

Desain Pabrik Bioetanol dari Batang Sorgum dengan Kapasitas 15.000 kL/Tahun

Evania Christiana Febiani, Luciana Felisia, Annas Wiguno, dan Kuswandi
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: kuswandi@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan setiap tahunnya, sementara sumber daya utama yang sampai saat ini masih digunakan berbahan dasar fosil yang tak terbarukan. Hal tersebut menyebabkan mulai dikembangkannya berbagai alternatif, salah satunya bioetanol yang merupakan bagian dari biofuel. Bahan baku bioetanol banyak dikembangkan, salah satunya yang berasal dari batang sorgum. Penggunaan batang sorgum sebagai bahan baku bioetanol dinilai menguntungkan dari segi ekonomi maupun teknis, sehingga dirancang suatu pabrik bioetanol dari batang sorgum dengan rancangan kapasitas sebesar 15.000.000 L/tahun. Proses utama dari pabrik ini adalah *pre-treatment* untuk degradasi lignin, fermentasi dengan teknologi SSCF, dan purifikasi menggunakan distilasi serta *molecular sieves*. Pabrik yang didesain akan mulai beroperasi di Nusa Tenggara Timur (NTT) pada tahun 2027 dengan asumsi operasi 330 hari dalam satu tahun. Analisis ekonomi dilakukan dan didapatkan data *Capital Expenditure* (CAPEX) sebesar Rp217.181.210.789; *Operational Expenditure* (OPEX) sebesar Rp170.197.041.372; *Net Present Value* (NPV) sebesar Rp84.770.408.771 dengan *Internal Rate of Return* sebesar 19,50%, *Break Even Point* (BEP) sebesar 50,55% dan *Pay-out Time* (POT) selama 6 tahun setelah pabrik beroperasi. Tak hanya itu, pabrik ini juga menekankan konsep *green industry* yang didasarkan pada peraturan pemerintah dengan adanya unit pengolahan limbah serta memanfaatkan kembali limbah yang meaisih memiliki nilai ekonomi. Disimpulkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan.

Kata Kunci—Batang Sorgum, Bioetanol, Energi Alternatif, SSCF.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara berkembang yang memiliki jumlah penduduk terbanyak ke-4 di dunia, yakni mencapai 277,7 juta per tahun 2023. Jumlah ini terus mengalami peningkatan tiap tahunnya, sehingga kebutuhan Indonesia akan energi juga ikut meningkat. Hal ini dibuktikan dengan data dari BBPT Outlook Energi Indonesia 2021 yang menyatakan bahwa konsumsi energi pada tahun 2019 mencapai 989,9 juta SBM [1]. Akan tetapi, diketahui pula bahwa hingga saat ini, konsumsi energi masih didominasi oleh BBM (Bahan Bakar Minyak) yang tak terbarukan serta tidak ramah lingkungan. Hal ini disebabkan masih adanya ketergantungan akan BBM serta anggapan bahwa BBM memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar lainnya.

Permintaan akan bahan bakar minyak ini tidak berbanding lurus dengan ketersediaannya. Maksudnya, kenaikan permintaan akan BBM ini tidak disertai dengan kenaikan ketersediaannya, sehingga pemerintah mengusahakan berbagai macam cara untuk menjaga stabilitas energi di Indonesia, yakni dengan beralih ke energi baru terbarukan (EBT). Hal ini didukung dengan Peraturan Presiden (Perpres) No. 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional yang mendukung pengurangan bahan bakar minyak. Alasannya

Tabel 1.
Perbandingan proses *pre-treatment*

Dasar Seleksi	Pre-Treatment			
	Asam	Basa	Organosolv	
Suhu (°C)	120	130	180	
Waktu (menit)	60	10	45	
Komposisi	Sebelum	30,2	39,48	33,46
Hemiselulosa (%)	Sesudah	55,8	81,74	53
Komposisi	Sebelum	23,9	16,56	18,25
Selulosa (%)	Sesudah	6,9	8,87	4,08
Komposisi	Sebelum	11,9	24,77	39,55
Lignin (%)	Sesudah	27,2	6,16	48,92

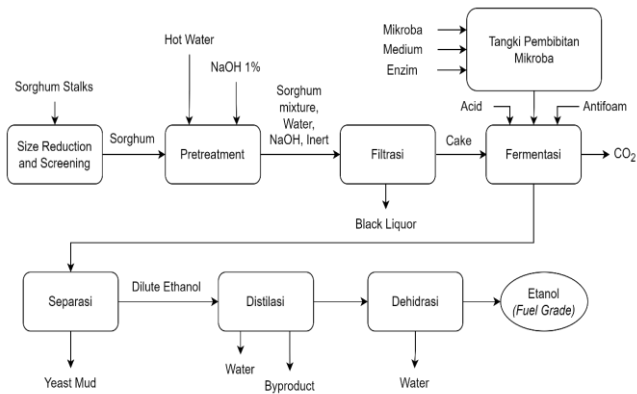
Tabel 2.
Perbandingan proses *pre-treatment*

Parameter	SHF			SSF		SSCF	
	Hidrolisis	Fermentasi	Waktu (jam)	Yield Etanol (%)	Biaya	Tinggi	Rendah
Suhu (°C)	50	35	35	35			
Waktu (jam)	96	72	72				
Yield Etanol (%)	23,98	30,54	43,46				
Biaya	Tinggi	Rendah	Rendah				

adalah karena ketersediaannya lebih terjaga serta lebih ramah lingkungan.

