PRARANCANGAN PABRIK BIOBUTANOL DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MELALUI METODEFERMENTASI EKSTRAKTIF DENGAN KAPASITAS 24.000 TON/TAHUN

M. Zikrillah[1], Husnul Khotimah[1], Dimas Nur Herdianto[1,*]
Meta Fitri Rizkiana[1], Ratri Sekaringgalih [1], Zuhriah Mumtazah[1]

[1]Program Studi S-1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember Jl. Kalimantan No. 37, Jember Jawa Timur, 68121

*Corresponding Author: dimasgntg@gmail.com

Abstrak

Meningkatnya kebutuhan akan sumber energi yang berkelanjutan dan terbarukan mendorong pengembangan bahan bakar berbasis hayati, termasuk biobutanol. Studi ini menyajikan prarancangan pabrik biobutanol dengan kapasitas produksi 24.000 ton/tahun menggunakan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai bahan baku. Proses meliputi pretreatment, delignifikasi, hidrolisis enzimatik, dan fermentasi ABE ekstraktif menggunakan Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 yang dioperasikan secara fed-batch untuk meningkatkan hasil dan mengurangi hambatan produk. Ekstraktan yang digunakan adalah 2-etil-1-heksanol, yang secara selektif memisahkan ABE dari media fermentasi, sehingga memungkinkan konsentrasi butanol yang lebih tinggi. Produk dimurnikan melalui sistem distilasi multi-tahap. Hasil neraca massa dan energi menunjukkan kebutuhan bahan baku sebesar 71.693,05 kg/jam dan output biobutanol sebesar 3.030 kg/jam. Evaluasi ekonomi menunjukkan Pay Out Time (POT) selama 2,78 tahun, Return on Investment (ROI) sebesar 31,32%, dan Break Even Point (BEP) sebesar 41,2%, yang mengindikasikan kelayakan ekonomi pabrik ini. Rancangan ini menunjukkan potensi menjanjikan dalam mengonversi limbah biomassa menjadi bahan bakar terbarukan bernilai tinggi.

Kata kunci: Biobutanol, TKKS, Biomassa, Fermentasi, Analisis ekonomi.

1. Pendahuluan

Sektor energi global tengah menghadapi tantangan berupa menipisnya bahan bakar fosil namun permintaan bahan bakar terus meningkat. *International Energy Agency* (IEA) memperkirakan konsumsi minyak mencapai 103,9 juta barel/hari pada tahun 2025 atau meningkat 1,1 juta barel/hari dibandingkan tahun 2024 (IEA, 2024). Menurut data dari Direktur Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi (EBTKE), bahwa pada tahun 2028 cadangan minyak bumi sebanyak 3,7 milyar barrel akan habis (Afriyanti et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan bahan bakar alternatif yang terbarukan dan berkelanjutan, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Biobutanol merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang potensial karena memiliki karakteristik fisiko-kimia seperti bensin dan berfungsi dengan baik pada mesin bensin biasa tanpa banyak modifikasi yang rumit (Shang et al., 2020). n-butanol atau butil alkohol yang disebut biobutanol ketika diproduksi secara biologis, merupakan jenis alkohol dengan rumus molekul C_4H_9OH atau $CH_3(CH_2)_3OH$. n-butanol adalah cairan yang tidak berwarna, larut sekitar 7% - 8% dalam air, tetapi mudah larut dalam pelarut organik seperti glikol, keton, alkohol, aldehida, eter, hidrokarbon aromatik dan alifatik (Saputro & Kurniawan, 2019). Tabel 1. menunjukkan perbandingan sifat-sifat bensin, etanol, dan n-butanol.

Tabel 1. Spesifikasi Bensin, Etanol, dan n-Butanol

Karakteristik	Bensin	Etanol	n-Butanol
ρ pada 20°C	0,72-0,78 g/mL	0,789 g/mL	0,808 g/mL
μ pada 25 °C	0,4-0,8 mm^2/s	1,07 mm^2/s	2,63 mm^2/s
ρ Energi	32 MJ/L	25 MJ/L	29,2 MJ/L
RON	91-99	108	94

Butanol dapat diproduksi melalui berbagai metode seperti kondensasi aldol, proses reppe, proses oxo, dan proses hidrogenasi dengan bahan baku utama berupa bahan kimia. Namun, butanol juga dapat terbentuk melalui fermentasi ABE (Aseton-Butanol-Etanol) dari bahan – bahan organik yang memiliki kandungan karbohidrat (gula atau pati). Organisme penghasil n-butanol yang berperan dalam fermentasi ABE adalah

anggota genus *Clostridium* (Obergruber et al., 2021). *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 menjadi pilihan bakteri yang cukup menjanjikan karena mampu menahan toksisitas butanol hingga konsentrasi 65 g/L dan mempunyai suhu optimum pada 30°C dibandingkan Clostridium acetobutylicum yang hanya dapat hidup sampai kadar butanol mencapai konsentrasi 15 g/L (Zikrillah et al., 2023).

Menghindari adanya persaingan antara kebutuhan energi dan kebutuhan pangan, produksi bahan bakar alternatif telah dialihkan pada pemanfaatan limbah biomassa, termasuk dalam produksi biobutanol. Hal ini secara tidak langsung dapat mengurangi emisi polutan, mendukung ekonomi sirkular, serta mengurangi ketergantungan pada sumber eksternal (Ziolkowska, 2020). Biobutanol dapat diproduksi dari biomassa yang memiliki kandungan lignoselulosa tinggi, melalui proses konversi menjadi gula sebelum proses fermentasi.

Salah satu limbah biomassa lignoselulosa yang potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biobutanol adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), karena tersedia melimpah di Indonesia dan memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi. TKKS dihasilkan sebanyak 21% dari total Tandan Buah Segar (TBS) atau sekitar 21 ton/hari jika suatu pabrik mampu mengolah 100 ton TBS per hari. TKKS memiliki kandungan selulosa 43-46%, hemiselulosa 30-34%, lignin 23-25%, dan kadar abu 0,5-0,7% (Susanto et al., 2022).

Berdasarkan hal di atas, dengan pemilihan proses produksi dan bahan baku yang tepat, pendirian pabrik biobutanol dapat menjadi solusi yang menjanjikan dalam mengatasi permasalahan energi. Produk biobutanol dapat diblending dengan bensin sehingga mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, produk biobutanol juga dapat membantu pemenuhan kebutuhan n-butanol yang digunakan sebagai pelarut dalam industri cat, bahan tinta, dan cairan rem (Ibrahim et al., 2017).

