

Inovasi Produksi Bioetanol Berbasis Lignoselulosa Limbah Kulit Kopi (*Coffea sp.*) dengan Konsep Biorefinery Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae*

(Innovation in Lignocellulose-Based Bioethanol Production from Coffee Skin Waste (*Coffea sp.*) by Biorefinery Method Using *Saccharomyces cerevisiae*)

Haikal Azmi¹, Nazla Fauziyah Octaviani¹, Musa'adah^{1*}

¹ Departemen Biologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung, Bandung, 40614, Indonesia

* Correspondence: musaadah@uinsgd.ac.id

Abstract: Indonesia is the fourth largest coffee exporter in the world, with a market share of around 11%. In 2021, Indonesia's coffee production reached 765,415 tons, generating 382,000 tons of coffee husk waste. However, only about 2% of this amount is utilized, coffee skins contain 20-50% cellulose which has the potential to be used as a substrate for bioethanol production, a renewable energy source. This study aims to explore innovations in bioethanol production from lignocellulosic coffee pulp waste, particularly through a biorefinery method using *Saccharomyces cerevisiae* as fermentation agent. The research employs an exploratory descriptive approach, by reviewing relevant scientific articles. The process of converting lignocellulosic substrates into ethanol consists of four main stages in bioethanol production, namely: (1) pretreatment, which can be done physically, chemically, or biologically; (2) hydrolysis of polymers such as cellulose and hemicellulose into simple sugars such as hexose and silose; (3) fermentation of sugars by microorganisms to produce ethanol; and (4) separation and purification of the produced ethanol. The utilization of the biorefinery concept in bioethanol production not only facilitates the conversion of biomass into bioethanol, but also enables the production of other high-value products, such as biohydrogen (environmentally friendly fuel), furfural (resin and composite industry), HMF (bioplastic precursor and furan fuel), xylitol (sweetener in food and pharmaceutical industries), vinasse (organic fertilizer and biomass fuel), organic acids (chemical and pharmaceutical industries), and microbial biomass (high-protein animal feed).

Keywords: Bioethanol, Biorefinery, Coffee Skin, Lignocellulosic Waste, *Saccharomyces cerevisiae*

Citation: Azmi *et al.* 2025. Inovasi Produksi Bioetanol Berbasis Lignoselulosa Limbah Kulit Kopi (*Coffea sp.*) dengan Konsep Biorefinery Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae*. *Curr. Biochem.* 12(1):13-

Received: October 26th, 2024

Revised: August 8th, 2025

Accepted: August 11th, 2025

Published: August 13th, 2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

pISSN: 2355-7877

eISSN: 2355-7931

Abstrak: Indonesia merupakan pengekspor kopi terbesar keempat di dunia, dengan pangsa pasar sekitar 11%. Pada tahun 2021, produksi kopi Indonesia mencapai 765.415 ton, menghasilkan 382.000 ton limbah kulit kopi. Namun, hanya sekitar 2% dari jumlah tersebut yang dimanfaatkan. Padahal kulit kopi masih mengandung 20-50% selulosa yang dapat berpotensi untuk digunakan sebagai substrat dalam produksi bioetanol, sebuah sumber energi terbarukan. Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi inovasi produksi bioetanol dari limbah lignoselulosa kulit kopi, khususnya menggunakan metode biorefinery menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* sebagai agen fermentasi. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif eksploratif, dengan melakukan review terhadap artikel ilmiah yang relevan. Berdasarkan hasil review diketahui bahwa, proses konversi substrat lignoselulosa menjadi bioetanol terdiri dari empat tahap utama dalam produksi bioetanol, yaitu: (1) pretreatment (delignifikasi), yang dapat dilakukan secara fisik, kimiawi, atau biologis; (2) hidrolisis polimer seperti selulosa dan hemiselulosa menjadi gula sederhana seperti heksosa dan silosa; (3) fermentasi gula oleh mikroorganisme untuk menghasilkan etanol; dan (4) pemisahan dan pemurnian etanol yang telah diproduksi. Pemanfaatan konsep biorefinery dalam produksi bioetanol tidak hanya memfasilitasi konversi biomassa menjadi bioetanol, tetapi juga memungkinkan dihasilkan produk bernilai tinggi lainnya, seperti biohidrogen (bahan bakar ramah lingkungan), furfural (industri resin dan komposit), HMF (prekursor bioplastik dan bahan bakar furan), xylitol (pemanis dalam industri makanan dan farmasi), vinasse (pupuk organik dan bahan bakar biomassa), asam organik (industri kimia dan farmasi), serta biomassa mikroba (pakan ternak berprotein tinggi).

