

**REKAYASA BIOPROSES PRODUKSI BIOETANOL  
DARI BIOMASA LIGNOSELULOSA TANAMAN JAGUNG: *LIFE CYCLE  
ASSESSMENT (LCA) DAN ANALISIS TEKNOEKONOMI***  
(Bioconversion of Corn Stover Lignocellulosic Biomass to Bioethanol: Life Cycle  
Assessment (LCA) and Technoeconomic Analysis)

**Djumali Mangunwidjaja<sup>1)</sup>, Anas Miftah Fauzi<sup>1)</sup>, Sukardi<sup>1)</sup>, Wagiman<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Dep. Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

<sup>2)</sup>Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana, IPB

**ABSTRAK**

Biomassa tanaman jagung merupakan sumber lignoselulosa yang dapat menjadi bahan baku produksi bioetanol. Teknologi biokonversi lignoselulosa menjadi etanol masih pada fase pertumbuhan sehingga memerlukan kajian dari berbagai aspek. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji kelayakan dari aspek lingkungan dan tekno-ekonomi dari proses produksi yang telah dikembangkan pada penelitian terdahulu. Proses produksi mencakup delignifikasi, hidrotermolisis, sakarifikasi dan ko-fermentasi (SKFS), dan distilasi dan dehidrasi. Untuk memproduksi 1 L etanol butuh 7,96 kg biomassa atau rendemennya 121 L/ton biomassa. Dari sudut pandang aspek lingkungan, produksi bioetanol dari lignoselulosa memiliki rasio kesetimbangan energi yang positif yaitu 5,60, tetapi melepaskan emisi gas rumah kaca sebesar 63,67 ton CO<sub>2</sub>-eq per tahun. Sementara itu, dari sisi ekonomi menunjukkan bahwa proses produksi bioetanol ini layak dilakukan berdasarkan parameter NPV, IRR, dan PBP. Untuk kapasitas produksi 1000 liter per liter dibutuhkan investasi sebesar Rp 1.891.508.861,00 dengan keuntungan Rp 2.166,00 per liter.

Kata kunci: Bioetanol, lignoselulosa, kajian daur hidup, tekno-ekonomi.

**ABSTRACT**

Corn stover biomass has been proposed to be lignocellulosic feedstocks for the bioethanol production. In the log phase of lignocellulosic bioconversion technology to ethanol, the life cycle assessment (LCA) and techno-economic analysis should be conducted. The objectives of this study was to assess the life cycle environmental impacts and the techno-economics analysis associated with the bioethanol production from lignocellulosic. The process included in this system consist of milling, delignification, hydrotermolysis, simultaneous saccharification and co-fermentation, distillation and dehydration. In order to produce 1 L of ethanol (95%), approximately 7.96 kg of corn stover were required or its yield was 121 liters per ton of biomass. From the environmental point of view, the production of lignocellulosic bioethanol have a positive net energy ratio (NER) was 5.60, unfortunately 63,67 tonnes of CO<sub>2</sub>-eq per year of greenhouse gas emissions was emitted. Additional, the bioethanol production process was feasible based on the parameters of NPV, IRR, and PBP. The investment cost of 1000 liters per day was Rp 1,891,508,861.00, meanwhile the profit of Rp 2,166.00 per liter ethanol.

Keywords: Bioethanol, lignocellulose, life cycle assessment, techno-economic.

## PENDAHULUAN

Periode 2005-2010 kebutuhan premium Indonesia mencapai 18,5 juta KL, dan diperkirakan meningkat menjadi 20,53 juta KL pada tahun 2015 (Ristek 2006). Untuk itu ESDM telah membuat rencana untuk mensubstitusi penggunaan premium dengan campuran etanol 3% (E-3) dan 5% (E-5). Pada tahun 2011-2015 ditargetkan penggunaan bioetanol sebesar 3% dari konsumsi premium, dan pada tahun 2016-2025 penggunaan bioetanol menjadi 5% dari total konsumsi (ESDM 2005). Untuk itu diperlukan bahan baku dalam jumlah besar. Salah satu bahan yang berpotensi adalah biomassa lignoselulosa.

Potensi ketersediaan lignoselulosa di Indonesia cukup besar. Lignoselulosa bisa diperoleh dari limbah tanaman jagung (*corn stover*) yang tersebar di 30 provinsi. Lahan budidaya jagung di Indonesia pada tahun 2003 mencapai 3.358.211 ha, dan meningkat secara signifikan pada tahun 2008 yang mencapai 4.003.313 ha (BPS 2009). Limbah tanaman jagung terdiri dari tongkol (4,49%), kelobot (4,72%), daun (7,02%), batang (83,28%) dan komponen lain (0,49%).