Salah satu jenis EBT yang saat ini sedang banyak dikembangkan adalah *biofuel*. *Biofuel* sendiri terdiri dari banyak jenis, seperti *biodiesel* yang digunakan untuk pengganti bahan bakar *diesel*, *biohydrogen* yang digunakan untuk pembangkit listrik, serta bioetanol yang digunakan untuk pengganti bensin. Tentu saja, penggunaan bahan bakar tak terbarukan tidak bisa digantikan secara masal begitu saja dalam satu waktu. Oleh karena itu, banyak dikembangkan bioetanol sebagai campuran bensin untuk mengurangi penggunaan BBM serta meningkatkan kualitas bensin (*hybrid*). Hal ini karena properti bioetanol yang cenderung menguntungkan, seperti angka oktan bioetanol yang mencapai 106-110 dibandingkan angka oktan bensin yang berada di kisaran 91-96. Nilai oktan berpengaruh pada performa mesin, di mana semakin tinggi angka oktan maka rasio pembakaran yang terjadi dapat lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat. Bioetanol juga dikatakan sebagai energi yang ramah lingkungan karena mengandung 34,7% oksigen yang tidak ada di bensin. Keberadaan oksigen ini akan menyebabkan efisiensi pembakaran meningkat hingga 15% dan mengurangi emisi partikulat dan gas nitrogen oksida yang berbahaya bagi kesehatan manusia [2].

Peningkatan kebutuhan bioetanol ini diperkirakan telah mencapai 350.000 kiloliter pertahunnya. Umumnya, bahan baku yang digunakan untuk bioetanol adalah biomassa seperti, batang jagung, tebu, dan bit gula. Alternatif biomassa pun juga terus dikembangkan, salah satunya batang sorgum. Sorgum sendiri sedang dikembangkan oleh pemerintah Indonesia, di mana pada tahun 2023, telah dicanangkan penambahan lahan hingga 115 ribu hektar. Sorgum dinilai



Gambar 1. Diagram balok proses produksi bioetanol dari batang sorgum.

Tabel 3. Kandungan batang sorgum

Kandungan	Presentase (w/w)
Selulosa	27,49
Hemiselulosa	23,51
Lignin	33,00
Ash	5,33
Moisture	9,98
Extractive	0,69
Total	100

memiliki nilai ekonomi yang tinggi karena bijinya dapat digunakan untuk pengganti nasi, sedangkan batangnya yang kaya akan glukosa dapat menjadi bahan baku untuk produksi bioetanol. Selain itu, sorgum juga dapat tumbuh pada lahan kering dan memiliki masa panen yang singkat, yaitu 3 bulan.

Oleh karena itu, perancangan pabrik ini akan di desain menggunakan bahan baku batang sorgum agar dapat memaksimalkan pemanfaatan tanaman sorgum menjadi ioetanol dengan cara fermentasi. Pemilihan bahan baku ini juga didasarkan pada ketersediaan dari tanaman sorgum yang berlimpah dan amat disayangkan apabila dari keseluruhan tanaman hanya diambil bijinya sebagai bahan makanan. Kandungan glukosa dan sukrosa pada batang sorgum dapat diubah menjadi bioetanol melalui serangkaian proses yang selanjutnya akan berdampak positif untuk memenuhi kebutuhan bioetanol dalam negeri. Perancangan pendirian pabrik ini diharapkan dapat memaksimalkan potensi dari limbah batang sorgum.

II. URAIAN PROSES PRODUKSI

Perancangan pabrik bioetanol dari batang sorgum ini memiliki beberapa tahapan proses produksi untuk menghasilkan bioetanol sesuai dengan standar mutu nasional dengan kualitas tinggi. Tiga tahapan utama dari pabrik ini sendiri adalah *pre-treatment*, fermentasi, serta purifikasi.

A. Proses *Pre-treatment*

Proses *pre-treatment* adalah proses terpenting dalam rangkaian proses produksi bioetanol, sebab pada proses inilah kualitas serta kuantitas produk bioetanol dapat ditentukan. Tujuan utama dari proses *pre-treatment* sendiri adalah untuk degradasi lignin agar dapat terpisah dari hemiselulosa dan selulosa yang merupakan komponen utama pembentuk bioetanol. Akan tetapi, perlu diingat bahwa pada umumnya proses *pre-treatment* dapat menghasilkan limbah berbahaya, sehingga dibutuhkan penanganan limbah yang benar. Beberapa metode *pre-treatment* antara lain yakni dengan asam, basa, serta organosolv. Berikut merupakan

Tabel 4. Data supply demand bioetanol di Indonesia

Tahun	Produksi (kL)	Konsumsi (kL)	Ekspor (kL)	Impor (kL)
2012	205.000	135.000	59.000	0
2013	207.000	135.000	86.000	0
2014	202.000	135.000	94.000	2.000
2015	205.000	136.000	67.000	0
2016	205.000	137.000	71.000	2.000
2017	195.000	137.000	64.000	5.000
2018	200.000	138.000	158.000	96.000
2019	200.000	139.000	70.000	1.000
2020	193.000	175.000	47.000	29.000
2021	200.000	167.000	82.000	54.000
2022	205.000	168.000	85.000	45.000

perbandingan dari ketiga proses *pre-treatment* ini.

Setelah dilakukan perbandingan menggunakan aplikasi *Expert Choice*, didapatkan hasil bahwa *pre-treatment* basa memiliki keunggulan dibanding kedua metode lainnya, sehingga *pre-treatment* basa dipilih untuk diterapkan di pabrik ini.

