

Desain Pabrik Bioetanol Melalui Fraksinasi Lignoselulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Centri Nurcahyania, Nadiya Rizki Safitria, Siti Machmudah, dan Sugeng Winardia
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
email : machmudah@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Bioetanol adalah bahan bakar alternatif yang diolah dari tumbuhan yang memiliki keunggulan karena mampu menurunkan emisi CO₂ hingga 18%, dibandingkan dengan emisi bahan bakar fosil seperti minyak tanah. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang merupakan salah satu limbah padat yang dihasilkan dari pabrik CPO yang jumlahnya mencapai 95,56% dari jumlah CPO yang diproduksi. Proses produksi bioetanol terdiri dari empat proses yaitu pre-treatment, fraksinasi, fermentasi dan proses pendukung (pemurnian). Proses ini dapat menghilangkan air hingga kadar etanol menjadi 99,5% dan dihasilkan etanol absolute (murni). Pabrik bioethanol ini akan menghasilkan produk sebesar 16.614.108,61 kg/tahun dengan kemurnian etanol 99,5%. Dari perhitungan analisis ekonomi didapatkan nilai NPV sebesar Rp 249.539.009.136, untuk IRR sebesar 25,02%, POT selama 2,42 tahun, dan BEP sebesar 25,98%. Dari data tersebut menunjukkan bahwa pabrik Lignin dari Tandan Kosong Kelapa Sawit ini layak untuk didirikan.

Kata Kunci—Pre-Treatment, Fraksinasi, Bioetanol, TKKS.

I. PENDAHULUAN

SUMBER daya energi konvensional bahan bakar fosil meliputi minyak bumi/gas bumi dan batu bara merupakan sumber energi yang tidak terbarukan. Kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM) sekarang membuat permasalahan secara global dikarenakan faktor-faktor seperti cadangan yang berkurang sesuai dengan umur eksploitasinya, permintaan yang meningkat, jaminan pasokan (*supply security*) yang terbatas dan pembatasan produksi. Saat ini pengembangan bioetanol merupakan salah satu upaya yang dikembangkan untuk mengurangi kelangkaan. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM, bentuk dukungan pemerintah dengan adanya pengembangan bioetanol.

Bioetanol merupakan salah satu *biofuel* yang hadir sebagai bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan dan sifatnya yang terbarukan [1]. Beberapa kelebihan bioetanol dibanding bahan bakar minyak, antara lain lebih aman, memiliki titik nyala tiga kali lebih tinggi dibanding bensin, dan menghasilkan emisi gas hidrokarbon lebih sedikit. Di balik itu juga terdapat berbagai kekurangan bioetanol bila dibanding dengan bahan bakar minyak, antara lain mesin kendaraan akan mengalami kesulitan untuk dihidupkan bila dalam keadaan suhu dingin, serta mampu bereaksi dengan logam tertentu seperti aluminium, sehingga dapat merusak

Tabel 1.
Data Ekspor dan Impor Bioetanol

Tahun	Ekspor (L/tahun)	Impor (L/tahun)
2017	64.000.000	5.000.000
2018	158.000.000	96.000.000
2019	70.000.000	1.000.000
2020	47.000.000	29.000.000
2021	65.000.000	44.000.000

Tabel 2.
Komposisi Kimia TKKS

Komponen	Komposisi (%)
Hemiselulosa	14,62
Selulosa	37,26
Lignin	31,68
Ash	6,69
Zat Ekstraktif	1,34
Air	8,41

komponen kendaraan yang terbuat dari logam tersebut [2]. Hal tersebut menjadi perhatian banyak negara dalam pembuatan bahan bakar nabati (BBN) berupa *biofuel* yang salah satunya adalah bioethanol (Etanol merupakan cairan tak berwarna, mudah menguap, dan mempunyai bau yang khas. Berat jenisnya adalah 0,7939 g/mL dan titik didihnya 78,3°C pada tekanan 766 cmHg. Sifat lainnya adalah larut dalam air dan eter serta mempunyai kalor pembakaran 7093,72 kkal.

Kelapa sawit merupakan tanaman yang mengandung lignoselulosa dengan nilai ekonomis yang cukup tinggi karena merupakan salah satu tanaman penghasil minyak nabati. Tanaman kelapa sawit merupakan salah satu jenis tanaman perkebunan yang menduduki posisi penting dalam sektor pertanian dan sektor perkebunan. Tabel 1 disampaikan data tinjauan pasar. Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia TKKS.

Ketersediaan kelapa sawit sangat melimpah dan selalu meningkat dari tahun ke tahun, contohnya seperti pada pertumbuhan kelapa sawit dari tahun 2015-2020 yang disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Salah satu limbah padat industri kelapa sawit adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah padat tersebut mempunyai ciri khas pada komposisinya. Dimana komponen terbesarnya adalah selulosa, disamping komponen lain hemiselulosa dan lignin. TKKS merupakan limbah padat yang paling banyak dihasilkan oleh industri kelapa sawit yaitu sekitar 22-23% dari total Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah [3].