Pada penelitian sebelumnya telah diteliti perlakuan awal dengan menggunakan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan *white root fungi* dengan bioproses simultan, enzimatik-fermentasi, kemudian penelitian mengenai biokonversi langsung biomassa lignoselulosa limbah tanaman jagung menjadi etanol dengan mikroorganisme rekombinan. Dari penelitian pertama diperoleh kondisi optimum perlakuan awal, yaitu dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  selama 2 jam, pada 69,91 °C dan dengan penggunaan air 62,5 g/g biomassa. Setelah proses, lignin yang terkandung dalam bahan lignoselulosa berkurang sebanyak 18,48%. Kondisi optimum tersebut digabungkan dengan penggunaan mikroba rekombinan pada proses fermentasi simultan. Biokonversi yang terbaik terjadi pada penggunaan enzim kasar dengan kultur campuran *Zymomonas mobilis* dan *Pichia stipitis* pada 48 jam. Etanol yang dihasilkan sebanyak 43,08 g/L.

Dalam rangka melanjutkan hasil penelitian tahun kedua maka penelitian tahun ketiga ditujukan untuk: (a) penerapan proses terbaik pada skala yang lebih besar untuk perlakuan pendahuluan pada biomassa dan proses fermentasi (b) mengkaji dampak lingkungan dari teknologi yang dikembangkan dan pemanfaatan limbah, (c) mengkaji tekno-ekonomi dari proses terbaik.

## METODE PENELITIAN

### Proses Delignifikasi dan Hidrotermolisis

Pada penelitian terdahulu diperoleh kondisi perlakuan delignifikasi yaitu penambahan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  g/g biomassa, penambahan air 6,25 ml/g biomassa, suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Setelah bahan dicuci dilanjutkan dengan proses hidrotermolisis yaitu perlakuan biomassa pada suhu tinggi, sementara media air yang ditambahkan dijaga tetap pada fase cair. Hidrotermolisis I dilakukan pada suhu  $121^\circ\text{C}$  selama 1 jam dan hidrotermolisis II pada suhu  $180\text{-}190^\circ\text{C}$  selama 20 menit. Penambahan air pada hidrotermolisis I dan hidrotermolisis II masing-masing adalah 5 ml/g biomassa dan 9 ml/g biomassa. Percobaan dilakukan pada berat biomassa 15 g, 150 g, 300 g, dan 600 g. Biomassa tanaman jagung yang digunakan merupakan campuran batang, daun, tongkol, dan kelobot yang kemudian dihancurkan sehingga diperoleh ukuran 2-10 mm. Komposisi lignoselulosa biomassa tanaman jagung adalah: lignin 19,44%, selulosa 41,31%, hemiselulosa 26,46%, bahan ekstraktif 4,61% dan kadar air 12,72%.

### Proses Sakarifikasi dan Ko-Fermentasi Simultan (SKFS)

Sebelum proses SKFS, substrat diberi perlakuan prehidrolisis pada suhu  $51^\circ\text{C}$  selama 24 jam untuk menyediakan gula pada awal SKFS. Prehidrolisis dan sakarifikasi menggunakan enzim kasar selulase dan xilanase, sedangkan fermentasi menggunakan kultur campuran *Z. mobilis* dan *P. stipitis*. Proses SKFS dilaksanakan selama 48 jam pada suhu ruang yaitu  $30\text{-}32^\circ\text{C}$  secara *batch*. Tabel 2 menyajikan basis rancangan proses SKFS untuk percobaan skala laboratorium pada volume 750 ml, 1500 ml, dan 3000 ml.

Tabel 2. Proses SKFS pada skala laboratorium.

Komponen	Satuan	Komposisi
Lignoselulosa	g/l	79.037
Nutrient	g/l	3.050
Enzim selulase	IU/g selulosa	30
Enzim xilanase	IU/g hemiselulosa	15
Kultur <i>Z. mobilis</i>	g/l	0.060
Kultur <i>P. stipitis</i>	g/l	0.053

**Life Cycle Analysis (LCA)**

**Kesetimbangan Energi**

Kesetimbangan energi ditentukan dengan dua indikator yaitu *Net Energy Ratio* (NER) dan *Net Energy Gain* (NEG) dihitung dengan persamaan 1 dan 2 (Papong and Malakul 2010, Ojeda and Kafarov 2009) yaitu:

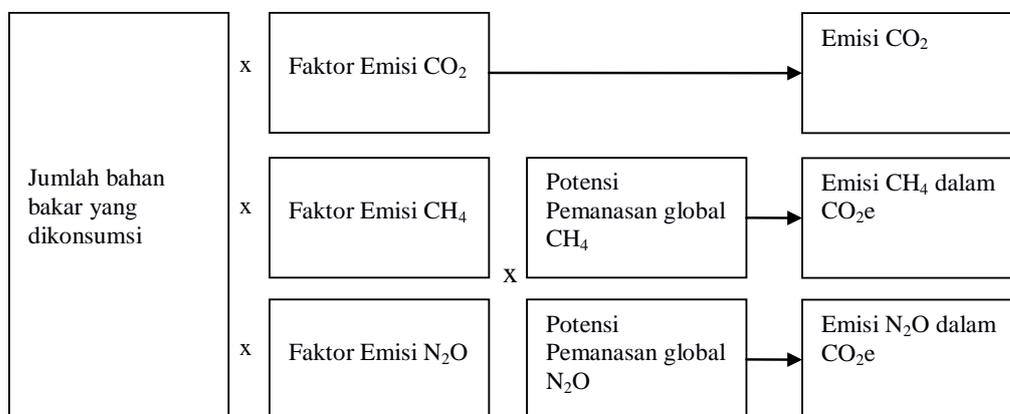
$$\text{---} \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

Input energi meliputi energi untuk pengangkutan bahan dan energi untuk proses produksi, sedangkan output energi adalah energi yang terkandung di dalam etanol yaitu 21,10 MJ/L (UN 2009).

**Potensi Gas Rumah Kaca (PGR)**

Polutan yang dilepaskan ke lingkungan dari pengangkutan bahan baku dan produksi bioetanol yang berpotensi menimbulkan gas rumah kaca yaitu CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub>. Emisi dihasilkan pada proses pengangkutan dan proses produksi dihitung dengan model sebagai berikut:



Gambar 1. Model perhitungan emisi gas rumah kaca (UN 2009)

Nilai ekuivalensi untuk gas CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O masing-masing adalah 1, 21 dan 310 adalah (UN 2009). Sementara itu, emisi akibat penggunaan listrik dihitung dengan cara mengalikan jumlah listrik yang digunakan (JLD) dengan faktor emisi yang spesifik untuk tiap negara:

$$\tag{3}$$

Potensi gas rumah kaca (PGR) dihitung menggunakan perangkat lunak *Greenhouse Gas Calculator 1.0* dari PBB. Menurut Kadam (2000), PGR akibat emisi yang ditimbulkan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$(4)$$

dengan GWP adalah potensi pemanasan global ke- $i$  dan  $m_i$  adalah massa gas ke- $i$  yang terlepas (kg).

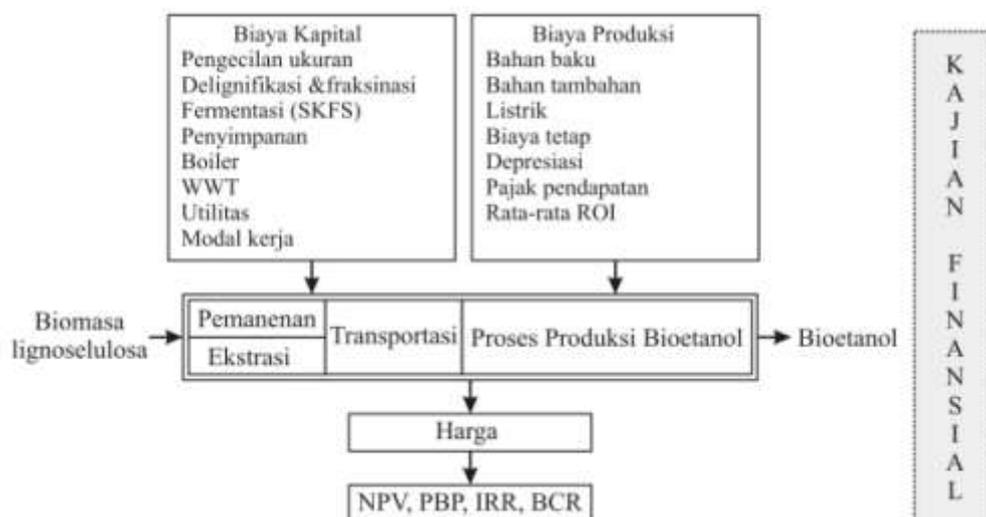
### Analisis Tekno-ekonomi

#### Asumsi-asumsi dan lingkup kajian

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis tekno-ekonomi rancangan sistem produksi bioetanol adalah:

1. Kapasitas produksi 1000 L/hari
2. Harga bioetanol Rp 13.000,00
3. Tingkat suku bunga 12%
4. Jumlah hari kerja 300 hari/tahun
5. Pajak penghasilan 28% (UU No. 36 Tahun 2008)

Analisis biaya di dalam tekno-ekonomi mencakup biaya investasi dan biaya produksi. Biaya investasi dibagi menjadi empat kategori yaitu biaya langsung, biaya tidak langsung, biaya tak terduga dan *fee*, dan fasilitas tambahan. Untuk biaya produksi terdiri dari biaya langsung, biaya tidak langsung, dan biaya pengembalian modal tahunan.



Gambar 2. Lingkup kajian tekno-ekonomi produksi bioetanol dari lingoselulosa.

### Analisa Titik Impas

Ada tiga komponen biaya yang dipertimbangkan dalam analisis ini yaitu biaya tetap, biaya variabel, dan biaya total. Analisis titik impas untuk menentukan tingkat produksi (X) dihitung dengan rumus berikut (Pujawan 2004)

$$X = \frac{FC}{p - c} \quad (5)$$

dengan FC adalah biaya tetap, p dan c merupakan harga jual dan biaya variabel per satuan produk.

### Analisis Kelayakan Finansial

Parameter yang dipakai untuk analisis kelayakan finansial yaitu *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan *pay back period* (PBP) (Gray et al. 1992, Pujawan 2004) dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{—————} \quad (6)$$

$$\text{—————} \quad (7)$$

$$\text{—————} \quad (8)$$

Keterangan:

$B_t$  = penerimaan kotor pada tahun ke-t

$C_t$  = total biaya pada tahun ke-t

$i$  = tingkat suku bunga (%)

$i^*$  = tingkat suku bunga yang dicari (IRR, %)

$n$  = umur ekonomis proyek

Analisis Sensitivitas dilakukan untuk melihat dampak perubahan harga enzim dan harga produk etanol terhadap nilai-nilai kelayakan finansial di atas.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Proses Delignifikasi dan Fraksinasi

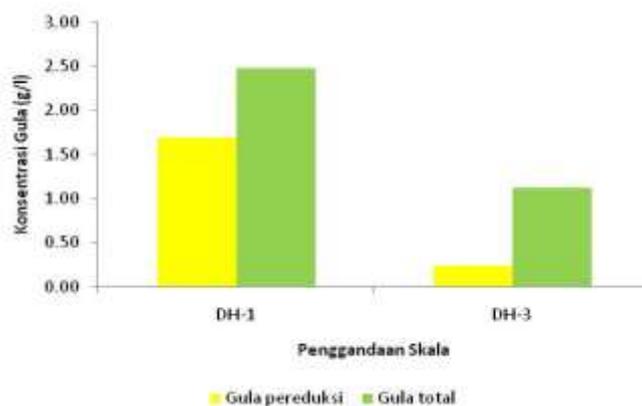
Perlakuan pendahuluan terhadap biomassa dengan cara kimiawi ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bertujuan untuk merusak komponen lignin, sedangkan hidrottermolisis bertujuan memfraksinasi komponen selulosa dan hemiselulosa. Proses tersebut dipengaruhi

oleh katalisator, suhu proses dan waktu proses. Untuk mengevaluasi hasil penelitian di laboratorium maka dilakukan empat percobaan delignifikasi dan hidrotermolisis. Tabel 3 menyajikan perubahan komponen lignoselulosa pada beberapa percobaan delignifikasi dan hidrotermolisis.

DH-1 merupakan proses delignifikasi dan hidrotermolisis biomassa tanaman jagung dengan berat biomassa 15 g. Akibat perlakuan tersebut terjadi pengurangan berat biomassa dari 13,092 g menjadi 4,574 g atau berat berkurang 65,064%. Pengurangan tersebut disebabkan oleh terdegradasinya komponen lignoselulosa dan kemudian terlarut saat proses pencucian. Komponen lignin dan bahan ekstraktif terdegradasi pada tahap delignifikasi, sedangkan selulosa dan hemiselulosa terhidrolisis selama proses hidrotermolisis.