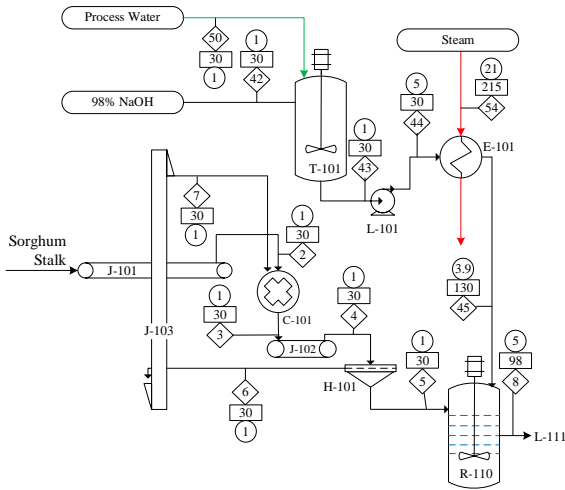
B. Proses Hidrolisis dan Fermentasi

Reaksi pembentukan etanol terjadi karena adanya aktivitas mikroorganisme pada substrat. Penggunaan mikroba pada proses fermentasi harus secara selektif karena dapat berbeda-beda tergantung pada komposisi substrat. Mikroorganisme yang dipilih harus mampu tumbuh dengan cepat dan memiliki toleransi yang sesuai dengan konsentrasi gula agar dapat menghasilkan kadar bioetanol diinginkan. Fermentasi bioetanol dari gula hemiselulosa cenderung lambat dan kuantitas produk yang lebih rendah daripada gula selulosa. Proses fermentasi yang dapat digunakan dalam proses ini di antaranya seperti *Separate Hydrolysis Fermentation* (SHF), *Simultaneous Saccharification Fermentation* (SSF), serta *Simultaneous Saccharification Co-Fermentation* (SSCF).

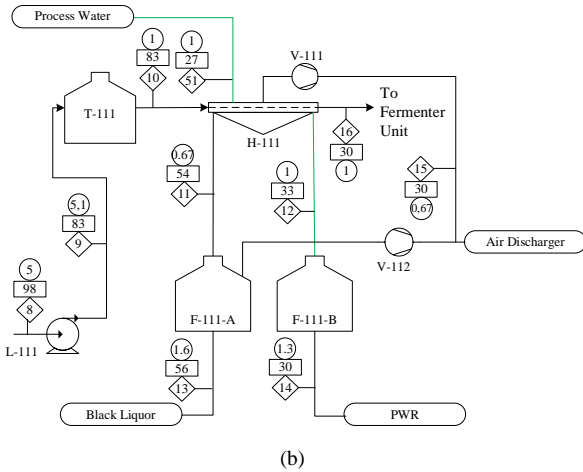
Pada SHF, proses hidrolisis dan fermentasi dilakukan secara berurutan pada reaktor yang berbeda. Sementara itu, pada SSF, proses hidrolisis dan fermentasi terjadi selama berkelanjutan atau berurutan dalam reaktor yang sama dan waktu yang sama pula. Terakhir, pada SSCF proses hidrolisis dan fermentasi terjadi pada reaktor yang sama dan waktu yang sama secara serentak. Dapat dilihat pada Tabel 2. bahwa SSCF memiliki keuntungan yang lebih baik dibandingkan dengan dua metode lainnya, sehingga SSCF dipilih untuk proses hidrolisis dan fermentasi dalam rancangan pabrik ini.

C. Proses Purifikasi

Pada proses purifikasi, akan dilakukan pemurnian dari bioetanol yang masih tercampur dengan komponen lainnya. Pada tahap ini, akan dilakukan proses distilasi dan juga dehidrasi. Proses distilasi hanya mencapai maksimum pada konsentrasi 97,2%, padahal untuk mencapai kondisi etanol *fuel-grade* dibutuhkan etanol yang memiliki kemurnian hingga 99,5% volume. Hal ini disebabkan adanya kondisi azeotrope antara air dan etanol, sehingga untuk mencapai kemurnian tinggi, dilakukan proses dehidrasi dan dipilih metode adsorpsi. Metode ini dipilih karena lebih menguntungkan dibandingkan metode distilasi azeotrop karena prosesnya yang lebih sederhana dan biaya operasi yang lebih rendah [3]. Sementara itu, adsorben yang terpilih adalah *molecular sieve* yang memiliki sifat basa, kadar air < 1 ppm dengan kemampuan regenerasi yang mudah.



Gambar 2a. Proses pre-treatment pada pabrik bioetanol dari batang sorgum.



(b)

Gambar 2b. Proses pre-treatment pada pabrik bioetanol dari batang sorgum (lanjutan).

D. Uraian Proses

Produksi bioetanol terbagi menjadi tiga proses utama. Proses pertama yaitu proses *pre-treatment* yang bertujuan untuk mereduksi ukuran bahan baku batang sorgum menjadi serpihan halus. Selain itu, pada proses ini terjadi proses degradasi lignin dan konversi hemiselulosa dan selulosa dengan penambahan NaOH 1% serta *hot water*. Proses selanjutnya adalah proses fermentasi yang berlangsung selama 72 jam dan bertujuan untuk memproduksi bioetanol dengan bantuan mikroorganisme. Proses ini dilakukan dengan bantuan mikroba, medium, enzim untuk pembibitan mikroba dan juga tambahan *antifoam* serta asam pada tangka fermentasi untuk menetralkan pH. Proses terakhir yang terjadi adalah proses purifikasi dengan distilasi dan dehidrasi yang bertujuan untuk memisahkan bioetanol hasil fermentasi dari *impurities* dan memurnikan bioetanol agar sesuai dengan spesifikasi etanol *fuel grade* yang memiliki kadar kemurnian hingga 99,5%. Uraian proses pada pabrik ini dapat dilihat pada diagram balok Gambar 1.