Kata kunci: Bioetanol, Biorefinery, Kulit Kopi, Limbah Lignoselulosa, *Saccharomyces cerevisiae*

1. Pendahuluan

Kebutuhan terhadap energi (bahan bakar) di dunia, termasuk di Indonesia semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan teknologi. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Indonesia telah melakukan impor bahan bakar minyak dan gas (migas). Jumlah impor bahan bakar minyak tersebut diketahui mengalami peningkatan sebesar 2,6% setiap tahunnya. Data menunjukkan bahwa kuantitas impor bahan bakar per hari mencapai 350.000-400.000 barel atau sekitar 40 juta dolar (Kementerian ESDM, 2022).

Disisi lain, produksi bahan bakar di Indonesia masih didominasi oleh pemanfaatan bahan bakar fosil yang termasuk kedalam sumber energi tak terbarukan (*non renewable*) dengan persentase 71% (Muhamad, 2023). Sementara, cadangan minyak bumi di Indonesia hingga tahun 2021 hanya 4,17 ribu MMSTB (Million Stock Tank Barrels) (*Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action 2022*). Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2021 cadangan minyak Indonesia hanya tersedia untuk 9,5 tahun mendatang (Kementerian ESDM, 2021). Sehingga, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil ini menjadi masalah besar. Solusi yang dapat dilakukan adalah dengan mencari sumber energi alternatif yang terbarukan (*renewable*). Salah satunya dengan memanfaatkan bioetanol berbasis biomassa lignoselulosa sebagai bahan pengganti bahan bakar fosil.

Pemanfaatan energi terbarukan yang ramah lingkungan juga merupakan salah satu visi Indonesia Emas 2045 (Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional, 2023) dan merupakan upaya implementasi Peraturan Presiden No.5 Tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional untuk memanfaatkan sumber daya alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak (Presiden Republik Indonesia, 2006). Bioetanol diproduksi melalui proses fermentasi gula sederhana yang terdapat pada bahan alami (Syaiiful et al., 2022). Bioetanol merupakan salah satu sumber energi baru yang memiliki kelebihan dengan kandungan oksigen yang lebih tinggi (35%) dan bersifat ramah lingkungan karena emisi gas yang dihasilkan rendah (19-20%) (Ana et al., 2015). Adapun bahan yang diperlukan dalam pembuatan bioetanol merupakan bahan alami yang kaya akan lignoselulosa (Rifa'i et al., 2022), salah satunya limbah kulit kopi.

Limbah kulit kopi merupakan salah satu sumber penghasil lignoselulosa tertinggi dengan kuantitas pemanfaatan yang sangat minim, yakni hanya sekitar 2% dari limbah yang dihasilkan, yaitu sebesar 7.640 ton dari 382.000 ton limbah. Apabila limbah kulit kopi tidak diolah, maka dapat menyebabkan pencemaran lingkungan (Putri et al., 2017). Di sisi lain, kulit kopi diketahui masih memiliki kandungan senyawa yang bermanfaat. Salah satunya adalah kandungan selulosa yang terdapat dalam limbah kulit kopi mencapai sekitar 63% (Irwan et al., 2023). Kandungan selulosa ini dapat dimanfaatkan untuk pembuatan bioetanol. Bioetanol adalah produk hasil konversi selulosa dalam substrat melalui proses fermentasi dengan bantuan mikroorganisme tertentu (khamir) (Yuniarti et al., 2018). Salah satu spesies khamir yang dapat digunakan sebagai starter atau agen hayati dalam produksi bioetanol adalah *Saccharomyces cerevisiae* (Simbolon et al., 2018).

Saccharomyces cerevisiae merupakan mikroorganisme eukariotik bersel satu, tidak berklorofil, memiliki sifat toleran terhadap suhu yang tinggi, dan memiliki sifat stabil serta adaptif (Kustyawati, 2018). *Saccharomyces cerevisiae* memiliki keunggulan dalam mengoptimalkan proses produksi bioetanol dengan sukrosa sebagai nutrisi utama, sehingga proses fermentasi berlangsung secara optimal (Cahyaningtyas & Sindhuwati, 2021) penelitian yang dilakukan oleh Harsono et al., (2015), didukung dengan kemampuannya untuk menghasilkan bioetanol tertinggi-mencapai 65%, dalam waktu fermentasi yang singkat selama 2 hari kopi arabika *pulp*. Hasil samping dari bioetanol dapat dimanfaatkan kembali melalui metode biorefinery.

