

Pra-Desain Pabrik Bioetanol dari Ampas Tebu (*Bagasse*) dengan Teknologi *Simultaneous Saccharification* dan *Co-Fermentation* untuk Kapasitas 30.000 KL/Tahun

Fachrizan Bilal Masrur, Mauludandru Heradiprakoso, Kuswandi, dan Rizky Tetrisyanda
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: kuswandi@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Salah satu komoditas perkebunan utama di Indonesia adalah tebu yang digunakan untuk produksi gula. Dari setiap pengolahan akan menghasilkan limbah yang salah satunya adalah ampas tebu yang menyusun sebesar 35% dari bagian tebu. Dari hasil riset yang dilakukan, limbah ampas tebu di Indonesia masih kurang optimal pemanfaatannya disamping banyaknya potensi untuk pemanfaatan. Ampas tebu tersusun atas lignoselulosa yang berpotensi untuk diolah lebih lanjut menjadi bioetanol. Pabrik bioetanol dari ampas tebu ini terdiri atas tiga proses utama: *pre-treatment*, fermentasi, serta purifikasi. Dari proses tersebut dibutuhkan 112.840 ton/tahun untuk dapat menghasilkan bioetanol *fuelgrade* sebesar 30.000 kL/tahun yang diproyeksikan dapat memenuhi 27% kebutuhan etanol di Indonesia pada tahun 2027. Dengan kebutuhan tersebut, lokasi yang optimal dalam pembangunan pabrik ini adalah daerah Jawa Timur, lebih tepatnya pada Kecamatan Kras, Kabupaten Kediri. Pabrik ini dirancang dengan basis pembangunan pada tahun 2025 serta beroperasi pada tahun 2027 dengan satu tahun operasi adalah 330 hari. Dari hasil analisa ekonomi yang dilakukan pada pendirian pabrik ini diketahui nilai CAPEX (*Capital Expenditure*) sebesar Rp383.260.056.805, nilai OPEX (*Operational Expenditure*) sebesar Rp261.993.319.888, IRR (*Internal Rate of Return*) sebesar 24,11%/tahun, serta POT (*Pay Out Time*) pada tahun ke 5 pabrik beroperasi.

Kata Kunci—Ampas Tebu, Bioetanol, SSCF.

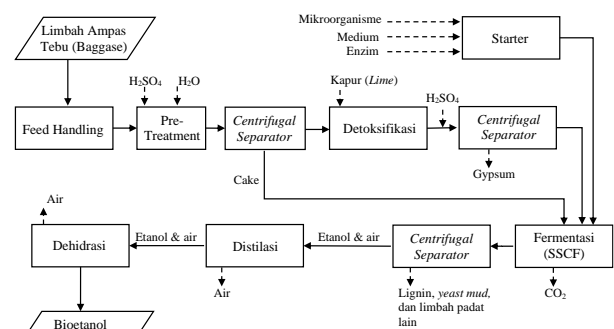
I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN Outlook Energi Indonesia pada tahun 2019, hasil proyeksi permintaan kebutuhan energi akan terus meningkat. Dengan peningkatan tersebut, tentunya agar dapat terus bertahan di masa depan, basis energi yang digunakan harus berkelanjutan & dapat diperbarui. Pemerintah Indonesia sendiri pun juga telah berkomitmen untuk menjadi negara yang berkelanjutan, salah satu komitmen tersebut tertuang dalam kebijakan Pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) pada Perpres No.5 Tahun 2006 tentang pengembangan BBN (Bahan Bakar Nabati). EBT yang difokuskan adalah bioenergi yang termasuk salah satunya adalah Bioetanol. Dalam implementasinya, pemerintah Indonesia berupaya untuk mencampurkan bahan bakar fosil dengan etanol melalui teknologi *blending*. Berdasarkan Permen ESDM (Energi dan Sumber Daya Manusia) No.12 tahun 2015, ditargetkan pada tahun 2025 terlaksana *blending* 80% *gasoline* dengan 20% *etanol*.

Kelebihan bioetanol sebagai bahan bakar dibandingkan bahan bakar minyak (BBM) adalah aman digunakan sebagai bahan bakar, titik nyala etanol tiga kali lebih tinggi

Tabel 1.
Kualitas Etanol Berdasarkan SNI 7390-2008

Parameter	Unit, Min/Max	Spesifikasi
Kadar Etanol	%-v, min	99,5
Kadar Metanol	mg/L, max	300
Kadar Air	%-v, max	1
Kadar Denaturan	%-v, min	2
Kadar Cu	%-v, max	5
Kadar Cu	mg/kg, max	0,1
Keasaman (CH ₃ COOH)	mg/L, max	30
Tampakan		Jernih dan tidak ada endapan
Kadar Ion Klorida (Cl ⁻)	mg/L, max	40
Kandungan Belerang (S)	mg/L, max	50
Kadar Getah (gum)	mg/100 mL, max	5,0
pH	6,5-9	



Gambar 1. Diagram proses (balok) proses produksi bioetanol.

dibandingkan bensin. Emisi hidrokarbon lebih sedikit dikarenakan bioetanol memiliki bilangan oktan yang lebih tinggi (106-110) daripada bensin (91-96) sehingga dapat digunakan sebagai campuran bensin untuk meningkatkan performa bensin (Tabel 1). Kedua, efisiensi pembakaran akan meningkat dengan penggunaan bioetanol serta mengurangi emisi polutan berupa oksida nitrogen dan sulfur karena memiliki kadar oksigen yang lebih tinggi (34%) dan kadar sulfur yang jauh lebih rendah (0%) dibandingkan bensin [1].