2. Deskripsi Proses

2.1. Pemilihan Proses

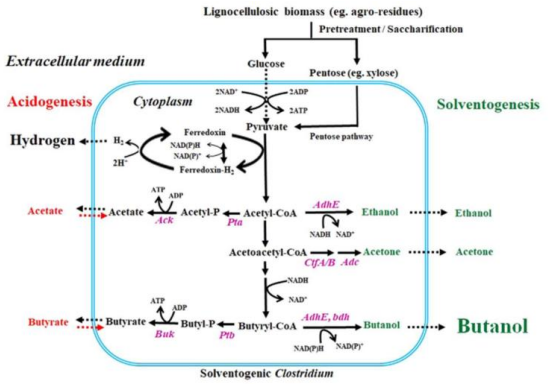
Produksi butanol dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti kondensasi aldol, proses reppe, proses oxo, proses hidrogenasi, dan fermentasi ABE (Aseton-Butanol-Etanol). Proses-proses tersebut umumnya memanfaatkan bahan baku utama berupa bahan kimia, namun fermentasi ABE dapat dilakukan dengan bahan baku utama yang bersumber dari biomassa. Biomassa yang mengandung lignoselulosa diekstrak kandungan selulosanya dan disintesis menjadi glukosa. Glukosa kemudian difermentasi dan menghasilkan produk ABE. Reaksi pembentukan ABE pada proses fermentasi adalah sebagai berikut:

Aseton : $2C_6H_{12}O_{6\,(l)} + H_2O_{(l)} \rightarrow 3C_3H_6O_{(l)} + 3CO_{2(g)} + 3H_{2(g)}$ (1)

Butanol : $C_6H_{12}O_{6(l)} \rightarrow C_4H_{10}O_{(l)} + 2CO_{2(g)} + H_2O_{(l)}$ (2)

Etanol : $C_6H_{12}O_{6(l)} \rightarrow 2C_2H_6O_{(l)} + 2CO_{2(g)}$ (3)

Fermentasi ABE merupakan fermentasi bahan organik dengan bantuan bakteri misalnya Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 yang dapat mengubah monosakarida menjadi ABE dengan hasil akhir butanol dalam bentuk cairan (Suprihatin et al., 2020). Fermentasi dilakukan dengan menambahkan bakteri dalam keadaaan anearob yang akan menghasilkan produk ABE (Buehler & Mesbah, 2016). Proses fermentasi ABE dibagi menjadi dua tahap yaitu asidogenesis (proses penguraian bahan oleh bakteri anaerob) dan solventogenesis (Jiang et al., 2019). Fase asidogenesis adalah fase dimana bakteri dapat tumbuh secara optimum dan sangat berperan dalam metabolisme energi. Asam butirat dan asam asetat akan dihasilkan pada fase asidogenesis yang menyebabkan pH dari media fermentasi akan turun, mengakibatkan terhambatnya pertumbuhan bakteri, yang berakibat pada fermentasi sehingga berpindah ke fase solventogenesis. Ketika populasi bakteri mencapai 70-80% (fase solventogenesis) bakteri akan menghentikan setiap pertumbuhan sel selama proses berlangsung, solvent akan diproduksi pada fase ini yang ditandai dengan naiknya pH, yang akan menghasilkan ABE dengan perbandingan hasil 3:6:1 (Nithyanandan et al., 2016). Fermentasi ABE umumnya menghasilkan total produk sekitar 20 g/L. Hasil produk terbatas pada konsentrasi rendah disebabkan oleh sifat toksisitas dari butanol yang menyebabkan bakteri fermentasi mati akibat butanol terakumulasi dalam kaldu fermentasi (Ave & Ii, 2018).



Gambar 1. Mekanisme Fermentasi ABE

Dalam upaya peningkatan hasil produksi butanol, fermentasi ABE dapat dilakukan dengan dua metode berikut:

1. Fermentasi Ekstraktif

Fermentasi ekstraktif adalah metode fermentasi yang melibatkan penghilangan butanol secara terus-menerus dari kaldu fermentasi untuk mengurangi efek toksiknya pada sel mikroba. Metode ini meningkatkan hasil dan produktivitas butanol dengan mempertahankan konsentrasi butanol yang lebih rendah di lingkungan fermentasi, yang jika tidak dapat menghambat aktivitas mikroba (Solana et al., 2016). Fermentasi ekstraktif juga menyebabkan periode solventogenesis menjadi lebih lama (Muharja, Darmayanti, Fachri, Palupi, Rahmawati, Rizkiana, Amini, Putri, Setiawan, Asrofi, et al., 2023). Namun, biaya energi yang terkait dengan proses ekstraksi dapat menjadi signifikan dan pilihan pelarut ekstraksi dapat memengaruhi efisiensi dan kemurnian keseluruhan butanol yang dipulihkan (Sánchez-Ramírez et al., 2015).

2. Fermentasi *Co-culture*

Fermentasi *co-culture* adalah metode fermentasi yang memanfaatkan beberapa spesies mikroba untuk meningkatkan produksi butanol. Misalnya, *Clostridium thermocellum* +*Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 dapat meningkatkan pemanfaatan substrat dan meningkatkan hasil keseluruhan. Pemanfaatan kultur bersama tampaknya menguntungkan dibandingkan mikroorganisme tunggal karena potensi konsorsium untuk melakukan pembagian kerja (proses multi langkah), fungsi yang rumit dan lebih kuat terhadap fluktuasi lingkungan (Nakayama et al., 2011). Namun, kompleksitas dalam mengelola beberapa kultur dapat menimbulkan tantangan dalam hal kontrol dan pengoptimalan proses (Bankar et al., 2013).

Berdasarkan prosesnya, fermentasi ABE dapat dilakukan dengan tiga metode yaitu sebagai berikut:

a. *Batch*

Fermentasi ABE secara *batch* beroperasi dengan memfermentasi semua media dalam *batch* bioreaktor. Metode *batch* lebih mudah dan lebih sederhana dibandingkan metode lainnya. Fermentasi *batch* pada dasarnya menggunakan bejana berpengaduk dengan aksesori tambahan seperti gas sparger dan *heating/cooling jacket*. Proses *batch* dimulai dengan memasukkan substrat dan nutrisi tambahan ke dalam bejana. Konsentrasi substrat biasanya berkisar antara 60–80 g/L (konsentrasi substrat dibatasi oleh efek penghambatan produk). Campuran reaksi disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu sekitar 120 °C, diikuti dengan pendinginan hingga 35–37 °C. Setelah itu, kultur benih diinokulasikan ke dalam campuran dalam kondisi *anaerob*. Waktu fermentasi *batch* (tergantung pada kultur yang digunakan dan kondisi operasi lainnya) adalah 48–72 jam. Ketika konsentrasi pelarut mencapai 20 g/L (atau 33 g/L untuk kultur hiper-penghasil butanol), terjadi penghambatan pertumbuhan sel yang menghentikan proses fermentasi. Volume tipikal dari fermenter *batch* berkisar dari 100 liter hingga 800.000 liter (atau 800 m^3) (Ranjan & Moholkar, 2012). Alasan produktivitas yang rendah dalam metode *batch* karena fase lag yang lama, durasi *downtime* antar *batch*, penghambatan produk, dan konsentrasi sel yang rendah di reaktor (Prakash et al., 2015). Hal ini kemudian mempengaruhi proses *recovery,* karena konsentrasi biobutanol yang terlalu rendah membuat *recovery* menjadi tidak efisien, dengan konsumsi energi yang tinggi, dan mahal (Ibrahim et al., 2018).