Sementara itu DH-2, DH-3 dan DH-4 adalah delignifikasi dan hidrotermolisis untuk biomassa dengan berate masing-masing yaitu 150 g, 160 g, dan 400 g. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan berat lignoselulosa mencapai 44-56%, dengan penurunan terbesar terjadi pada komponen bahan ekstatif.

Komponen lignoselulosa yang terhidrolisis akan terlarut ke dalam fraksi cairan baik dalam bentuk monosakarida maupun oligosakarida. Gambar 3 menunjukkan gula total dan gula produksi DH-1 yaitu 2,48 g/l dan 1,69 g/l, sedangkan pada DH-4 yaitu proses delignifikasi dan hidrotermolisis 600 g biomassa maka gula total dan gula produksinya masing-masing hanya 1,13 g/l dan 0,24 g/l.



Gambar 3. Konsentrasi gula pereduksi dan gula total pada DH-1 dan DH-4

Tabel 2. Hasil proses delignifikasi dan hidrottermolisis

Komponen	DH-1			DH-2			DH-3			DH-4		
	X <sub>0</sub> (g)	X <sub>1</sub> (g)	ΔX (%)	X <sub>0</sub> (g)	X <sub>1</sub> (g)	ΔX (%)	X <sub>0</sub> (g)	X <sub>1</sub> (g)	ΔX (%)	X <sub>0</sub> (g)	X <sub>1</sub> (g)	ΔX (%)
BTJ	15.000	4.626		150.000	479.160		300.000	882.145		600.000	1397.117	
Lignoselulosa	13.092	4.574	65.064	130.920	73.264	44.039	273.300	125.000	54.263	561.000	245.753	56.194
Lignin	2.545	0.958	62.377	25.451	14.433	43.291	60.290	23.938	60.296	123.757	47.062	61.972
Selulosa	5.408	1.975	63.490	54.083	39.365	27.215	85.762	55.113	35.738	176.042	108.353	38.451
Hemiselulosa	3.464	1.589	54.143	34.641	16.609	52.055	64.526	26.638	58.718	132.452	52.370	60.461
Bahan ekstrakti	0.604	0.053	91.186	6.035	2.857	52.658	39.437	12.175	69.128	80.952	23.936	70.432

Keterangan:

DH = delignifikasi dan hidrottermolisis

BTJ = biomassa tanaman jagung

X<sub>0</sub> = komposisi biomassa sebelum perlakuan delignifikasi dan hidrottermolisis

X<sub>1</sub> = komposisi biomassa setelah perlakuan delignifikasi dan hidrottermolisis

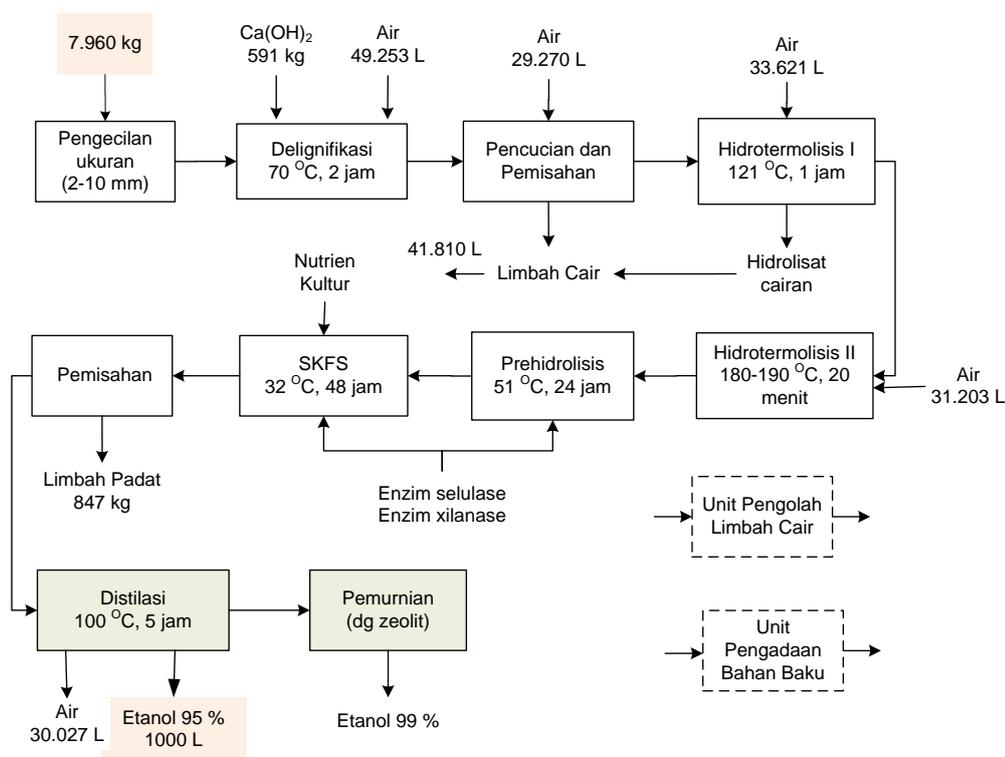
ΔX = perubahan komposisi lignoselulosa :  $\Delta X = \left( \frac{X_0 - X_1}{X_0} \right) \times 100\%$

