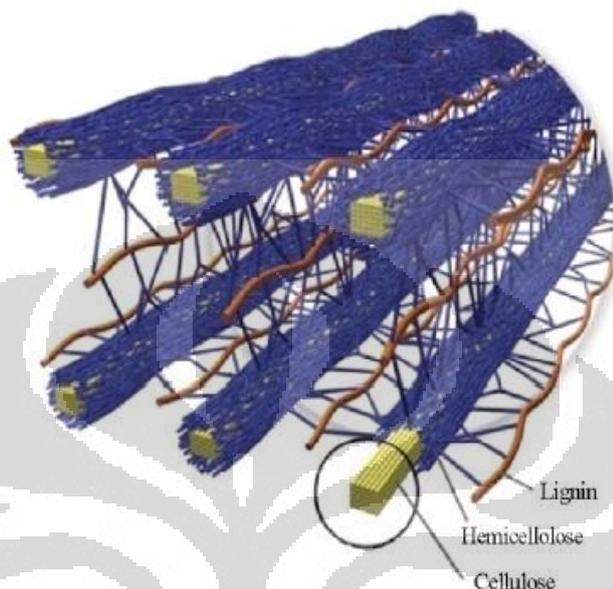
Gambar 2. 7 Diagram alir dan Skema Pembuatan Biogas (Naganami dan Ramasamy, 2008)

### 2.8.2. *By-product* Bioetanol dari TKKS

Pengolahan limbah bioetanol dari TKKS ini dibagi dalam dua jenis limbah, yaitu limbah padatan dan limbah cair. Limbah padatan berupa padatan TKKS yang mengandung sebagian besar lignin dan sisa selulosa dan hemiselulosa yang tidak terfermentasikan. Sisa padatan ini memiliki heating value yang tinggi jika digunakan sebagai bahan bakar secara langsung (heating value lignin 29,45 MJ/kg). Heating value yang cukup tinggi dari lignin ini akan menjadikan lignin sebagai bahan bakar padat yang cukup baik. Sementara itu limbah cair akan diolah dengan teknologi fermentasi untuk menjadi biogas (biometana) yang memiliki Heating value cukup tinggi (22,4 MJ/m<sup>3</sup>).

Lignin, merupakan salah satu penyusun utama dari biomassa. Strukturnya membentuk ikatan hidrogen yang kuat dengan selulosa sehingga tampak seperti menyelubungi selulosa (dikenal dengan istilah lignoselulosa). Hal inilah yang

mengakibatkan biomassa sulit untuk difermentasi. Selain itu, masalah lainnya dengan lignin adalah sifatnya yang inert yang membuatnya relatif sulit untuk direaksikan, bahkan dengan jalur biokimia sekalipun. Gambaran dari struktur lignoselulosa digambarkan dalam Gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2. 8 Struktur Lignoselulosa (Doherty, *et al.* 2010)

Karena sifatnya yang tidak terfermentasi dalam proses fermentasi, maka agar nilai energi dan *added value* dari lignin ini tidak hilang begitu saja, pemanfaatan lignin untuk dibakar menjadi salah satu cara terbaik untuk mendapatkan tambahan energi dari lignin.

## 2.9 Perkembangan Analisis *Lifecycle* Bioetanol

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 2.7. terdapat perbandingan dari beberapa studi analisis yang telah ada.

Dalam Tabel diatas, penelitian-penelitian mengenai analisa *lifecycle* bahan bakar bioetanol dapat dibagi dalam 2 tinjauan utama. Tinjauan pertama adalah untuk emisi atau gas rumah kaca dari bahan bakar bioetanol. Tinjauan kedua adalah terhadap net energi atau exergi yang dilakukan berdasarkan hukum

termodinamika. Selain itu, ada juga tinjauan-tinjauan lain yang tidak terlalu sering diangkat, semisal alih fungsi lahan. Sering pula analisis *lifecycle* meninjau kedua tinjauan utama tersebut, yaitu emisi dan net energy secara bersamaan.

Tabel 2. 7Perbandingan dari Beberapa Studi Analisis LCA yang Telah Ada

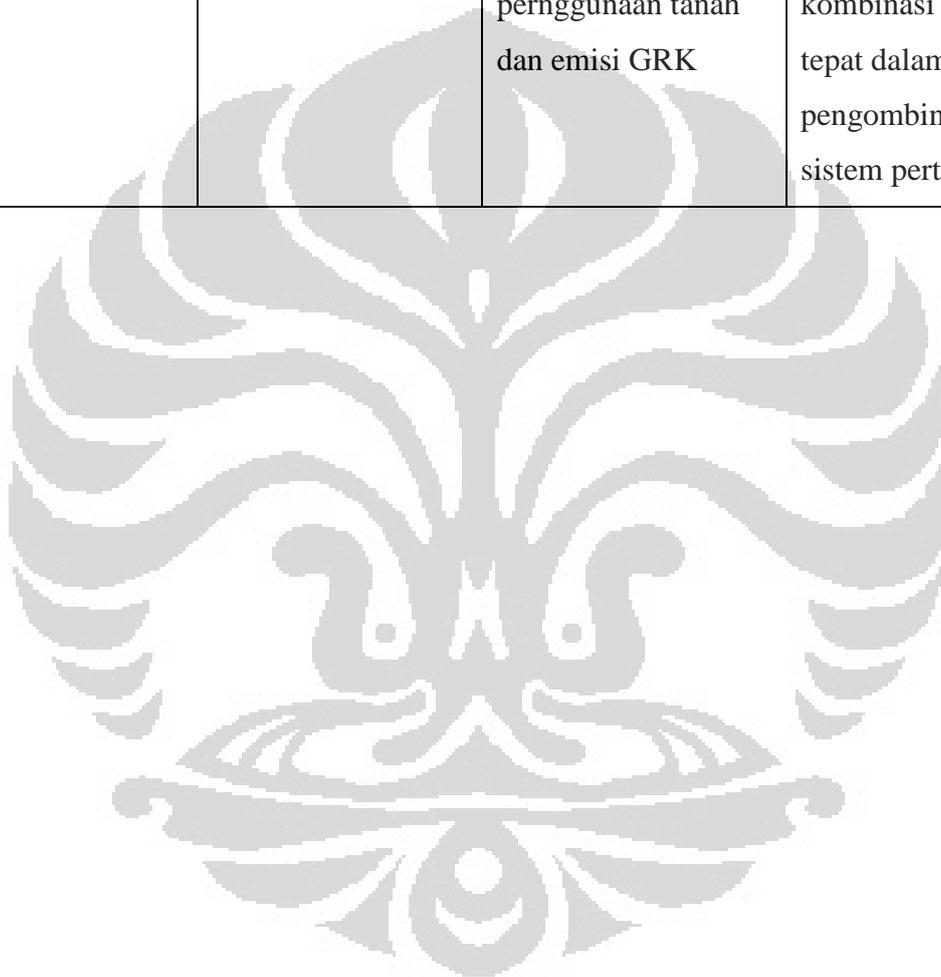
<b>Nama</b>	<b>Parameter</b>	<b>Subjek</b>	<b>Hasil Penelitian</b>
(Borjesson 2009)	Emisi Gas Rumah	Dampak ekologis	<i>Biofuel</i>
(Stoeglehner and Narodoslawsky 2009)	Kaca	dari kebijakan penggunaan <i>biofuel</i> termasuk bioetanol	menghasilkan pengurangan gas rumah kaca (GRK) dalam jumlah yang signifikan dibandingkan dengan bahan bakar fosil.
(Groode and Heywood 2007)	Emisi gas rumah kaca	Dampak lingkungan saat ini serta di masa yang akan datang untuk beberapa jalur produksi bioetanol dengan analisa monte carlo	Emisi GRK dari sektor transportasi publik akan berkurang 3.3% jika bioetanol dari jagung, 5.6% jika bioetanol dari tongkol jagung, serta 12% jika dari <i>switchgrass</i> . Penggunaan bioetanol dari <i>switchgrass</i> akan menggunakan lahan 30% lebih

			sedikit dari jagung tanpa mengurangi pasokan makanan
(Yu and Tao 2009)	Emisi gas buang (flue gas)	Uji emisi dari 3 jenis bioetanol yang dikembangkan di China	CO <sub>2</sub> dan VOC yang lebih rendah dibandingkan dengan bensin konvensional dalam daur hidupnya. Namun, dalam riset ini ditemukan bahwa singkong menghasilkan kandungan CO, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , PM10 yang lebih tinggi dibandingkan dengan gasoline
(Ou, Zhang <i>et al.</i> 2009)	Net energy value dan emisi gas rumah kaca	Mengkaji konsumsi energi dan emisi GRK dari 6 sumber <i>biofuel</i> yang dikembangkan di China	<i>biofuel</i> tidak menunjukkan dampak ekologis yang besar selama tidak dilakukan peningkatan produktivitas pertanian, pengurangan pupuk, serta pengurangan tahapan

			transportasi
(Prakash, Henham <i>et al.</i> 1998)	Yield energi dan emisi karbon	Dampak lingkungan dan yield energi dari bioetanol berbasis mollases di India	Untuk kondisi tahun 1998. Yield energi benefit yang dihasilkan oleh bioetanol berbasis mollases di India adalah sebesar 2. Emisi karbon yang dihasilkan adalah sebesar 1 kg/14,4 MJ. Untuk kondisi saat itu bioetanol dapat mengganti 28% kebutuhan gaoline India.
(Thulanthinguyen, Gewala <i>et al.</i> 2007)	Net energy value dan net renewable energy value	Analisis energi Full Chain dari bioetanol berbasis singkong di Thailand	Untuk contoh kasus Thailand, bioetanol berbasis Singkong menghasilkan net energy value dan net renewable energy value yang positif sebesar 8,8 MJ/l dan 9,15 MJ/l. Pengarang menyarankan agar Thailand mengalihkan kebijakan bioetanolnya ke basis singkong.

(Tan, Lee <i>et al.</i> 2010)	Net energy value dan net exergy value	Analisis energi dan exergi dari Bioetanol berbasis TKKS di Malaysia dibandingkan dengan produksi biodiesel dari CPO	Produksi bioetanol dari TKKS lebih stabil secara termodinamika dibandingkan biodiesel yang dapat dilihat dari net exergy yang 10 % lebih tinggi. Hanya saja Net Energy value TKKS lebih rendah 9% dari biodiesel. Namun produksi bioetanol dari TKKS sangat disarankan untuk mitigasi dampak lingkungan dari kebun kelapa sawit..
(Heather L. Wakeley, Chris T. Hendrickson <i>et al.</i> 2009)	Pengaruh transportasi terhadap net energy dan emisi GRK	Evaluasi dampak transportasi dan kebutuhan infrastruktur dari penggunaan E85 berbasis pati dan selulosa di Inggris	Transportasi yang jauh antara kebun ke pabrik serta dari pabrik ke konsumen akan membuat emisi netto GRK menjadi negatif. Direkomendasikan agar perkebunan-pabrik-konsumen

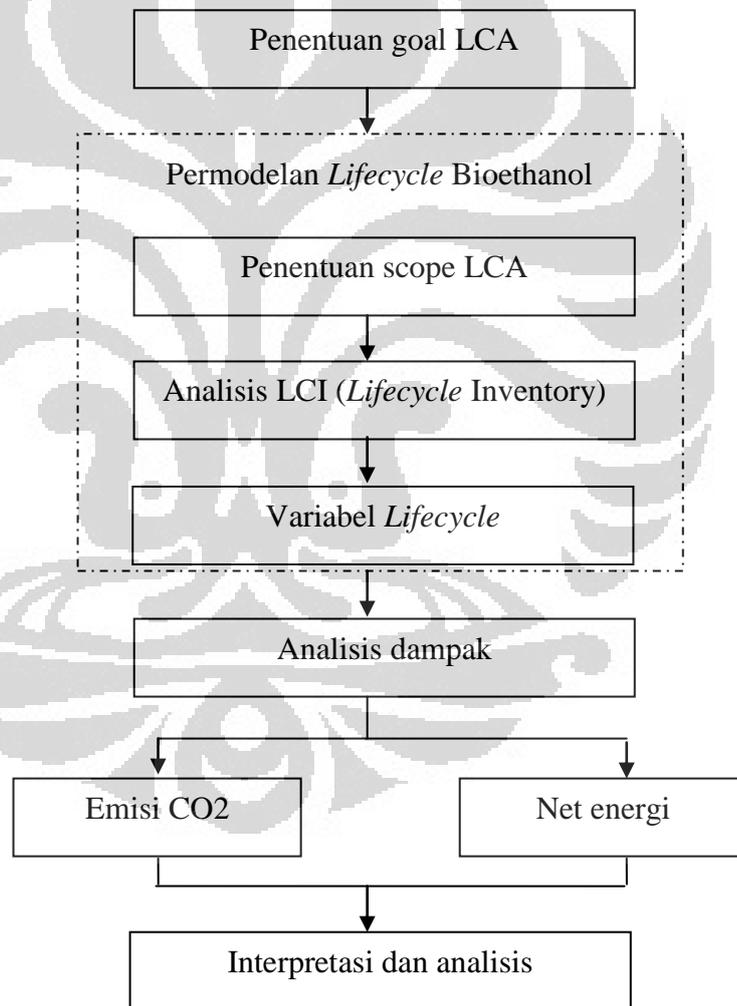
			berada di regional yang sama
(Silalertruska, Gheewala <i>et al.</i> 2009)	Alih fungsi lahan	Analisa dampak dari kenaikan permintaan bioetanol berbasis singkong di Thailand terhadap penggunaan tanah dan emisi GRK	Dalam studi ini diberikan beberapa metode yang tepat untuk mitigasi alih fungsi lahan serta kombinasi yang tepat dalam pengombinasian sistem pertanian



### BAB 3 METODE PENELITIAN

Dalam permodelan dan simulasi *lifecycle* sistem produksi bioetanol ini akan digunakan rangkaian metode pelaksanaan berdasarkan framework ISO 14040 yang terdiri dari 4 tahapan, yaitu: (1) penentuan goal dan scope, (2) analisis *lifecycle* inventory, (3) analisis dampak, serta (4) interpretasi.