b. *Fed-batch*

Fermentasi *fed-batch* diterapkan karena konsentrasi substrat yang tinggi bersifat toksik bagi kultur mikroba. Reaktor dimulai dalam mode *batch* dengan konsentrasi substrat yang rendah. Biasanya, awalnya larutan fermentasi (*broth*) mengisi sekitar setengah volume fermenter. Kemudian, seiring substrat dikonsumsi oleh kultur, substrat tambahan ditambahkan secara perlahan, sehingga konsentrasi total pelarut dalam larutan fermentasi tetap di bawah tingkat toksik. Dengan cara ini, volume total larutan fermentasi meningkat, kecuali jika ada penarikan pelarut secara simultan. Jika produk tidak ditarik, proses dapat dilanjutkan hingga larutan fermentasi mengisi sekitar 75% volume fermenter (Ranjan & Moholkar, 2012). Namun, akumulasi produk sampingan pelarut dalam sistem *fed-batch* ABE bersifat toksik bagi sel. Meskipun fermentasi *fed-batch* dapat meningkatkan kadar biobutanol, *yield* biobutanol relatif lebih rendah dibandingkan fermentasi *batch* karena beban substrat yang tinggi dan toksisitas pelarut. Oleh karena itu, sebagian besar proses *fed-batch* dirancang dengan integrasi pemulihan *in-situ* untuk memulihkan pelarut dan mengurangi efek inhibisi pelarut pada sel, sehingga *yield* yang dihasilkan meningkat (Ibrahim et al., 2018).

c. Kontinu

Fermentasi kontinu adalah fermentasi yang hanya membutuhkan satu kultur inoculum untuk waktu fermentasi yang lebih lama. Namun, feremntasi kontinu tidak dapat memberikan peningkatan yang signifikan dibandingkan proses *batch*. (Gallazzi et al., 2015) memperoleh 9,0 g/L dengan hasil 22%

biobutanol pada mode *batch* dibandingkan dengan 7,6 g/L dengan hasil 40% biobutanol pada fermentasi kontinu. Keuntungan fermentasi kontinu antara lain: pengurangan waktu sterilisasi dan inokulasi, produktivitas tinggi, dan pengurangan inhibisi biobutanol. Selain itu, mode kontinu sulit mencapai kondisi *steady state* dengan laju pengenceran 0,01 jam^{-1}, kemungkinan disebabkan oleh perilaku osilasi dalam kultur sel. Laju pengenceran > 1,0 jam^{-1} mengurangi konsumsi glukosa dan produksi biobutanol. Masalah utama adalah dua fase asidogenesis dan solventogenesis yang bercampur selama proses kontinu. Clostridia bersifat bifasik, sehingga sulit untuk mempertahankan kultur dalam fase solventogenik sepanjang sistem kontinu karena kondisi pH yang berbeda dalam asidogenesis (pH 5–6) dan solventogenesis (pH < 4,5) yang bercampur selama fermentasi kontinu (Ibrahim et al., 2018).

Fermentasi ekstraktif dipilih karena dapat mengurangi hambatan dari produk akhir dengan cara menghilangkan produk fermentasi *in-situ*. Fermentasi ekstraktif sangat sederhana dan mudah diimplementasikan dengan sistem fermentasi skala besar. Dalam metode ini, substrat dikontakkan dengan ekstraktan berupa 2-Ethyl-Hexanol secara terus menerus yang tidak bercampur dengan air, sehingga secara selektif dapat mengekstrak aseton, butanol, etanol dari substrat, namun meninggalkan semua komponen lain seperti nutrisi dan sel dalam substrat. 2-Ethyl-Hexanol dipilih karena bersifat tidak toksik dan koefisien distribusi tinggi terhadap butanol (aceton: 0,58 kg/kg; butanol: 6,09 kg/kg; etanol: 0,47 kg/kg) (Ave & Ii, 2018). Proses fermentasi dilakukan secara *fed-batch* karena dengan mengintegrasikan fermentasi ekstraktif dan mode *fed-batch* dapat secara optimal meningkatkan kadar dan *yield* biobutanol serta mengurangi efek toksisitas pelarut namun tetap mudah dalam menentukan kondisi optimal. Selain pemilihan proses fermentasi, metode pemisahan fase diperlukan untuk memperoleh butanol dengan kadar tinggi. Pemurnian dilakukan dengan distilasi karena menghasilkan kemurnian yang tinggi akibat perbedaan titik didih yang cukup tinggi dari setiap komponen, ekonomis, dan mudah untuk digunakan dalam skala industri.

2.2. Uraian Proses

Proses pembuatan biobutanol dengan fermentasi ekstraktif (fed-batch) menggunakan bakteri Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 dibagi menjadi 6 tahap yaitu persiapan bahan baku, pretreatment, delignifikasi, hidrolisis enzimatik, fermentasi ABE dan pemisahan ABE.

1. Tahapan *Pre-Treatment*

Limbah tandan kosong kelapa sawit yang berasal dari industri kelapa sawit ditampung dalam silo penyimpanan (F-110) kemudian diangkut menggunakan belt conveyor (J-111) dan dipotong menggunakan mesin hammer mill (C-120) hingga mencapai ukuran kecil (3-5 mm). Tujuan penghancuran TKKS menjadi serbuk untuk memperluas permukaan bahan sehingga dapat mempercepat proses delignifikasi dan hidrolisis. Fiber TKKS diangkut menggunakan belt conveyor (J-121) kemudian disimpan dalam silo penyimpanan (F-130) sebelum dipindahkan ke tangki reaktor menggunakan *pneumatic conveyor* (J-131) untuk proses selanjutnya.