### Proses Sakarifikasi dan Ko-Fermentasi Simultan (SKFS)

Perubahan skala proses SKFS menggunakan basis penelitian terdahulu yaitu pada volume 50 ml, sedangkan pada skala laboratorium yang lebih besar digunakan berturut-turut 750 liter, 1500 liter, dan 3000 liter. Pada SKFS 50 ml diperoleh konsentrasi etano pada *broth* fermentasi sebesar 43,08 g/l dan rendemen 27,64 g etanol/g biomassa.

### Rancangan Proses Produksi

Proses produksi etanol dari lignoselulosa terdiri dari perlakuan pendahuluan, sakarifikasi, fermentasi dan *recovery* etanol. Perlakuan pendahuluan meliputi pengecilan ukuran, delignifikasi dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dan hidrotermolisis. Sementara itu, sakarifikasi menggunakan enzim selulase dan xilanase, sedangkan fermentasi menggunakan *Zimomonas mobilis* dan *Pichia stipitis*. Untuk memisahkan etanol dari air digunakan cara distilasi dan dehidrasi dengan zeolit. Gambar 5 menyajikan skema rancangan proses produksi etanaol dari lignoselulosa tanaman jagung.



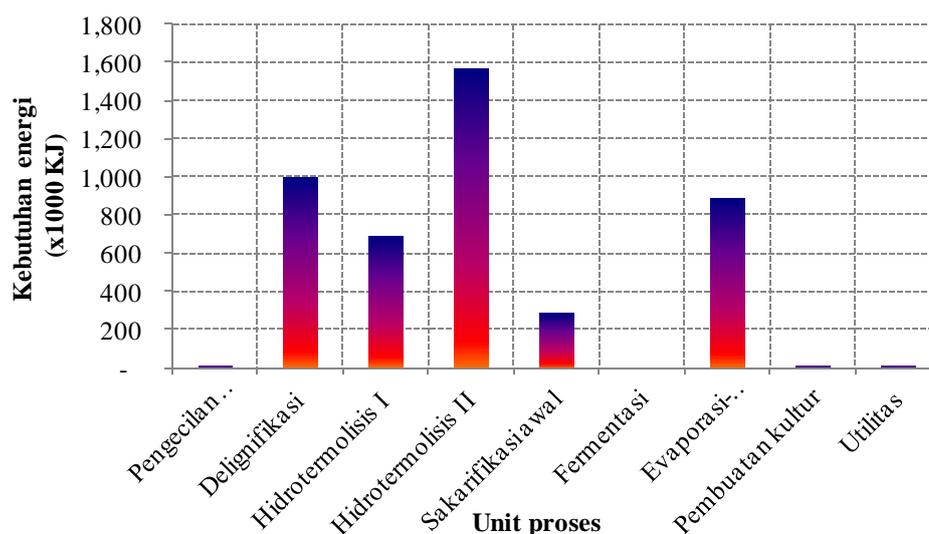
Gambar 5. Rancangan proses produksi etanaol dari lignoselulosa tanaman jagung.

Berdasarkan rancangan di atas maka untuk menghasilkan 1000 liter etanol dengan tingkat kemurnian 95% dibutuhkan bahan baku berupa limbah tanaman jagung sebanyak 7.960 kg. Dengan kadar air biomassa tanaman jagung 12,72% dan diasumsikan efisiensi distilasi dan absorbs 90%, maka rendemen yang diperoleh sebesar 0,125 kg etanol per kg biomassa tanaman jagung. Selain etanol, sistem produksi ini juga menghasilkan limbah cair sebanyak 41.810 liter dan limbah padat 847 kg.