Metode biorefinery merupakan pendekatan terintegrasi dan berkelanjutan untuk mengolah biomassa, seperti limbah lignoselulosa dari kulit kopi, menjadi beragam produk yang bernilai tinggi dan dapat dipasarkan, mencakup pangan, pakan, bahan kimia, material, serta energi dalam bentuk bioetanol, biogas, listrik, panas, maupun pupuk organik (de Jong, et al., 2020).

Pendekatan ini sejalan dengan konsep ekonomi sirkular, di mana limbah dari satu proses dapat diolah menjadi bahan baku untuk proses lain, sehingga meningkatkan efisiensi dan meminimalkan limbah. Penggunaan limbah sebagai bahan baku bioetanol juga mengurangi ketergantungan pada bahan baku nabati yang bersaing dengan pangan, serta mendukung diversifikasi energi di Indonesia dan pengurangan emisi gas rumah kaca (Masruroh & Fardian, 2022).

Keberhasilan produksi bioetanol salah satunya dapat dipengaruhi substrat, suhu, waktu fermentasi, pH dan jumlah mikroorganisme (khamir) yang digunakan atau ditambahkan selama proses fermentasi (Fitria & Lindasari, 2021). Konsentrasi khamir yang tepat dengan jumlah substrat yang digunakan akan menghasilkan produk bioetanol yang optimum. Jika khamir yang ditambahkan terlalu sedikit atau terlalu banyak, maka proses produksi bioetanol menjadi kurang optimal (Rahmasari *et al.*, 2022). Sehingga konsentrasi khamir yang paling optimum dalam menghasilkan bioetanol juga perlu diketahui agar produksi bioetanol dari biomassa lignoselulosa menjadi lebih efektif dan efisien. Selain itu, dalam produksi bioethanol berbasis lignoselulosa juga dipengaruhi oleh metode *pretreatment*. Hal ini karena tujuan *pretreatment* adalah untuk mengurangi atau menghilangkan berbagai senyawa yang dapat menghambat laju hidrolisis dan dapat meningkatkan produksi bioetanol (Aransiola *et al.*, 2020). Berdasarkan paparan tersebut, maka inovasi pembuatan bioetanol dari limbah kulit kopi dengan metode biorefinery menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* dianggap sebagai salah satu inovasi pengolahan limbah organik yang bersifat efektif dan menjadi inovasi efisien untuk mengurangi ketergantungan bahan fosil dan sebagai implementasi energi terbarukan ramah lingkungan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan *literature review*. Proses pencarian literatur difokuskan pada studi yang diterbitkan dalam kurun waktu 5-10 tahun terakhir, kecuali untuk penelitian klasik yang sangat relevan dengan topik. Sumber literatur yang digunakan mencakup jurnal bereputasi baik secara nasional maupun internasional, dengan memanfaatkan basis data akademik seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan PubMed. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian mencakup bioetanol kulit kopi, limbah kulit kopi, dan biorefinery. Literatur yang terpilih diseleksi berdasarkan relevansi topik, kualitas penelitian, metode yang digunakan, serta hasil penelitian yang berkaitan dengan fermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* dan penerapan teknologi biorefinery dalam produksi bioetanol dari lignoselulosa.

3. Hasil

3.1. Komponen Limbah Kulit Kopi

Limbah lignoselulosa yang dihasilkan selama pemrosesan kopi merupakan sumber yang menjanjikan untuk produksi bioetanol sekaligus sebagai aplikasi pemanfaatan energi terbarukan. Komponen utama, termasuk selulosa, hemiselulosa, dan lignin, secara signifikan mempengaruhi keberhasilan konversi biomassa menjadi bioetanol. Penelitian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kandungan lignoselulosa pada dua jenis kopi, yaitu kopi arabika dan kopi robusta. Perbedaan ini memengaruhi tingkat konversi menjadi glukosa dan produksi bioetanol. Seperti yang ditunjukkan oleh Seftian *et al.* (2012), selulosa yang berasal dari limbah kopi dapat difermentasi menjadi etanol (bioethanol berbasis lignoselulosa) melalui proses hidrolisis enzimatis. Selain itu, kandungan lignin yang lebih tinggi pada kopi robusta menunjukkan potensi yang lebih baik untuk produksi bioetanol (Singh *et al.*, 2023) dibandingkan dengan kopi arabika. **Tabel 1.** menggambarkan komposisi kimia dari limbah kopi arabika dan robusta, yang menggambarkan proporsi masing-masing komponen.