2. *Delignifikasi*

TKKS yang telah melalui proses *pretreatment* direndam dalam larutan NaOH 10% (b/v) dengan rasio padat-cair 1:10. Proses hidrotermal dilakukan pada reaktor tangki berpengaduk dengan kondisi oporasi suhu 121°C dan 1 atm selama 15 menit untuk memaksimalkan proses delignifikasi (R-140). TKKS dicuci bersih dengan air hingga air cucian mencapai pH netral menggunakan alat *filter press* (H-145), untuk memastikan penghilangan sisa NaOH dan lignin yang terlarut. Kandungan selulosa meningkat dari sekitar 41,3% menjadi 62,7% setelah delignifikasi, sementara kandungan lignin menurun dari 23,8% menjadi 13,2%. Namun, berat kering TKKS menurun hingga 54,71% dari berat awal akibat hilangnya hemiselulosa dan lignin selama perlakuan pendahuluan.

3. Proses Enzimatik

Proses hidrolisis enzimatik menggunakan reaktor tangki berpengaduk (CSTR/*Continuous Stirred Tank Reactor*) (R-150) dilakukan untuk mengkonversi selulosa dalam TKKS menjadi gula reduksi, menggunakan enzim selulase dari *Trichoderma reesei* (F-151). TKKS yang telah melalui *pretreatment* sebelumnya dicampur dengan larutan buffer asam sitrat jenuh (0,05 M, pH 5,0) dari silo penyimpanan (F-153) dengan perbandingan 1 g : 6 ml. Enzim selulase 45 U/g substrat ditambahkan ke campuran ini (Noomtim & Cheirsilp, 2011). Proses hidrolisis dijalankan pada suhu 50°C dengan pengadukan pada kecepatan 160 rpm selama 72 jam untuk memastikan pencampuran yang homogen dan memaksimalkan kontak antara enzim dan substrat. Setelah didinginkan, sampel dialirkan menuju *filter press* (H-157) untuk memisahkan glukosa dari substrat. Kondisi operasi ini menghasilkan gula reduksi dengan konsentrasi tertinggi sebesar 16,43 g/L atau 33% dari TKKS yang telah di*pretreatment* dengan basa, menunjukkan efisiensi tinggi dalam proses konversi selulosa menjadi gula.

4. Pra-Fermentasi

Proses pra-fermentasi dibagi menjadi 2 tahapan yaitu refresh dan proses propagasi.

a. Refresh
   Proses refresh bertujuan untuk memperbanyak populasi bakteri Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 yang dilakukan pada skala laboratorium. Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 diinokulasikan ke dalam 9 ml media potato glucose (PG) dengan inokulum 10% v/v. Media PG tersebut kemudian diberi perlakuan heat-shock dalam air bersuhu 100 ºC selama 1 menit. Setelah itu, kultur yang telah diinokulasi diinkubasi pada suhu 30 ºC selama 24 jam (Muharja et al., 2023).
b. Proses Propagasi
   Proses propagasi atau perkembangbiakan bakteri, bertujuan untuk membantu bakteri beradaptasi dengan lingkungan agar dapat berkembang biak dengan optimal. Bakteri yang digunakan adalah Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4. Media nutrisi yang digunakan untuk pertumbuhan Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4 adalah Tryptone Yeast Acetate (TYA) dari silo penyimpanan (F-211). TYA terdiri dari campuran tryptone bacto (0,006), yeast extract (0,002), amonium asetat (0,003), magnesium sulfat (0,0003), besi (II) sulfat (0,00001), potassium fosfat (0,0005), dan akuades (0,9882)) (Darmayanti et al., 2020). TYA dihomogenkan hingga mencapai pH 6,5 dengan menggunakan mixer (M-210). Media refresh, TYA (1/3 dari jumlah glukosa), dan glukosa (10% hasil hidrolisis) dimasukkan ke dalam tangki propagasi dan dihomogenkan pada suhu 30°C selama 15 menit (R-220). Media propagasi kemudian dialirkan ke tangki fermentor (R-230) sebagai proses selanjutnya.

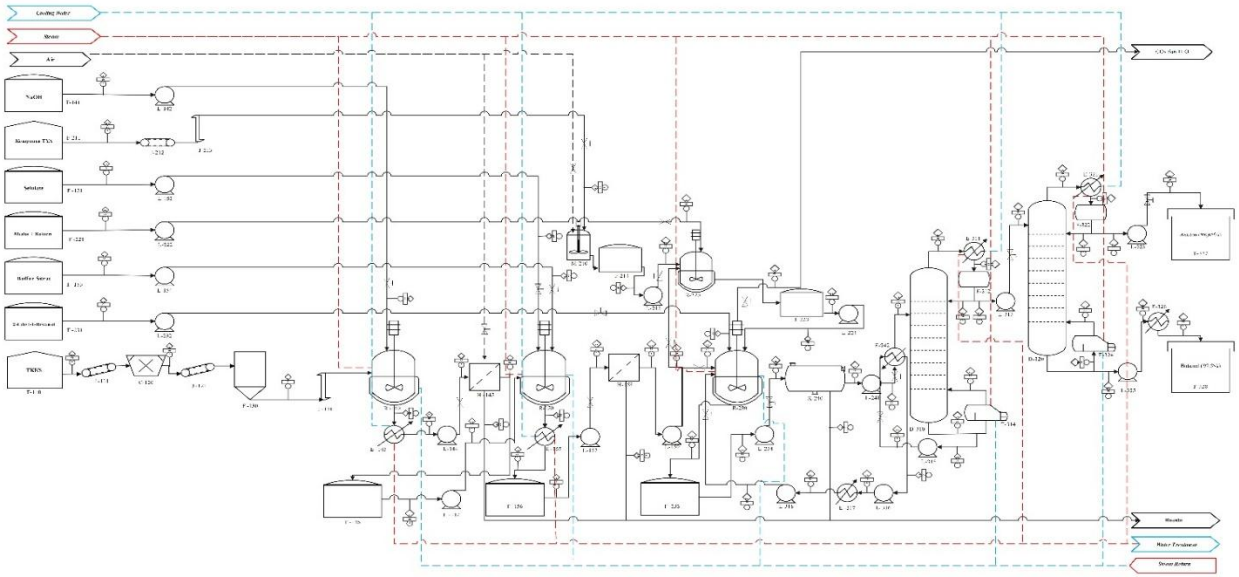
5. Fermentasi Ekstraktif
   Media propagasi, TYA (1/3 dari jumlah glukosa), glukosa (90% hasil hidrolisis), dan ekstraktan (0,59 dari total broth fermentasi) dimasukkan ke dalam tangki fermentor (R-230) kemudian diaduk hingga homogen dengan kecepatan 150 rpm pada suhu 37°C. Glukosa ditambahkan secara berkala saat konsentrasi gula turun dibawah 10 g/L dan diikuti dengan penambahan larutan ekstraktan (2-*Ethyl-Hexanol*) dari silo penyimpanan (F-231) (Muharja, Darmayanti, Fachri, Palupi, Rahmawati, Rizkiana, Amini, Putri, Setiawan, & Asrofi, 2023). Waktu fermentasi, termasuk pergantian tangki, diasumsikan 72 jam (60 jam untuk fermentasi, ditambah 6 jam hasil yang diberikan ke bagian pemisahan, ditambah 6 jam untuk pergantian tangki). *Yield* fermentasi aseton : butanol : etanol masing-masing adalah 31,834% : 68,164% : 0,001% (Darmayanti et al., 2022). Selanjutnya, hasil ABE yang tercampur dengan ekstraktan fermentasi dialirkan ke bagian pemisahan.
6. Pemisahan ABE (Distilasi)
   Setelah proses fermentasi selesai, campuran yang dihasilkan didekantasi (X-240) untuk memisahkan dua fase, fase atas berupa campuran ekstraktan, aseton, dan butanol sedangkan fase bawah berupa campuran air, etanol, dan residu. Fase atas kemudian dialirkan ke kolom distilasi pertama (D-310) untuk memisahkan ekstraktan dari campuran aseton dan butanol. Hasil pemisahan ekstraktan dialirkan kembali ke reaktor fermentasi (R-230) untuk siklus fermentasi berikutnya. Campuran cairan yang masih mengandung aseton dan butanol, diproses lebih lanjut di unit distilasi kedua (D-320). Tahap ini bertujuan untuk memisahkan komponen aseton dan butanol secara lebih spesifik. Aseton dan butanol dimurnikan pada kolom distilasi kedua untuk mencapai kadar kemurnian butanol sebesar 99,5% (F-326) dan aseton sebesar 99,5% (F-325). Proses ini memastikan produk akhir memenuhi standar kualitas dan efisiensi yang diinginkan.