Bahan baku yang digunakan untuk memproduksi bioetanol dapat diklasifikasikan menjadi 4 generasi. Bioetanol generasi pertama (G1) memanfaatkan bahan baku dengan kandungan gula yang mudah untuk didapatkan yang umumnya merupakan bahan pangan, Kemudian generasi kedua (G2) yang memiliki kandungan lignoselulosa dan umumnya diperoleh dari *side-product* atau limbah dari agrikultur / limbah dari G1. Pada generasi bahan baku ketiga (G3) menggunakan mikroorganisme akuatik lebih tepatnya adalah alga. Serta pada generasi bahan baku keempat (G4) adalah

Tabel 21.
Data Aktivitas Pasar Etanol di Indonesia dari Tahun 2012–2022

Tahun	Produksi (L)	Konsumsi (L)	Ekspor (L)	Impor (L)
2012	205.000.000	135.000.000	59.000.000	0
2013	207.000.000	135.000.000	86.000.000	0
2014	202.000.000	135.000.000	94.000.000	2.000.000
2015	205.000.000	136.000.000	67.000.000	0
2016	205.000.000	137.000.000	71.000.000	2.000.000
2017	195.000.000	137.000.000	64.000.000	5.000.000
2018	200.000.000	138.000.000	158.000.000	96.000.000
2019	200.000.000	139.000.000	70.000.000	1.000.000
2020	193.000.000	175.000.000	47.000.000	29.000.000
2021	200.000.000	167.000.000	82.000.000	54.000.000
2022	205.000.000	168.000.000	85.000.000	45.000.000

Tabel 32.
Provinsi Penghasil Gula Terbesar di Indonesia.

Provinsi	Produksi (Ton)			
	2017	2018	2019	2020
Jawa Timur	1,023,514	1,065,965	1,052,026	1,003,162
Lampung	632,321	642,630	742,123	729,021
Jawa Tengah	173,857	201,037	182,733	127,018
Sumatera Selatan	89,010	101,135	90,422	91,806

biomassa yang telah mengalami modifikasi genetik. Dari 4 generasi tersebut, generasi yang paling optimal untuk saat ini dari analisa ekonomi serta teknis adalah generasi kedua (G2) [2].

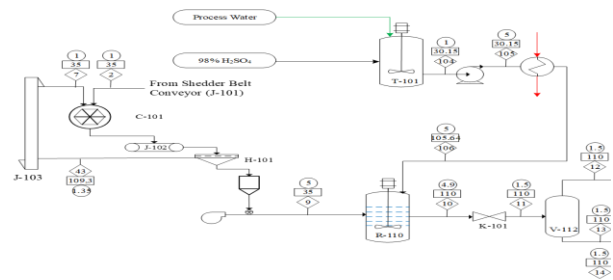
Salah satu biomassa yang memiliki kandungan lignoselulosa untuk dijadikan pengganti bahan bakar adalah *bagasse*. Umumnya, *bagasse* diperoleh dari pengolahan tebu dan tergolong melimpah di Indonesia. Namun berdasarkan data yang tersedia, *bagasse* umumnya digunakan hanya untuk bahan baku boiler sehingga harapannya perancangan pabrik “Pra – Desain Pabrik Bioetanol Dari Ampas Tebu (*Bagasse*) Dengan Teknologi Simultaneous *Saccharification & Co-Fermentation* Untuk Kapasitas 30.000 KL/tahun” mampu memaksimalkan potensi dari limbah ampas tebu.

II. URAIAN PROSES PRODUKSI

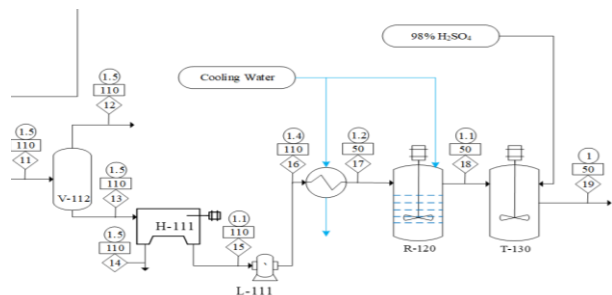
Dalam merancang proses produksi bioetanol berbahan dasar *bagasse*, terdapat beberapa langkah proses produksi yang dilakukan agar menghasilkan hasil produksi bioetanol yang optimal. Langkah proses produksi bioetanol terdiri atas 3 langkah yakni *pre-treatment*, fermentasi, dan purifikasi (Gambar 2 dan Gambar 3).