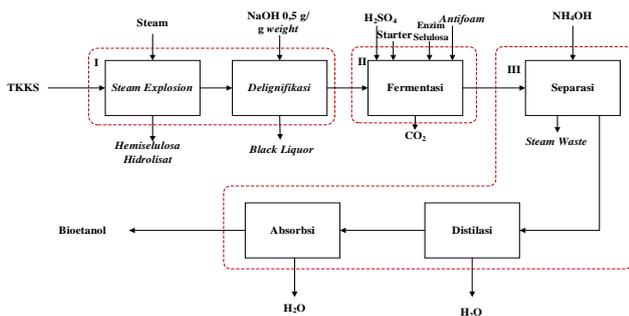
Pabrik Bioetanol ini menggunakan bahan baku utama berupa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). TKKS berbentuk tidak teratur dengan bobot kira-kira 3,5 kg dan memiliki ketebalan 130 mm dengan panjang bervariasi 170 – 300 mm dan lebar 250 – 350 mm. Komposisi tandan kosong

Tabel 3.
Seleksi Mikroorganisme dalam Proses Fermentasi

Jenis Mikroorganisme	Yield	Suhu	pH
<i>Zymomonas mobilis</i>	97%	30-37°C	3,5-7,5
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	90-92	30-40°C	4-5

Tabel 4.
Seleksi Proses Dehidrasi

Parameter	Destilasi Azeotrop	Adsorpsi
Teknologi	Lebih kompleks	Sederhana
Bahan	Benzene (Untuk entrainer)	Nitrogen, udara kering (Untuk regenerasi)
Limbah	Benzene	Tidak ada
Kemurnian etanol	99,5% berat	99,5% berat
Operating Cost	Lebih tinggi (Untuk steam, cooling water, entrainer)	Lebih Rendah (untuk regenerasi saja)
Capital Cost	Lebih tinggi (diperlukan kolom tambahan)	Lebih rendah (Alatnya berukuran lebih kecil)



Gambar 1. Diagram Balok Proses Produksi Bioetanol Berbahan TKKS.

kelapa sawit dalam limbah kelapa sawit memiliki presentase sebesar 23% dari total produksi, atau sekitar 7,15 juta ton. Pendirian pabrik ini akan didirikan di Kawasan Industri Dumai, Provinsi Riau. Hal ini bertujuan untuk memudahkan aksesibilitas dan fasilitas transportasi, sumber energi listrik dan air, Sumber tenaga kerja yang memadai serta iklim dan topografi yang sesuai sehingga dapat menekan biaya distribusi serta biaya operasinya. Berdasarkan perhitungan produk bioethanol yang dihasilkan sebesar 16.614.108,61 kg/tahun.

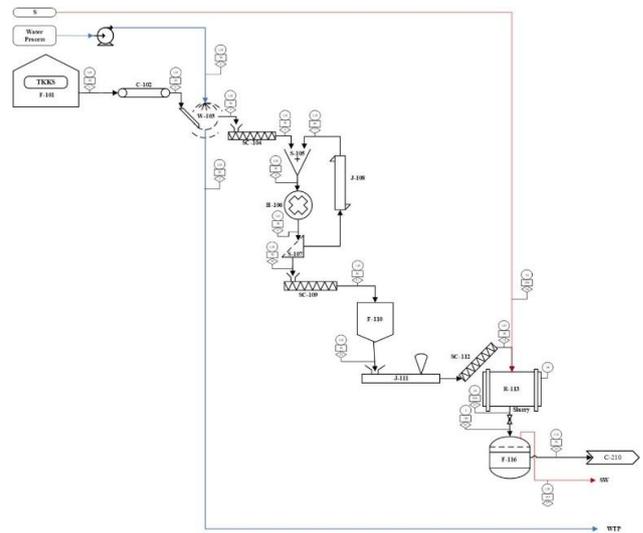
II. DASAR PERANCANGAN

A. Seleksi Proses

Dalam perancangan pabrik bioetanol dilakukan seleksi proses yang tepat dari beberapa bahan dan teknologi yang dapat digunakan untuk memaksimalkan hasil produksi agar menghasilkan pabrik yang beroperasi secara efektif serta efisien, baik dari sektor ekonomi maupun lingkungan. Terdapat beberapa tahapan utama, yaitu proses *pre-treatment*, fraksinasi, fermentasi dan proses pendukung (pemurnian).

Dalam proses *pre-treatment* TKKS dilakukan reduksi ukuran bertujuan untuk menghaluskan TKKS untuk memperluas kontak bahan baku dengan steam sehingga proses fraksinasi lignoselulosa menjadi selulosa, hemiselulosa, dan lignin menjadi maksimal. Selanjutnya untuk proses dilakukan analisa pemilihan proses dengan perbandingan berdasarkan parameter seleksi proses.

Pre-treatment steam explosion dan *delignifikasi*



Gambar 2. Unit Proses *Pre-treatment Size Reduction* dan *Steam Explosion* terdiri dari TKKS storage (F-101), belt conveyor (C-102), Rotary Washer (W-103), Screw Conveyor (SC-104), Shredder (S-105), Hammer Mill (H-106), Screen (S-107), Screw Conveyor (SC-108), bin (F-110), weight belt feeder (J-111), screw conveyor (SC-112), reaktor steam explosion (R-113), Tangki Flash (F-116).