Tahapan-tahapan analisis *lifecycle* diatas dijadikan acuan dalam penelitian ini. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

### 3.1 Penentuan Goal and Scope

Penentuan *Goal* dan *scope* dari penelitian ini adalah sebagai arahan dan batasan yang jelas dari penelitian ini. *Goal* dan *scope* yang ditentukan berpengaruh terhadap hasil evaluasi analisis *lifecycle*. *Goal* merupakan tujuan dari studi analisis *lifecycle* ini. *Goal* dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dampak dan performa lingkungan dari produksi bioetanol berdasarkan emisi CO<sub>2</sub> dan net energi dalam tiap *lifecycle* untuk setiap 1 L bioetanol dari *feedstock* singkong dan TKKS.

*Scope* merupakan ruang lingkup dari sistem *lifecycle* bioetanol. Detail mengenai *scope* penelitian ini terdapat pada bab permodelan LCA bioetanol.

### 3.2 Inventarisasi Lifecycle Bioetanol (LCI)

Sebagian aliran massa dan energi input dan output dari setiap *feedstock* dan skenario produksi bioetanol diperoleh dengan menggunakan data sekunder berdasarkan publikasi hasil penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya. Sebagian data lainnya didapatkan dari hasil perhitungan sendiri dengan beberapa asumsi dan data primer. Data dari masing-masing proses dari data sekunder maupun data hasil perhitungan kemudian akan diolah untuk mendapatkan inventarisasi neraca massa energi untuk produksi tiap liter bioetanol. Inventarisasi untuk tiap-tiap bahan baku dilakukan dengan metode *plantation to tank*, dari proses pertaniannya hingga mencapai penggunaan akhirnya di tangki bahan bakar kendaraan. Pada Tabel 3.1 ditunjukkan pembagian antara inventori yang didapatkan dari data sekunder dan inventori yang didapatkan dari hasil perhitungan sendiri untuk kedua *feedstock*.

Tabel 3. 1. Pembagian Antara Inventori Sekunder dan Inventori Perhitungan Sendiri Untuk Kedua *Feedstock*

<b>Bioetanol dari Singkong</b>	
<b>Inventori dari data sekunder</b>	<b>Inventori dari perhitungan sendiri</b>
Pertanian	Pretreatment
Konversi singkong	Transportasi
Pemanfaatan by-product	Penggunaan akhir ( <i>in tank</i> )

Bioetanol dari EFB	
Inventori dari data sekunder	Inventori dari perhitungan sendiri
Pertanian	Pretreatment
Konversi singkong	Transportasi
Pemanfaatan by-product	Penggunaan akhir ( <i>in tank</i> )
Biodiesel	-

### 3.3. Penilaian Dampak *Lifecycle*

Penilaian dampak *lifecycle* dilakukan dengan tujuan mengevaluasi dampak yang dihasilkan dari produksi dan penggunaan tiap liter bioetanol. 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 diterjemahkan dalam jumlah output-reduksi gasCO<sub>2</sub> dan input-output energi dalam *lifecycle* bioetanol. Pengumpulan dan perhitungan penilaian dampak *Lifecycle* dilakukan dengan bantuan *software* Microsoft Excel<sup>®</sup>. Sementara persamaan-persamaan yang digunakan dalam penilaian dampak LCA ini adalah persamaan-persamaan yang terdapat pada bagian 2.5.3.1 dan 2.5.3.2 (persamaan 2.1 - 2.4).

### 3.4. Analisis dan Interpretasi

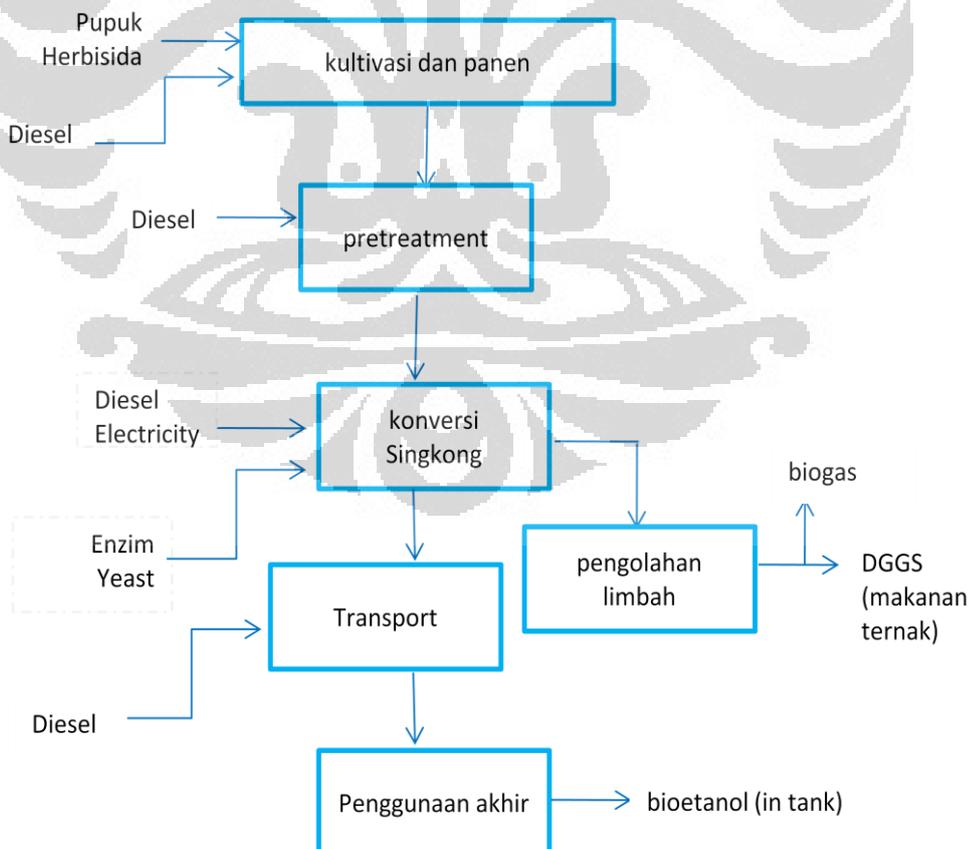
Analisis dan interpretasi dari hasil analisis *Lifecycle* ini mencakup skenario produksi yang memiliki performa lingkungan yang lebih baik, dilihat dari reduksi CO<sub>2</sub> dan selisih energi yang dihasilkan dari tiap skenario untuk masing-masing *feedstock* yang dianalisis dalam studi ini. Analisis lainnya adalah identifikasi variabel-variabel *lifecycle* dari produksi bioetanol untuk tiap *feedstock* untuk lebih memahami sifat dan karakteristik dari tiap *feedstock* sebagai bahan baku bioetanol. Setelah dilakukan perhitungan nilai variabel-variabel analisis *lifecycle*, dilakukan interpretasi data dan variabel *lifecycle* untuk memahami nilai yang dihasilkan dengan holistik. Dalam interpretasi data, dibandingkan juga nilai-nilai dari publikasi-publikasi yang mirip yang telah ada sebelumnya.

## BAB 4 PERMODELAN LCA BIOETANOL

### 4.1. Batasan LCA (*scope LCA*)

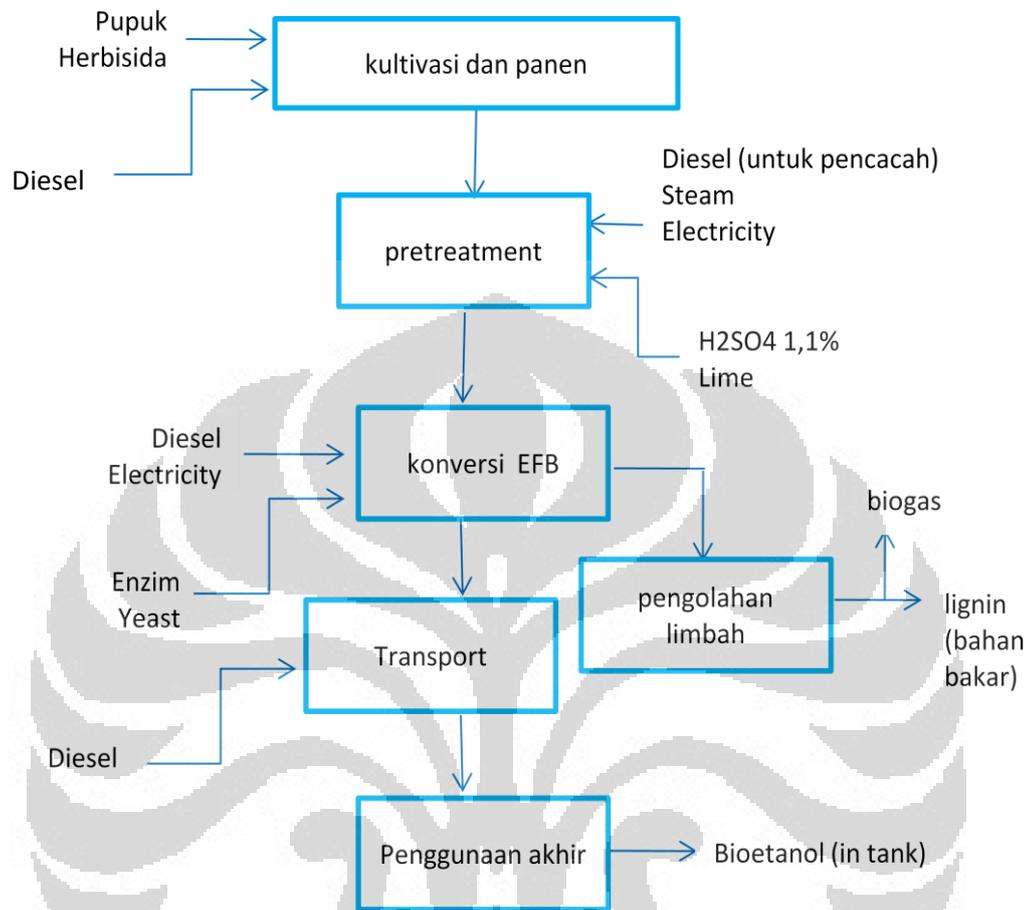
Batasan LCA untuk *feedstock* singkong meliputi proses penanaman singkong, pretreatment fisik singkong, proses konversi singkong yang mencakup proses sakarifikasi dan fermentasi singkong serta separasi bioetanol, transportasi bioetanol ke konsumen hingga bioetanol tersedia di tangki bahan bakar kendaraan. Sementara batasan sistem dari *lifecycle* bioetanol untuk *feedstock* TKKS meliputi proses penanaman pohon kelapa sawit, pretreatment TKKS baik fisik maupun kimia, proses konversi TKKS menjadi bioetanol yang mencakup proses sakarifikasi dan fermentasi serta separasi bioetanol, penggunaan *by-product* dari bioetanol yang mencakup CPO, transportasi bioetanol ke konsumen hingga bioetanol tersedia di tangki bahan bakar kendaraan.

Batasan LCA untuk bioetanol dari singkong didefinisikan dalam Gambar 4.1 sebagai:



Gambar 4. 1 Batasan Sistem *Lifecycle* Bioetanol dari Singkong

Batasan masalah untuk bioetanol dari TKKS didefinisikan dalam Gambar 4.2 sebagai:



Gambar 4. 2 Batasan Sistem *Lifecycle* Bioetanol dari TKKS

#### 4.2. Kalkulasi Input-Output Energi dan Output-Reduksi CO<sub>2</sub> LCA

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.1 dan 4.2. Sistem *lifecycle* bioetanol yang digunakan dalam studi ini dibagi dalam beberapa bagian yang dapat dibagi menjadi bagian dengan input utilitas dan bagian dengan output produk (termasuk *by-product*). Input utilitas dalam tiap bagian disertai dengan input energi dan pelepasan emisi CO<sub>2</sub> sedangkan output produk disertai dengan output energi dan reduksi emisi CO<sub>2</sub>. Untuk itu dibutuhkan perhitungan untuk mengukur emisi yang keluar atau direduksi maupun energi yang masuk atau keluar.

#### 4.2.1. Kalkulasi Input-Output Energi

Input energi didefinisikan sebagai energi dari lingkungan yang masuk dalam sistem *lifecycle* bioetanol. Energi yang masuk dalam sistem ini dapat berupa energi yang masuk secara langsung ke dalam sistem dalam bentuk utilitas energi ataupun energi yang masuk secara tidak langsung ke dalam sistem dalam bentuk utilitas non-energi. Utilitas energi termasuk steam yang dihasilkan dengan boiler diesel, diesel dan listrik. Sementara utilitas non-energi mencakup pupuk, herbisida, dan bahan-bahan kimia yang dibutuhkan dalam proses produksi. Input energi untuk tiap bagian dari sistem *lifecycle* bioetanol didefinisikan dalam persamaan 4.1. berikut:

$$E_{i,p} = E_{eq} \times m_i \quad (4.1)$$

$E_{i,p}$  = energi yang masuk dalam tiap bagian dari sistem *lifecycle*

$E_{eq}$  = energi equivalent per satuan massa utilitas

$m_i$  = jumlah aliran massa utilitas masuk dalam bagian sistem

Output energi didefinisikan sebagai energi yang dikeluarkan oleh sistem ke lingkungan. Energi yang keluar dari sistem ini didapatkan dari pemanfaatan produk samping maupun produk utama bioetanol yang menghasilkan energi kepada lingkungan. Persamaan 4.2 menunjukkan definisi dari output energi untuk tiap bagian sistem

$$E_{o,p} = E_{eq} \times m_o \quad (4.2)$$

$E_{o,p}$  = energi yang keluar dari tiap bagian sistem *lifecycle*

$E_{eq}$  = energi equivalent per satuan massa produk

$m_o$  = jumlah aliran massa produk keluaran tiap bagian sistem

Setelah input dan output energi untuk tiap bagian sistem *lifecycle* dikumpulkan, maka semua data yang telah didapat tersebut dikumpulkan jadi satu untuk mendapatkan data input dan output energi dari sistem *lifecycle* yang didefinisikan dalam persamaan 4.3 dan 4.4

$$E_{i,LCA} = \sum E_{i,p} \quad (4.3)$$

$$E_{o,LCA} = \sum E_{o,p} \quad (4.4)$$

$E_{i,LCA}$  = input energi sistem *lifecycle*

$E_{o,LCA}$  = output energi sistem *lifecycle*

#### 4.2.2. Kalkulasi Output - Reduksi CO<sub>2</sub>

Output CO<sub>2</sub> didefinisikan sebagai emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh sistem *lifecycle* bioetanol. Output CO<sub>2</sub> dihasilkan dari penggunaan utilitas-utilitas dalam sistem, baik utilitas energi yang menghasilkan maupun utilitas non-energi yang menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> dalam proses produksinya. Persamaan 4.5 memberikan definisi mengenai output CO<sub>2</sub>

$$CO_{2o,p} = CO_{2eq} \times m_i \quad (4.5)$$

$CO_{2o,p}$  = CO<sub>2</sub> yang keluar dari tiap bagian sistem *lifecycle*

$CO_{2eq}$  = faktor emisi CO<sub>2</sub> per satuan massa utilitas

$m_i$  = jumlah aliran massa utilitas masuk dalam bagian sistem

CO<sub>2</sub> direduksi didefinisikan sebagai jumlah emisi CO<sub>2</sub> ke lingkungan yang berhasil dikurangi oleh produk dari sistem *lifecycle* bioetanol jika dibandingkan dengan penggunaan utilitas yang disubstitusinya. Dalam permodelan ini, bioetanol mensubstitusi penggunaan bensin (gasoline), lignin dan biogas mensubstitusi penggunaan diesel sedangkan DDGS mensubstitusi penggunaan kedelai sebagai makanan ternak. Persamaan 4.6 memberikan definisi mengenai reduksi CO<sub>2</sub>

$$CO_{2r,p} = CO_{2eq} \times E_o \quad (4.6)$$

$CO_{2r,p}$  = CO<sub>2</sub> yang direduksi oleh tiap bagian sistem *lifecycle*

$CO_{2eq}$  = faktor emisi CO<sub>2</sub> per satuan energi utilitas yang disubstitusi oleh produk