A. Proses Pre-treatment

Tahap terpenting dalam proses produksi bioetanol adalah proses *pre-treatment* karena menentukan kuantitas dan kualitas bioetanol yang dihasilkan nantinya. Biomassa lignoselulosa tersusun dari matriks selulosa dan lignin yang diikat oleh hemiselulosa rantai yang terdiri dari tiga konstituen utama yaitu hemiselulosa, lignin, dan selulosa. Di dalam proses *pre-treatment* bertujuan untuk mendegradasi lignin agar terpisah dari hemiselulosa dan selulosa sehingga nantinya hemiselulosa dan selulosa dapat terekspos oleh mikroorganisme saat proses fermentasi. Terdapat 3 teknologi yang umum dilakukan dalam tahap *pre-treatment* yaitu : *pre-treatment* asam yang menggunakan asam kuat encer, *pre-treatment* basa yang menggunakan basa, serta *pre-treatment* organosolv yang menggunakan pelarut organik [3-4]. Dilakukan seleksi proses *pre-treatment* dengan parameter



Gambar 22. Diagram proses *pre-treatment* pada pabrik bioetanol.



Gambar 33. Diagram proses *pre-treatment* pada pabrik bioetanol (lanjutan).

utama yang digunakan sebagai pembanding adalah suhu, waktu, konversi selulosa, hemiselulosa, serta lignin. Menggunakan aplikasi “*Expert Choice*” didapatkan bahwa *pre-treatment* asam merupakan proses yang paling optimal.

B. Proses Fermentasi

Pada tahap fermentasi, dilakukan seleksi berupa teknologi proses fermentasi yang digunakan. Dilakukan perbandingan antara 3 teknologi : *separate hydrolysis fermentation* (SHF), *simultaneous saccharification & fermentation* (SSF), dan *simultaneous saccharification & co-fermentation* (SSCF) (Gambar 4). Pada SHF, proses sakarifikasi (hidrolisis) dilakukan terpisah dengan proses fermentasi sehingga dibutuhkan minimal dua wadah yang berbeda. Kemudian pada SSF proses hidrolisis dan fermentasi dilakukan pada wadah yang sama namun tanpa adanya fermentasi terhadap pentosa (gula C₅). Serta SSCF yang melakukan hidrolisis dan fermentasi baik gula pentosa (C₅) ataupun glukosa (gula C₆) pada wadah yang sama. Kemudian dilakukan pemilihan dengan basis pertimbangan terhadap parameter suhu, waktu, biaya, dan konversi etanol. Dari hasil perbandingan yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa teknologi SSCF pada pabrik ini yang paling optimal [5].

C. Proses Purifikasi

Pada proses produksi bioetanol, terdapat kondisi azeotrop antara campuran etanol dan air. Kondisi tersebut terjadi pada saat fraksi massa etanol 95% [6] (Gambar 5). Dengan adanya hal tersebut maka distilasi bertingkat secara umum, tidak dapat melakukan pemurnian lanjutan. Sehingga, pada tahap purifikasi ini dimaksudkan untuk melakukan seleksi proses antara teknologi distilasi azeotropik dengan proses distilasi bertingkat kemudian dilanjutkan dengan adsorpsi. Berdasarkan hasil perbandingan yang telah dilakukan, proses adsorpsi dinilai lebih optimal dari segi teknis serta ekonomi.

D. Uraian Proses

Dari bahan baku *bagasse* yang didapatkan, hal pertama

Tabel 43.
Reaksi yang Terjadi pada Pre-Treatment

Reaksi	Reaktan	Konversi (%)
$(Glucan)_n + H_2O \rightarrow n Glucose$	Glucan	5,95
$(Xylan)_n + H_2O \rightarrow n Xylose$	Xylan	80
$Acetate \rightarrow Acetic acid$	Acetate	100
$(Lignin)_n \rightarrow n Soluble lignin$	Lignin	5

Tabel 54.
Reaksi Hidrolisis/Sakarifikasi

Reaksi	Reaktan	% Konversi
$(Glucan)_n + nH_2O \rightarrow nGlucose$	Glucan	63,52
$(Xylan)_n + nH_2O \rightarrow nXylose$	Xylan	63,52

Tabel 65.
Reaksi fermentasi pada tangga SSCF

Reaksi	Reaktan	% Konversi
$Glucose \rightarrow 2Ethanol + 2CO_2$	Glucose	100
$3 Xylose \rightarrow 5 Ethanol + 5CO_2$	Xylose	70

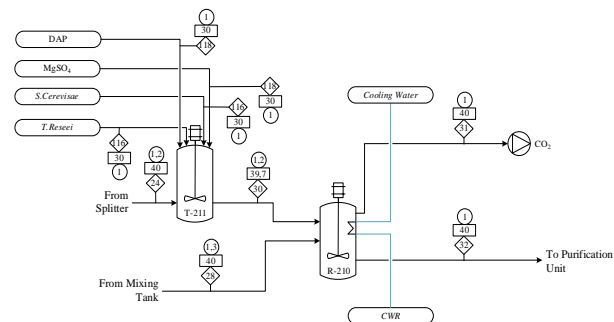
Tabel 76.
Analisa Neraca Massa Pabrik Bioetanol Berbahan Dasar Ampas Tebu

Komponen	kg/jam	kg/jam
	Masuk	Keluar
Glucan (selulosa)	6493,97	2697,88
Xylan (Hemiselulosa)	3204,24	428,15
Lignin	3859,62	3858,80
Zat ekstraktif	434,55	0,00
Abu	255,03	255,01
Air	78057,99	75676,69
Acetic Acid		70,12
Xylosa		818,72
Glukosa		0,00
H ₂ SO ₄	359,11	0,09
CaOH ₂	496,03	0,00
Calcium Acetate		478,50
Gypsum (Hidrat)		628,24
Medium	1,03	2185,71
Yeast culture	7,82	37,86
Enzim	83,55	120,63
CO ₂		2964,46
Etanol		3099,21
Pertumbuhan Enzim	67,11	
Total	93320,06	93320,06