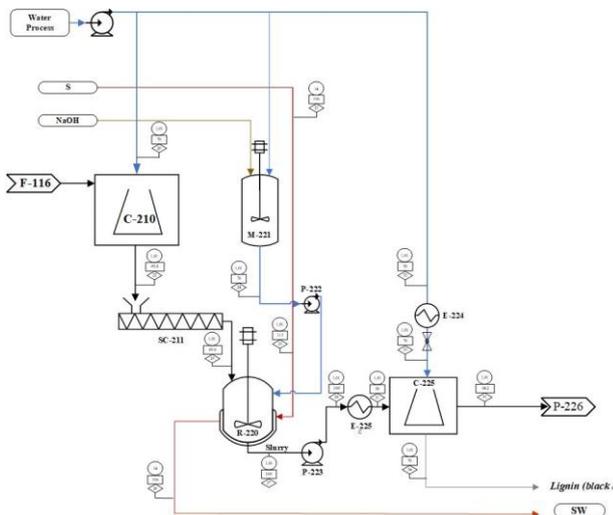
menggunakan NaOH akan memiliki hasil yang optimal apabila kedua proses tersebut dikombinasi dalam suatu proses. Hal tersebut dilakukan dengan beberapa pertimbangan, yaitu pemisahan selulosa dengan kemurnian tinggi dengan hanya sedikit degradasi dan fraksinasi hemiselulosa dengan efisiensi tinggi, *Yield* yang dihasilkan lebih stabil dibanding hanya menggunakan proses *steam explosion* saja, Lignoselulosa belum terpisahkan secara sempurna sehingga perlu dilakukan proses fraksinasi untuk memisahkan dan mengambil lignin dari biomassa.

Setelah proses *pre-treatment*, selanjutnya proses pembuatan bioethanol dengan proses *Simultaneous Saccharification Co-Fermentation* (SSCF) karena *yield* yang dihasilkan lebih besar dan jangka waktu yang dibutuhkan juga lebih singkat [4]. Fermentasi merupakan proses biokimia dan tahap paling kritis dalam produksi etanol, di mana mikroorganisme yang berperan dalam fermentasi akan menghasilkan enzim yang mampu mengkonversi substrat menjadi etanol menggunakan bakteri *Zymomonas mobilis* sebagai mikroorganisme fermentasi berdasarkan pertimbangan range pH dan suhu, dan *yield*.

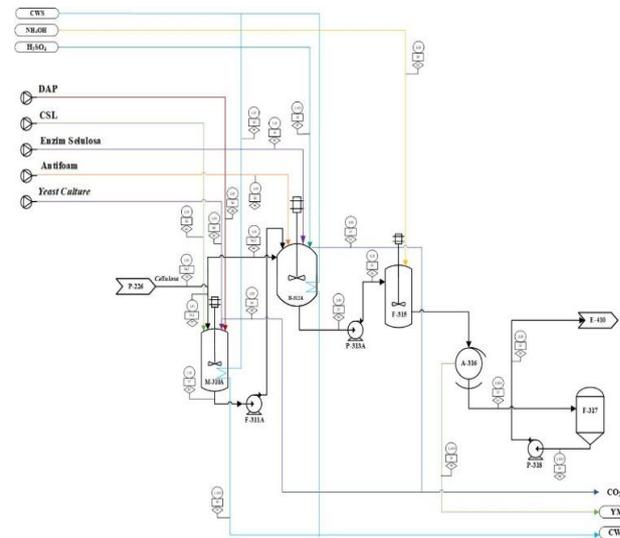
Faktor utama yang berpengaruh terhadap *yield* produk dan efisiensi fermentasi meliputi kondisi fisik inoculum, faktor lingkungan selama fermentasi, dan mutu substrat [5]. Kondisi fisik inoculum sesuai dengan kondisi pertumbuhan optimal mikroba spesifik yang digunakan. Kondisi lingkungan yang banyak berpengaruh adalah pH, suhu, kapasitas I-13 buffer, kontaminan, konsentrasi substrat, kandungan alkohol, jenis khamir, suplai oksigen dan agitasi. Seleksi mikroorganisme melalui proses fermentasi tertera pada Tabel 3.

Tahapan selanjutnya yaitu proses pendukung atau pemurnian, proses fermentasi untuk mencapai kemurnian etanol 99,5%. Dua metode dehidrasi yang dapat digunakan untuk menghasilkan bioetanol 99,5% yaitu dengan distilasi azeotrop dan adsorpsi. Perbandingan penggunaan proses distilasi azeotrop dan adsorpsi disajikan pada Tabel 4.

Dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi lebih menguntungkan dari pada distilasi azeotrop dikarenakan



Gambar 3. Unit Proses Fraksinasi Proses Delignifikasi terdiri dari *centrifuge* 1 (C-210), *screw conveyor* (SC-212), reaktor delignifikasi (R-220), *Centrifuge* 2 (C-225), *Centrifugal Pump* (P-223).