Tabel 1. Komposisi lignoselulosa pada kopi arabika dan robusta

Jenis Kopi	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	Referensi
Kopi arabika	30-40	20-30	15-25	Ballesteros, <i>et.al.</i> (2014)
Kopi robusta	25-35	20-25	20-30	Singh, <i>et.al.</i> (2023)

Berbagai penelitian telah mengkaji potensi limbah kulit kopi sebagai bahan baku bioetanol. Selain perbedaan jenis kopi, nyatanya kulit kopi yang terdiri dari *husk* (kulit terluar) dan *pulp* (kulit daging buah) memiliki kandungan lignoselulosa yang berbeda-beda. Kandungan ini menentukan proses pengolahan lebih lanjut, terutama pada *pretreatment* dan fermentasi. **Tabel 2** menunjukkan variasi komposisi lignoselulosa pada *husk* dan *pulp* berdasarkan beberapa studi yang dapat berpengaruh terhadap potensi kulit kopi sebagai bahan baku bioetanol.

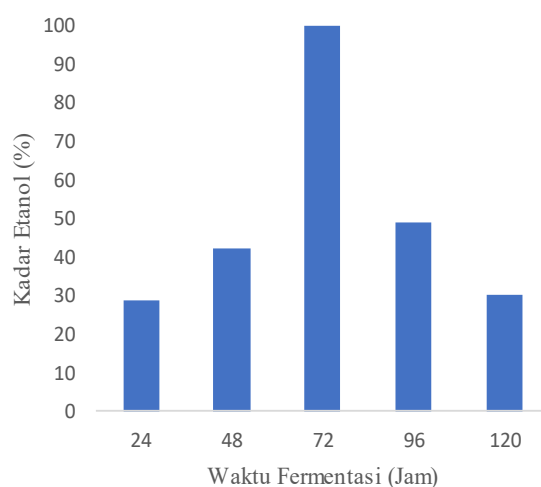
Tabel 2. Komposisi lignoselulosa pada *husk* dan *pulp*

Bagian kulit kopi	Selulosa (wt%)	Hemiselulosa (wt%)	Lignin (wt%)	Referensi
<i>Husk</i>	25.7	14.6	17.6	Nanda, <i>et al.</i> (2014)
<i>Husk</i>	26.5	25.5	33.5	de Carvalho Oliveira, <i>et.al.</i> , (2018)
<i>Husk</i>	39	12.6	26.2	Van Nguyen, <i>et al.</i> (2023)
<i>Pulp</i>	25.88	3.60	20.07	Do Viet, <i>et al.</i> (2019)
<i>Pulp</i>	35	46	19	Parajuli, <i>et al.</i> (2015)

3.2. Produksi Bioetanol

Pengolahan kulit kopi sebagai bahan baku produksi bioetanol secara umum terdiri dari 2 (dua) tahapan utama yaitu: 1) persiapan bahan baku untuk produksi bioetanol (*pretreatment* dan *hidrolisis*); dan 2) fermentasi. Keduanya bertujuan untuk mengkonversi lignoselulosa menjadi bioetanol. Proses *pretreatment* dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti secara fisik/mekanis, menggunakan termal/panas, secara biologis hingga penggunaan bahan kimia (secara kimiawi). Adapun proses fermentasi dipengaruhi oleh faktor-faktor penentu keberhasilan fermentasi, seperti jumlah mikroorganisme, pH, waktu dan suhu. **Tabel 3.** merangkum beberapa penelitian yang terkait dengan produksi bioetanol dari limbah kulit kopi yang dibedakan berdasarkan metode *pretreatment*, kondisi fermentasi, hasil penelitian dan referensi yang relevan. Data ini memberikan gambaran umum tentang berbagai pendekatan yang telah diuji untuk memaksimalkan produksi bioetanol dari limbah kulit kopi, baik dari jenis arabika maupun robusta.

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dari lima referensi mengenai produksi bioetanol (**Gambar 1**), penelitian Listiandari & Herdyastuti (2022) menunjukkan hasil yang paling optimal.