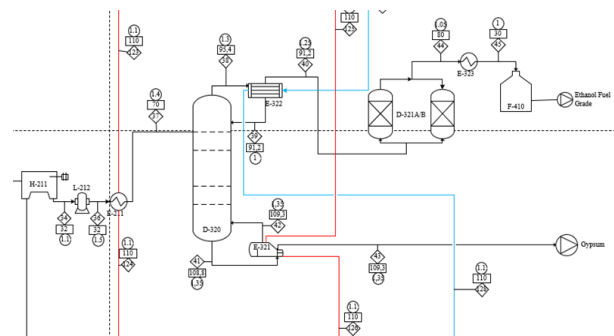
yang dilakukan adalah melakukan *feed handling* yaitu proses yang bertujuan untuk mereduksi ukuran dari *bagasse* hingga menjadi ≤ 20 mm. Kemudian *bagasse* dialirkan menuju tangki *pre-treatment* untuk dilakukan proses hidrolisis akibat adanya penambahan asam kuat (H₂SO₄) yang diencerkan. Pada proses ini akan terbentuk cairan *liquor* (hemiselulosa yang terhidrolisa dan lignin yang larut) serta *bagasse* yang masih berbentuk padatan. Hasil *pre-treatment* kemudian dipisahkan menggunakan separator sentrifugal untuk memisahkan fraksi berat (padatan) serta fraksi ringan (cair). Untuk fraksi ringan kemudian dialirkan menuju proses detoksifikasi dengan menambahkan kapur (Ca(OH)₂). Proses detoksifikasi bertujuan untuk menghilangkan kandungan asam asetat yang terdapat pada *bagasse*. Hal ini disebabkan karena kandungan asam asetat dapat merusak proses fermentasi yang terjadi nantinya. Dari proses detoksifikasi, akan terbentuk garam (gypsum dan kalsium asetat) yang dipisahkan dengan menggunakan separator sentrifugal. Kemudian hasil padatan yang terpisah pada separasi pertama dicampurkan dengan hasil cairan yang terpisah pada proses detoksifikasi untuk dilakukan proses fermentasi. Selanjutnya

Tabel 87.
Kebutuhan Saturated Steam Tipe Low Pressure pada 120°C

Nama Alat	Kode Alat	Massa (kg/jam)
Sulfuric Acid Heater	E-101	3050,72
Pre-Treatment Tank	R-110	1541,56
Overliming Tank	R-120	342,01
Heater to Distillation	E-211	843,07
Partial Reboiler	E-321	8588,61
Total		14365,97



Gambar 44. Diagram proses fermentasi.



Gambar 55. Diagram proses pada purifikasi.

hasil fermentasi akan dipurifikasi melalui 3 tahapan : sentrifugasi, distilasi, dan dehidrasi yang nantinya akan terbentuk produk bioetanol *fuelgrade*. Uraian proses dari pabrik ini digambarkan sesuai pada Gambar 1.

III. DATA DASAR PERANCANGAN

A. Ketersediaan Bahan Baku di Indonesia

Statistik yang dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa produksi gula di Indonesia memiliki pola fluktuatif sejak tahun 2017. Berdasarkan data pada tahun 2021, produksi gula di Indonesia mencapai 1033 ton gula. Hal ini kemudian dapat dikonversi menjadi jumlah *bagasse* yang terproduksi yakni sebesar 7231 ton. Namun dari seluruh *bagasse* yang dihasilkan hanya 20% maksimal yang dapat digunakan karena 80% lainnya telah digunakan untuk utilitas pabrik gula itu sendiri. Sehingga potensi bahan baku *bagasse* yang dapat dimanfaatkan sebesar 1446,2 ton.

Jumlah tersebut merupakan hasil kalkulasi dari seluruh pabrik gula yang beroperasi di Indonesia. Dari seluruh provinsi penghasil gula di Indonesia, 2 provinsi yang menghasilkan gula terbesar adalah Lampung dan Jawa Timur dengan masing masing sebesar 729.021 ton dan 1.003.162 ton. Sehingga data ini dapat disimpulkan bahwa ketersediaan bahan baku *bagasse* cukup melimpah jumlahnya seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.

B. Penentuan Kapasitas Produksi

Kapasitas produksi pabrik harus memperhatikan aspek

Tabel 98.
Kebutuhan Air Pendingin

Nama Alat	Kode Alat	Massa (kg/jam)
<i>Slurry Cooler</i>	E-111	2068,41
<i>Mixing Tank Cooler</i>	E-133	336,94
Fermentation Tank SSCF	R-210	198,87
<i>Partial Condensor</i>	E-322	26392,46
<i>Bioetanol Condensor</i>	E-323	1343,00
Total		30339,68