Gambar 4. Unit Proses Hidrolisis dan Fermentasi terdiri dari tangki *starter* (M-310), tangki fermentasi (R-312), Tangki Netralisasi (F-315), *Rotary Vacuum Filter* (A-316), *filtrat pump* (P-318), menuju *pre-heater beer coloumn* (E-410), *beer coloumn* (B-411).

proses adsorpsi menggunakan teknologi yang lebih sederhana, tidak menghasilkan limbah, serta operating cost dan *capital cost* yang lebih rendah. Oleh sebab itu proses adsorpsi dipilih sebagai proses dehidrasi. Untuk memaksimalkan proses dehidrasi etanol maka dibutuhkan jenis adsorben yang paling baik dalam menghilangkan air dalam etanol [4].

Absorben yang paling baik adalah *molecular sieve*. Hal tersebut dikarenakan kadar air yang dihasilkan kurang dari 1 ppm yang sangat kecil nilainya, sehingga kadar etanol dapat memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI). *Molecular sieve* yang dapat digunakan adalah tipe zeolit dengan ukuran pori 3A karena ukuran ini dapat efektif menyerap molekul air yang berukuran 2,8A dan tidak dapat menangkap molekul etanol yang berukuran 4,4A. Molekul air yang terperangkap dan melekat pada adsorben disebut adsorbate sedangkan yang tidak melekat disebut adsorptive. Mekanisme adsorpsi terbagi menjadi 4 tahap yaitu: Transfer massa molekul-molekul air (*adsorbate*) menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben, Difusi *adsorbate* melalui lapisan film (*film diffusion*), Difusi *adsorbate* melalui pori-pori dalam adsorben (*pore diffusion*), Menempelnya *adsorbate* pada permukaan dinding dalam adsorben.

Proses ini dapat menghilangkan air hingga kadar etanol menjadi 99,5% dan dihasilkan etanol absolute (murni). Adsorpsi dengan *molecular sieve* adalah teknik dehidrasi etanol yang paling baik dan menguntungkan.

III. URAIAN PROSES

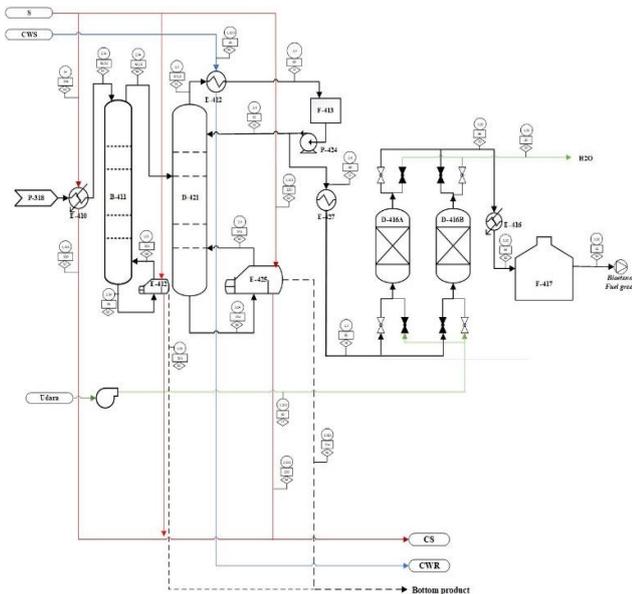
Proses produksi bioetanol tahap *pre-treatment* yang berfungsi untuk membersihkan bahan baku dan mereduksi ukuran bahan baku. Tahap kedua fraksinasi, yang terbagi menjadi ekstraksi air dan ekstraksi alkali yang masing-masing bertujuan untuk memisahkan lignoselulosa dari TKKS. Tahap ketiga proses fermentasi, dengan perlakuan awal menggunakan asam kuat untuk memproduksi bioetanol dari TKKS. Kemudian terdapat proses pendukung, yaitu proses pemurnian untuk memisahkan bioetanol dari beberapa komponen agar menjadi etanol *fuel grade* dan sesuai dengan standar SNI. Gambar 1 menunjukkan diagram proses

produksi bioethanol TKKS.