### Life Cycle Analysis

#### Kesetimbangan Energi dan Dampak Lingkungan

Energi yang diperlukan untuk produksi 1000 liter etanol adalah 44.504 MJ yang terdiri dari energi untuk pengangkutan bahan baku 2.754 MJ, proses produksi 43.640 MJ, dan *utilitas* 864 MJ. Unit proses yang paling banyak membutuhkan energi adalah hidrotermolisis II karena proses ini dilakukan pada suhu 180-190 °C (Gambar 6). Unit proses berikutnya yang juga memerlukan energi besar adalah delignifikasi, distilasi, dan hidrotermolisis I. Selain faktor suhu, besarnya jumlah kebutuhan energi juga dipengaruhi oleh waktu proses. Misalnya unit proses distilasi pada suhu 100 °C, kebutuhan energi lebih besar dibandingkan hidrotermolisis I pada suhu 121 °C karena waktu distilasi lebih lama.



Gambar 6. Kebutuhan energi pada setiap unit proses produksi etanol.

Energi yang dikandung pada etanol adalah 21,10 MJ/L (UN 2009) sehingga total energi yang diperoleh dari proses ini adalah 15.975 MJ. *Net Energy Ratio* (NER) dan *Net Energy Gain* rancangan sistem produksi bioetanol masing-masing sebesar 5,60 dan 16,629 yang berarti energi yang dihasilkan (etanol) lebih tinggi dibandingkan dengan energi primer yang digunakan untuk proses produksi etanol tersebut. Nilai NER tersebut lebih tinggi dibanding NER etanol dari jagung yaitu 1,35-1,67 tetapi lebih rendah dibanding etanol dari gula tebu yang memiliki NER 8,3-10,2 (Shapouri *et al.* 2007; Duffield *et al.* 2007).

Pada proses pengangkutan bahan baku digunakan truk dengan bahan bakar premium, sedangkan energi untuk proses produksi digunakan biomassa dari limbah padat (residu) ataupun biomassa, serta energi listrik untuk utilities. Penggunaan bahan bakar tersebut potensial menimbulkan emisi gas rumah kaca yaitu CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub>. Jumlah polutan yang ditimbulkan dari produksi etanol ini yaitu 21,93 Kg CO<sub>2</sub>/L etanol, 0,00003 Kg N<sub>2</sub>O/L etanol, dan 0,0000002 Kg CH<sub>4</sub>/L etanol. Besarnya emisi CO<sub>2</sub> diakibatkan oleh penggunaan energi biomassa dan energi fosil pada proses pengangkutan dan proses produksi. Dari emisi tersebut dapat diketahui bahwa potensi gas rumah kaca pada produksi etanol dari biomassa tanaman jagung adalah 63,67 ton CO<sub>2</sub>.eq/tahun.

## **Analisis Teknoekonomi**

### **Analisis Biaya**

Biaya investasi merupakan biaya yang diperlukan untuk mendirikan industri bioetanol dari biomassa tanaman jagung. Biaya investasi terdiri dari biaya tetap yang meliputi biaya prainvestasi, tanah dan bangunan, fasilitas penunjang, mesin dan peralatan produksi, dan alat kantor. Selain itu, biaya investasi juga mencakup biaya modal kerja yang meliputi upah tenaga kerja, bahan baku dan penunjang, bahan bakar dan listrik.

Biaya investasi yang diperlukan untuk proses produksi dengan kapasitas 1000 L/hari adalah Rp. 1.891.508.861,00, komponen terbesar dari biaya investasi adalah biaya mesin dan peralatan dengan proporsi 53,06% (Tabel 4). Modal kerja yang diperlukan untuk operasi pertama kali adalah 466.230.881,16 atau 24,65% dari total biaya investasi.

Tabel 4. Biaya investasi produksi etanol dengan limbah tanaman jagung.

Komponen	Nilai Total (Rp)	Persentase (%)
Biaya Kapital Tetap	1,425,277,979.87	75.35
Biaya Prainvestasi	1,000,000.00	0.05
Tanah dan Bangunan	650,000,000.00	34.36
Fasilitas Penunjang	3,028,500.00	0.16
Mesin dan Peralatan	756,249,479.87	53.06
Alat Kantor	15,000,000.00	7.00
Modal kerja	466,230,881.16	24.65
Total biaya investasi	1,891,508,861.03	100.00

Biaya operasi terbagi menjadi dua komponen, biaya tetap dan biaya tidak tetap. Total biaya yang diperlukan selama proses produksi adalah Rp 2.797.385.287,00. Komponen biaya terbesar yang disumbangkan oleh biaya bahan baku dan penunjang (82.69%) (Tabel 5).