Tabel 109.
Analisis Ekonomi

Analisis Ekonomi	Unit	Junlah
<i>CAPEX</i>	Rupiah	383.260.056.805
<i>OPEX</i>	Rupiah	261.993.319.888
<i>Net Present Value</i>	Rupiah	341.199.159.144
<i>Internal Rate of Return</i>	%	18,83
<i>Payout Time</i>	Tahun	5
<i>Break Even Point</i>	%produksi	39,73

kebutuhan produk nasional, yakni data impor, ekspor, produksi, dan konsumsi, serta juga kompetitor pabrik. Analisis penentuan kapasitas pabrik sangat dibutuhkan agar penggunaan alat, neraca massa, neraca energi, dan hal lain yang berkaitan dapat ditentukan. Penentuan kapasitas pabrik didasarkan pada data yang dipublikasikan oleh Indonesia Biofuels Annual Report pada tahun 2022 seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Dari hasil perhitungan, didapatkan proyeksi kebutuhan etanol di Indonesia pada tahun 2027 adalah 111.167.335 L. Sehingga dengan produksi 30.000.000 L akan memenuhi kebutuhan nasional sebesar $\pm 27\%$.

C. Pemilihan Lokasi Pendirian Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik merupakan hal yang cukup penting yang perlu dipertimbangkan pada perancangan sebuah pabrik.

Hal tersebut dikarenakan penentuan lokasi akan mempengaruhi risiko serta keuntungan dari perusahaan. Lokasi pabrik juga akan mempengaruhi distribusi bahan baku maupun hasil produksi dari pabrik sehingga akan mempengaruhi perhitungan transportasi dari kedua hal tersebut yang kemudian akan mempengaruhi biaya produksi dan harga jual dari produk.

Alasan lain yang menyebabkan penentuan lokasi pabrik cukup krusial yaitu lokasi yang terpilih harus dapat memberikan kemungkinan perluasan atau perbesaran pabrik dan memberikan kesejahteraan bagi perusahaan maupun warga sekitar dalam jangka panjang. Konsiderasi yang digunakan dalam basis pemilihan lokasi pendirian pabrik adalah sebagai berikut :

1. Sumber tenaga kerja
2. Utilitas
3. Harga tanah dan gedung
4. Kondisi geografis wilayah
5. Kemungkinan perluasan wilayah
6. Hukum dan peraturan
7. Ketersediaan bahan baku
8. Aksesibilitas dan fasilitas transportasi.

Adapun rencana pendirian pabrik bioetanol berbahan dasar ampas tebu ini memiliki 2 opsi lokasi, Jawa Timur serta Lampung. Hal ini disebabkan 2 provinsi tersebut merupakan 2 provinsi penghasil gula terbesar di Indonesia, sehingga dapat dipastikan terkait ketersediaan bahan bakunya (poin No. 7).

Berdasarkan parameter yang ditentukan, hasil seleksi yang dilakukan menggunakan aplikasi *Expert Choice* memberikan nilai yang lebih tinggi untuk provinsi Jawa Timur. Sehingga berdasarkan hal tersebut provinsi Jawa Timur ditetapkan dalam lokasi pembangunan pabrik bioetanol dari ampas tebu ini. Lebih tepatnya pada Kecamatan Kras, Kabupaten Kediri.

IV. URAIAN PROSES TERPILIH

Proses produksi bioetanol berbahan dasar *bagasse* terdiri atas tiga unit proses utama. Unit pertama adalah unit *pre-treatment* yang berfungsi untuk mereduksi ukuran bahan baku dan mendegradasi lignin agar terpisah dari lignoselulosa. Kemudian unit fermentasi yang bertujuan untuk melakukan fermentasi pada gula untuk menjadi etanol. Serta unit purifikasi untuk memisahkan bioetanol dari zat pengotor agar diperoleh produk bioetanol *fuel grade* sesuai dengan SNI.

A. Pre-Treatment (Area 1)

Pertama, Bahan baku *bagasse* dibawa dengan truk menuju pabrik pembuatan bioetanol. Kondisi ukuran dari *bagasse* memiliki dimensi panjangnya 200 – 300 cm lebarnya 1,5 – 3 cm dengan massa jenis 1,3 kg/L disimpan di dalam *feed storage* (F-100) [7]. Selanjutnya, *bagasse* akan dicuci di *washed belt conveyor* (J-101) untuk menghilangkan zat pengotor, kemudian dialirkan ke *disc attrition mill* (C-101). *Disk attrition mill* berfungsi untuk mereduksi ukuran *bagasse* menjadi ± 10 mm. Tujuan dari reduksi ukuran ini, yakni mengurangi derajat polimerisasi dan meningkatkan kecernaan dari biomassa lignoselulosa [7]. serta meningkatkan konversi gula dalam hidrolisis serta etanol dalam fermentasi [8]. Kemudian *bagasse* dialirkan menuju *screener* (H-101) menggunakan *belt conveyor* (J-102) untuk disaring antara ukuran yang sesuai dengan ukuran dan *oversize*. Untuk ukuran yang masih *oversize* dialirkan kembali menuju *disk attrition mill* agar ukurannya sesuai menggunakan *bucket elevator* (J-103). Selanjutnya, *bagasse* yang telah direduksi ukurannya akan dibawa menuju hopper untuk ditampung kemudian dipompa menuju *pretreatment tank reactor* (R-110) menggunakan pompa *pneumatic* (P-110). Setelah melewati proses *feed handling*, *bagasse* akan dialirkan menuju *pre-treatment tank* (R-110) menggunakan *belt conveyor* (J-112). Pre-treatment dilakukan dengan menggunakan asam kuat yakni H_2SO_4 yang diencerkan hingga 2% v/v Selanjutnya larutan asam dipompa menuju *pre-treatment tank* (R-210). Kondisi operasi pada *pre-treatment tank* (R-210) diatur pada suhu 110°C dan memiliki waktu tinggal selama 15 menit serta pada tekanan 5 atm [9]. Selama proses *pre-treatment*, larutan asam akan melarutkan hampir keseluruhan dari hemiselulosa menjadi komponen gula serta melarutkan sebagian lignin menjadi *black liquor* dengan konversi sekitar 5%, reaksi yang terjadi pada proses *pre-treatment* dapat dilihat pada Tabel 3.