A. Pre-treatment

Tahap Pre-treatment berfungsi untuk membersihkan bahan baku dan mereduksi ukuran bahan baku. TKKS terlebih dahulu dengan pencucian, kemudian dihancurkan menjadi potongan yang lebih halus dan dikeringkan agar tidak ada aktifitas biologis saat disimpan di tangki penyimpanan kemudian masuk ke reaktor steam explosion. TKKS yang berasal dari TKKS storage (F-101) dipindahkan menggunakan belt conveyor (C-102) untuk masuk ke proses pencucian dengan air proses. Proses pencucian dilakukan dengan menggunakan Rotary Washer (W-103) untuk menghilangkan pengotor yang menempel pada TKKS secara maksimal. TKKS dari Rotary Washer menuju proses penghancuran untuk direduksi ukurannya menjadi 8 – 12 mm melalui dua alat. Mula-mula TKKS direduksi ukurannya melalui Shredder (S-105) sehingga ukurannya akan menjadi 1-100 cm, kemudian TKKS dihancurkan lagi pada Hammer Mill (H-106) sehingga ukurannya menjadi 10 mm. Tujuan dari proses mekanik ini ialah untuk mengecilkkan bahan lignoselulosa serta menambah luas permukaan kontak untuk proses pre-treatment berikutnya, di samping itu juga ukuran 8-12 mm adalah ukuran yang efektif untuk dapat memperoleh recovery selulosa yang besar [5]. Pengurangan ukuran bahan baku menjadi bagian-bagian kecil merupakan salah satu cara yang paling efektif untuk meningkatkan aksesibilitas enzim ke bahan lignoselulosa. Semakin kecil ukuran sampel maka akan semakin mudah dalam mendegradasi lignin [6]. TKKS dari Hammer Mill yang memiliki ukuran > 12 mm selanjutnya di Screen (S-107) ditransportasikan melalui Screw Conveyor (SC-108) menuju size reduction ulang. Unit proses ini tertera pada Gambar 2.

Setelah melalui proses *size reduction* TKKS dengan ukuran <12 mm kemudian ditransportasikan *Screw Conveyor* (SC-109) masuk ke bin (F-110). Sebelum proses fraksinasi TKKS dari bin ditimbang dengan *weight belt feeder* (J-111) untuk memastikan komposisi sesuai kapasitas, kemudian ditransportasikan dengan *screw conveyor* (SC-112) menuju reaktor *steam explosion* (R-113). Reaktor tersebut dialiri dengan saturated steam bertekanan 14 bar sehingga reaktor



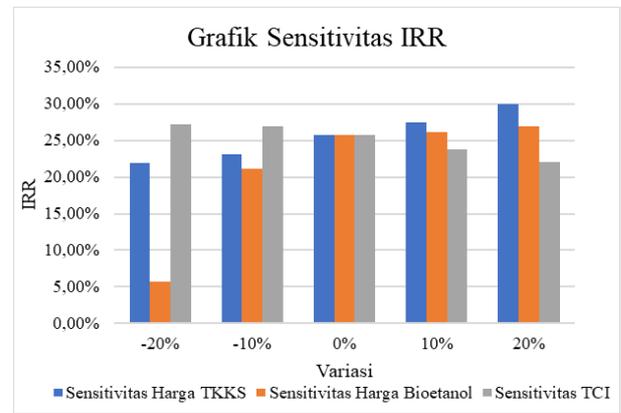
Gambar 5. Unit Proses Separasi terdiri dari beer column (B-411), pre-heater kolom distilasi (E-410), Reboiler beer column (E-412), kolom distilasi (D-421), Reboiler (E-425), Kondenser (E-422), Reflux (F-423), dehidrator bioetanol (D-428), kondensator Bioetanol (E-429), tangki penampung bioetanol (F-430).

beroperasi pada suhu sekitar 196°C, proses berlangsung selama 9 menit. Pada proses ini sebagian besar lignin akan dihilangkan dari struktur lignoselulosa dan sebagian besar hemiselulosa akan keluar sebagai monosakarida dan oligosakarida untuk siap diambil pada unit berikutnya. TKKS dari reaktor steam explosion akan terdekompresi dan menuju Tangki Flash (F-116), bertujuan untuk pemisahan steam dan pretreated TKKS (slurry), disini terjadi penurunan tekanan steam sehingga terjadi penurunan suhu.

B. Tahap Fraksinasi

Tahap Fraksinasi terbagi menjadi ekstraksi air dan ekstraksi alkali yang masing-masing bertujuan untuk memisahkan lignoselulosa dari TKKS yang telah melalui proses pretreatment sebelumnya. Pada tahap fraksinasi, TKKS yang sudah hancur akibat pretreatment steam explosion akan melalui dua tahap fraksinasi. Slurry dari Tangki Flash masuk ke centrifuge 1 (C-210) beroperasi dengan pencucian menggunakan air hangat pada suhu 70°C perbandingann 3 : 1 dari berat biomassa yang masuk. Proses beroperasi di atas suhu kamar dan di bawah 100°C guna mengefektifkan pelarutan serta mencegah reaksi berkelanjutan dari degradasi hemiselulosa menjadi produk samping yang tidak diinginkan. Setelah proses di dalam centrifuge 1 maka keluaran dapat terpisah menjadi 2 aliran, yaitu aliran liquid yang mengandung sebagian besar hemiselulosa dan air, serta aliran yang mengandung sebagian besar selulosa dan lignin. Aliran yang mengandung sebagian besar selulosa dan lignin melewati screw conveyor (SC-212) menuju reaktor delignifikasi (R-220) untuk melarutkan lignin dari proses pretreatment. Unit proses fraksinasi tertera pada Gambar 3.