Pemilihan suhu dan tekanan operasi pada proses distilasi dalam pabrik biobutanol dari TKKS didasarkan pada sifat fisik dan termodinamika komponen yang dipisahkan. Pada distilasi pertama, digunakan suhu 171°C dan tekanan atmosfer 760 mmHg untuk memisahkan campuran aseton dan butanol dari ekstraktan 2-Ethyl-1-Hexanol, yang memiliki titik didih 184°C. Suhu ini mendekati titik didih butanol (117°C), memungkinkan komponen volatil seperti aseton (56°C) terpisah sebagai distilat, sementara ekstraktan tetap berada di residu karena titik didihnya yang jauh lebih tinggi. Pada distilasi kedua, suhu 85°C dengan tekanan atmosfer 760 mmHg digunakan untuk memisahkan butanol dari aseton. Suhu ini cukup rendah untuk mempertahankan butanol (117°C) di fasa cair, tetapi cukup tinggi untuk memisahkan komponen yang lebih volatil, seperti aseton, sebagai distilat. Pemilihan kondisi ini memastikan efisiensi pemisahan komponen aseton dan butanol, menjaga stabilitas ekstraktan dan produk, serta mengoptimalkan energi tanpa memerlukan sistem vakum atau tekanan tinggi. Dengan demikian, kondisi operasi ini cocok untuk proses skala industri berbasis bahan baku TKKS.

3. Neraca Massa dan Neraca Energi

Pabrik biobutanol dirancang beroperasi 330 hari/tahun dengan jam kerja 24 jam dalam sehari. Berdasarkan perhitungan neraca massa, pabrik biobutanol dari TKKS membutuhkan bahan baku

PROCESS FLOW DIAGRAM **PRA-RANCANGAN PABRIK BIOBUTANOL DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MELALUI METODE FERMENTASI EKSTRAKTIF DENGAN KAPASITAS 24.000 TON/TAHUN**



Komponen	Aliran																								
	<3>	<5>	<8>	<9>	<10>	<12>	<14>	<16>	<17>	<20>	<21>	<22>	<23>	<24>	<28>	<30>	<32>	<34>	<35>	<36>	<39>	<40>	<43>	<55>	<60>
TKKS	71.693		39.223	32.469	39.223	39.223			27.989																
Liginin	16.489		5.181		5.181	5.181			5.181	5.181	5.181														
Selulosa	32.261		24.592		24.592	24.592			16.477	16.477	16.477														
Hemiselulosa	22.941		9.448		9.448	9.448			6.330	6.330	6.330														
NaOH		716.930	716.930	7.152.570	16.734	16.734			16.734	16.734	551.90	16.182	14.564	1618						14.564	14.564				
H_2O			6.452.374																						
Enz Selulose							0,05		0,05	0,05	0,001	0,048	0,043	0,004						0,043	0,043				
Buffer Sitrat								335.744	335.744	335.744	11.073	324.671	292.204	32.467						292.204	292.204				
Glukosa									8.115	8.115	267	7.848	7.063	784						7.063	7.063				
Xylosa									3.118	3.118	102	3.015	2.713	301						2.713	2.713				
TYA													3.258		362					3.258	3.258				
Media Refresh																4.310									
Bakteri																									
2-Ethyl-Hexanal																		212.192		212.192		212.192	8		8
H_2																			154						
CO_2																			6.152						
Media Propagasi																	39.844			39.844	39.844				
Butanol																				3.046		3.046	3.031	15	3.016
Aseton																				1.114		1.114	1.109	1103	5

KETERANGAN	
Kode Alat	**Nama Alat**
F-110	Gudang Penyimpanan TKKS
J-111	Belt Conveyor
C-120	*Hummer Mill*
J-121	Belt Conveyor
F-130	Silo Penyimpanan
J-131	*Bucket Elevator*
R-140	Reaktor Delignifikasi
F-141	Silo NaOH
L-142	*Gear Pump*
E-143	*Heat Exchanger*
L-144	*Gear pump*
H-145	*Filter Press*
F-146	Tanki Penyimpanan Delig
L-147	*Gear Pump*
R-150	Reaktor Hidrolisis
F-151	Silo Selulase
L-152	*Gear pump*
F-153	Silo Buffer Sitrat
L-154	*Gear pump*
E-155	*Cooler*
F-156	Tanki Penyimpanan Hidrolisis
L-157	*Gear Pump*
H-158	*Filter Press*
L-159	*Centrifugal Pump*
M-210	Mixer
F-211	Silo Penyimpanan TYA
J-212	*Pneumatic Conveyor*
J-213	*Bucket Elevator*
R-214	Tangki Penyimpanan TYA
L-215	*Centrifugal Pump*
R-220	Tangki Propagasi
F-221	Silo Media + Bakteri
L-222	*Gear Pump*
F-213	Tangki Penyimpanan Propagasi
L-224	*Centrifugal Pump*
R-230	Reaktor Fermentasi
R-231	Silo 2-Ethyl-Hexanol
L-232	*Centrifugal Pump*
F-233	Tanki Penyimpanan Fermentasi
L-234	*Centrifugal Pump*
X-240	Dekanter
L-241	*Centrifugal Pump*
E-242	Preheater
D-310	Kolom Distilasi I
E-311	Kondesor
F-312	Akumulator
L-313	*Centrifugal Pump*
E-314	Reboiler
L-315	*Centrifugal Pump*
L-316	*Centrifugal Pump*
E-317	*Cooler*
L-318	*Centrifugal Pump*
D-320	Kolom Distilasi II
E-321	Kondensor
F-322	Akumulator
L-323	*Centrifugal Pump*
E-324	Reboiler
L-325	*Centrifugal Pump*
E-326	*Cooler*
F-327	Tangki Penyimpanan Aseton
F-328	Tangki Penyimpanan Butanol