Setelah proses *pre-treatment*, larutan dialirkan menuju *valve* (K-101) untuk diturunkan tekannya hingga 1,5 atm. Penurunan ini akan menguapkan Sebagian larutan sehingga perlu dihilangkan, penghilangan dilakukan menuju lingkungan karena mayoritas komponennya adalah air

sehingga dirasa aman untuk dilepas. Pelepasan uap dilakukan pada tangki *blowdown* (V-112).

Kemudian aliran bawah yang berisikan komponen liquid dan solid (*hydrolized solid/liquid*) dan dialirkan menuju *centrifugal separator* (H-111) untuk dipisahkan antara padatan dengan cairan. Cairan yang tidak ikut tersaring kemudian akan didinginkan pada cooler (E-111) hingga bersuhu 50°C agar sesuai dengan proses selanjutnya.

Cairan hasil proses pre-treatment selanjutnya akan dialirkan menuju proses kapurisasi (*overliming*) pada reaktor (R – 120). Pada proses *overliming*, Ca(OH)₂ ditambahkan pada tangki untuk meningkatkan pH menjadi 10 dengan waktu tinggal 15 menit sehingga akan terjadi reaksi *overliming*. Kemudian larutan tersebut dipompa menuju tangki (T-130) untuk proses pengasaman dengan menambahkan asam sulfat encer hingga memiliki pH sekitar 4.5. Pengasaman ini dilakukan dengan tujuan untuk menyesuaikan dengan kondisi optimum pada proses SSCF.

Waktu tinggal dari proses reasidifikasi juga dilakukan selama 15 menit. Proses kapurisasi dan pengasaman ini akan membentuk produk samping yaitu gypsum, yang kemudian dialirkan menuju separator sentrifugal (H-132) untuk menghilangkan ±99.5% dari padatan gypsum yang terbentuk. Kemudian larutan hasil filtrasi dipompa menuju cooler (E-133) untuk diturunkan suhunya menjadi ±40°C agar sesuai dengan kondisi fermentasi nantinya, kemudian dialirkan menuju tangki pencampuran (T-140) yang akan dicampurkan dengan padatan yang terbentuk dari hasil pre-treatment (*hydrolized solid*) untuk melakukan proses selanjutnya (SSCF)

B. Fermentasi (Area 2)

Pada proses fermentasi dilakukan dengan teknologi proses SSCF (*simultaneous sacharification & co-fermentation*) dimana tahap hidrolisis dan fermentasi dilakukan secara simultan dalam satu reaktor. Proses fermentasi dilakukan dalam kondisi anaerob dalam tangki fermentasi (R-210) yang dilengkapi pengaduk dan koil pendingin untuk menjaga suhu fermentasi tetap pada suhu optimal terjadinya sakarifikasi dan fermentasi yakni 40°C, hal ini disebabkan karena reaksi dalam Tangki Fermentasi (R-210) bersifat eksotermis atau menghasilkan panas.

Sebelum dilakukan proses fermentasi, perlu disiapkan terlebih dahulu preparasi dari mikroorganisme agar sakarifikasi dan fermentasi dapat bekerja secara optimal. Fermentor pada proses produksi ini adalah yeast *Saccharomyces cerevisiae* TMB3400 yang dipersiapkan pada tangki starter (T-211) yang terdiri atas DAP (*Diammonium phosphate*) broth dan nutrient MgSO₄. Proses inokulasi yeast berlangsung pada suhu 30°C selama 12 jam. Selain itu perlu juga disiapkan enzim selulase sebagai hidrolisator dari selulosa, yang diproduksi menggunakan yeast *Trichoderma reesei*. Proses inokulasi dari hidrolisator tidak memerlukan nutrisi khusus karena yeast *T.reesei* sendiri dapat berkembang dengan nutrisi selulosa yang merupakan bahan baku masukan pada tangki fermentasi.

Proses hidrolisis atau sakarifikasi akan terjadi dengan bantuan enzim selulase. Enzim selulase merupakan kumpulan enzim yang terdiri dari: endoglukanase, eksoglukanase, dan β-glukosidase. Enzim tersebut diproduksi oleh yeast *T.reesei* yang telah dipersiapkan sebelumnya. Pada

proses sakarifikasi, kandungan glukosa yang terdapat pada selulosa akan tersintesis menjadi glukosa yang dapat difermentasi oleh mikroba fermentor.