Cellulignin masuk pada reaktor delignifikasi (R-220) bersamaan dengan penambahan NaOH 0,5 g/g weight. Larutan NaOH dapat menyerang dan merusak struktur lignin pada bagian kristalin dan amorf serta memisahkan sebagian hemiselulosa sehingga menyisakan sebagian besar selulosa pada substrat. Ion OH⁻ dari NaOH akan memutuskan ikatan-



Gambar 6. Diagram Sensitivitas terhadap IRR

ikatan dari struktur dasar lignin sedangkan ion Na⁺ akan berikatan dengan lignin membentuk natrium fenolat. Garam fenolat ini bersifat mudah larut. Lignin yang terlarut ditandai dengan warna hitam pada larutan yang disebut lindi hitam (black liquor) [7]. Reaksi yang terjadi pada proses ini sebagai berikut:



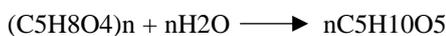
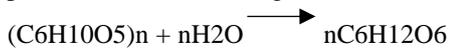
Setelah proses delignifikasi, slurry TKKS dialirkan menuju Centrifuge 2 (C-225) menggunakan Centrifugal Pump (P-223) untuk dilakukan pemisahan dalam Centrifuge 2 (C-225) yang nantinya akan disertai pencucian menggunakan air hangat pada suhu 70°C untuk membantu menghilangkan pengotor yang kemungkinan masih menempel sebelum masuk ke proses fermentasi. Pada proses ini slurry akan terpisah menjadi dua aliran yang berbeda, yaitu aliran liquid yang kaya akan lignin (black liquor) dan aliran kedua yang terdiri dari sejumlah besar selulosa dan sedikit sisa lignin, aliran ini akan dilanjutkan ke proses fermentasi.

C. Tahap Hidrolisa Asam dan Fermentasi

TKKS yang telah melalui tahap pretreatment kemudian akan menuju tahap hidrolisis dan fermentasi yang akan dilakukan secara simultan dalam satu reaktor. Proses Hidrolisis terjadi lebih dahulu dengan adanya penambahan H₂SO₄ untuk menciptakan suasana asam. Fermentasi sendiri merupakan proses konversi glukosa dan xylosa menjadi bioetanol dengan bantuan mikroorganisme [5]. Proses fermentasi dilakukan dalam kondisi anaerob dalam tangki fermentasi yang dilengkapi pengaduk dan coil pendingin untuk menjaga suhu tangki fermentasi agar konstan yaitu pada 37°C karena reaksi dalam tangki fermentasi bersifat eksotermis atau mengeluarkan panas. Unit proses hidrolisis dan fermentasi tertera Gambar 4.

Aliran selulosa hasil pemisahan dialirkan ke dua tangki berbeda. 5% menuju tangki starter (M-310) dan 95% menuju tangki fermentasi (R-312). Proses pada tangki starter ini sebagai tahap perkembangan Z. mobilis sebagai starter pada proses fermentasi. Proses ini berlangsung secara semi kontinyu pada suhu 37°C selama 14 jam. Pada tangki starter juga ditambahkan nutrient berupa Diamonium Phospat [NH₄(H₂PO₄)] dan corn steep liquor (CSL). Penambahan nutrient dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan unsur nitrogen dan fosfat dari Z. mobilis. Selanjutnya inokulum bakteri Zymomonas mobilis yan terbentuk dari tangki starter

dimasukkan ke dalam Fermentor (R-312) ditambahkan H_2SO_4 untuk menciptakan suasana asam agar pH menjadi 4,8 sebagai pH optimum dalam proses fermentasi. Pada tahap ini terjadi dua proses yang berjalan bersamaan yaitu proses hidrolisis selulosa dan hemiselulosa menjadi gula dan proses fermentasi glukosa dan pentose menjadi bioetanol dalam satu reaktor. Pertama, *feed* yang masuk akan di hidrolisis oleh enzim selulose yang berfungsi untuk memecah ikatan selulosa menjadi monomer glukosa. Reaksi yang terjadi pada proses hidrolisis ini sebagai berikut:

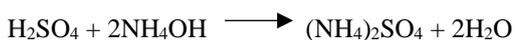


Selanjutnya proses fermentasi yang berjalan juga, akan mengubah glukosa yang terbentuk menjadi etanol dengan bantuan *Zymomonas mobilis*. Reaksi fermentasi yang terjadi adalah [11]:



Output proses fermentasi berupa bioetanol konsentrasi 7%. Bioetanol tersebut yang masih bercampur dengan *yeast mud* dan masih terdapat H_2SO_4 yang bersifat asam yang nantinya akan dibawa menuju proses normalisasi pH. Output lain dari proses ini adalah gas CO_2 yang dikeluarkan dari atas tangki fermentasi untuk dibuang ke lingkungan.

Aliran output dari Tangki Fermentasi dipompa dengan *Centrifugal Pump* (P-313) menuju Tangki Netralisasi (F-315) untuk menormalisasi pH dengan ditambahkan senyawa NH_4OH . Reaksi yang terjadi pada proses netralisasi ini sebagai berikut:



Setelah proses netralisasi pH kemudian dialirkan menuju *Rotary Vacuum Filter* (A-316) untuk memisahkan padatan-padatan (*yeast*) yang terbawa bersama bioetanol untuk memisahkan antara liquid dan padatan. Filtrat dipompa dengan *filtrat pump* (P-318) menuju *pre-heater beer coloumn* (E-410) hingga bersuhu $82,12^\circ C$ untuk dipanaskan sebelum memasuki *beer coloumn* (B-411).