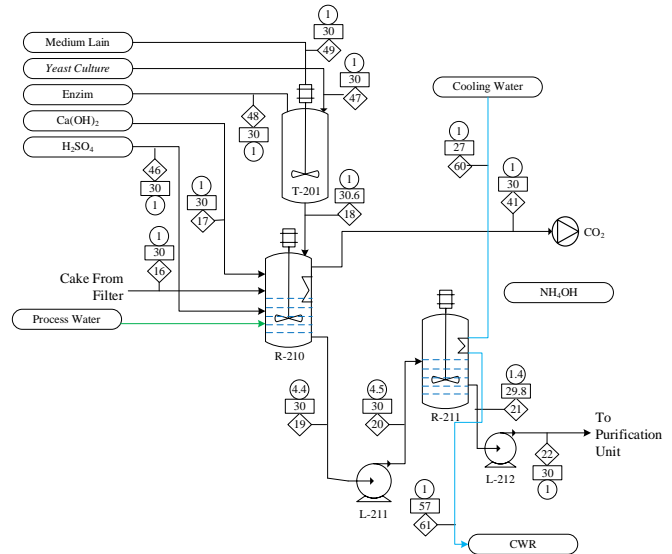
III. DATA DASAR PERANCANGAN

A. Ketersediaan Bahan Baku di Indonesia

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang paling banyak menyumbangkan dana bagi perekonomian Indonesia. Bahkan, Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia menyatakan

Tabel 5. Reaksi pada *fermentation tank*

Reaksi Hidrolisis
$(C_6H_{10}O_5)_n + n H_2O \rightarrow n C_6H_{12}O_6$
$(C_5H_8O_4)_n + n H_2O \rightarrow n C_5H_{10}O_5$
Reaksi Fermentasi
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$
$C_5H_{10}O_5 \rightarrow 5 C_2H_5OH + 2 CO_2$



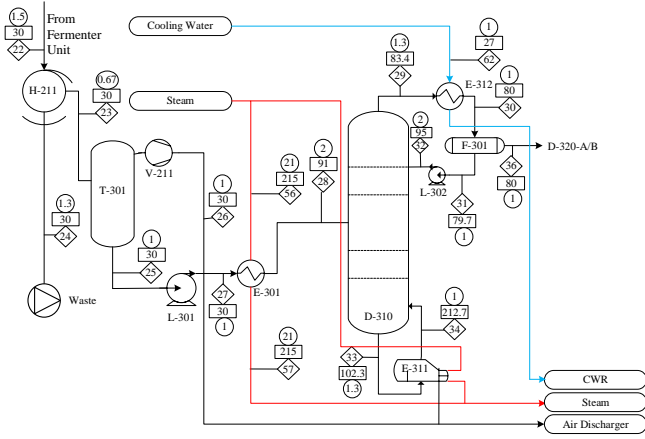
Gambar 3. Proses fermentasi pada pabrik bioetanol dari batang sorgum.

bahwa sektor pertanian memberikan sumbangsih sebesar 12,98% pada pertumbuhan ekonomi di Indonesia pada kuartal kedua tahun 2022 lalu. Salah satu sektor pertanian yang kini sedang gencar dikembangkan di Indonesia adalah sorgum. Pasalnya, bahan pangan pengganti gandum ini memiliki banyak manfaat, tak hanya pada sektor pangan saja, melainkan juga sebagai bahan baku dalam pembuatan bioetanol. Sorgum dapat diolah menjadi bioetanol 5% (E5) yang dapat memenuhi kualifikasi untuk menjadi biofuel.

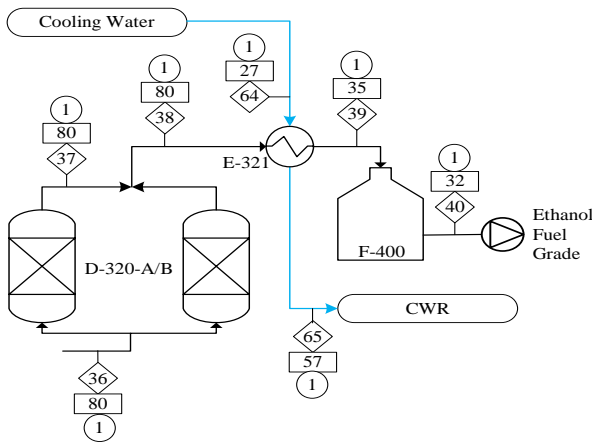
Terdapat 6 provinsi sebagai penghasil terbesar sorgum, yakni Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, dan juga Kalimantan Barat. Perlu diketahui bahwa setiap hektar lahannya dapat menghasilkan sorgum sebanyak 2,5 ton – 5 ton. Pemerintah menargetkan akan ada 154 ribu hektar sorgum yang akan direalisasikan pada tahun 2024. Apalagi, sorgum sendiri merupakan tanaman dengan *zero waste*, di mana seluruh bagiannya dapat dimanfaatkan, mulai dari daun, batang buah, hingga malaynya. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa ketersediaan sorgum, khususnya bagian batang yang nanti akan diolah menjadi bioetanol di Indonesia sangat melimpah.

Sorgum pada varietas Bioguma 1, Bioguma 2, dan juga Bioguma 3 dapat menghasilkan biomassa sebesar 45-50 ton/hektarnya. Hal ini disebabkan batang sorgum pada umumnya memiliki berat sekitar 400-800 gram yang di dalamnya memiliki kandungan nira sebesar 0,1 – 0,15 liter/batangnya. Hal ini membuat batang sorgum sangat menjanjikan jika hendak diolah menjadi bioetanol. Serat di dalamnya berpotensi menghasilkan etanol sebesar 4000 – 6500 liter/hektarnya. Sorgum sendiri, khususnya bagian batang memiliki kandungan yang sama layaknya biomassa lainnya yakni selulosa, hemiselulosa, lignin, dan komponen lainnya seperti pada Tabel 3.