Kemudian untuk proses fermentasi, digunakan bakteri *Zymomonas mobilis* rekombinan sebagai biokatalis. Bakteri tersebut akan memfermentasikan komponen glukosa serta xilosa untuk menghasilkan etanol. Proses sakarifikasi dan fermentasi ini membutuhkan waktu selama 72 jam yang terdiri dari 36 jam waktu untuk proses sakarifikasi dan 36 jam waktu untuk proses fermentasi. Reaksi yang terjadi beserta dengan fraksi konversi terhadap proses sakarifikasi dan fermentasi dapat dilihat seperti pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

Pada akhir dari proses fermentasi, hasil karbon dioksida yang terbentuk akan dikeluarkan menggunakan valve yang tersedia, secara bersamaan juga ditambahkan kapur (CaOH₂) untuk menetralkan kadar asam yang masih tersisa pada reaktor fermentasi.

C. Purifikasi (Area 3)

Proses purifikasi memiliki tujuan untuk memisahkan bioetanol dari pengotor lainnya sehingga terbentuk produk akhir bioetanol dengan kemurnian tinggi, yaitu 99,5% v/v atau *Ethanol Fuel Grade* (EFG). Proses purifikasi terdiri atas 2 proses pemurnian : pemurnian menggunakan distilasi dan pemurnian menggunakan dehidrasi. *Output stream* dari Tangki Fermentasi (R-210) dipompa dengan *centrifugal slurry pump* (L-211) menuju *centrifugal separator* (H-211) untuk memisahkan padatan-padatan yang terbawa bersama bioetanol. Setelah dipisahkan, *cake* yang berupa *yeast mud* dan padatan lain akan dialirkan keluar menuju pengolahan limbah padat, sedangkan filtratnya akan dipompa menggunakan pompa (L-212) menuju *pre-heater* untuk dipanaskan hingga bersuhu 70°C.

Kemudian campuran air-etanol akan dialirkan menuju distilasi (D-320) untuk dilakukan pemurnian lebih lanjut. Kolom distilasi (D-320) memiliki 11 tray dengan *feed* masuk pada tray ke-5. Kemurnian etanol yang dihasilkan melalui proses distilasi ini adalah 81,2% w/w etanol pada produk atas dan produk bawah dengan komposisi 0.063% w/w etanol. Untuk memenuhi spesifikasi tersebut, refluks pada kondensor diatur agar memiliki perbandingan 5,3 : 1. Kondisi operasi pada kolom distilasi adalah 95,4°C dan 1,3 atm pada produk *overhead*, dan 108,8°C dan 1.35 atm pada *bottom* produk. Keluaran distilat dikondensasi pada kondensor parsial (E-322) untuk merubah fasa vapor menjadi cairan dan fasa vapor.

Akan tetapi, produk atas keluaran distilasi (D-320) belum memenuhi syarat etanol yang digunakan sebagai *biofuel* yaitu harus memiliki tingkat kemurnian minimal 99,5% sesuai dengan SNI 7390-2008. Oleh karena itu, diperlukan proses peningkatan kemurnian etanol lebih lanjut melalui proses dehidrasi menggunakan *molecular sieves*. Proses dehidrasi dilakukan dengan menggunakan 2 kolom adsorpsi yaitu (D-321A/B). Pada kolom adsorpsi, campuran etanol masukan akan diserap kandungan airnya sehingga akan menghasilkan produk etanol dengan komposisi 99.5% v/v.

Adsorpsi melibatkan dua fase, yaitu fase pemuatan (adsorpsi) dan fase pelepasan (desorpsi). *Molecular sieves* yang digunakan memiliki diameter 4 Å, sehingga akan mampu memisahkan molekul air dan etanol yang berukuran

2,5 A° dan 4 A° dari molekul etanol yang berukuran 4,4 A°. Proses adsorpsi ini akan berlangsung pada suhu 81,07 °C dan tekanan atmosferik. Kemudian *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. Hasil dari proses dehidrasi menggunakan *molecular sieves* ini adalah produk *Bioetanol Fuel Grade* yang kemudian akan dilakukan pendinginan menggunakan kondensator *cooler* (E-323) untuk kemudian disimpan di tangki penyimpanan bioetanol (F-410) pada suhu ruang.

V. NERACA MASSA DAN NERACA ENERGI

A. Neraca Massa

Hasil analisa neraca massa pada pabrik ini ditampilkan sesuai pada Tabel 7.

B. Neraca Energi

Pabrik bioetanol ini membutuhkan *steam* sebagai pemanas, air dan listrik. Diperlukan *steam* dengan jenis (*low pressure steam*) sebanyak 14,366 ton/jam sesuai pada Tabel 8. Air yang digunakan sebagai pendingin serta proses dibutuhkan sebanyak 30,34 ton/jam seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9. Serta listrik berfungsi untuk mengoperasikan unit pompa dan beberapa alat lainnya dengan daya yang dibutuhkan 1,73 MW/hari.

VI. ANALISA EKONOMI

Analisis ekonomi merupakan hal yang penting dalam meninjau kelayakan pendirian dan perancangan pra desain pabrik. Beberapa faktor yang perlu dianalisa dalam menentukan kelayakan berdirinya pabrik bioetanol dari *bagasse* ini diantaranya adalah *Net Present Value* (NPV), laju pengembalian modal (*Internal Rate of Return/IRR*), waktu pengembalian modal minimum (*Pay Out Time/POT*), dan juga titik impas (*Break Event Point/BEP*). Untuk mengetahui nilai dari faktor-faktor tersebut, terlebih dahulu perlu diketahui nilai *Capital Expenditure* (CAPEX) dan *Operating Expense* (OPEX).