D. Tahap Separasi

Untuk dapat menghasilkan etanol yang murni maka perlu dilakukannya pemurnian. Melalui proses distilasi, diharapkan air pada larutan etanol dapat dipisahkan sehingga bioetanol murni dengan kemurnian tinggi bisa didapatkan. Unit proses separasi tertera pada Gambar 5.

Filtrat yang telah disterilisasi masuk ke *beer coloum* (B-411) bertujuan untuk menguapkan etanol sehingga terjadi pemisahan glukosa dari etanol dan air untuk pemurnian yang lebih lanjut. Keluaran dari *beer coloumn* (B-411) ini menghasilkan kadar etanol sebesar 45%. Untuk selanjutnya di lakukan pemisahan etanol dan H_2O kolom distilasi (D-421). Kemurnian etanol yang dihasilkan melalui proses distilasi ini adalah 94,7% massa mengingat campuran etanol-air akan mencapai azeotrop pada titik kemurnian etanol 95,6% massa, tetapi etanol yang digunakan sebagai *biofuel* harus memiliki kemurnian hingga 99,5% volume sesuai dengan SNI 7390-2008. Sehingga diperlukan proses

peningkatan kemurnian etanol lebih lanjut melalui proses dehidrasi menggunakan *molecular sieves*.

Pada proses pemurnian yang kedua ini adalah proses pemurnian secara penuh. Campuran etanol-air yang keluar dari kolom distilasi dengan komposisi 95% menuju ke dehidrator bioetanol (D-428). Proses di *Molecular sieves* akan berlangsung pada suhu $86^\circ C$ dan tekanan atmosferik. Unit *Molecular sieve* beroperasi selama 8 jam, sehingga setelah 8 jam lebih maka unit *Molecular sieve* ini mengalami keadaan jenuh dengan air sehingga perlu diregenerasi. *Molecular sieves* yang telah mengandung banyak air akan diregenerasi untuk dipisahkan kandungan airnya menggunakan udara kering sehingga *Molecular sieves* dapat digunakan lagi untuk proses adsorpsi. Regenerasi dari Unit *Molecular sieve* ini menggunakan udara kering (*dry air*) di dalam kolom adsorber yang lain. Proses regenerasi dilakukan dengan menutup aliran ke kolom yang sudah jenuh dan mengalihkan aliran tersebut ke kolom *standby*. Untuk selanjutnya kolom yang sudah jenuh dibuka katupnya agar tekanannya turun menuju tekanan atmosfer sehingga gas pengotor yaitu H_2O yang tertangkap dapat terlepas kembali [8].

Proses ini dapat menghilangkan air hingga kadar etanol menjadi 99,5% dan dihasilkan etanol absolute (murni). Etanol 99,5 % ini sebelum masuk ke tangki penyimpanan, didinginkan dengan kondensor Bioetanol (E-429) untuk mengubah fase dari etanol uap menjadi etanol *liquid* dengan suhu sekitar $32^\circ C$. Selanjutnya etanol ditampung pada tangki penampung bioetanol (F-430) pada suhu ruang.

IV. NERACA MASSA DAN ENERGI

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan neraca massa dan energi pada pabrik bioetanol ini dibutuhkan bahan baku yaitu sebanyak 143 ton TKKS/tahun atau : 418,9 L etanol/ton TKKS atau 60.000 kL/tahun untuk dapat menghasilkan produk bioetanol sebanyak 16.614.108,61 kg/tahun.

V. ANALISA EKONOMI

A. Net Present Value (NPV)

Net present value merupakan selisih antara nilai arus kas masuk dan nilai arus kas keluar pada sebuah periode waktu. NPV digunakan pada saat menghitung midal untuk menganalisis potensi keuntungan dari sebuah proyek maupun investasi yang akan dilakukan. Nilai NPV yang positif menyatakan bahwa proyeksi pendapatan pabrik kede pannya akan meraup keuntungan, sebaliknya apabila nilai NPV negative menandakan kerugian. Didapatkan nilai *Net Present Value* (NPV) sebesar Rp 249.539.009.136.

B. Analisa Laju Pengembalian Modal (Internal Rate of Return/IRR)

Internal rate of return berdasarkan metode discounted cash flow adalah suatu tingkat bunga tertentu dimana seluruh penerimaan akan tepat menutup seluruh jumlah pengeluaran modal. Dari hasil perhitungan yang dilakukan didapatkan harga $i = 25,77\%$. Harga i yang diperoleh lebih besar dari harga I untuk bunga pinjaman yaitu 8,25% pertahun. Dengan harga $I = 25,77\%$ yang didapat dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa pabrik ini layak didirikan dengan

kondisi tingkat bunga pinjaman 8,25% per tahun.

C. Analisa Waktu Pengembalian Modal (Pay Out Time/POT)

Minimum *pay out time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal suatu pabrik yang dapat dihitung dari modal dibagi laba dan depresiasi. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa waktu pengembalian modal minimum adalah 3,82 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik ini layak didirikan karena POT yang didapatkan lebih kecil dari perkiraan usia pabrik yaitu 25 tahun.