Bioetanol dari batang sorgum ini nantinya akan menjadi



Gambar 4a. Proses purifikasi pada pabrik bioetanol dari batang sorgum.



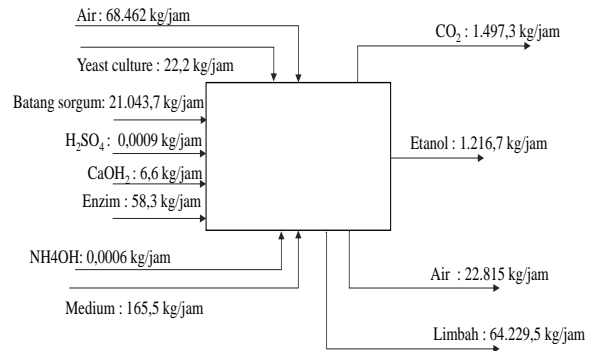
Gambar 4b. Proses purifikasi pada pabrik bioetanol dari batang sorgum (lanjutan).

campuran bahan bakar minyak (BBM) dengan kode E5 yang artinya ada campuran bioetanol sebanyak 5% di dalamnya. Oleh karena itu, perancangan bioetanol dari batang sorgum ini akan disesuaikan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) agar dapat memenuhi kualifikasi *fuel grade* salah satunya memiliki kadar etanol minimum 99,5% dan kadar air maksimum 0,5%

B. Kapasitas Produksi

Perhitungan kapasitas pabrik sangat diperlukan khususnya dalam menentukan penggunaan alat, neraca massa, neraca energi, dan lainnya. Oleh karena itu, untuk menunjang perhitungan kapasitas pabrik dibutuhkan kebutuhan dari pasar yang dari data *Supply Demand* Bioetanol yang dapat membantu memperkirakan kapasitas produksi pabrik bioetanol dari sorgum yang akan beroperasi pada tahun 2025. Data *supply demand* bioetanol dapat dilihat pada Tabel 4.

Dari data di atas, dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai laju pertumbuhan produksi, konsumsi, ekspor, serta impor bioetanol. Dengan asumsi pabrik dibangun pada tahun 2025 dengan mengabaikan anomali, didapatkan proyeksi kebutuhan nasional sebanyak 59.357.687 L/tahun, sehingga pabrik ini mampu menyumbang sebesar 25,27% dari total kapasitas kebutuhan nasional dengan kapasitas 15.000.000 L/tahun. Jika dibandingkan dengan kebutuhan bioethanol sebagai bahan baku BBM saat ini, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral melaporkan bahwa kebutuhan pada tahun 2023 ini mencapai 696.000 KL. Angka tersebut



Gambar 5. Neraca massa pada pabrik bioetanol dari batang sorgum.

Tabel 6. Kebutuhan steam

Nama Alat	Kode Alat	Massa (kg/h)
NaOH Pre-Heater	E-101	5.797
Distillation Column Pre-Heater	E-301	183
Distillation Column Partial Reboiler	E-311	2.401
Total		8.381

merupakan angka kebutuhan bauran bioethanol dengan bahan bakar minyak (BBM) jenis bensin yang saat ini baru diimplementasikan di Jakarta dan Jawa Timur. Akan tetapi, Menteri ESDM juga menyatakan bahwa hingga Juli 2023, kapasitas produksi maksimal bioethanol *fuel grade* di Indonesia hanya mencapai 40.000 KL/tahunnya. Oleh karena itu, jika pabrik ini didirikan, maka pabrik ini mampu memenuhi **37,5%** dari total kapasitas maksimal produksi bioethanol FGE di Indonesia atau sekitar **2,15%** dari total kebutuhan Indonesia secara keseluruhan.

C. Lokasi dan Ketersediaan Utilitas

Lokasi pendirian pabrik merupakan hal penting yang tidak boleh dilupakan, sebab mampu mempengaruhi seluruh proses produksi. Lokasi pabrik memberikan dampak pada biaya produksi dan juga harga jual dari produk, sehingga harapannya dapat memberikan keuntungan bagi perusahaan maupun masyarakat yang tinggal di sekitarnya. Beberapa faktor dan pertimbangan yang mempengaruhi pemilihan lokasi pabrik adalah sebagai berikut:

- Ketersediaan bahan baku di daerah pendirian pabrik
- Kondisi geografis
- Utilitas
- Sumber tenaga kerja
- Aspek ekonomi
- Aksesibilitas dan fasilitas transportasi
- Hukum dan peraturan

Dari berbagai pertimbangan dan faktor di atas, terdapat dua opsi lokasi untuk pendirian pabrik bioetanol dari sorghum, yakni di Provinsi Jawa Timur (Kawasan Industri Ngoro, Mojokerto) dan di Provinsi Nusa Tenggara Timur (Kawasan Industri Bolok, Kupang). Pemilihan kedua lokasi pabrik ini berdasarkan laporan Direktorat Jenderal Tanaman Pangan bahwa provinsi NTT dan Jawa Timur merupakan lima besar daerah penghasil sorgum paling banyak di Indonesia. Dilakukan perbandingan pada kedua lokasi tersebut berdasarkan faktor dan pertimbangan di atas menggunakan aplikasi *Expert Choice* dan dipilihlah Kawasan Industri Bolok, Kupang, NTT sebagai tempat berdirinya pabrik ini.