$E_o$  = Energi yang dihasilkan oleh produk dari sistem *lifecycle*

Setelah output dan reduksi CO<sub>2</sub> untuk tiap bagian sistem *lifecycle* dikumpulkan, maka semua data yang telah didapat tersebut dikumpulkan jadi satu untuk mendapatkan data output dan reduksi CO<sub>2</sub> dari sistem *lifecycle* yang didefinisikan dalam persamaan 4.7 dan 4.8

$$CO_{2o,LCA} = \sum CO_{2o,p} \quad (4.7)$$

$$CO_{2r,LCA} = \sum CO_{2r,p} \quad (4.8)$$

$CO_{2o,LCA}$  = output CO<sub>2</sub> sistem *lifecycle*

$CO_{2r,LCA}$  = reduksi CO<sub>2</sub> sistem *lifecycle*

### 4.3. *Lifecycle Inventory Analysis* (Analisis LCI) untuk Setiap Skenario

Berikut disajikan LCI yang digunakan dalam studi ini:

#### 4.3.1. LCI Utilitas Pertanian

Pertanian (Plantation) mendapatkan perhatian yang sangat krusial dan paling sering diperdebatkan dalam analisis *lifecycle* bioenergi seperti halnya bioetanol. Hal ini dikarenakan beberapa alasan berikut:

1. Dalam suatu analisis *lifecycle* bioenergi, biasanya komponen pertanian akan menjadi penyumbang input energi dan emisi CO<sub>2</sub> nomor 2 setelah konversi.
2. Utilitas yang digunakan dalam pertanian paling beragam jika dibandingkan dengan tahapan lainnya
3. Kontroversial dan *debatable*, nilainya dapat berbeda-beda untuk berbagai kondisi geografis, kebijakan, sosial politik, dan lain-lain.

Salah satu parameter paling krusial dan kontroversial dalam analisis *lifecycle* bioetanol adalah nilai energi equivalent dari utilitas-utilitas pertanian. Hal ini diakibatkan nilai parameter ini yang sangat berbeda antar peneliti walaupun metode analisis yang dilakukan sama. Untuk nilai energi equivalent utilitas ini ada beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa pihak untuk melihat besarnya nilai-nilai ini. Utilitas-utilitas utama yang diteliti ini pada kebanyakan penelitian adalah pupuk (N,P,K) dan herbisida paraquat yang paling banyak digunakan dalam pertanian. Selain itu sebenarnya ada pula insektisida dan juga nutrisi pertanian lainnya, namun dikarenakan sifat dari kedua tanaman *energy crops* yang kami uji ini-yang kebetulan cukup mirip-, maka utilitas utama yang akan disorot dalam studi ini adalah pupuk (N,P,K) dan herbisida paraquat. Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk menghitung nilai energi equivalent dari utilitas-utilitas pertanian ini yang perbedaannya dianggap cukup signifikan ditunjukkan dalam Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4. 1 Beberapa Hasil Publikasi Mengenai Nilai Energi Equivalent Utilitas Pertanian (dalam MJ/kg)

	USDA (2004)	Pimentel and Patzek (2005)	Dai <i>et al</i> (2006)	Gheewala <i>et al</i> (2007)	Ecoivent (2006)
Pertanian					
Pupuk					
N	56,98	66,98	46,50	72,15	62,2
P	9,30	17,39	10,79	10,31	19,80
K	6,98	13,65	5,00	8,20	5,90
Herbisida (paraquat)	358,18	418,6	262,11	525,41	-

Dari data yang disajikan pada Tabel diatas, dapat diperhatikan bahwa nilai energi equivalent yang dihasilkan dari berbagai penelitian menunjukkan hasil yang berbeda-beda, bahkan untuk penelitian yang dilakukan dalam satu negara (USDA dan Pimentel melakukan penelitian di Amerika Serikat). Data diatas menunjukkan betapa beragamnya nilai energi equivalent utilitas pertanian yang dipublikasikan.

Untuk penelitian ini, kami menggunakan data utilitas pertanian yang dipublikasikan di China (Dai *et al* 2006). Pemilihan ini diambil karena kondisi Indonesia cukup mirip dengan kondisi di China, dimana pupuk dan herbisida diproduksi dan dikonsumsi di dalam negeri. Akibatnya, nilai energi equivalent utilitas menjadi rendah akibat berkurangnya energi untuk transportasi utilitas yang jauh. Data yang dihitung oleh Gheewala, *et al* dari Thailand menunjukkan energy equivalent yang jauh lebih besar dibandingkan data yang dihasilkan oleh Dai, *et al* karena Thailand mengimpor hampir 100% kebutuhan utilitas pertaniannya. Sementara data dari Pimentel tidak kami pakai karena adanya dugaan subjektivitas yang dituduhkan kepada peneliti. Data dari USDA secara umum cukup mirip dengan data yang dihasilkan oleh Dai, *et al*. Namun data dari Dai, *et al* dipilih karena kondisi yang sama-sama di Asia sehingga memiliki kemiripan yang lebih baik dibandingkan dengan data USDA.

Setelah melakukan analisis terhadap data energi equivalent dari berbagai utilitas pertanian, maka tantangan berikutnya adalah inventory terhadap emission

factor dari utilitas pertanian tersebut. Ada beberapa publikasi yang menunjukkan nilai emission factor dari utilitas pertanian tersebut. Diputuskan untuk menggunakan data sekunder yang dikumpulkan oleh (Wood and Corley, 1991) yang beberapa kali dikutip dalam penelitian lain, sehingga cukup dapat dipercaya.

#### 4.3.2. Bioetanol dari Singkong

Dalam analisis ini, basis yang digunakan adalah untuk produksi tiap 100.000L bioetanol 99,5% yang merupakan standar kemurnian bioetanol yang dapat digunakan untuk bahan bakar. Detail inventori untuk tiap bagian dinyatakan sebagai berikut:

- Penanaman Singkong

Penanaman singkong diasumsikan berada di kawasan Pacitan, Jawa Timur. Daerah ini dipilih sebagai lokasi pertanian dalam model ini walaupun bukan merupakan daerah dengan produksi singkong nomor 1 di Indonesia, dikarenakan lokasinya yang lebih ke tengah Indonesia dibandingkan dengan Lampung, lokasi *existing plant* bioetanol dari singkong saat ini. Hal ini akan mempermudah distribusi bioetanol ke berbagai wilayah di penjuru Indonesia. Berdasarkan data BPS 2010, produktivitas perkebunan singkong rata-rata di Jawa Timur mencapai 16,10 ton/ha.tahun. Perkebunan singkong ini akan diasumsikan berada dalam kompleks yang sama dengan mill dan bioetanol plant sehingga energi untuk transportasi dari perkebunan menuju pengolahan bioetanol menjadi tidak signifikan dan dianggap tidak berpengaruh.

Utilitas yang masuk untuk pertanian singkong sendiri terdiri dari pupuk (N,P,K), herbisida (paraquat), dan diesel untuk kebutuhan transportasi selama proses pertanian itu sendiri. Untuk data-data utilitas yang dibutuhkan selama pertanian ini diambil dari data sekunder dengan membandingkan beberapa data-data sekunder yang telah dipublikasikan. Perbandingan untuk data-data sekunder dalam input utilitas singkong ditunjukkan dalam data-data dalam Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4. 2 Perbandingan Data-Data Sekunder untuk Input Utilitas Pertanian Singkong (kg utilitas per kg singkong)

	Dai, <i>et al</i> (2006)	Gheewala, <i>et al</i> (2007)	Dongpatra, <i>et al</i> (1999)
Pertanian			
Pupuk			
N	0,003017	0,001812	0,008522
P	0,003017	0,001701	0,004261
K	0,006035	0,002144	0,008522
Herbisida (paraquat)	0,000905	0,000144	3,64E-06
Diesel Use	0,0019	0,0064	-
Produktivitas (kg/Ha)	33.142	27.046	22.000

Dalam penelitian ini diputuskan untuk menggunakan data sekunder yang diambil oleh (Gheewala, *et al.* 2007) yang melakukan penelitian di Thailand. Hal ini diakibatkan, datanya cukup baru dan praktek pertanian dan juga kualitas tanah yang ada di Indonesia diasumsikan lebih menyerupai kondisi yang ada di Thailand dibandingkan dengan kondisi yang ada di China (Dai, *et al.* 2006). Demikian juga dengan penggunaan diesel, dianggap bahwa di China penggunaan diesel untuk transportasi jauh lebih rendah daripada dalam praktek pertanian yang ada di China yang terkenal lebih mengutamakan labour work dibandingkan dengan machine work. Sementara dalam skenario kami, perkebunan singkong yang ada tergolong sebagai perkebunan besar yang akan lebih banyak menggunakan machine work dibandingkan dengan labour work. Karena itu, diduga bahwa praktek pertanian di Indonesia akan jauh lebih menyerupai praktek pertanian yang ada di Thailand dibandingkan dengan di China

- Pre-treatment Singkong

Pencacahan singkong menjadi chip dilakukan dengan menggunakan mesin cacah berbahan bakar diesel. Menggunakan informasi mesin pencacah singkong yang dijual di pasaran dengan daya 0,5 HP dan kapasitas cacah mencapai 40

kg/jam. kami mengalkulasi kebutuhan diesel dengan mengambil asumsi bahwa efisiensi mesin cacah mencapai 30%.

- Konversi Singkong

Utilitas yang masuk dalam sistem konversi bioetanol ini mencakup listrik, diesel serta bahan kimia yang digunakan adalah enzim  $\alpha$ -amylase dan kapang *S. cerevisiae*. Untuk mendapatkan data nilai input utilitas pada proses konversi ini diambil dari data sekunder. Dilakukan perbandingan terhadap berbagai data sekunder yang dipublikasikan untuk mencari nilai input utilitas yang terbaik. Perbandingan terhadap berbagai data sekunder ini ditunjukkan dalam Tabel 4.3 berikut yang dinyatakan dalam jumlah energi per L bioetanol yang dihasilkan.

Tabel 4. 3Perbandingan Data-Data Sekunder untuk Utilitas Proses Konversi Singkong Menjadi Bioetanol

	USDA (2004)	Pimentel and Patzek (2005)	Dai, <i>et al</i> (2006)	Gheewala, <i>et al</i> (2007)
Konversi singkong				
Listrik & steam (MJ/L)	13,86	14,93	10,97	10,15

Dari berbagai data sekunder yang ada dalam Tabel 4.3 diatas, dapat dilihat bahwa nilai input energi untuk konversi bioetanol per liternya adalah cukup sama. Dua data dari kiri pada Tabel diatas adalah data untuk bioetanol yang diproduksi dari bahan baku singkong. Sedangkan dua data dari kanan merupakan nilai energi yang dibutuhkan untuk konversi bioetanol dari bahan baku singkong. Jika dilihat, bahwa perbedaan nilai energi input dari data sekunder untuk konversi bioetanol dari singkong tidaklah berbeda jauh, yang menandakan bahwa teknologi untuk konversi bioetanol dari singkong bersifat cukup general. Diputuskan untuk menggunakan data sekunder yang diambil dari Gheewala, *et al*. Hal ini dimaksudkan agar konsisten dengan data pertanian yang juga diambil dari data sekunder yang sama.

- Waste Treatment

Pengolahan limbah bioetanol ini dibagi dalam dua jenis limbah, yaitu limbah padatan dan limbah cairan. Limbah padatan berupa padatan singkong yang masih

banyak mengandung protein, selulosa, pati, dan mineral. Limbah padatan ini kemudian akan dikeringkan hingga menjadi produk samping yang disebut sebagai DDGS (Dried Distiller's Grain with Soluble). Produk ini merupakan salah satu bahan makanan ternak berkualitas tinggi yang dapat digunakan sebagai substitusi dari kacang-kacangan atau biji-bijian seperti kacang kedelai sebagai bahan makanan ternak. Diasumsikan bahwa seluruh singkong yang tidak dikonversi akan menjadi DDGS dan 90% DDGS digunakan sebagai makanan ternak. Nilai kalori dari DDGS akan dianggap sebagai output energi dari sistem. Sementara itu limbah cair akan diolah dengan fermentasi untuk menjadi biogas (biometana). 90% dari biogas yang dihasilkan diasumsikan berhasil di-*capture* untuk dijadikan sebagai bahan bakar. Heating value dari biogas 22,4 MJ/m<sup>3</sup> dianggap sebagai output energi dari sistem.