D. Sensitivitas Terhadap IRR

Sensitivitas terhadap IRR digunakan untuk analisa terhadap perubahan-perubahan yang terjadi. Analisa yang dilakukan adalah analisa perubahan harga tandan kosong kelapa sawit, perubahan harga etanol, dan perubahan nilai TCI yang akan mempengaruhi nilai IRR seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Melalui hasil analisa sensitivitas terhadap IRR dapat diketahui bahwa faktor yang paling berpengaruh pada perubahan nilai IRR adalah harga jual produk TKKS. Dari semua perhitungan analisa ekonomi yang telah dilakukan, berikut merupakan ringkasan hasil perhitungan analisa ekonomi pabrik bioetanol dari TKKS.

E. Break Even Point (BEP)

Analisa titik impas digunakan untuk mengetahui besarnya kapasitas produksi yang harus ditetapkan ketika biaya produksi total tepat sama dengan hasil penjualan. Biaya tetap (FC), biaya variable (VC) dan biaya semi variable (SVC) tidak dipengaruhi oleh kapasitas produksi. Dari perhitungan yang telah dilakukan pada Appendix C, maka didapatkan nilai BEP adalah 34,95%.

VIII. KESIMPULAN

A. Kesimpulan secara proses

Produksi bioetanol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) tersebut menggunakan cara Fraksinasi menggunakan Steam Explosion. Steam explosion tersebut dialiri dengan saturated steam bertekanan 14 bar sehingga reaktor beroperasi pada suhu sekitar 195°C selama 6 menit. Selanjutnya diproses untuk pemisahan lignin dengan proses delignifikasi NaOH. Hasil Selulosa masuk ke proses

pembuatan etanol dengan metode SScF. Bahan baku yang digunakan merupakan limbah dari pabrik CPO dan bukaan lahan perkebunan kelapa sawit yang semakin meningkat setiap tahunnya. Selain itu, mendukung upaya pemerintah dalam mengurangi penggunaan bahan bakar minyak tidak terbarukan.

B. Kesimpulan secara Ekonomi

Kesimpulan yang didapat secara ekonomi yaitu perencanaan operasi adalah 24 jam/hari selama 330 hari. Kapasitas pabrik sebesar 18085 kg/jam. Hasil produksi Bioetanol sebesar 16.614.108,61 kg/tahun. Lokasi pendirian pabrik di Dumai, Riau. Umur pabrik 25 tahun. Masa konstruksi 2 tahun. Untuk analisa ekonomi yaitu permodalan: CAPEX sebesar Rp 475.866.266.788 dan OPEX sebesar Rp 1.226.908.776.152. Penerimaan hasil penjualan/tahun Rp 1.472.063.400.000. Rentabilitas: Bunga bank 8,25% pertahun. Laju inflasi 2,55% pertahun. IRR 25,77%. Pay out time 3,82 tahun. Break Event Point 34,95%..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Sitompul and D. R. Putra, "Pengaruh waktu dan konsentrasi enzim selulase pada proses hidrolisis tandan kosong kelapa sawit menjadi glukosa," *Anal. Anal. Environ. Chem.*, vol. 1, no. 1, 2016.
- [2] W. Wusnah, S. Bahri, and D. Hartono, "Proses pembuatan bioetanol dari kulit pisang kepok (*musa acuminata* b.c) secara fermentasi," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 8, no. 1, pp. 48–56, 2020.
- [3] Y. Sudiyani, D. Styarini, E. Triwahyuni, K. C. Sembiring, and Y. Aristiawan, "Utilization of biomass waste empty fruit bunch fiber of palm oil for bioethanol production using pilot-scale unit," *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 31–38, 2013.
- [4] A. A. Kamoldeen, C. K. Lee, W. N. W. Abdullah, and C. P. Leh, "Enhanced ethanol production from mild alkali-treated oil-palm empty fruit bunches via co-fermentation of glucose and xylose," *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 113–123, 2017.
- [5] S. Sriyono, A. M. Hilda, and M. Kamayani, "Pemodelan dan Simulasi Proses Adsorpsi Gas Pengotor oleh Molecular Sieve pada Pendingin Rde dengan Software Chemcad," in *Prosiding Seminar Nasional Teknoka*, 2018. Jakarta: UHAMKA.
- [6] Y. Sudiyani, S. Aiman, and D. Mansur, *Perkembangan Bioetanol G2: Teknologi dan Perspektif*. LIPI Press, 2009. ISBN: 9786024960711.
- [7] T. W. Jeffries, "Ethanol fermentation on the move," *Nat. Biotechnol.*, vol. 23, no. 1, pp. 40–41, 2005.
- [8] C. Sindhuwati, A. Mustain, Y. O. Rosly, and A. S. Aprijaya, "Potensi tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan bioetanol dengan metode fed batch pada proses hidrolisis," *J. Tek. Kim. dan Lingkungan*, vol. 5, no. 2, pp. 128–144, 2021.