Gambar 1. Kadar etanol kopi robusta dengan variasi waktu fermentasi (Listiandari, & Herdyastuti, 2022)

Tabel 3. Penelitian produksi bioetanol dari kulit kopi

Jenis Bahan Baku	Metode <i>Pretreatment</i>	Hidrolisis	Kondisi Fermentasi	Hasil Penelitian	Referensi
Kulit kopi arabika (<i>husk</i>)	<i>Pretreatment</i> mekanis dan termal meliputi pembersihan, pengeringan dengan cahaya matahari dan oven, penghalusan, dan pengayakan kulit kopi.	-	Massa yeast 6%, 12%, 18%; waktu 2, 4, dan 6 hari dalam suhu ruang	Kadar bioetanol tertinggi 5,533%, densitas bioetanol tertinggi 0,8324 gr/ml, dan viskositas tertinggi adalah 1,09 cP	Azrin <i>et al.</i> (2023)
Kulit kopi arabika (<i>pulp</i>)	Pengeringan oven pada 60°C selama 48 jam, kemudian digiling	Asam sulfat (H ₂ SO ₄)	Fermentasi menggunakan <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , dengan variasi massa ragi (40g dan 80g), selama 1 hingga 3 hari dalam suhu ruang	Konsentrasi bioetanol tertinggi yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah 60.2%, yang diperoleh pada hari ke-2 dengan massa ragi sebanyak 80 gram	Harsono, <i>et al.</i> (2015)
Kulit kopi robusta (<i>pulp</i>)	<i>Pretreatment</i> alkali dengan 0.2 g NaOH/g biomass pada 120°C selama 20 menit di sistem microwave	Enzimatis (enzim <i>Viscozyme Cassava C</i>)	Fermentasi dengan <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (3.10 ⁸ sel/ml) pada 30°C selama 72 jam	Konsentrasi etanol tertinggi yang dihasilkan adalah 11.28 g/l serta konversi glukosa ke etanol: 72.55%	Do Viet, <i>et al.</i> (2019)
Kulit kopi robusta (<i>husk</i>)	Delignifikasi dengan NaOH (6%, 8%, 10%)	Biologis dengan SSF (<i>Simultaneous Saccharification and Fermentation</i>).	Metode SSF (<i>Simultaneous Saccharification and Fermentation</i>). Fermentasi dengan 4 gram; <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ; Waktu fermentasi: 24, 48, 72, 96, 120 jam; suhu ruang	Kadar bioetanol tertinggi adalah 72 jam dengan kadar bioetanol mencapai 100%.	Listiandari & Herdyastuti, (2022).
Kulit kopi arabika (<i>pulp</i>)	<i>Pretreatment</i> alkali dengan NaOH (4%)	Hidrolisis enzimatis	Fermentasi dengan <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada 30°C selama 48 jam	Hasil etanol tertinggi 13,66 g/L, dengan yield 0,4 g etanol/g, 38,13 g/L gula pereduksi, dan 27,02 g/L glukosa. <i>Pretreatment</i> optimal: NaOH (4%), 25 menit	Menezes (2014)

4. Pembahasan

4.1. Komponen Limbah Kulit Kopi

Menurut Hutapea *et al.*, 2017, kulit kopi mengandung selulosa 46,3%, hemiselulosa 35%, lignin 18,8%, dan abu 8,2%. Lebih lanjut diketahui bahwa, kulit kopi arabika mengandung 30-40% selulosa, 20-30% hemiselulosa, dan 15-25 lignin. Adapun, kopi robusta mengandung selulosa 25-35%, hemiselulosa 20-25%, dan lignin 30% (Ballesteros, *et al.*, 2014 & Singh, *et al.*, 2023).

Variasi antara kulit kopi arabika dan robusta dalam komposisi lignoselulosa berpengaruh terhadap hasil konversi bioetanol. Kulit kopi arabika cenderung memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang lebih tinggi, yang mempermudah pemecahan gula sederhana selama proses hidrolisis dan fermentasi. Hal ini sesuai dengan hasil pada **Tabel 1**, di mana kulit kopi arabika memberikan hasil bioetanol yang lebih tinggi dibandingkan dengan robusta dalam kondisi fermentasi serupa.

Berdasarkan **Tabel 2**, didapatkan bahwa limbah kopi bagian *husk* memiliki kuantitas selulosa lebih besar daripada limbah *pulp* kulit kopi. Hal tersebut disebabkan karena bagian *husk* kulit kopi memiliki struktur yang lebih kaku, sehingga kuantitas selulosa lebih banyak (Gondim, *et al.*, 2024). Selulosa sebagai komponen utama dinding sel berfungsi untuk memberikan kekuatan pada dinding sel buah kopi (Gibson, 2021). Adapun, *pulp* memiliki kuantitas selulosa yang lebih rendah karena banyak mengandung pektin dan air, sehingga memberikan tekstur lembut pada buah (Biratu, *et al.*, 2024).