Gambar 2. *Process Flow Diagram* Pabrik *Biobutanol*

TKKS sebanyak 71.693,05 kg/jam dan menghasilkan biobutanol sebanyak 3.030 kg/jam. Kebutuhan panas disediakan oleh unit pengadaan steam di utilitas. Steam masuk pada suhu 200°C. Total kebutuhan steam yang diperlukan sebesar 153.457,87 kg/jam.

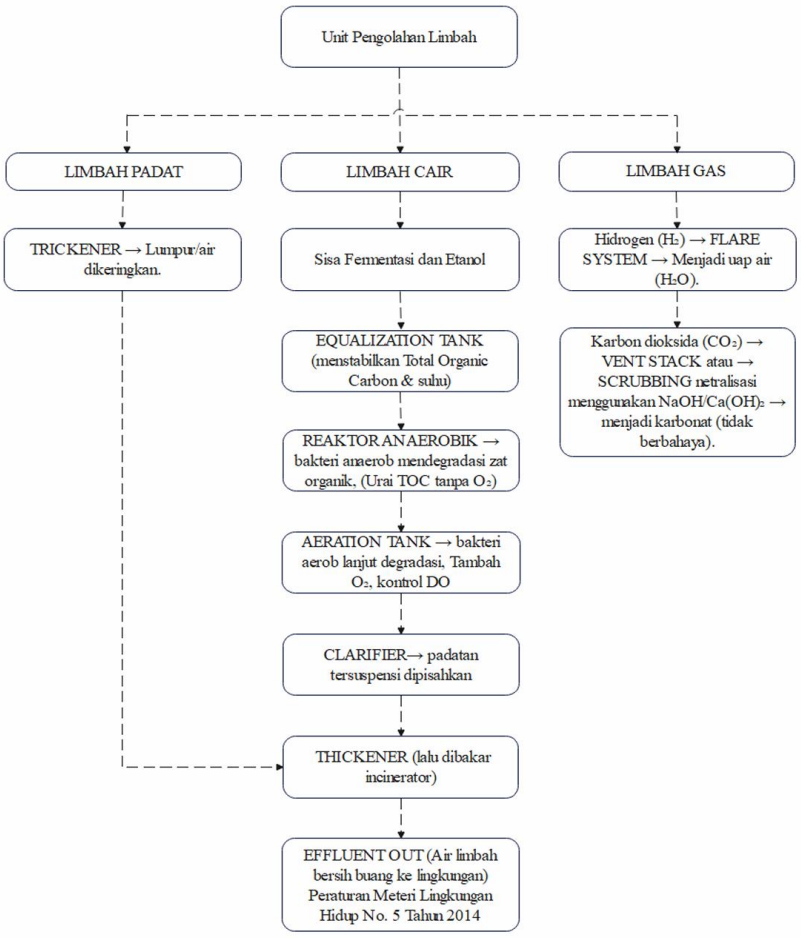
4. Utilitas

Utilitas merupakan unit pendukung yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan proses produksi dalam pabrik. Utilitas perlu dirancang sesuai kebutuhan sehingga proses berjalan dengan baik. Berdasarkan kebutuhannya, utilitas pabrik biobutanol diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Unit pengadaan steam
2. Unit pengolahan air
3. Unit pembangkit tenaga listrik
4. Unit bahan bakar
5. Unit pengolahan limbah

Kebutuhan air sanitasi sebanyak 18,42 m3/hari, kebutuhan air umpan boiler 6363,99 m3/hari, kebutuhan air proses 6179 m3/hari, kebutuhan air pendingin sebanyak 91.311,68 m^3/hari, dan kebutuhan steam 153.457,87 m3/hari. Kebutuhan listrik pada pabrik biobutanol akan disuplai dari Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) berkapasitas 25 MW yang berjarak 70 km dari lokasi pendirian pabrik biobutanol. Dengan total kebutuhan daya sebanyak 105,39 kWh/Tahun. Selain itu, akan digunakan suplai daya cadangan dengan menggunakan diesel (generator) untuk mendukung kondisi gangguan pemadaman atau maintenance penyedia listrik utama dengan daya 10241,1 kWh. Bahan bakar yang digunakan berupa minyak diesel dengan total kebutuhan sebesar 16828,9 lb/jam.

Setiap proses pengolahan bahan baku menjadi produk di pabrik biobutanol menghasilkan limbah yang perlu dikelola dengan baik untuk menghindari pencemaran lingkungan.



Gambar 3. *Block Flow Diagram* Pengolahan Limbah

5. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi dapat dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui layak atau tidak berdirinya suatu pabrik yang telah dirancang. Beberapa hal yang perlu dilakukan analisi perhitungan dalam evaluasi ekonomi antara lain Total Capital Investment (TCI) atau total modal, Total Production Cost (TPC) atau biaya yang dibutuhkan untuk produksi, Pay Out Time (POT) atau keuntungan bersih, waktu yang dibutuhkan untuk pengembalian, Rate of Investement (ROI) atau laju pengembalian modal, dan Break Even Point (BEP). Total Capital Investment (TCI) adalah sejumlah dana yang dibutuhkan dalam mendirikan sebuah pabrik, meliputi Fixed Capital Investment (FCI) dan Working Capital Investment (WCI). Total Production Cost (TPC) adalah sejumlah biaya yang dibutuhkan dalam kegiatan operasional suatu pabrik. Menurut KBBI, keuntungan di definisikan sebagai mendapatkan keuntungan (laba). Lama waktu pengembalian merupakan waktu yang diperlukan suatu pabrik dalam mengembalikan sejumlah modal yang digunakan. Dalam perancangan pabrik ini waktu maksimal yang digunakan yaitu setengah dari umur pabrik (10 tahun). Laju pengembalian modal (ROI) adalah rasio untung dan rugi dari suatu investasi yang dibandingkan dengan jumlah uang yang diinvestasikan. Nilai ROI harus lebih besar dari pada bunga bank untuk dapat dikatakan pabrik layak didirikan. Bunga bank yang ada pada perhitungan ini adalah 8,5% yang berasal dari Bank BRI. Break Even Point (BEP) adalah kapasitas dimana pabrik tidak mendapatkan keuntungan atau mengalami kerugian atau dengan kata lain hasil penjualan sama dengan ongkos produksi. Nilai BEP harus di antara range 40% s/d 60% untuk dapat dikatakan pabrik layak didirikan. Hasil evaluasi ekonomi pabrik biobutanol dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2. Evaluasi Ekonomi Pabrik