Perhitungan mengenai jumlah DDGS yang dihasilkan sebagai produk samping dilakukan sendiri dengan mengasumsikan bahwa DDGS yang tersisa adalah sebesar jumlah singkong yang dikurangi dengan berat 95% pati, 100% gula, dan air. Data yang dibutuhkan untuk menghitung jumlah biogas yang dihasilkan diambil dari (Papong, *et al.* 2009).

- Transportasi

Transportasi bioetanol dari plant bioetanol ke depo pencampuran BBM dan pengguna akhir dilakukan dengan menggunakan truk tangki kapasitas 10000 L berjalan bolak-balik. Berdasarkan survey yang dilakukan, truk di pengangkut bahan bakar rata-rata memiliki konsumsi bahan bakar sebesar 4 liter per kilometer. Lokasi Pencampuran adalah depo Pertamina Plumpang Jakarta yang selama ini memang sudah merupakan pusat pencampuran bahan bakar nabati dan berjarak 730 km dari perkebunan. Di dalam Depo bioetanol akan dicampur dengan bensin hingga mencapai campuran E10. Sementara itu, konsumen bahan bakar bioetanol dari singkong ini diasumsikan berada di DKI Jakarta yang merupakan konsumen bahan bakar nomor satu di Indonesia. Diasumsikan bahwa jarak antara pencampuran bioetanol dengan konsumen berjarak 40 km. Angka ini didapatkan dari asumsi bahwa bahan bakar yang dihasilkan dibawa hingga SPBU yang ada di kota Depok. Diduga bahwa kebanyakan bahan bakar akan digunakan di area

Jakarta yang berjarak kurang dari 40 km dari Depo Plumpang. Angka 40 km ini merupakan titik terjauh konsumen bahan bakar.

- Konsumsi

Analisis *Lifectcle* ini mengambil basis dari *well to tank*. Sehingga nilai energi output dari bioetanol yang dihasilkan adalah densitas energi dari bioetanol. Nilai densitas energi ethanol adalah sebesar 21,2 MJ sementara nilai kalor bakar gasoline adalah sebesar 34, 2 MJ/L. Akibat dari perbedaan nilai kalor bakar ini adalah massa CO<sub>2</sub> yang dihemat pada pembakaran bioetanol ini adalah dihitung berdasarkan CO<sub>2</sub> pada MJ energi yang sama dan bukan berdasarkan volume bahan bakar yang sama.

#### 4.3.3. Bioetanol dariTKKS

Analisis LCI dilakukan berdasarkan input dan output material dan energi, emisi udara yang dinyatakan dalam emisi CO<sub>2</sub> equivalent, emisi cairan, serta emisi padatan yang terlibat dalam *lifecycle* bioetanol berbasis singkong. Dalam analisis ini, basis yang digunakan adalah untuk produksi tiap 100.000L bioetanol *fuelgrade* yang dapat digunakan untuk bahan bakar. Detail untuk tiap bagian dinyatakan sebagai berikut:

- Penanaman Kelapa Sawit

Penanaman kelapa sawit diasumsikan berada di kawasan Kabupaten Muaro Jambi, provinsi Jambi. Lokasi perkebunan ini diambil dengan pertimbangan bahwa di provinsi ini sedang dilakukan pengembangan lahan kelapa sawit dalam skala besar sehingga memberikan potensi yang baik untuk pengembangan industry berbasis kelapa sawit di sana. Selain itu, secara geografis letak kabupaten Muaro Jambi pun cukup memudahkan untuk transportasi produk ke Jawa sebagai pasar terbesar. Berdasarkan data BPS 2010, produktivitas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 20 ton buah segar per ha.tahun yang dapat menghasilkan CPO sebanyak 3,7 ton per tahun dan TKKS sebanyak 4,44 ton per ha.tahun. Perkebunan Kelapa Sawit ini akan diasumsikan berada dalam kompleks yang sama dengan mill, baik mill untuk ekstraksi minyak dan bioetanol plant sehingga energi untuk transportasi dari perkebunan menuju pengolahan bioetanol menjadi tidak signifikan dan dianggap nol. Input utilitas-utilitas pertanian dalam

perkebunan kelapa sawit mencakup pupuk (N,P,K), herbisida (paraquat) serta Diesel untuk keperluan pertanian. Untuk data input utilitas pertanian untuk perkebunan kelapa sawit ini diambil dari data sekunder yang dipublikasikan oleh (Kamahara, *et al.* 2010). Karena data sekunder yang dipakai ini merupakan data sekunder yang diambil dari kasus di Indonesia maka diasumsikan bahwa hasil yang diperoleh dapat langsung dipergunakan untuk kasus kami tanpa perlu diperbandingkan dengan data sekunder dari kasus negara lain. Untuk skenario 3 dimana digunakan faktor alih fungsi lahan, digunakan data dari hasil penelitian (Hadi Yahya, 2010) dengan asumsi lahan sebelumnya adalah lahan gambut dengan emisi 491,69 gr CO<sub>2</sub>/ MJ biodiesel

- Pre-treatment TKKS

TKKS yang telah dipisahkan dari tandan buah sawit segar akan di berikan perlakuan pendahuluan (pre-treatment) terlebih dahulu sebelum dikonversi menjadi bioetanol. Metode pretreatment dibagi dalam 2 langkah, yaitu pencacahan TKKS menjadi chip serta pemecahan struktur kristal selulosa dan hemiselulosa. Menggunakan informasi mesin pencacah untuk sekam padi (memiliki struktur dan kekerasan cukup mirip dengan TKKS) yang dijual di pasaran dengan daya 0,5 HP dan kapasitas cacah mencapai 30 kg/jam. kami mengalkulasi kebutuhan diesel dengan mengambil asumsi bahwa efisiensi mesin cacah mencapai 30%.

Perlakuan ini dilakukan dengan menggunakan asam keras 1,1% selama 2 menit pada suhu 190°C dan tekanan 12,1 atm. Untuk mencapai suhu dan tekanan sesuai kebutuhan digunakan steam dengan tekanan 13 atm dan suhu 268°C yang diinjeksikan dalam TKKS. Informasi mengenai entalpi dan nilai energi dari steam dapat diambil dari steam table. Setelah proses pemecahan kristal selulosa selesai, maka TKKS yang telah dipretreatment diberikan *lime* (batu kapur, CaCO<sub>3</sub>) untuk menetralkan pH TKKS.

Untuk pretreatment dari TKKS sebelum difermentasi ini, digunakan data sekunder dari beberapa sumber. Belum banyaknya publikasi yang sudah dilakukan mengenai proses produksi bioetanol dari selulosa hasil industri kelapa sawit menjadi kendala untuk mendapatkan data sekunder yang layak dipercaya. Tabel 4.4 dibawah ini menunjukkan perbandingan beberapa data sekunder yang dipertimbangkan untuk digunakan dalam studi ini.

Tabel 4. 4Perbandingan Data Sekunder untuk Pretreatment TKKS (dalam GJ/ha)

	Tan, <i>et al</i> (2010)	Lee, <i>et al</i> (2010)
<i>Chemical Pretreatment</i>		
<i>Steam</i>	2,4788	27,350
<i>Electricity</i>	0,1163	1,295
<i>Sulfuric acid 1,1%</i>	0,0698	0,0011
<i>Lime 10 M</i>	0,1581	0,00347

Dari data yang didapat dan diperbandingkan itu, diputuskan bahwa data yang akan digunakan adalah data yang dipublikasikan oleh (Tan, *et al.*2010). Hal ini dikarenakan data yang dipublikasikan oleh Tan ini secara spesifik hanya memfokuskan pada TKKS. Sementara data yang didapatkan dari (Lee, *et al.* 2010) tidak secara konsisten fokus pada TKKS saja, namun juga pada biomassa kelapa sawit lain seperti pelepah dll.

- Konversi TKKS

Konversi mencapai  $\approx 9,1$  % untuk basis TKKS basah (Lee, *et al.* 2010). Konversi rendah, dikarenakan bahkan untuk biomassa seperti TKKS kadar gula dalam bentuk selulosa masih tergolong rendah. Selain itu, walaupun telah melalui tahapan pretreatment, tidak semua selulosa siap/dapat untuk difermentasi). Setelah proses fermentasi selesai dilakukan tahap purifikasi. Tahapan pertama purifikasi adalah pemisahan fasa padatan dan fasa cairan dari produk. Kemudian fasa cairan yang mengandung ethanol akan didistilasi secara azeotropik hingga didapatkan ethanol dengan kemurnian *fuelgrade* di bagian atas menara distilasi.

Input utilitas pada tahap konversi ini mencakup listrik, diesel, serta bahan kimia berupa enzim selulase dan kapang *K. marxianus*. Untuk data sekunder yang digunakan dalam tahapan ini mengambil dari data sekunder yang dipublikasikan oleh (Lee, *et al.* 2010). Hal ini dilakukan agar data yang didapat konsisten dengan data pada tahapan pretreatment yang tidak dapat dipisahkan dari tahapan pretreatment.

- Waste Treatment

Pengolahan limbah bioetanol ini dibagi dalam dua jenis limbah, yaitu limbah padatan dan limbah cairan. Limbah padatan berupa padatan TKKS yang mengandung sebagian besar lignin dan sisa selulosa dan hemiselulosa yang tidak terfermentasikan. Sisa padatan ini memiliki heating value yang tinggi jika digunakan sebagai bahan bakar secara langsung (heating value lignin 29,45 MJ/kg). Oleh karena itu, dalam pembuatan skenario *lifecycle* ini sisa limbah padatan TKKS ini akan diasumsikan 100% berupa lignin dan digunakan sebagai bahan bakar. Heating value yang cukup tinggi dari lignin ini akan menjadi output energi bagi sistem. Sementara itu limbah cair akan diolah dengan teknologi fermentasi untuk menjadi biogas (biometana). 90% dari biogas yang dihasilkan diasumsikan berhasil di-*capture* untuk dijadikan sebagai bahan bakar. Heating value dari biogas 22,4 MJ/m<sup>3</sup> dianggap sebagai output energi dari sistem.

- Transportasi

Perhitungan transportasi bioetanol berbasis TKKS memiliki asumsi yang hampir sama dengan transportasi bioetanol berbasis singkong. Satu-satunya hal yang berbeda adalah bahwa jarak Depo Plumpang dengan perkebunan kelapa sawit adalah sebesar 930 km

- Konsumsi

Pendekatan untuk tahapan ini sama persis (*idem*) dengan data pada bioetanol dari singkong.

- Pengaruh Biodiesel dari CPO

Bioetanol dari TKKS merupakan “produk samping” yang didapatkan dari industri pengolahan CPO. Pada salah satu skenario yang diuji dalam penelitian ini mengasumsikan bahwa produk CPO yang dihasilkan akan digunakan sebagai biodiesel. Penggunaan asumsi biodiesel ini akan menghasilkan Gambaran suatu kompleks “perkebunan energi” dari kelapa sawit dimana hampir seluruh bagian dari tandan buah segar sawit dapat dijadikan sebagai sumber energi. Oleh karena itu, pada simulasi ini diasumsikan bahwa seluruh CPO yang didapatkan dari mill akan diolah menjadi biodiesel. Untuk mendapatkan biodiesel dari CPO diperlukan 2 tahapan. Pertama adalah proses milling untuk mendapatkan CPO dari tandan buah sawit segar (FFB). Kedua adalah proses transesterifikasi yang mereaksikan

CPO dengan methanol dan natrium hydroxida untuk mendapatkan biodiesel. Diasumsikan bahwa seluruh CPO dikonversi menjadi biodiesel. Seluruh energi dan bahan kimia yang digunakan dalam proses pembuatan biodiesel akan menjadi energi losses dalam sistem (bernilai negatif) dan energi yang didapatkan dari heating value biodiesel akan menjadi output energi bagi sistem (nilai positif).

Untuk mendapatkan nilai dari input utilitas yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel dari CPO, digunakan data-data sekunder dari publikasi peneliti lainnya. Dilakukan perbandingan terhadap berbagai data yang telah dipublikasikan dan dipilih data yang dianggap terbaik untuk digunakan sebagai data dalam simulasi ini. Tabel 4.5 menunjukkan perbandingan antara beberapa data sekunder yang dianalisis dalam penelitian ini.

Tabel 4. 5Perbandingan Beberapa Data Sekunder Input Produksi Biodiesel (dalam GJ/ha)

	De Souza, <i>et al</i> (2010)	Wood and Corley (1991)	Yusoff and Hansen (2007)	Pleanjal and Gheewala (2009)	Yee, <i>et al</i> (2009)
<b>Ekstraksi minyak</b>					
Steam	34,41	30,44	32,13	18,06	36,16
Electricity	1,51	1,32	1,41	6,09	0,99
Diesel	0,90	--	--	0,54	0,34
<b>Transesterifikasi</b>					
Methanol	14,90	13,82	14,29	13,37	0,07
Catalyst	0,79	0,73	0,76	0,44	0,01
Electricity	2,37	2,20	2,27	0,02	0,42
Steam	-	-	-	-	5,45

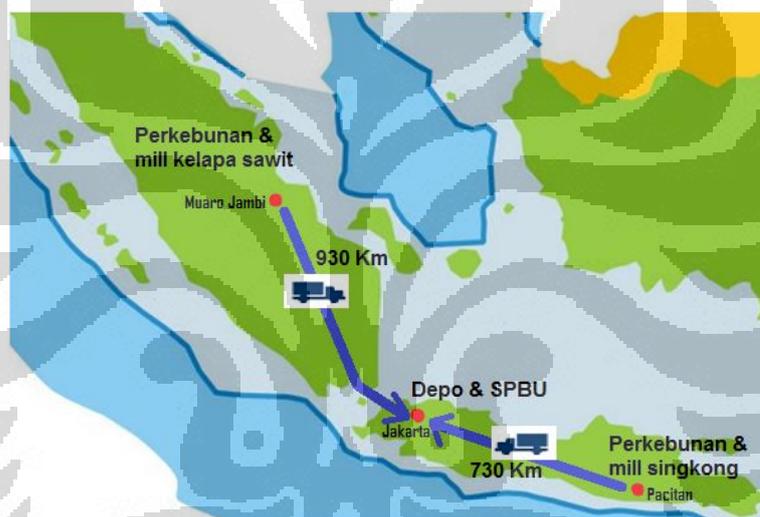
Secara umum, hasil yang ditunjukkan oleh de Souza, Yusoof, dan Gheewala dalam publikasi mereka masing-masing menunjukkan hasil yang cukup sama yang menandakan bahwa teknologi ekstraksi dan transesterifikasi relatif sama dimanamana (universal). Alasan pemilihan hasil yang ditunjukkan oleh Yusoof dan Hansen lebih dikarenakan karena lokasi penelitian mereka yang di Malaysia yang

diasumsikan memiliki teknologi relatif sama dengan Indonesia. Hal ini juga mengingat status Malaysia yang sama dengan Indonesia sebagai negara penghasil CPO nomor satu di dunia.