Tabel 7.
Kebutuhan *cooling water*

Nama Alat	Kode Alat	Massa (kg/h)
<i>Fermentation Tank</i>	R-210	16.100
<i>Distillation Column</i>	E-312	44.348
<i>Partial Condenser Bioethanol Condenser</i>	E-321	9.104
Total		69.553

Tabel 8.
Analisis ekonomi pabrik bioetanol dari batang sorgum

No.	Keterangan	Unit	Jumlah
1.	CAPEX	IDR	Rp217.181.210.789
2.	OPEX	IDR	Rp170.197.041.372
3.	NPV	IDR	Rp84.770.408.771
4.	Interest	%/tahun	5,75
5.	IRR	%	19,50
6.	POT	Satuan waktu	6 tahun
7.	BEP	%	50,55%
8.	Harga Bahan Baku	IDR/ton.tahun	Rp88.454.751.710
9.	Harga Produk	IDR/ton.tahun	Rp225.000.000.000
10.	Lama Konstruksi	Tahun	2
11.	Basis operasi / tahun	Hari	330

IV. URAIAN PROSES TERPILIH

Telah dilakukan pemilihan dari beberapa opsi dalam tiga uraian proses utama, yakni *pre-treatment* basa, fermentasi dengan metode SSCF, serta purifikasi menggunakan metode adsorpsi dengan *molecular sieve* sebagai adsorbennya. Uraian proses ini dipilih karena memiliki keuntungan yang lebih baik dibandingkan dengan opsi lainnya. Tujuannya tentu saja untuk mendapatkan hasil bioetanol dengan standar *fuel grade ethanol* yang berlaku di Indonesia.

A. Pre-Treatment

Batang sorgum kering sebelumnya akan disimpan dalam *feed storage* (F-101) dan diarahkan ke proses selanjutnya melalui *hammer mill belt conveyor* (J-101). Ukuran batang sorgum akan dikecilkan menggunakan *hammer mill* (C-101) hingga mencapai ukuran $\pm 2-3$ mm. Hal ini dilakukan untuk menghancurkan komposisi lignin sebelum melalui proses-proses selanjutnya. Batang sorgum selanjutnya akan dialirkan menuju *siever shaker* (H-101) melalui *sieve shaker belt conveyor* (J-102). *Siever shaker* akan menyaring batang sorgum sesuai ukuran yang diinginkan dan batang sorgum yang berukuran lebih dari ketentuan (*oversized*) selanjutnya akan dialirkan kembali ke *hammer mill* melalui *oversize bucket elevator* (J-103).

Batang sorgum yang berbentuk serpihan halus selanjutnya akan masuk ke *pre-treatment tank* (R-110) untuk proses *pre-treatment* basa. Proses ini berlangsung selama 30 menit pada suhu 130 °C dan ditambahkan larutan NaOH (Natrium Hidroksida) 10% yang sebelumnya telah diencerkan pada NaOH *dillution tank* (T-101) dan dipanaskan pada NaOH *pre-heater* (E-101) hingga mencapai suhu 130 °C. Proses *pre-treatment* akan mendegradasi lignin dan bercampur dengan NaOH 10% sehingga akan menjadi *black liquor*. *Slurry* hasil dari proses *pre-treatment* selanjutnya akan dipompa menggunakan *centrifugal slurry pump* (L-111) untuk dimasukkan ke dalam *pre-treatment storage tank* (T-111). *Slurry* selanjutnya akan dialirkan menuju *horizontal vacuum belt filter* (H-111) untuk memisahkan *impurities* dan

black liquor yang masih terdapat pada *slurry* hasil *pre-treatment*. Proses penyaringan yang terjadi pada *horizontal vacuum belt filter* dibantu oleh *vacuum pump* (V-111). Proses penyaringan juga akan disertai proses pencucian *cake* hasil penyaringan menggunakan *process water* sehingga *cake* bersih dari *impurities*. Adanya *process water* yang dialirkan juga berfungsi untuk menurunkan suhu *cake* yang keluar dari *filter*. *Cake* yang telah bersih dari pengotor selanjutnya akan masuk ke proses selanjutnya yaitu proses fermentasi. Sedangkan, *black liquor* hasil penyaringan dan pengotor lainnya akan masuk ke *filtrate tank* (F-111-A) dan *process water* yang digunakan pada proses pencucian akan masuk ke *filtrate tank* (F-111-B) sebelum akhirnya dialirkan menuju *process water recycle*.

B. Fermentasi

Proses fermentasi terpilih adalah *Simultaneous Saccharification Co-Fermentation* (SSCF) di mana proses hidrolisis dan fermentasi dilakukan secara bersamaan dalam reaktor yang sama. Proses fermentasi adalah proses mengubah glukosa menjadi alkohol dengan bantuan mikroorganisme. Proses fermentasi dilakukan pada kondisi anaerob di *fermentation tank* (R-210) yang dilengkapi pengaduk dan koil pendingin serta dialirkan *cooling water*. Berbagai upaya pendinginan ini dilakukan karena proses fermentasi bersifat eksotermis atau menghasilkan panas sehingga diperlukan upaya pendinginan untuk menjaga kondisi optimum fermentasi pada suhu 30 °C.

Mikroorganisme yang digunakan untuk fermentasi akan dibiakkan terlebih dahulu pada *starter tank* (T-201). Mikroorganisme yang digunakan seperti *Saccharomyces cerevisiae* dan *Candida shehatae* akan melalui proses inokulasi pada *starter tank* selama 12 jam pada suhu 30 °C. Selain itu, *starter tank* juga berisi DAP (*Diammonium phosphate*) *broth*, $MgSO_4$ sebagai *nutrient* untuk mikroorganisme serta enzim selulase.