Parameter	Nilai	Kesimpulan
Total modal	Rp. 4.360.697.008.452	
Biaya produksi	Rp. 2.447.695.538.180	
POT	2,78 tahun	Layak
ROI	31,32 %	Layak
BEP	41,2 %	Layak

6. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan perhitungan yang terdapat pada bab sebelumnya, dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut:

1. Pabrik biobutanol berlokasi di Desa Mengkapan, Kecamatan Sungai Apit, Kabupaten Siak, Provinsi Riau.
2. Bahan baku berupa TKKS yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan produksi pada pabrik ini adalah 71.693,05 kg/jam dengan produk biobuyanol 99,8% sebanyak 3.030 kg/jam.
3. Pabrik ini direncanakan beroperasi secara kontinyu selama 330 hari/tahun dan 24 jam/hari.
4. Berdasarkan evaluasi ekonomi dapat disimpulkan bahwa pabrik biobutanol dari TKKS dengan kapasitas 24.000 ton/tahun ini layak untuk didirikan.

Daftar Pustaka

Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2018). Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan Di Indonesia. DINAMIC: Directory Journal of Economic, 2(3), 865–884.

Ave, G. D., & Ii, T. A. A. (2018). Techno-economic comparison of Acetone-Butanol-Ethanol fermentation using various extractants.

Bankar, S. B., Survase, S. A., Ojamo, H., & Granström, T. (2013). Biobutanol: the outlook of an academic and industrialist. Rsc Advances, 3(47), 24734–24757.

Buehler, E. A., & Mesbah, A. (2016). Kinetic study of acetone-butanol-ethanol fermentation in continuous culture. PLoS ONE, 1*1*(8), 1–21. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158243.

Darmayanti, R. F., Muharja, M., Zhao, T., Gao, M., Tashiro, Y., Sakai, K., & Sonomoto, K. (2022). Techno-Economic Analysis of Extractive Butanol Fermentation by Immobilized Cells with Large Extractant Volume. Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan, *6*(2), 99–111. https://doi.org/10.33795/jtkl.v6i2.337.

Gallazzi, A., Branska, B., Marinelli, F., & Patakova, P. (2015). Continuous production of n-butanol by Clostridium pasteurianum DSM 525 using suspended and surface-immobilized cells. Journal of Biotechnology, *216*, 29–35. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.10.008.

Ibrahim, M. F., Kim, S. W., & Abd-Aziz, S. (2018). Advanced bioprocessing strategies for biobutanol production from biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(September 2017), 1192–1204. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.060.

Ibrahim, M. F., Ramli, N., Bahrin, E. K., & Abd-Aziz, S. (2017). Cellulosic biobutanol by Clostridia: Challenges and improvements. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 1241–1254.

IEA. (2024). Oil Market Report - December 2024.

Jiang, Y., Lv, Y., Wu, R., Sui, Y., Chen, C., Xin, F., Zhou, J., Dong, W., & Jiang, M. (2019). Current status and perspectives on biobutanol production using lignocellulosic feedstocks. Bioresource Technology Reports, 7, 100245.

Muharja, M., Darmayanti, R. F., Fachri, B. A., Palupi, B., Rahmawati, I., Rizkiana, M. F., Amini, H. W., Putri, D. K. Y., Setiawan, F. A., & Asrofi, M. (2023). Biobutanol production from cocoa pod husk through a sequential green method: Depectination, delignification, enzymatic hydrolysis, and extractive fermentation. Bioresource Technology Reports, 21, 101298.

Muharja, M., Darmayanti, R. F., Fachri, B. A., Palupi, B., Rahmawati, I., Rizkiana, M. F., Amini, H.W,.

Putri, D. K. Y., Setiawan, F. A., Asrofi, M., Widjaja, A., & Halim, A. (2023). Biobutanol Production from Cocoa Pod Husk Through a Sequential Green Method: Depectination, Delignification, Enzymatic Hydrolysis, and Extractive Fermentation. Bioresource Technology Reports, 21(November 2022), 101298. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101298.

Nakayama, S., Kiyoshi, K., Kadokura, T., & Nakazato, A. (2011). Butanol production from crystalline cellulose by cocultured Clostridium thermocellum and Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4. Applied and Environmental Microbiology, 77(18), 6470–6475.

Nithyanandan, K., Zhang, J., Li, Y., Wu, H., Lee, T. H., Lin, Y., & Chia-fon, F. L. (2016). Improved SI engine efficiency using acetone–butanol–ethanol (ABE). Fuel, 174, 333–343.

Noomtim, P., & Cheirsilp, B. (2011). Production of butanol from palm empty fruit bunches hydrolyzate by Clostridium acetobutylicum. Energy Procedia, 9, 140–146.

Obergruber, M., Hönig, V., Procházka, P., Kučerová, V., Kotek, M., Bouček, J., & Mařík, J. (2021). Physicochemical properties of biobutanol as an advanced biofuel. Materials, 14(4), 1–21. https://doi.org/10.3390/ma14040914.

Prakash, A., Dhabhai, R., & Sharma, V. (2015). A Review on Fermentative Production of Biobutanol From Biomass. Current Biochemical Engineering, 3(1), 37–46. https://doi.org/10.2174/2212711902999150827143437.

Ranjan, A., & Moholkar, V. S. (2012). Biobutanol: science, engineering, and economics. International Journal of Energy Research, *36*(3),277–323. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.1948.

Sánchez-Ramírez, E., Quiroz-Ramírez, J. J., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., & Bonilla-Petriciolet, A. (2015). Process Alternatives for Biobutanol Purification: Design and Optimization. Industrial &

Engineering Chemistry Research, 54(1), 351–358. https://doi.org/10.1021/ie503975g.

Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2018). Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan Di Indonesia. DINAMIC: Directory Journal of Economic, 2(3), 865–884.