#### 4.4. Inventory Lain dan Informasi Tambahan

##### 4.4.1. Peta Logistik

Peta logistik dalam studi ini merupakan alat bantu yang bertujuan untuk membantu lebih memahami proses dan alur logistik yang ada di dalam skenario-skenario yang digunakan dalam studi ini. Gambar 4.3 dibawah ini merupakan peta logistik yang dapat membantu memperdalam pemahaman akan alur logistik dalam studi ini.



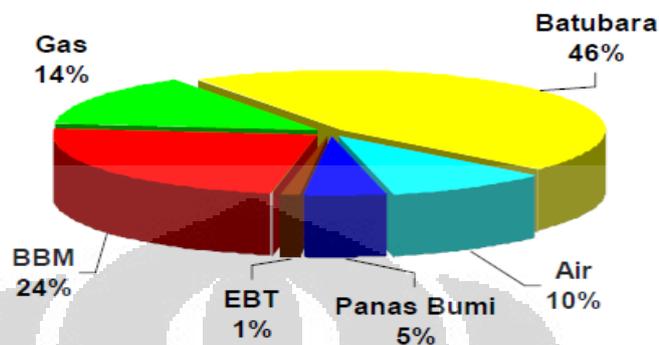
Gambar 4. 3 Peta Logistik yang Digunakan Dalam Skenario

##### 4.4.2. Utilitas Energi

Utilitas energi, dalam hal ini adalah diesel (untuk transportasi, pertanian, dan boiler) serta listrik merupakan komponen utilitas yang paling banyak digunakan dalam *lifecycle* bioetanol. Untuk itu, diperlukan kehati-hatian dalam menginventaris utilitas energi ini, karena sifatnya yang sensitif (perbedaan sedikit saja mampu menghasilkan perubahan yang besar).

Untuk data emisi CO<sub>2</sub> dari utilitas energi ini, semua data *emission factor* diambil dari data tier 1 yang dikeluarkan oleh IPCC pada tahun 2006 (IPCC, 2006). Sementara itu, untuk kebutuhan utilitas listrik, digunakan data energi mix

kebutuhan listrik di pulau Jawa (kami mengasumsikan energi mix untuk Jawa dan Sumatera sama). Energi mix untuk menghasilkan listrik di Pulau Jawa ditunjukkan dalam Gambar 4.4 di bawah ini.



Gambar 4. 4Energi Mix untuk Menghasilkan Listrik di Jawa (Kementerian ESDM, 2010)

Dengan menggunakan data diatas, dilakukan konversi sesuai dengan inventori dalam laporan IPCC 2006. Selain data untuk listrik, IPCC juga menyediakan data untuk utilitas energi lain. Data-data tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.6 di bawah ini:

Tabel 4. 6Faktor emisi untuk utilitas energi

<i>Fuel</i>	CO <sub>2</sub> emission factor (kg-CO <sub>2</sub> /TJ)		
	Default	Lower	Upper
Diesel for Boiler	74.100	72.600	74.800
Diesel for Agriculture mobile	74.100	72.600	74.800
Energy Mix for Electricity	71.770	68.970	74.768
Gasoline	69.300	67.500	73.000
Diesel for Truck	74.100	72.600	74.800

Untuk nilai energi dari berbagai utilitas energi selain listrik (karena listrik didefinisikan dalam energi) diambil dari sumber data sekunder. Hampir seluruh data sekunder menunjukkan nilai yang sama dan perbedaan yang muncul di tiap data menunjukkan hasil yang tidak signifikan. Data untuk utilitas energi

diambil dari Patterson, *et al.* 2008 dan Papong, *et al.* 2009. Data input energi untuk utilitas pertanian ditunjukkan dalam Tabel 4.9 dibawah ini:

Tabel 4. 7DensitasEnergi dari Utilitas Energi (Patterson, 2008)

<i>Fuel</i>	Densitas Energi	Satuan
Diesel	34,45	MJ/L
Bietanol	21,2	MJ/L
Biogas	22,4	MJ/m <sup>3</sup>
Biodiesel	46,1	MJ/kg

#### 4.3.3. Analisis *Feedstock* dan Lahan

Analisis ini dilakukan karena disadari bahwa basis yang digunakan dalam penelitian ini (100.000 L bioetanol) dapat bias dan bisa jadi merupakan sudut pandang yang tidak lengkap dalam analisis *lifecycle* ini.

Untuk bioetanol berbasis singkong, dengan konversi sebesar 1 L bioetanol / 6 kg singkong basah dan produktivitas lahan rata-rata sebesar 16,10 ton/ha.tahun. Maka untuk menghasilkan 100.000 L bioetanol berbasis singkong dibutuhkan singkong basah sebanyak 600 ton dan lahan perkebunan singkong sebanyak 37,37 ha.tahun.

Untuk bioetanol berbasis TKKS, dengan konversi sebanyak 8,26% (Piarpuzan, *et al.* 2011). dan produktivitas lahan sebesar 4,44 ton TKKS/ha.tahun. Maka untuk menghasilkan 100.000 L bioetanol berbais TKKS dibutuhkan TKKS basah sebanyak 1210,030 ton dan lahan sebanyak 272,53 ha.tahun.

#### 4.4. Variabel *Lifecycle* Bioetanol

Dalam studi *lifecycle* bioetanol ini digunakan beberapa variabel *lifecycle* yang berguna untuk melihat dampak lingkungan dari bioetanol untuk setiap skenario untuk masing-masing *feedstock* (singkong dan TKKS). Keempat variabel yang digunakan ini adalah sama dengan variabel yang muncul dalam persamaan 2.2 - 2.5, yaitu NEV, NER, NCV, dan NCR.

## BAB 5

### HASIL PEMBAHASAN

#### 5.1. Skenario Simulasi

Skenario yang digunakan dalam simulasi penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### **Bioetanol dari Singkong**

- Skenario 1: Bioetanol dari singkong dengan menghitung pemanfaatan kembali limbah
- Skenario 2: Bioetanol dari singkong tanpa memanfaatkan kembali limbah

##### **Bioetanol dari TKKS**

- Skenario 1: Bioetanol dari TKKS dengan mengasumsikan pemanfaatan CPO sebagai biodiesel dan menghitung pemanfaatan limbah
- Skenario 2: Bioetanol dari TKKS tanpa mengasumsikan pemanfaatan CPO sebagai biodiesel dan tanpa menghitung pemanfaatan limbah
- Skenario 3: Bioetanol dari TKKS dengan mengasumsikan pemanfaatan CPO sebagai biodiesel dan menghitung pemanfaatan limbah dengan memperhitungkan alih fungsi lahan

#### 5.2. Hasil Simulasi

Hasil simulasi ini mencakup neraca massa dan analisis net energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari sistem *lifecycle* bioetanol untuk kedua *feedstock*

##### 5.2.1. Bioetanol dari Singkong

Tabel 5. 1 Neraca Massa dan Energi Bioetanol dari Singkong

Proses/Material	Nilai	Satuan	Energi Equivalent (MJ)	CO <sub>2</sub> equivalent (kg)
<b>Input material</b>				
<b>Penanaman singkong</b>				
Pupuk N	1.328	kg	-61.752	-11.786
Pupuk P	1.249	kg	-13.477	-2.735
Pupuk K	1.569	kg	-7.845	-900
Herbisida	104	kg	-27.259	-700
Diesel	1.241	L	-42.752	-3.168

<b>Pretreatment</b>				
Diesel	2.599	L	-89.520	-6.633
<b>Konversi Bioetanol</b>				
Diesel	28.476	L	-981.000	-72.692
Electricity	34.000	MJ	-34.000	-2.440
Enzim $\alpha$ -amilase	690	kg	-14.675	
Yeast <i>S.cerevisiae</i>	54	kg	-552,3	-400
<b>Transportasi</b>				
Diesel	3.850	L	-125.743	-9.828
<b>Output material</b>				
<b>Waste Treatment</b>				
Biogas	11.300	m <sup>3</sup>	227.808	16.881
DDGS	23.400	kg	437.837	115.619
<b>Produk akhir</b>				
Bioetanol	100.000	L	2.120.000	146.916

Skenario 1:

Tabel 5. 2 Analisis Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> untuk Skenario 1 per 100.000 L bioetanol

Total output energi	-1.405.466	MJ
Total output CO <sub>2</sub>	-111.311	kg
Total input energi	2.785.645	MJ
Total reduksi CO <sub>2</sub>	279.416	kg

Skenario 2:

Tabel 5. 3 Analisis Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> untuk Skenario 2 per 100.000 L bioetanol

Total output energi	-1.405.466	MJ
Total output CO <sub>2</sub>	-111.311	kg
Total input energi	2.120.000	MJ
Total reduksi CO <sub>2</sub>	146.916	kg

### 5.2.2. Bioetanol dari TKKS

Tabel 5. 4 Neraca Massa dan Energi Bioetanol dari TKKS

Proses/Material	Nilai	Satuan	Energi Equivalent (MJ)	CO <sub>2</sub> equivalent (kg)
<b>Input material</b>				
<b>Penanaman singkong</b>				
Pupuk N	50.700	kg	-2.357.548	-449.963
Pupuk P	7.757	kg	-83.694	-16.987
Pupuk K	49.611	kg	-248.057	-28.455
Herbisida	54	kg	-14.117	-377
Diesel	32.672	L	-1.125.549	83.403
<b>Pretreatment</b>				
Diesel (mesin pencacah)	5.760	L	-198.436	-14.704
Listrik	19.725	MJ	-19.725	-1.416
Steam	141.451	kg	-420.537	-77.904
sulfuric acid (1,1%)	10.967	kg	-12.064	-1.535
lime (10 M)	7.653	kg	-26.557	-6.582
<b>Konversi Bioetanol</b>				
Diesel	20.406	L	-702.999	-52.092
Electricity	60.753	kWh	-60.753	-4.360
Cellulase	6.900	kg	-146.763	
Yeast <i>K.marxianus</i>	548	kg	-5.523	-4.000
<b>Transportasi</b>				
Diesel	4.850	L	-163.638	-12.381
<b>Output material</b>				
<b>Waste Treatment</b>				
Biogas	58.949	m <sup>3</sup>	1.188.409	88.061
Lignin (bahan bakar)	103.740	kg	2.758.032	204.370
<b>Produk akhir</b>				
Bioetanol	100.000	L	2.120.000	146.916

<b>Pengaruh Biodiesel</b>				
<b>Milling CPO</b>				
Steam	49.611	kg	-8.756.340	-1.622.112
Electricity	384.267	MJ	-384.267	-27.579
Diesel	0	L	0	0
<b>Transesterifikasi CPO</b>				
Steam	0	kg	0	0
Electricity	618.643	MJ	-618.643	-44.400
Methanol	128.538	kg	-3.894.512	-78.794
Sodium Hydroxide	32.877	kg	-207.123	-7.233
<b>Combustion Biodiesel</b>				
Biodiesel	1.008.361	kg	46.485.442	3.444.571

#### Skenario 1

Tabel 5. 5 Analisis Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> untuk Skenario 1 per 100.000 L bioetanol

Total output energi	-19.450.289	MJ
Total output CO <sub>2</sub>	-2.534.277	kg
Total input energi	52.551.883	MJ
Total reduksi CO <sub>2</sub>	3.883.919	kg

#### Skenario 2

Tabel 5. 6 Analisis Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> untuk Skenario 2 per 100.000 L bioetanol

Total output energi	-5.589.404	MJ
Total output CO <sub>2</sub>	-754.160	kg
Total input energi	2.120.000	MJ
Total reduksi CO <sub>2</sub>	146.916	kg

## Skenario 3

Tabel 5. 7 Analisis Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> untuk skenario 3 per 100.000 L  
bioetanol

Total output energi	-19.450.289	MJ
Total output CO <sub>2</sub>	-3.030.078	kg
Total input energi	52.551.883	MJ
Total reduksi CO <sub>2</sub>	3.883.919	kg