Batang sorgum yang telah melalui proses *pre-treatment* dan telah menjadi *cake* selanjutnya akan masuk ke *fermentation tank* (R-210) yang akan ditambahkan campuran mikroorganisme yang berasal dari *starter tank* (T-201). Proses fermentasi akan optimum pada pH 4,8 sehingga ditambahkan asam sulfat (H_2SO_4) untuk menciptakan suasana asam. *Antifoam* juga ditambahkan untuk mencegah pembentukan busa sebagai akibat dari terbentuknya gas CO_2 sebagai *byproduct* proses fermentasi. Proses fermentasi berlangsung selama 72 jam dalam kondisi anaerob. Secara umum, proses yang terjadi pada *fermentation tank* adalah hidrolisis selulosa dan hemiselulosa menjadi gula monomer sederhana dilanjutkan proses fermentasi glukosa dan pentosa menjadi bioetanol. Reaksi yang terjadi dalam *fermentation tank* ditunjukkan pada Tabel 5.

Proses fermentasi selanjutnya akan menghasilkan *dilute ethanol* yang selanjutnya harus melalui proses purifikasi untuk meningkatkan kemurnian etanol. Gas karbondioksida yang dihasilkan dari proses fermentasi selanjutnya akan dikeluarkan dari tangki fermentasi dan dibuang ke lingkungan.

C. Purifikasi

Proses purifikasi bertujuan untuk memisahkan bioetanol dari pengotor lainnya sehingga memenuhi spesifikasi untuk etanol *fuel grade* dengan kemurnian 99,5%. *Slurry* yang

keluar dari *fermentation tank* (R-210) selanjutnya akan dipompa menggunakan *centrifugal slurry pump* (L-212) dan dialirkan ke *neutralization tank* (R-211) untuk menetralkan pH yang sebelumnya dalam kondisi asam dengan penambahan senyawa NH_4OH . *Slurry* selanjutnya akan diarahkan ke *rotary vacuum filter* (H-211) untuk memisahkan padatan yang masih tertinggal pada bioetanol. Padatan ini yang berupa *yeast mud* selanjutnya akan dikeluarkan dan diarahkan ke pengolahan limbah. Sedangkan, bioetanol yang telah bebas dari padatan pengotor akan dialirkan ke *dilute ethanol tank* (T-301) dan dipompa dengan *distillation pump* (L-301) ke *distillation column pre-heater* (E-301) hingga mencapai suhu 91°C . Bioetanol selanjutnya akan didistilasi pada *distillation column* (D-310) hingga mencapai kemurnian 87%. *Distillation column* memiliki 11 *plates*, 1 *partial condenser* dan 1 *partial reboiler* serta reflux yang digunakan sebesar 1,895.

Etanol yang keluar dari *distillation column* (D-310) masih belum memenuhi spesifikasi kemurnian *fuel grade ethanol* sehingga dibutuhkan proses pemurnian lain yaitu dehidrasi dengan *molecular sieves*. Campuran etanol-air akan dialirkan ke *dehydration tank* (D-320-A/B). *Molecular sieves* yang digunakan memiliki diameter 3\AA , sehingga akan memisahkan molekul air dan asam asetat dari etanol melalui proses adsorpsi pada tekanan atmosferik. *Molecular sieves* akan diregenerasi menggunakan *dry air* sehingga dapat digunakan kembali. Penggantian secara berkala juga akan dilakukan untuk menghindari menurunnya kemampuan *molecular sieves* melakukan adsorpsi seiring berjalannya waktu. Proses dehidrasi ini akan menghasilkan bioetanol *fuel grade* yang akan didinginkan menggunakan *bioethanol condenser* (E-321) sebelum dialirkan ke *ethanol storage tank* (F-400) untuk penyimpanan sementara.

V. NERACA MASSA DAN NERACA ENERGI

A. Neraca Massa

Neraca massa yang terjadi pada pabrik ini dapat dilihat pada Gambar 5.

B. Neraca Energi

Pabrik ini membutuhkan *steam* dan *cooling water* pada beberapa alatnya. Tipe *steam* yang digunakan adalah *high pressure steam* dengan suhu 215°C . Kebutuhan *steam* dapat dilihat pada Tabel 6 dan kebutuhan *cooling water* dapat dilihat pada Tabel 7.

VI. ANALISIS EKONOMI DAN SOSIAL LINGKUNGAN

Analisis ekonomi dilakukan untuk mengetahui apakah pabrik ini layak didirikan secara ekonomi atau tidak. Pabrik yang layak didirikan tentu saja menyumbang profit dan bukan kerugian. Hal-hal yang diperhatikan dalam analisis ekonomi sendiri antara lain *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payout Time* (POT), serta *Break Even Point* (BEP). Untuk menghitung faktor-faktor tersebut, perlu diketahui terlebih dahulu nilai CAPEX (*Capital Expenditure*) serta OPEX (*Operational Expenditure*).

Sementara itu, aspek sosial dan lingkungan juga diperhatikan, sebab Pembangunan pabrik tentu saja

berdampak bagi berbagai pihak, ulai dari perusahaan sendiri, pemerintah, dan juga masyarakat luas.

A. CAPEX (*Capital Expenditure*) dan OPEX (*Operational Expenditure*)

CAPEX (*Capital Expenditure*) merupakan pengeluaran modal yang digunakan untuk membeli asset tetap, meningkatkan efisiensi operasional serta kapasitas produksi asset tetap, dan juga memperpanjang masa manfaat dari asset tetap itu sendiri. Umumnya, biaya yang dikeluarkan berjumlah cukup besar, tetapi tidak sering terjadi (tidak dilakukan pembelian secara terus-menerus).

Sementara itu, OPEX merupakan biaya operasional yang dikeluarkan oleh perusahaan untuk memenuhi kebutuhan operasional dalam perusahaan. Artinya, OPEX merupakan biaya berulang yang harus dikeluarkan perusahaan setiap saat menjalankan operasi.