Ave, G. D., & Ii, T. A. A. (2018). Techno-economic comparison of Acetone-Butanol-Ethanol fermentation using various extractants.

Bankar, S. B., Survase, S. A., Ojamo, H., & Granström, T. (2013). Biobutanol: the outlook of an academic and industrialist. Rsc Advances, 3(47), 24734–24757.

Buehler, E. A., & Mesbah, A. (2016). Kinetic study of acetone-butanol-ethanol fermentation in continuous culture. PLoS ONE, 11(8), 1–21. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158243.

Darmayanti, R. F., Muharja, M., Zhao, T., Gao, M., Tashiro, Y., Sakai, K., & Sonomoto, K. (2022). Techno-Economic Analysis of Extractive Butanol Fermentation by Immobilized Cells with Large Extractant Volume. Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan, 6(2), 99–111. https://doi.org/10.33795/jtkl.v6i2.337.

Gallazzi, A., Branska, B., Marinelli, F., & Patakova, P. (2015). Continuous production of n-butanol by Clostridium pasteurianum DSM 525 using suspended and surface-immobilized cells. Journal of Biotechnology, 216, 29–35. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.10.008.

Ibrahim, M. F., Kim, S. W., & Abd-Aziz, S. (2018). Advanced bioprocessing strategies for biobutanol production from biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(September 2017), 1192–1204. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.060.

Ibrahim, M. F., Ramli, N., Bahrin, E. K., & Abd-Aziz, S. (2017). Cellulosic biobutanol by Clostridia: Challenges and improvements. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 1241–1254.

IEA. (2024). Oil Market Report - December 2024.

Jiang, Y., Lv, Y., Wu, R., Sui, Y., Chen, C., Xin, F., Zhou, J., Dong, W., & Jiang, M. (2019). Current status and perspectives on

biobutanol production using lignocellulosic feedstocks. Bioresource Technology Reports, 7, 100245.

Muharja, M., Darmayanti, R. F., Fachri, B. A., Palupi, B., Rahmawati, I., Rizkiana, M. F., Amini, H. W., Putri, D. K. Y., Setiawan, F. A., & Asrofi, M. (2023). Biobutanol production from cocoa pod husk through a sequential green method: Depectination, delignification, enzymatic hydrolysis, and extractive fermentation. Bioresource Technology Reports, 21, 101298.

Muharja, M., Darmayanti, R. F., Fachri, B. A., Palupi, B., Rahmawati, I., Rizkiana, M. F., Amini, H.W,.

Putri, D. K. Y., Setiawan, F. A., Asrofi, M., Widjaja, A., & Halim, A. (2023). Biobutanol Production from Cocoa Pod Husk Through a Sequential Green Method: Depectination, Delignification, Enzymatic Hydrolysis, and Extractive Fermentation. Bioresource Technology Reports, 21(November 2022), 101298. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101298.

Nakayama, S., Kiyoshi, K., Kadokura, T., & Nakazato, A. (2011). Butanol production from crystalline cellulose by cocultured Clostridium thermocellum and Clostridium saccharoperbutylacetonicum N1-4. Applied and Environmental Microbiology, 77(18), 6470–6475.

Nithyanandan, K., Zhang, J., Li, Y., Wu, H., Lee, T. H., Lin, Y., & Chia-fon, F. L. (2016). Improved SI engine efficiency using acetone–butanol–ethanol (ABE). Fuel, 174, 333–343.

Noomtim, P., & Cheirsilp, B. (2011). Production of butanol from palm empty fruit bunches hydrolyzate by Clostridium acetobutylicum. Energy Procedia, 9, 140–146.

Obergruber, M., Hönig, V., Procházka, P., Kučerová, V., Kotek, M., Bouček, J., & Mařík, J. (2021). Physicochemical properties of biobutanol as an advanced biofuel. Materials, 14(4), 1–21. https://doi.org/10.3390/ma14040914.

Prakash, A., Dhabhai, R., & Sharma, V. (2015). A Review on Fermentative Production of Biobutanol From Biomass. Current Biochemical Engineering, 3(1), 37–46. https://doi.org/10.2174/2212711902999150827143437.

Ranjan, A., & Moholkar, V. S. (2012). Biobutanol: science, engineering, and economics. International Journal of Energy Research, 36(3), 277–323. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.1948.

Sánchez-Ramírez, E., Quiroz-Ramírez, J. J., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., & Bonilla-Petriciolet, A. (2015). Process Alternatives for Biobutanol Purification: Design and Optimization. Industrial &

Engineering Chemistry Research, 54(1), 351–358. https://doi.org/10.1021/ie503975g.

Saputro, D. T., & Kurniawan, R. (2019). Prarancangan Pabrik n-Butanol Menggunakan Proses Hidrogenasi n-Butiraldehid dengan Katalis Copper Zinc Oxide Kapasitas Produksi 5000 ton/tahun. Jurnal Tugas Akhir Teknik Kimia, 2(1), 1–7.

Shang, Z., Yu, X., Ren, L., Wei, G., Li, G., Li, D., & Li, Y. (2020). Comparative study on effects of injection mode on combustion and emission characteristics of a combined injection n-butanol/gasoline SI engine with hydrogen direct injection. Energy, 213, 118903. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118903.

Solana, M., Qureshi, N., Bertucco, A., & Eller, F. (2016). Recovery of butanol by counter-current carbon dioxide fractionation with its potential application to butanol fermentation. Materials, 9(7). https://doi.org/10.3390/ma9070530.

Suprihatin, Sofiati, N., & Prastiyo, N. E. (2020). Biobutanol dari Glucose Off Grade dengan Proses Fermentasi Menggunakan Clostridium Acetobutylicum. Seminar Nasional Teknik Kimia Soebardjo Brotohardjono XVI, v(September), 1–5.

Susanto, R., Samadhi, T. W., Wulandari, W., & Amraini, S. Z. (2022). Analisis Ekonomi Awal Proses Produksi Biobutanol dari Tandan Kosong Sawit dengan Proses Hidrolisis dan Fermentasi Secara Terpisah. Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik, 21(2), 124–134. https://doi.org/10.55893/jt.vol21no2.447.

Zikrillah, M., Khotimah, H., Herdianto, D. N., (2023). Peningkatan Produksi Biobutanol dengan Penambahan Surfaktan pada Fermentasi Ekstraksi dan Hidrolisis Enzimatik Menggunakan Clostridium. The Journalish: Social, 4(5), 108–119.

Ziolkowska, J. R. (2020). Biofuels Technologies: An Overview of Feedstocks, Processes, and Technologies. In Biofuels for a More Sustainable Future (pp. 1–9).