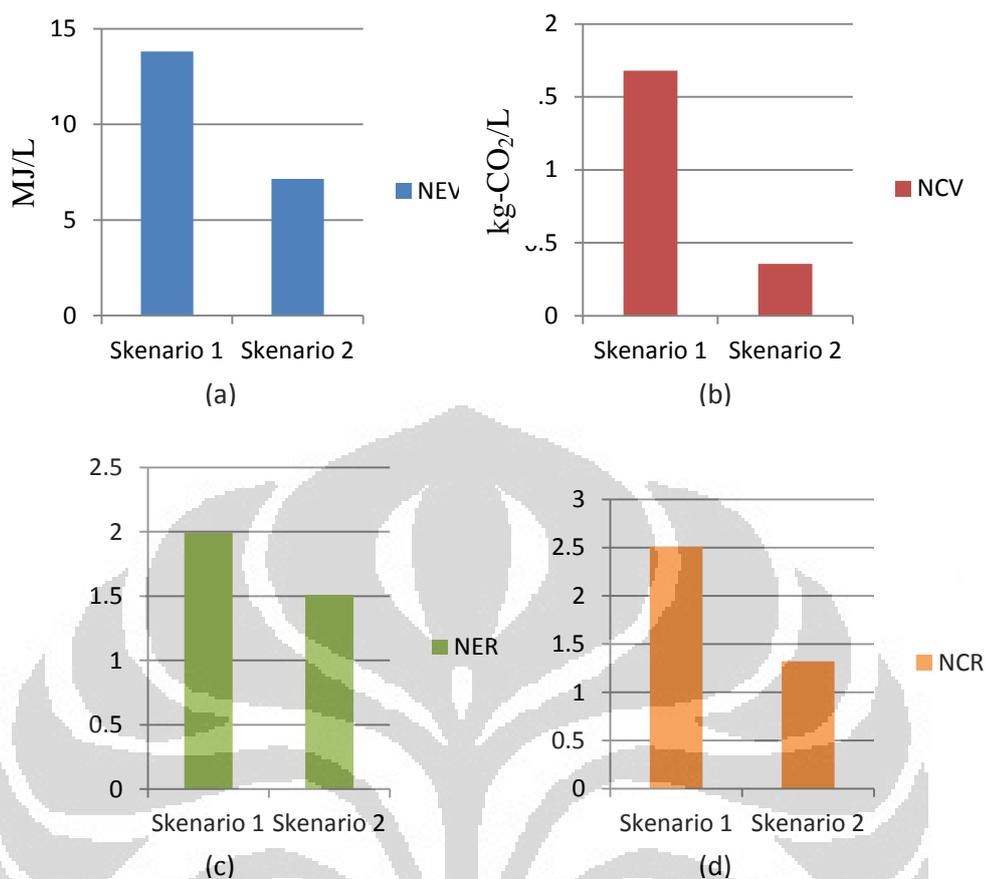
### 5.3. Pembahasan dan Evaluasi

#### 5.3.1. Bioetanol dari Singkong

Untuk Bioetanol dari Singkong, skenario 1 dengan pemanfaatan produk samping menunjukkan hasil yang jauh lebih baik daripada skenario 2 tanpa pemanfaatan produk samping. Hal ini ditunjukkan oleh variabel-variabel analisis *Lifecycle* di Tabel 5.8 berikut:

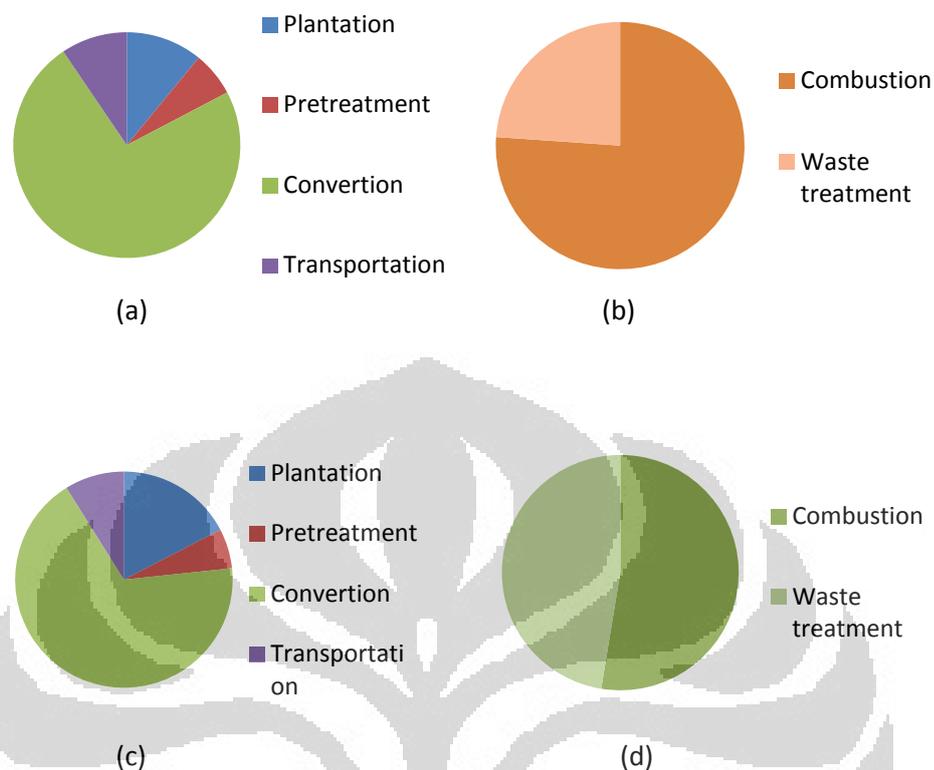
Tabel 5. 8 Hasil Analisa Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol dari Singkong

	Skenario 1	Skenario 2
Net Energi Value (MJ/L)	13,8	7,15
Net Energi Ratio	1,982	1,51
Net CO <sub>2</sub> Value (kg-CO <sub>2</sub> /L)	1,68	0,356
Net CO <sub>2</sub> Ratio	2,51	1,32



Gambar 5. 1 Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol Berbasis Singkong (a) NEV (b) NCV (c) NER (d) NCR

Dari berbagai variabel *lifecycle* yang dianalisa, dapat dilihat bahwa produksi bioetanol dari singkong menghasilkan performa lingkungan (energi dan emisi-CO<sub>2</sub>) yang positif. Namun, harus dicermati bahwa pemanfaatan produk samping dari limbah produksi bioetanol mampu meningkatkan performa lingkungan dari bioetanol berbasis singkong dengan signifikan. Gambar 5.2. menyajikan breakdown dari nilai input-output energi dan input-output energi dari bioetanol berbasis singkong.



Gambar 5. 2 Breakdown Input-Output Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> dari Bioetanol Berbasis Singkong (a) Input Energi (b) Output Energi (c) Output CO<sub>2</sub> (d) Reduksi CO<sub>2</sub>

Dari breakdown input-output energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari bioetanol berbasis singkong di atas, ditunjukkan bahwa konversi singkong menjadi penyumbang terbesar input energi dan emisi CO<sub>2</sub> pada *lifecycle* bioetanol berbasis singkong. Sementara itu, pemanfaatan produk samping bioetanol akan sanggup meningkatkan net energi hingga 25% dan net emisi CO<sub>2</sub> hingga 45%. Selain konversi singkong, pertanian singkong pun menjadi penyumbang energi dan emisi CO<sub>2</sub> yang besar dalam sistem *lifecycle* bioetanol.

Setelah simulasi selesai, selanjutnya dilakukan perbandingan hasil yang didapat dengan hasil yang didapatkan dalam penelitian lain. Kami membandingkan hasil yang kami dapat dengan hasil dari beberapa penelitian lainnya. Hasilnya kami sajikan dalam Tabel 5.9 berikut:

Tabel 5. 9 Perbandingan Hasil Studi dengan Penelitian Lainnya

	Studi ini	Dai, <i>et al</i> (2006)	Papong, <i>et al.</i> (2010)
Dengan produk sampung			
NEV (MJ/L)	13,80	7,48	19,03
NER	1,982	1,55	1,11
Tanpa produk sampung			
NEV (MJ/L)	7,15	4,46	-3,72
NER	1,51	1,33	0,85
Emisi CO <sub>2</sub>			
	Studi ini	Xunmin, <i>et al</i> (2009)	Papong, <i>et al</i> (2010)
Input CO <sub>2</sub> (kg-CO <sub>2</sub> /L)	2,78	1,455	2,863
Net CO <sub>2</sub> (kg-CO <sub>2</sub> /L)	1,99	0,748	-

Dari Tabel 5.9 diatas dapat dilihat bahwa nilai yang dihasilkan dari studi ini cukup moderat dan berada dalam rentang yang penelitian lainnya. Hasil Studi ini tentunya tidak akan menghasilkan angka yang sama dengan studi lainnya. Hal ini dikarenakan sifatnya yang sangat spesifik untuk di Indonesia, sehingga jalur logistik dan produktivitas lahan yang dijadikan acuan pun berbeda. Namun, dapat disimpulkan bahwa nilai yang didapat ini menghasilkan kecenderungan yang sama dengan penelitian-penelitian lainnya, yaitu bahwa bioetanol dari *feedstock* singkong memiliki dampak lingkungan yang baik. Dari perbandingan diatas pun dapat dilihat bahwa pengembangan bioetanol dari singkong di Indonesia akan menghasilkan dampak lingkungan yang tidak kalah dari pengembangan serupa di Thailand yang sangat gencar mengampanyekan singkong sebagai *feedstock* bioetanol masa depan.

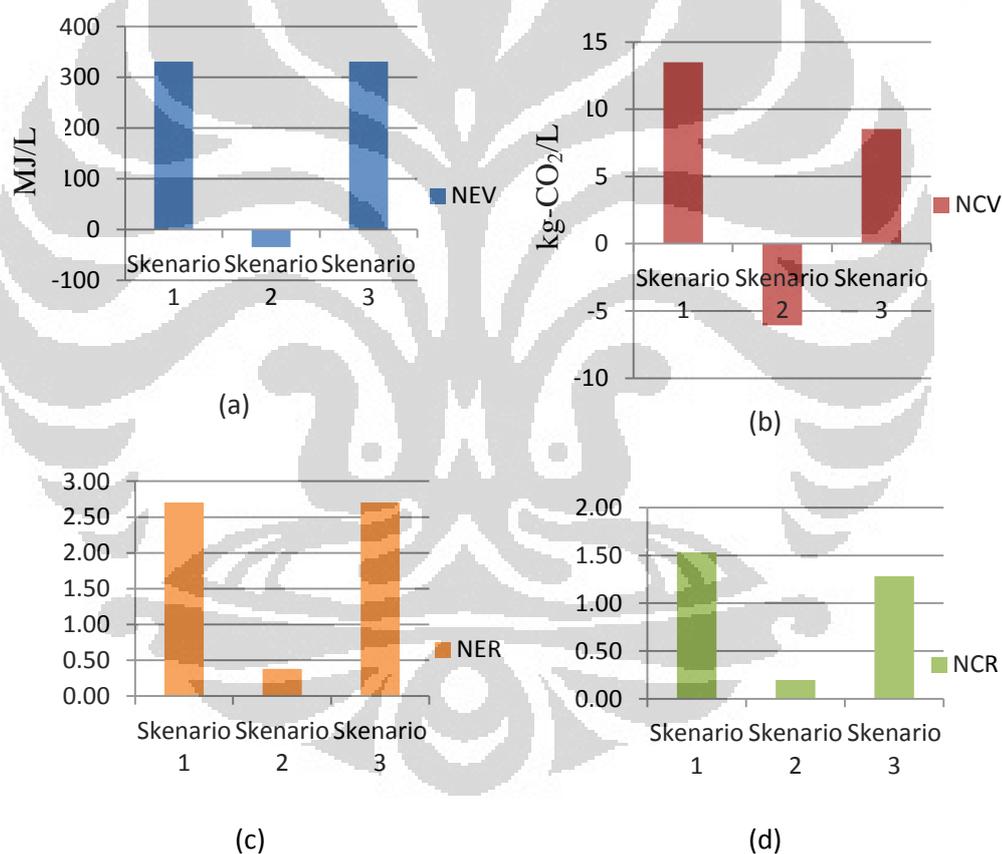
### 5.3.2. Bioetanol dari TKKS

Untuk bioetanol dari TKKS, pengikutsertaan produk utama CPO sebagai sumber energi yang dalam kasus ini diwakili sebagai biodiesel terbukti menghasilkan dampak lingkungan yang sangat baik. Bahkan setelah emisinya

dihitung dengan faktor alih fungsi lahan untuk skenario terburuk sekalipun. Hal ini ditunjukkan oleh variabel-variabel LCA di Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5. 10 Hasil Analisa Variabel LCA Tiap Skenario Bioetanol dari TKKS

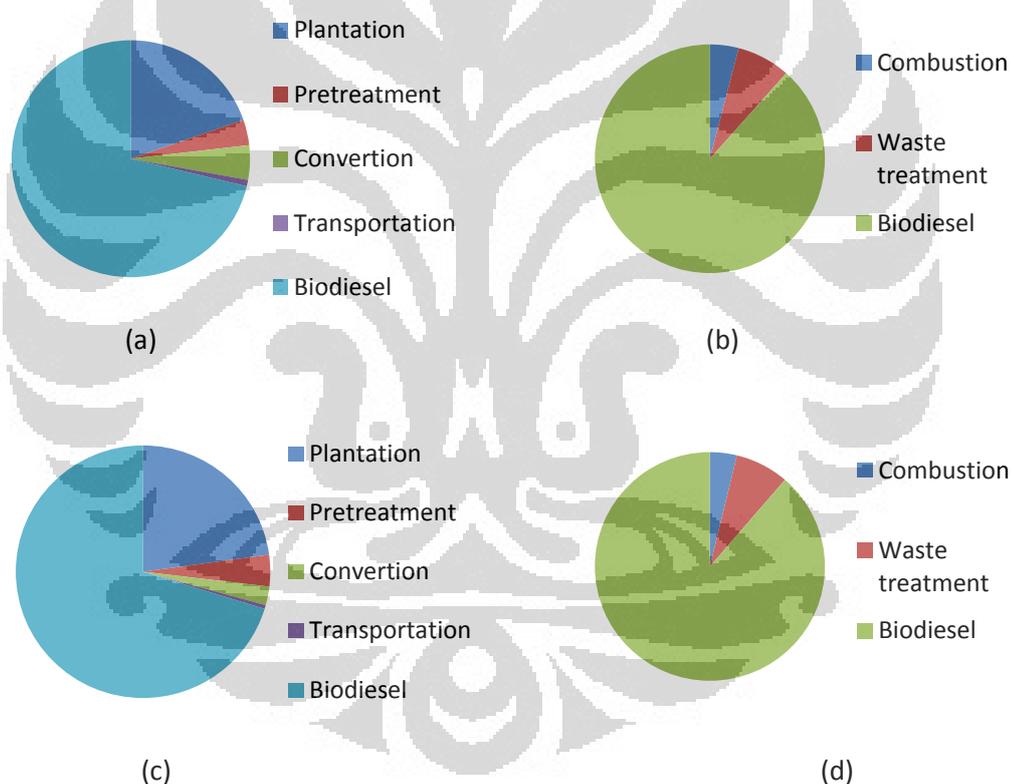
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
Net Energi Value (MJ/L)	331	-34,7	331
Net Energi Ratio	2,70	0,379	2,70
Net CO <sub>2</sub> Value (kg-CO <sub>2</sub> /L)	13,5	-6,072	8,54
Net CO <sub>2</sub> Ratio	1,53	0,195	1,28



Gambar 5. 3 Variabel LCA untuk Tiap Skenario Bioetanol Berbasis TKKS(a) NEV (b) NCV (c) NER (d) NCR

Dari berbagai variabel *lifecycle* yang dianalisa, didapatkan bahwa jika produk utama CPO diasumsikan sebagai biodiesel, serta melakukan utilisasi produk samping. Maka bioetanol dari TKKS akan memiliki nilai net energi dan emisi

CO<sub>2</sub> yang sangat besar. Sebaliknya, jika analisis yang dilakukan tidak memperhitungkan produk utama CPO (misalnya CPO tidak diubah menjadi produk yang dapat dikonversi menjadi energi) dan juga tidak memperhitungkan produk samping, maka performa lingkungan dari bioetanol berbasis TKKS ini akan menjadi sangat rendah hingga menjadi negatif. Hal ini menandakan bahwa jika CPO diolah menjadi biodiesel utamanya, maka akan menyumbangkan performa lingkungan positif dalam jumlah yang besar dalam *lifecycle* kelapa sawit itu secara keseluruhan. Hal ini dapat ditunjukkan lebih jelas oleh Gambar 5.4. yang menunjukkan breakdown dari input-output energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari bioetanol berbasis TKKS.