Selain itu, kandungan lignin pada *pulp* kulit kopi juga lebih tinggi dibandingkan dengan bagian *husk*. Lignin berfungsi sebagai penguat tambahan namun dapat menghambat enzim selulase. Sehingga, *pulp* kulit kopi memiliki kuantitas selulosa lebih kecil dibandingkan dengan *husk* kulit kopi. Jika dibandingkan berdasarkan tingkat efisiensi pembuatan bioetanol antara bagian *husk* dan *pulp* limbah kulit kopi, maka bahan limbah kulit kopi bagian *husk* lebih efektif dan efisien untuk menghasilkan bioetanol dengan kadar yang lebih tinggi, yaitu 63% (Septiani *et al.*, 2020).

4.2. Produksi Bioetanol dari Kulit Kopi

Limbah kopi, khususnya kulit kopi merupakan salah satu sumber biomassa lignoselulosa yang sangat potensial untuk diolah menjadi bioetanol, energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Berdasarkan data hasil produksi bioetanol dari limbah kulit kopi (**Tabel 3**) menunjukkan variasi yang cukup signifikan tergantung pada jenis bahan baku, metode *pretreatment*, kondisi fermentasi, dan mikroorganisme yang digunakan.

1) Jenis Bahan Baku

Berdasarkan hasil yang didapatkan, setiap jenis bahan baku memiliki kadar lignoselulosa yang berbeda dan berpengaruh terhadap kadar bioetanol yang dihasilkan. Misalnya, kulit kopi kering menghasilkan kadar bioetanol sebesar 5,533% dengan densitas tertinggi 0,8324 g/ml (Azrin *et al.*, 2023), sementara kulit kopi arabika (*pulp*) dapat mencapai konsentrasi bioetanol sebesar 20.6% setelah difermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae* (Harsono *et al.*, 2015).

2) Metode *Pretreatment*

Pretreatment merupakan tahapan penting dalam pengolahan lignoselulosa, yang bertujuan untuk menghilangkan hemiselulosa dan lignin serta merusak ikatan kompleks antara lignin, hemiselulosa, dan selulosa, sehingga meningkatkan luas permukaan dan ukuran pori selulosa agar enzim lebih mudah menembus struktur biomassa dan bekerja secara lebih efisien (Guru *et al.*, 2025).

Berbagai metode *pretreatment* telah dikembangkan, yang secara umum diklasifikasikan menjadi metode fisik, kimia, fisik-kimia, dan biologi. Setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada jenis biomassa dan hasil akhir yang diinginkan. Berdasarkan **Tabel 3**, *pretreatment* yang umum digunakan adalah alkali dengan NaOH.

a. Metode Fisik

Metode fisik seperti *milling* atau penggilingan dikenal efektif dalam memecah bahan lignoselulosa dengan sempurna, namun kelemahan utamanya adalah ketidakmampuan untuk menghilangkan lignin. Hal ini sesuai dengan temuan Mais *et al.* (2002), di mana proses ini

dapat memecah material menjadi partikel yang lebih kecil, tetapi lignin, komponen utama yang menghambat aksesibilitas enzim, tetap ada.

b. Metode kimia

Metode kimia merupakan pretreatment menggunakan reagen asam dan basa, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasan. Pretreatment asam efektif melarutkan hemiselulosa dan mengubahnya menjadi gula, namun dapat menghasilkan senyawa inhibitor yang korosif. Sementara itu, larutan basa efektif melarutkan lignin, tetapi kurang optimal dalam mendegradasi selulosa dan hemiselulosa. Metode kimiawi lain seperti oksidatif mampu menghilangkan lignin dan hemiselulosa, namun menghadapi tantangan selektivitas oksidan dan pembentukan inhibitor. Alternatif lainnya adalah metode organosolv dan ionic liquids yang menawarkan efisiensi dan fleksibilitas, namun memiliki risiko toksikologi (Aransiola, *et al.*, 2020).

c. Metode Fisik dan Kimia

Kombinasi antara metode fisik dan kimia menawarkan metode yang lebih inovatif seperti *steam explosion* dan *microwave-chemical*. *Steam explosion* mampu memberikan daya eksternal yang tinggi, mendepolimerisasi lignin, serta melarutkan hemiselulosa dengan efektif, namun pembentukan senyawa penghambat mikroorganisme menjadi kekurangan. Proses *microwave-chemical* dapat dilakukan dengan cepat dan menghasilkan zat inhibitor yang rendah, tetapi memerlukan kajian lebih lanjut tentang kelayakan teknologi ini (Aransiola *et al.*, 2020).