Tabel 5. Modal kerja untuk proses produksi etanol (1000 L/hari)

Deskripsi Biaya	Total Biaya (Rp)	Persentase (%)
Biaya tetap		13.51
Upah tenaga kerja	378,000,000	0.00
Biaya tidak tetap		86.49
Bahan baku dan penunjang	2,313,213,587	82.69
Pengangkutan bahan baku	25,472,000	0.91
Bahan Bakar	77,774,700	2.78
Listrik	2,925,000	0.10
Total biaya produksi	2,797,385,287	100.00

### Analisis Titik Impas

Pada titik impas sebuah industri memiliki penerimaan dan pengeluaran yang sebanding, sehingga disebut impas. Produksi minimum yang mengakibatkan impas adalah 343 L/hari dengan biaya produksi sebesar Rp 1.337.003.744,00 per tahun.

### Analisis Kelayakan Finansial

Penerimaan bersih dalam waktu 15 tahun, dengan memperhitungkan *discount factor*, menunjukkan *net present value*. NPV pada proses produksi etanol bernilai Rp 957.794.270,00, dengan IRR 19.29%, jangka pengembalian modal 4.96 tahun, dan rasio keuntungan dan biaya (BCR) 1.45.

### **Analisis Sensitivitas**

Enzim merupakan bahan pembantu tetapi menjadi penyumbang terbesar biaya produksi yaitu Rp 5.525.000,00 atau sekitar 71,65% dari biaya produksi. Harga enzim selulase dan xilanase yang digunakan pada perhitungan tekno-ekonomi yaitu masing-masing Rp 375.000,00 dan Rp 325.000,00 per liter enzim. Perubahan harga enzim akan berpengaruh pada kriteria kelayakan, jika terjadi kenaikan sampai 15% rancangan sudah tidak lagi layak.

Selain enzim, perubahan harga etanol juga akan berpengaruh pada kriteria kelayakan. Harga etanol sebagai dasar perhitungan adalah Rp 13.000,00 per liter dan penurunan harga etanol sampai 7,5% atau Rp 12.025,00 mengakibatkan industri tidak lagi layak. Pada penelitian ini, bahan baku yaitu limbah tanaman jagung tidak diberi harga, namun jika harus dibeli maka harga maksimum agar proyek tetap layak adalah Rp 75,00 per kg.

### **KESIMPULAN**

Proses produksi etanol dari lignoselulosa tanaman jagung yang terdiri dari delignifikasi, hidrottermolisis, sakarifikasi dan ko-fermentasi simultan, dan pemurnian dapat menghasilkan etanol sebesar 124 liter per ton bahan baku. Sementara itu, untuk kajian *life cycle assessment* (LCA) menunjukkan bahwa *Net Energy Ratio* (NER) dan *Net Energy Gain* produksi bioetanol dari lignoselulosa bernilai positif yaitu masing-masing 5,60 dan 16,629. Analisis tekno-ekonomi pada proses produksi ini juga menunjukkan bahwa industri etanol dari lignoselulosa layak untuk dilakukan.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional yang telah menyediakan dana penelitian melalui Hibah Kompetitif Penelitian Sesuai Prioritas Nasional Tahun Batch II Tahun Anggaran 2011 Nomor 430/SP2H/PL/Dit.Litabmas/IV/2011 tanggal 14 April 2011.

## DAFTAR PUSTAKA

- Brawn RC. 2003. *Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agriculture*. USA: Iowa State Press
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2009. Luas, Produksi, Produktivitas Jagung Secara Nasional. [www.bps.go.id](http://www.bps.go.id)
- Duffield JA, Shapouri H, Wang M. 2006. Assessment of Biofuels. In : Dewulf J, Van Langenhove H, editor. *Renewables-Based Technology Sustainability Assessment*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- [ESDM] Energi dan Sumber Daya Mineral. 2005. *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025*. Jakarta.
- Papong S, Malakul P. 2010. Life-cycle energy and environmental analysis of bioethnaol production from cassava in Thailand. *Bioresource Technology* 101: 5112-5118.
- Spatari S, Bagley DM, MacLean HL. 2010. Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol convertiona technologies. *Bioresource Technology* 101: 654-667.
- Pujawan N. 2004. *Ekonomi Teknik*. Edisi pertama, cetakan ketiga. Guna Widya, Surabaya.
- [Ristek] Riset dan Teknologi. 2006. *Buku Putih Ristek*. Jakarta
- [UN] United Nations. 2009. Greenhouse Gas Calculator, User Manual 1.0.
- Van Langenhove H, editor. *Renewables-Based Technology Sustainability Assessment*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.