Gambar 5. 4 Breakdown Input-Output Energi dan Emisi CO<sub>2</sub> dari Bioetanol Berbasis Singkong (a) Input Energi (b) Output Energi (c) Output CO<sub>2</sub> (d) Reduksi CO<sub>2</sub>

Seperti dapat dilihat pada Gambar 5.4. Lebih dari 75% output energi dan reduksi CO<sub>2</sub> dari bioetanol berbasis TKKS dihasilkan oleh “produk sampingnya” yaitu biodiesel dari CPO. Sementara itu, untuk input energi dan emisi CO<sub>2</sub> sebagian besar disumbangkan oleh pertanian kelapa sawit dan berbeda cukup jauh

jika dibandingkan dengan konversi. Struktur ini berbeda cukup jauh jika dibandingkan dengan bioetanol berbasis singkong.

Salah satu alasan utama mengapa terjadi perbedaan struktur ketika dilakukan breakdown input-output energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari bioetanol yang diproduksi dari kedua *feedstock* ini adalah karena “sifat” kedua *feedstock* yang berbeda sangat jauh. Bioetanol dari Singkong menggunakan singkong yang merupakan produk utama dari tanaman dan perkebunan singkong. Sementara itu, bioetanol dari TKKS menggunakan TKKS yang merupakan produk samping dari industri perkebunan dimana nilai utama dari industri itu, jika memang benar merupakan suatu industri perkebunan energi, adalah nilai energinya didapatkan dari produk utama, yaitu CPO yang diolah menjadi TKKS. Sumbangan dari biodiesel sebagai produk utama menjadikan nilai net energi dan reduksi CO<sub>2</sub> dari *lifecycle* bioetanol berbasis TKKS menjadi sangat tinggi. Namun, jika sumbangan dari biodiesel ini dihilangkan, dan dianggap tidak menyumbangkan nilai energi apa-apa (misalnya CPO tidak diubah menjadi biodiesel), maka nilai net energi dan reduksi CO<sub>2</sub> dari *lifecycle* bioetanol berbasis TKKS menjadi jauh lebih rendah dibandingkan dengan bioetanol dari singkong. Ada beberapa alasan yang menyebabkan hal ini terjadi, yaitu:

- Pertanian TKKS merupakan pertanian yang sangat boros energi dan utilitas.
- Yield selulosa dalam TKKS akan sangat rendah jika dibandingkan dengan yield minyak dalam CPO (100%). Dari sini, dapat dilihat bahwa secara umum biodiesel memang *biofuel* yang lebih baik dibandingkan dengan bioetanol sendiri).
- Untuk menghasilkan bioetanol dalam jumlah yang banyak akan membutuhkan TKKS yang sangat besar dan lahan yang luas. Dimana CPO yang dihasilkan akan jauh lebih besar dan menguntungkan dibandingkan dengan bioetanol dari TKKS itu sendiri.

Setelah mendapatkan hasil, langkah berikutnya adalah memvalidasi hasil penelitian ini dengan membandingkannya dengan beberapa studi yang telah

dipublikasikan mengenai *lifecyclebioetanol* dari TKKS. Hasilnya kami sajikan dalam Tabel 5.11 berikut:

Tabel 5. 11 Perbandingan Hasil Studi dengan Penelitian Lainnya

	Studi ini	Tan, <i>et al</i> (2010)	Lee, <i>et al</i> (2010)
NEV (MJ/L)	331	17,95	416,05
NER	2,70	6,62	7,00

Dikarenakan masih sedikitnya studi yang ada mengenai bioetanol dari TKKS ini, maka belum dapat dibandingkan variabel untuk emisi CO<sub>2</sub> dengan hasil publikasi lainnya, sehingga perbandingan baru dapat dilakukan untuk variabel energi. Studi ini dan studi-studi pembanding yang kami lakukan menggunakan basis yang berbeda. Studi yang dilakukan oleh (Tan, *et al.* 2010) dalam penelitiannya tidak memperhitungkan dampak dari produk samping, baik itu CPO maupun lignin serta tidak memperhitungkan dampak dari pertanian kelapa sawit. Sementara itu metodologi penelitian yang digunakan oleh (Lee, *et al.* 2010) memiliki pendekatan yang sama dengan yang diambil dalam studi ini, yaitu dengan memperhitungkan utilitas pertanian dampak dari produk utama CPO yang direaksikan menjadi biodiesel dan produk samping biogas dan lignin. Perbedaan hasil akhir yang didapatkan antara kedua penelitian ini lebih karena disebabkan perbedaan nilai-nilai utilitas, produktivitas pertanian dan jalur logistik antara kedua penelitian yang masih dapat dianggap wajar. Dari sini, dapat dilihat bahwa pengembangan bioetanol dari TKKS di Indonesia akan menghasilkan dampak lingkungan yang cukup baik dibandingkan dengan pengembangan serupa di Malaysia. Dari perbandingan ini juga dapat dilihat betapa besarnya pengaruh dari CPO dan produk samping biogas dan lignin terhadap nilai energi dari bioetanol berbasis TKKS. Besarnya pengaruh ini dapat dilihat dari betapa berbedanya nilai yang didapatkan oleh (Tan, *et al.* 2010) dan (Lee, *et al.* 2010). Sehingga dapat disimpulkan bahwa dalam assesment LCA bioetanol dari TKKS sangat penting untuk memperhitungkan dampak dari CPO sebagai produk utama industri kelapa sawit.

## BAB 6 PENUTUP

### 6.1. Kesimpulan

1. Bioetanol berbasis singkong di Indonesia dalam studi ini memiliki nilai NEV 13,8 MJ/L, NER 1,982, NCV 1,68 kg CO<sub>2</sub>/L dan NCR 2,51. Sedangkan bioetanol berbasis TKKS di Indonesia memiliki nilai NEV 331 MJ/L, NER 2,70, NCV 13,5 kg CO<sub>2</sub>/L dan NCR 1,53.
2. Dengan menggunakan basis per liter bioetanol yang dihasilkan baik *feedstock* TKKS maupun singkong menunjukkan dampak lingkungan yang baik dengan adanya reduksi gas CO<sub>2</sub> dan net energi yang positif.
3. Pengembangan singkong dan TKKS sebagai *feedstock* bioetanol di Indonesia akan menghasilkan dampak lingkungan yang relatif sama baiknya dibandingkan dengan pemanfaatan serupa di negara lain.

### 6.2. Saran

1. Perlu diadakan penelitian lanjutan dari sudut pandang yang berbeda, misalnya suplai bahan baku dan ketersediaan lahan pertanian untuk meninjau *feedstock* yang lebih potensial untuk dikembangkan di Indonesia antara singkong dan TKKS
2. Perlu dipertimbangkan untuk utilisasi lain dari limbah padat industri bioetanol, sehingga nilai tambah yang didapatkan dari pengembangan bahan bakar nabati ini akan menjadi lebih baik lagi. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meninjau pemanfaatan lain dari limbah padatan bioetanol. Untuk lignin, beberapa penelitian telah dilakukan untuk meninjau pemanfaatan alternatif lignin sebagai film plastik biodegradable (Doherty, *et al.* 2010), polyurethane (Thring, *et al.* 1997), dan produk-produk kimia dengan *pyrolysis* ((Sahban. *et al.* 1997). Sementara untuk DDGS penelitian telah dilakukan untuk pemanfaatan alternatif sebagai *Low fiber high protein poultry feed* (Srinivasan, *et al.* 2009), biogas dan syngas (Lei, *et al.* 2011), serta *feedstock* bioetanol selulosa (Kim, *et al.* 2008).

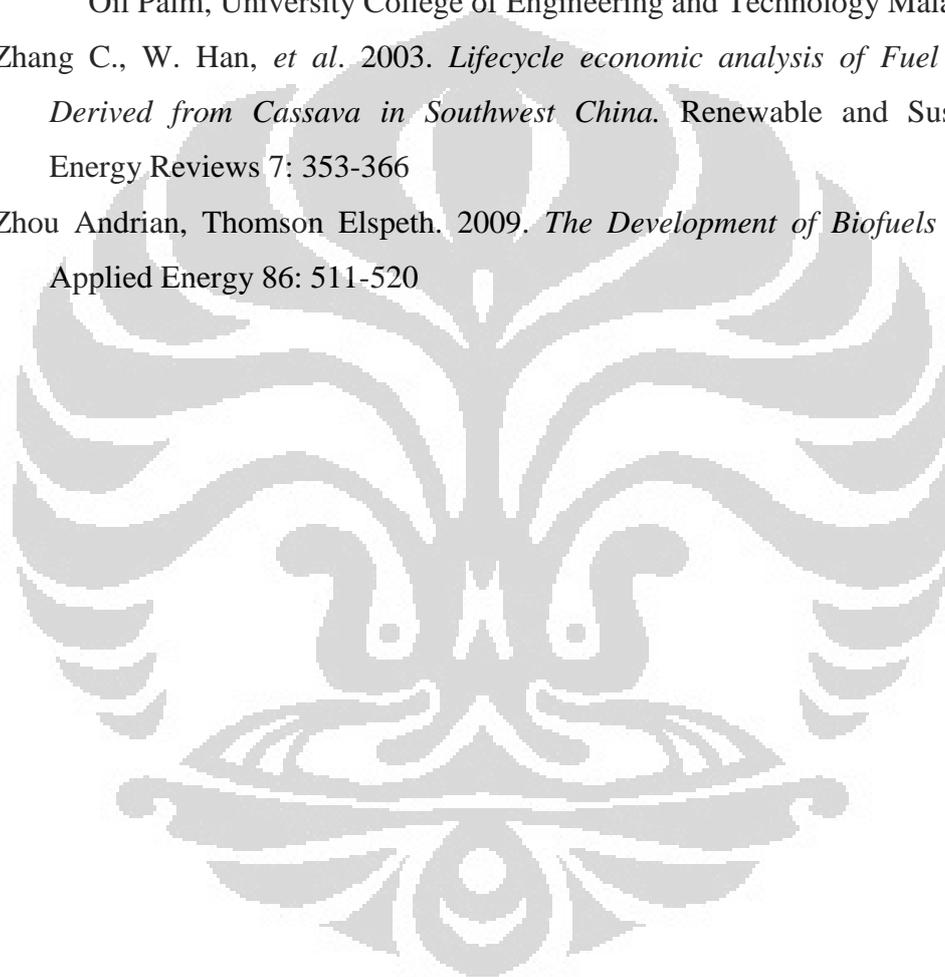
## DAFTAR PUSTAKA

- Bernesson Sven, Nilsson Daniel, Hansson Per-Anders. 2005. *A Limited LCA Comparing Large-and Small Scale Production of Ethanol for Heavy Engines Under Swedish Conditions*. Biomass and Bioenergy 30: 46-57.
- Borjesson P. 2009. *Good or Bad Bioethanol from A Greenhouse Gas Perspective*. Applied Energy 86: 589-584.
- Caresana F., et al. 2011. *Energy Production from Landfill Biogas: An Italian Case*. Biomass and Bioenergy 35:4331-4339.
- Dai, D.; Hu, Z.; Pu, G.; Li, H.; Wang, C. T. 2006 *Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China*. Energy Convers. Manage 47: 1686-1699.
- De Souza Simone Pereira, et al. 2010. *Greenhouse Gas Emissions and Energy Balance of Palm Oil Biofuel*. Renewable Energy 35: 2552-2561.
- Doherty William O.S., et al. 2011. *Value-Adding to Cellulosic Ethanol: Lignin Polymers*. Industrial Crops and Products 33: 259-276
- Dongpattra P, Vichukit V, Rojanaritpichet J, Poonsahung P, JeamMJamnanja J, Sarobol E, Ledmongkol W. 1999. *Soil and cassava fertilizer*. Department of Agronomy, Faculty of Agricultural, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.
- Giselrod, H., P. V, et al. (2008). *Towards sustainable production of biofuels from microalgae*. International Journal of Molecular Science 9: 1188-1195.
- Groode, T. A. and J. B. Heywood. 2007. *Ethanol: A Look Ahead*, Massachusetts Institute of Technology.
- Technical Committee ISO/TC 207. 1997. ISO 14040 *Environmental management- Lifecycle Assessment- Principles and Framework*.
- IPCC, 2006. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES, Japan.
- Jansson, C., A. Westerbergh, et al. 2009. *Cassava, a potential biofuel crop in (the) People's Republic of China*. Applied Energy 86: 595-599.