B. Net Present Value (NPV)

Net present value merupakan salah satu faktor penting yang perlu ditinjau saat menganalisis kelayakan pendirian suatu pabrik. Net present value atau NPV sendiri merupakan selisih antara nilai arus kas masuk dan nilai arus kas keluar. NPV digunakan untuk menghitung untung dan juga rugi dari suatu bisnis. Tak hanya itu, NPV juga dapat digunakan untuk menyusun perencanaan investasi. NPV positif berarti pabrik layak didirikan dan akan mendapatkan keuntungan, sementara NPV negatif berarti pabrik akan rugi serta tidak mendapatkan keuntungan. Berikut merupakan persamaan dalam mendapatkan NPV.

$$NPV = \sum_{t=0}^t \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

C. Internal Rate of Return (IRR)

Laju pengembalian modal atau *interest rate of return* (IRR) merupakan suatu indikator tingkat efisiensi dari sebuah investasi. IRR sendiri adalah metode yang digunakan untuk menghitung Tingkat bunga suatu investasi dan menyamakannya dengan nilai terkini berdasarkan perhitungan kas bersih di periode depan. Mudah-mudahan, jika nilai IRR lebih besar dari modal, maka perusahaan tersebut layak untuk menerima investasi. Dilakukan *trial* harga i yakni *interest rate* dengan persamaan:

$$\text{Total modal akhir masa konstruksi} = \sum_{t=0}^t \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

D. Pay-Out Time (POT)

Masa pengembalian modal minimum atau *payout time* (POT) merupakan jumlah tahun yang diperlukan untuk mengembalikan modal yang diinvestasikan / *Fixed Capital Investment* di mana semakin kecil nilai POT, maka semakin cepat pengembalian modal dan semakin baik pula kelayakan suatu pabrik.

E. Break Even Point (BEP)

Break Even Point (BEP) atau titik impas merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui besaran kapasitas produksi yang biaya produksi totalnya sama dengan penjualan.

F. Aspek Sosial

Aspek sosial dari pembangunan pabrik bioethanol dari batang sorgum ini tentu saja dapat meningkatkan

kesejahteraan masyarakat, sebab akan terbuka lapangan kerja baru dan menyerap tenaga kerja lokal untuk mengurangi jumlah pengangguran di daerah tersebut. Sementara itu, aspek sosial yang dapat dirasakan oleh pemerintah adalah adanya pemasukan dari perusahaan dalam bentuk pajak, baik kepada pemerintah daerah maupun pemerintah pusat.

G. Aspek Lingkungan

Aspek lingkungan dari pembangunan pabrik bioethanol dari batang sorgum ini dapat memberikan dampak yang positif dan juga negatif bagi lingkungan di sekitarnya. Dampak positif bagi lingkungan sekitarnya adalah dengan adanya pemanfaatan limbah batang sorgum yang hingga kini belum dimanfaatkan. Pengolahannya menjadi produk *fuel grade ethanol* tentu saja menambah nilai jualnya. Selain itu, produk ini juga produk terbarukan, yang mana tentunya lebih ramah lingkungan dan mengurangi tingkat ketergantungan pada bahan bakar fosil. Akan tetapi, pendirian pabrik ini juga memungkinkan adanya dampak negatif bagi lingkungan, misalnya saja pencemaran air, udara, dan tanah.

VII. KESIMPULAN

Telah dilakukan perancangan pendirian pabrik bioethanol dari batang sorgum dengan memanfaatkan limbah batang sorgum yang meningkat setiap tahunnya. Pendirian pabrik ini tidak hanya memproduksi bioethanol yang dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar nabati sebagai energi terbarukan tetapi juga membantu pengolahan limbah batang sorgum. Proses produksi bioethanol melalui tiga proses utama, yaitu *pre-treatment*, fermentasi dan purifikasi. Bioethanol sendiri akan terbentuk pada proses fermentasi dengan bantuan mikroorganisme *Saccharomyces Cerevisiae*. Secara ekonomi, pabrik ini layak didirikan dengan data CAPEX

sebesar Rp217.181.210.789 dan OPEX sebesar Rp170.197.041.372. *Net Present Value* yang didapatkan bernilai positif sebesar Rp84.770.408.771, dengan *Internal Rate of Return* di mencapai 19,50%, *Payout Time* selama 6 tahun dengan *Break Even Point* sebesar 50,55%. Secara lingkungan, pendirian pabrik ini memiliki dampak positif bagi lingkungan karena mengurangi limbah batang sorgum, mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil serta mendukung program transisi ke energi terbarukan dari pemerintah. Selain dampak positif, pendirian pabrik juga menimbulkan dampak negatif yang disebabkan oleh limbah hasil proses produksi pabrik bioethanol. Akan tetapi, dampak ini sudah diminimalisasi dengan keberadaan unit pengolahan limbah yang terdapat pada pabrik bioethanol. Adanya unit pengolahan limbah ini menyebabkan limbah dapat diolah sebelum dibuang ke lingkungan sehingga dapat sesuai dengan ketentuan yang ada serta memanfaatkan kembali limbah-limbah yang masih memiliki nilai ekonomi. Pabrik bioethanol dari batang sorgum didasarkan pada peraturan pemerintah mengenai *green industry* yang menyelaraskan proses operasi dengan kelestarian lingkungan hidup.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Perspektif Teknologi Energi Indonesia: Tenaga Surya untuk Penyediaan Energi Charging Station. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2021. ISBN 9786021328200.
- [2] N. Fikri and B. Sudarmanta, "Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Udara Pembakaran Terhadap Unjuk Kerja Dan Emisi Gas Buang Engine Honda Cb150r Berbahan Bakar Bioethanol E100," Departemen Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, 2017
- [3] Y. Sudiyani et al., "Optimization Pretreatment Condition of Sweet Sorghum Bagasse for Production of Second Generation Bioethanol," in AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics Inc., Jan. 2017. doi: 10.1063/1.4973142.