Metode lainnya, seperti *carbon dioxide explosion* dan *ammonia fiber explosion* (AFEX), menawarkan solusi yang tidak beracun dan meningkatkan luas permukaan, meskipun terkadang metode ini tidak cocok untuk substrat dengan kandungan lignin tinggi (Aransiola *et al.*, 2020). Metode *liquid hot water* (LHW) dilaporkan dapat meningkatkan edibility dan membentuk inhibitor rendah, namun membutuhkan energi dan air yang cukup besar.

d. Metode Biologis

Metode biologis disebut ramah lingkungan, berbiaya rendah, mudah dioperasikan, membutuhkan energi yang rendah, dan hampir tidak menghasilkan senyawa inhibitor. Namun, metode ini memiliki kelemahan berupa kecepatan hidrolisis yang rendah, memerlukan area steril dalam skala besar, pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur berlangsung lambat, waktu proses yang panjang, serta membutuhkan pemantauan yang ketat terhadap aktivitas mikroba selama pretreatment (Capolupo, *et al.*, 2016).

Setiap metode pretreatment memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada karakteristik lignoselulosa dan tujuan produksi. Metode kimia efektif menghidrolisis hemiselulosa dan lignin, namun berisiko menghasilkan inhibitor yang mencemari lingkungan. Sementara itu, metode fisik dan biologis lebih ramah lingkungan, tetapi kurang efisien atau memerlukan waktu lebih lama. Pemilihan metode pretreatment perlu mempertimbangkan efisiensi, biaya, dan dampak lingkungan.

Pretreatment alkali terbukti efektif dalam meningkatkan ketersediaan gula terfermentasi. Penggunaan NaOH 2% dapat menghasilkan hingga 64% total gula (glukosa + xilosa), sedangkan kombinasi pretreatment alkali-etanol mampu meningkatkan hasil menjadi sekitar 84% glukosa dan 80% xilosa. Efektivitas ini berkaitan dengan peningkatan degradasi lignin dan pemecahan struktur kompleks lignoselulosa, yang berdampak langsung pada peningkatan produksi bioetanol. (Li *et al.*, 2020).

3) Kondisi Fermentasi

Kondisi fermentasi, termasuk massa ragi, suhu, dan waktu fermentasi, sangat mempengaruhi hasil bioetanol. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan oleh Harsono *et al.* (2015) menggunakan variasi massa ragi (40 g dan 80 g) dan menemukan bahwa konsentrasi bioetanol tertinggi dicapai pada hari ke-2 fermentasi dengan menggunakan 80 g *Saccharomyces cerevisiae*. Selain itu, fermentasi yang berlangsung pada suhu ruang tanpa kontrol suhu tambahan pada penelitian Azrin *et al.* (2023) juga menghasilkan kadar bioetanol yang baik.

Menurut penelitian lain, *Saccharomyces cerevisiae* merupakan mikroorganisme yang paling umum digunakan dalam fermentasi bioetanol karena kemampuannya untuk mengkonversi gula sederhana menjadi etanol dengan efisiensi tinggi pada kondisi suhu dan pH yang optimal (Gupta & Verma, 2015). Suhu optimal untuk fermentasi oleh *Saccharomyces cerevisiae* biasanya berkisar antara 30°C hingga 35°C. Pada suhu di luar rentang tersebut, aktivitas enzimatis dan

pertumbuhan mikroorganisme dapat menurun, yang berdampak pada hasil produksi bioetanol.

4) Hasil Produksi dan Efisiensi Konversi

Hasil dari berbagai penelitian dalam **Tabel 3** menunjukkan bahwa hasil bioetanol bervariasi tergantung pada jenis bahan baku, metode *pretreatment* dan kondisi fermentasi. Kulit kopi robusta yang diperlakukan dengan *pretreatment* alkali dan fermentasi pada suhu 30°C selama 72 jam memberikan hasil bioetanol sebesar 11.28 g/l dengan konversi glukosa sebesar 72,55% (Listiandari & Herdyastuti, 2022). Di sisi lain, hasil tertinggi sebesar 10% bioetanol diperoleh dari *Robusta Coffee Husk* menggunakan metode SSF (*Simultaneous Saccharification and Fermentation*) dengan kondisi fermentasi selama 24, 48, 72, 96, dan 120 jam (Menezes, 2014).