A. Capital Expenditure (CAPEX) dan Operating Expense (OPEX)

Capital expenditure atau pengeluaran modal adalah biaya-biaya yang dikeluarkan dalam rangka memperoleh aset tetap, meningkatkan efisiensi operasional dan kapasitas produktif aset tetap, serta memperpanjang masa manfaat aset tetap.

Sementara *Operating expense* atau biaya operasi adalah pengeluaran yang biasa dilakukan oleh sebuah perusahaan saat memenuhi kebutuhan operasional.

B. 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 modal untuk menganalisis potensi keuntungan dari sebuah proyek maupun investasi yang akan dilakukan. Nilai NPV yang positif menyatakan bahwa proyeksi pendapatan pabrik kedepannya akan meraup keuntungan, sebaliknya apabila nilai NPV negative menandakan kerugian.

C. 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.

D. Waktu Pengembalian Modal Minimum (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.

E. Titik Impas (Break Event Point/BEP)

Analisa titik impas digunakan untuk mengetahui besarnya kapasitas produksi dimana biaya produksi total sama dengan hasil penjualan. Biaya tetap (FC), Biaya variabel (VC), biaya semi variabel (SVC) dan biaya total tidak dipengaruhi oleh kapasitas produksi.

KESIMPULAN

Pabrik bioetanol dari ampas tebu (*bagasse*) direncanakan untuk didirikan pada tahun 2025 dengan kapasitas produksi sebesar 30.000 kL/tahun. Pabrik tersebut akan berlokasi di Provinsi Jawa Timur, tepatnya pada Kecamatan Kras, Kabupaten Kediri. Proses produksi bioetanol ini terdiri dari tiga unit proses. Unit pertama ialah *pre-treatment*, berfungsi untuk mereduksi ukuran bahan baku dan mendegradasi lignin agar terpisah dari struktur lignoselulosanya, pada proses ini digunakan *pre-treatment* asam yang menggunakan H₂SO₄ 2,5%. Kemudian unit kedua ialah fermentasi, bertujuan untuk memproduksi bioetanol. Proses fermentasi menggunakan metode SSCF (*Simultaneous Saccharification Fermentation*) dengan *T.reesei* sebagai hidrolisator dan *S.cerevisae* sebagai fermentor. Serta unit ketiga, yakni unit purifikasi yang terdiri dari proses distilasi dan dehidrasi, untuk memisahkan bioetanol dari berbagai komponen agar menjadi etanol *fuel grade* sesuai dengan standar SNI. Proses ini menghasilkan etanol *fuel grade* dengan kemurnian sebesar 99,5% volume. Berdasarkan perhitungan analisis ekonomi, dapat diketahui bahwa: NPV (*Net Present Value*) sebesar Rp170.974.460.010 ; IRR (*Internal Rate of Return*) sebesar 19,72%; POT (*Pay Out Time*) selama 5 tahun; dan BEP (*Break Even Point*) sebesar 39,73% kapasitas total (Tabel 10). Sehingga dapat disimpulkan bahwa pabrik bioetanol dari *Bagasse* layak untuk didirikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Arlianti, "Bioetanol sebagai sumber green energy alternatif yang potensial di Indonesia," *J. Keilmuan dan Apl. Tek. UNISTEK*, vol. 5, no. 1, pp. 16–22, 2018.
- [2] A. Mohsenzadeh, A. Zamani, and M. J. Taherzadeh, "Bioethylene production from ethanol: A review and techno-economical evaluation," *ChemBioEng Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 75–91, 2017, doi: 10.1002/cben.201600025.
- [3] D. P. Singh, R. K. Trivedi, and others, "Acid and alkaline pretreatment of lignocellulosic biomass to produce ethanol as biofuel," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 727–734, 2013.
- [4] M. Jędrzejczyk, E. Soszka, M. Czapnik, A. M. Ruppert, and J. Grams, "Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass," in *Second and Third Generation of Feedstocks*, Elsevier, 2019, pp. 143–196. doi: 10.1016/B978-0-12-815162-4.00006-9.
- [5] M. A. Kamzon, S. Abderafi, and T. Bounahmidi, "Promising bioethanol processes for developing a biorefinery in the Moroccan

- sugar industry,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20880–20896, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.035.
- [6] Y. Sudyani, S. Aiman, and D. Mansur, *Perkembangan Bioetanol G2: Teknologi dan Perspektif*, 1st ed. Jakarta: LIPI Press, 2019.
- [7] V. G. Gupta, M. Tuohy, C. P. Kubicek, J. Saddler, and F. Xu, *Bioenergy Research: Advances and Applications*, 1st ed. United Kingdom: Elsevier, 2013.
- [8] Y. Yang, M. Zhang, J. Zhao, and D. Wang, “Effects of particle size on biomass pretreatment and hydrolysis performances in bioethanol conversion,” *Biomass Convers. Biorefinery*, 2022, doi: 10.1007/s13399-021-02169-3.
- [9] P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, and M. J. Negro, “Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 13, pp. 4851–4861, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.