- Heather L. Wakeley, Chris T. Hendrickson, *et al.* (2009). *Economic and Environmental Transportation Effects of Large-Scale Ethanol Production and Distribution in the United States*. Environmental Science & Technology.
- Kamahara Hirotsugu, *et al.* 2010. *Improvement Potential for Net Energy Balance of Biodiesel Derived from Palm Oil: A Case Study From Indonesian Practice*. Biomass and Bioenergy 34: 1818-1824.
- Kifani-Sahban F., *et al.* 1997. *A Physical Approach in The Understanding of The Phenomena Accompanying The Thermal Treatment of Lignin*. Thermochemica Acta 298: 199-204
- Kim Youngmi, *et al.* 2008. *Composition of Corn Dry-Grind Ethanol by-Products: DDGS, Wet Cake, and Thin Stillage*. Bioresource Technology 99: 5165-5176.
- Lee Teong Keat, Goh Chun Sheng. 2010. *Palm-Based Biofuel Refinery (PBR) to Substitute Petroleum Refinery: An Energy and Emergy Assesment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2986-2995
- Lee Teong Keat, *et al.* 2010. *Second-Generation Bio-Ethanol (SGB) from Malaysian Palm Empty Fruit Bunch: Energy and Exergy Analyses*. Bioresource Technology 101: 5719-5727
- Lei Hanwu, *et al.* 2011. *Microwave Pyrolysis of Distillers Dried Grain with Slouble (DDGS) for Biofuel Producion*. Bioresource Technology 102: 6208-6213.
- Nigam, P.S., A. Singh. 2011. *Review Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources: Progress in Energy and Combustion Science* 37: 52-68
- Nguyen, Thu Lan Thi, *et al.* 2007. *Full Chain Energy Analysis of Fuel Ethanol from Cassava in Thailand*. Environment Science Technology 41: 4135-4142
- Nguyen, Thu Lan Thi, Gheewala Shabbir H., Garivait Savitri. 2007. *Energy Balance and GHG-abatement Cost of Cassava for Fuel Ethanol in Thailand*. Energy Policy 35: 4585 – 4596
- Papong, Seksan, Malakul Pomthong. 2010. *Life-cycle Energy and Environmental Analysis of Biethanol Production from Cassava in Thailand*. Bioresource Technology 101: 5112-5118

- Patterson Tim, Dinsdale Richard, Esteves Sandra. 2008. *Review of Energy Balances and Emissions Associated with Biomass-Based Transport Fuels Relevant to the United Kingdom Context*. *Energy & Fuels* 22: 3506-3512
- Piarpuzan Diego, Quintero Julian A., Cardona Carlos A.. 2011. *Empty Fruit Bunches From Oil Palm As A Potential Raw Material for Fuel Ethanol Production*. *Biomass And Bioenergy* 35: 1130-1137.
- Pimentel, D.; Patzek, T. W. 2005. *Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. The Limits of Biomass Energy*. *Natl. Resour. Res.* 14(1): 65-76.
- Srinivasan Radhakrishnan, *et al.* 2009. *Pilot Scale Fiber Separation from Distillers Dried Grains with Soluble (DDGS) Using Sieving and Air Classification*. *Bioresource Technology* 100: 3548-3555
- Sriroth, Klanarong, *et al.* 2010. *The Promise of A Technology Revolution in Cassava Bioethanol: From Thai Practice to The World Practice*. *Fuel* 89: 1333-1338
- Stephenson A.L.. 2010. *The Environmental and Economic Sustainability of Potential Bioethanol from Willow in The UK*. *Bioresource Technology* 101: 9612-9623.
- Thring R.W., Vanderlaan M.N., Griffin S.L.. 1997. *Polyurethanes From Allcell Lignin*. *Biomass and Bioenergy* 13: 125-132.
- USDA Foreign Agricultural Service. *Thailand HRI Food Service Sector 2005*; GAIN Report No. TH5019; [www.fas.usda.gov/gainfiles/200502/146118902.doc](http://www.fas.usda.gov/gainfiles/200502/146118902.doc).
- Virgilio Panapanaan, *et al.* 2009. *Sustainability of Palm Oil Production and Opportunities for Finnish Technology and Know-How Transfer*. Lapeenranta, Lapeenranta University of Technology. Research Report
- Wakeley, Heather L. *et al.* 2009. *Economic and Environmental Transportation Effects of Large-Scale Ethanol Production and Distribution in The United States*. *Environmental Science and Technology*.
- Wood B.J., Corley R.H.. 1991. *The Energy Balance of Oil Palm Cultivation*. In: PORIM international palm oil conference – agriculture

- Xunmin Ou, *et al.* 2009. *Energy Consumption and GHG Emission of Six Biofuel Pathways by LCA in (the People's Republic of China.* Applied Energy 86: 5197-5208
- Yusoff S., Hansen S.B.. 2007. *Feasibility study of performing an lifecycle assessment on crude palm oil production in Malaysia.* International Journal of Life Cycle Assessment 12:50 - 58.
- Zaini, H. H. H. B. (2009). *Production of Bioetanol from Empty Fruit Bunch of Oil Palm, University College of Engineering and Technology Malaysia.*
- Zhang C., W. Han, *et al.* 2003. *Lifecycle economic analysis of Fuel Ethanol Derived from Cassava in Southwest China.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 7: 353-366
- Zhou Andrian, Thomson Elspeth. 2009. *The Development of Biofuels in Asia.* Applied Energy 86: 511-520



## LAMPIRAN

### 1. Bioetanol dari Singkong

#### 1.1 Pertanian

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Pupuk N	1.328 kg	46,5 MJ/kg	61.752 MJ
Pupuk P	1.249 kg	10,79 MJ/kg	13.477 MJ
Pupuk K	1.569 kg	5 MJ/kg	7.845 MJ
Herbisida	104 kg	262,11 MJ/kg	27.259 MJ
Diesel	1.241 L	34,45 MJ/L	42.752 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Pupuk N	1.328 kg	8,875 kg-CO <sub>2</sub> /kg	11.786 kg
Pupuk P	1.249 kg	2,19 kg-CO <sub>2</sub> /kg	2.735 kg
Pupuk K	1.569 kg	0,5736 kg-CO <sub>2</sub> /kg	900 kg
Herbisida	1.04 kg	7 kg-CO <sub>2</sub> /kg	728 kg
Diesel	1.241 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	3.186 kg

#### 1.2 Pretreatment

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	2.599 L	34,45 MJ/L	89.520 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Diesel	2.599 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	6.633 kg

### 1.3 Konversi Singkong

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	28.476 L	34,45 MJ/L	981.000 MJ
Electricity	34.000 MJ	--	34.000 MJ
Enzim $\alpha$ -amylase	690 kg	21,268 MJ/kg	14.675 MJ
Yeast <i>S. cerevisiae</i>	54 kg	10,22 MJ/kg	552 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Diesel	28.476 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	72.692 kg
Electricity	34.000 MJ	0,07177 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	2.440 kg
Enzim $\alpha$ -amylase	690 kg	0,54 kg-CO <sub>2</sub> / kg	400 kg
Yeast <i>S. cerevisiae</i>	54 kg		

### 1.4 Transportasi

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	3.850 L	34,45 MJ/L	132.633 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Diesel	3.850 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> MJ	9.828 kg

### 1.5 Energy dari *By-Product*

Output energi:

Output energi = jumlah produk x energi equivalent

Catatan: untuk *by-product* diasumsikan hanya 90% yang diberdayakan

Produk	Jumlah produk	Energi equivalent	Output Energi
Biogas	11.300 m <sup>3</sup>	22,4 MJ/m <sup>3</sup>	227.808 MJ
DDGS untuk makanan ternak	23.400 kg	20,79 MJ/kg	437.837 MJ

CO<sub>2</sub> direduksi:

CO<sub>2</sub> direduksi = jumlah produk x CO<sub>2</sub>-equivalent

Catatan: untuk *by-product* diasumsikan hanya 90% yang diberdayakan

Produk	Jumlah produk	CO <sub>2</sub> - equivalent	CO <sub>2</sub> direduksi
Biogas	11.300 m <sup>3</sup>	0,0741 kg CO <sub>2</sub> /MJ	16.881 kg
DDGS untuk makanan ternak	23.400 kg	5,49 kg CO <sub>2</sub> /kg	115.619 kg

## 1.6. Penggunaan akhir

Output energi:

Output energi = jumlah produk x energi equivalent

Produk	Jumlah produk	Energi equivalent	Output Energi
Bioetanol	100.000 L	21,2 MJ/L	2.120.000 MJ

CO<sub>2</sub> direduksi:

CO<sub>2</sub> direduksi= jumlah produk x CO<sub>2</sub>-equivalent

Produk	Jumlah produk	CO <sub>2</sub> -equivalent	CO <sub>2</sub> direduksi
Bioetanol	100.000 L	0,0693 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	146.916 kg

## 2. Bioetanol dari Singkong

### 2.1 Pertanian

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Pupuk N	50.700 kg	46,5 MJ/kg	2.357.548 MJ
Pupuk P	7.757 kg	10,79 MJ/kg	83.694 MJ
Pupuk K	49.611 kg	5 MJ/kg	248.057 MJ
Herbisida	54 kg	262,11 MJ/kg	14.117 MJ
Diesel	32.672 L	34,45 MJ/L	1.125.549 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Pupuk N	50.700 kg	8,875 kg-CO <sub>2</sub> /kg	449.963 kg
Pupuk P	7.757 kg	2,19 kg-CO <sub>2</sub> /kg	16.987 kg
Pupuk K	49.611 kg	0,5736 kg-CO <sub>2</sub> /kg	28.455 kg
Herbisida	54 kg	7 kg-CO <sub>2</sub> /kg	377 kg
Diesel	32.672 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	83.403 kg

## 2.2 Pretreatment

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	5.760 L	34,45 MJ/L	198.436 MJ
Electricity	19.725 MJ	--	19.725 MJ
Steam	141.452 kg	2,973 MJ/kg	420.537 MJ
Sulfuric acid (1,1%)	10.967 kg	1,1 MJ/kg	12.064 MJ
Lime 10 M	7.653 kg	3,47 MJ/kg	26.557 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> equivalent	Output CO <sub>2</sub>
Diesel	5.760 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /L	14.704 kg
Electricity	19.725 MJ	0,07177 kg-CO <sub>2</sub> /L	1.416 kg
Steam	141.452 kg	0,1853 kg-CO <sub>2</sub> /kg	77.904 kg
Sulfuric acid (1,1%)	10.967 kg	0,14 kg-CO <sub>2</sub> /kg	1.535 kg
Lime 10 M	7.653 kg	0,86 kg-CO <sub>2</sub> /kg	26.582 kg

## 2.3. Konversi TKKS

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	20.406 L	34,45 MJ/L	702.999 MJ
Electricity	60.753 MJ	--	60.753 MJ
Enzim $\alpha$ -amylase	6.900 kg	21,268 MJ/kg	146.763 MJ
Yeast <i>S. cerevisiae</i>	548 kg	10,22 MJ/Kg	5.523 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Diesel	20.406 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	52.092 kg
Electricity	60.753 MJ	0,07177 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	4.360 kg
Enzim $\alpha$ -amylase	6.900 kg	0,54 kg-CO <sub>2</sub> / kg	4.000 kg
Yeast <i>S. cerevisiae</i>	548 kg		

## 2.4 Transportasi

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	Energi equivalent	Input Energi
Diesel	4.850 L	34,45 MJ/L	167.083 MJ

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Diesel	4.850 L	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	12.381 kg

## 2.5 Energy dari By-Product

Output energi:

Output energi = jumlah produk x energi equivalent

Catatan: untuk *by-product* diasumsikan hanya 90% yang diberdayakan

Produk	Jumlah produk	Energi equivalent	Output Energi
Biogas	58.949 m <sup>3</sup>	22,4 MJ/m <sup>3</sup>	1.188.409 MJ
Lignin	103.740 kg	29,54 MJ/Kg	2.758.032 MJ

CO<sub>2</sub> direduksi:

CO<sub>2</sub> direduksi = jumlah produk x CO<sub>2</sub>-equivalent

Catatan: untuk *by-product* diasumsikan hanya 90% yang diberdayakan

Produk	Jumlah produk	CO <sub>2</sub> - equivalent	CO <sub>2</sub> direduksi
Biogas	58.949 m <sup>3</sup>	0,0741 kg CO <sub>2</sub> /MJ	88.061 kg
Lignin	103.740 kg	0,0741 kg CO <sub>2</sub> /MJ	204.370 kg

## 2.6. Penggunaan akhir

Output energi:

Output energi = jumlah produk x energi equivalent

Produk	Jumlah produk	Energi equivalent	Output Energi
Bioetanol	100.000 L	21,2 MJ/L	2.120.000 MJ

CO<sub>2</sub> direduksi:

CO<sub>2</sub> direduksi = jumlah produk x CO<sub>2</sub>-equivalent

Produk	Jumlah produk	CO <sub>2</sub> -equivalent	CO <sub>2</sub> direduksi
Bioetanol	100.000 L	0,0693 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	146.916 kg

## 2.7. Pengaruh Biodiesel

Input energi:

Input energi = jumlah utilitas x energi equivalent

Utilitas	Jumlah produk	Energi equivalent	Input Energi
Utilitas untuk milling			
Steam	49.611 kg	176,5 MJ/kg	8.756.340 MJ
Electricity	384.267 MJ	--	384.267 MJ
Utilitas untuk transesterifikasi			
Electricity	618.643 MJ	--	618.643 MJ
Metanol	128.538 kg	30,2985 MJ/kg	3.894.512
NaOH	32.877 kg	6,3 MJ/kg	207.123

Output CO<sub>2</sub>:

Output CO<sub>2</sub> = jumlah utilitas x CO<sub>2</sub>-equivalent

Utilitas	Jumlah Utilitas	CO <sub>2</sub> -equivalent	OutputCO <sub>2</sub>
Utilitas untuk milling			
Steam	49.611 kg	0,18525 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	1.622.112 kg
Electricity	384.267 MJ	0,07177 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	27.579 kg
Utilitas untuk transesterifikasi			
Electricity	618.643 MJ	0,07177 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	44.400 kg
Metanol	128.538 kg	0,613 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	78.794 kg
NaOH	32.877 kg	0,22 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	7.233 kg

Output energi:

Output energi = jumlah produk x energi equivalent

Produk	Jumlah produk	Energi equivalent	Output Energi
Biodiesel	1.008.361 kg	46,1 MJ/kg	46.485.442 MJ

CO<sub>2</sub> direduksi:

CO<sub>2</sub> direduksi = jumlah produk x CO<sub>2</sub>-equivalent

Produk	Jumlah produk	CO <sub>2</sub> -equivalent	CO <sub>2</sub> direduksi
Biodiesel	1.008.361 kg	0,0741 kg-CO <sub>2</sub> / MJ	3.444.571 kg