Penggunaan metode SSF (*Simultaneous Saccharification and Fermentation*) lebih efisien dibandingkan SHF (*Simultaneous Hydrolysis and Fermentation*) karena hidrolisis dan fermentasi berlangsung bersamaan, sehingga glukosa langsung difermentasi dan tidak terakumulasi. Hal ini mempercepat reaksi, meningkatkan derajat sakarifikasi, serta menghasilkan konsentrasi dan yield etanol yang lebih tinggi. SSF juga meningkatkan produktivitas etanol hingga 1,9 kali lipat, memperpendek waktu proses, dan menurunkan konsumsi energi serta biaya produksi (Oehlenschläger et al., 2024).

Dari data yang ada, jelas bahwa jenis bahan baku, metode *pretreatment*, dan kondisi fermentasi memainkan peran penting dalam menentukan hasil produksi bioetanol dari limbah kulit kopi. *Pretreatment* alkali dan fermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae* terbukti sebagai metode yang efektif dalam mengkonversi lignoselulosa menjadi bioetanol. Namun, diperlukan optimalisasi lebih lanjut dalam hal kondisi fermentasi, seperti kontrol suhu dan durasi fermentasi, untuk meningkatkan efisiensi proses. Dengan meningkatnya minat terhadap energi terbarukan, penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan limbah kopi untuk produksi bioetanol dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan bioenergi yang berkelanjutan.

Hasil penelitian Listiandari & Herdyastuti (2022) (**Gambar 1**) mengilustrasikan bahwa pada fermentasi kulit kopi robusta, kadar etanol tertinggi dicapai pada 72 jam fermentasi, yakni sekitar 95%. Hasil ini mencerminkan waktu fermentasi optimal dalam proses produksi bioetanol, lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian lainnya yang menguji waktu fermentasi yang serupa.

Berdasarkan penelitian Listiandari & Herdyastuti (2022), fermentasi kulit kopi robusta menghasilkan kadar etanol yang bervariasi tergantung pada lamanya fermentasi. Pada 24 jam pertama, kadar etanol yang dihasilkan mencapai sekitar 30%. Seiring berjalannya waktu, kadar etanol terus meningkat hingga mencapai puncak pada 72 jam dengan kadar sekitar 95%, menunjukkan bahwa waktu tersebut adalah durasi fermentasi optimal. Namun, setelah 72 jam, kadar etanol mulai menurun, dengan penurunan hingga sekitar 60% pada 96 jam dan turun lebih lanjut hingga 30% pada 120 jam. Penurunan ini disebabkan oleh habisnya substrat yang dikonversi oleh mikroorganisme atau agen fermentasi seperti *Saccharomyces cerevisiae*, sehingga mereka akan menggunakan etanol yang ada untuk menghasilkan energi dan bertahan hidup melalui metabolisme.

Menurut Pramita et al. (2014), penurunan kadar etanol disebabkan oleh perubahan etanol menjadi asam organik, seperti asam asetat atau ester. Asam asetat dapat terbentuk melalui oksidasi etanol menggunakan mikroorganisme. Dalam proses ini, etanol dioksidasi menjadi asetaldehida dan air, yang kemudian dioksidasi lebih lanjut menjadi asam asetat dan air (Khaira & Muria, 2015).

Lama waktu fermentasi berperan penting dalam pola pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* dan jumlah bioetanol yang dihasilkan. Kadar etanol terendah ditemukan pada fermentasi 24 jam, yaitu sekitar 28,94% (**Gambar 1**), karena pada tahap awal, *Saccharomyces cerevisiae* masih dalam fase lag, yang merupakan periode adaptasi sel sebelum metabolisme optimal (Bento et al., 2016), hingga akhirnya produksi etanol meningkat pada 48 jam. Setelah mencapai puncaknya pada 72 jam (**Gambar 1**), kadar etanol mulai menurun pada waktu fermentasi 96 jam dan terus menurun hingga 120 jam. Penurunan ini berkaitan dengan turunnya nilai pH seiring bertambahnya durasi fermentasi (Abun et al., 2024).

4.3. Biorefinery

Biorefinery adalah sebuah konsep yang mengintegrasikan berbagai proses dan teknologi untuk mengubah biomassa menjadi produk yang berharga seperti bahan bakar nabati, bahan

kimia dan energi (Devi, *et al.*, 2022). Proses biorefinery dapat dibedakan menjadi 3 tahapan. Pada tahap I biorefinery hanya mengonversi satu bahan baku menjadi satu produk. Tahap II melibatkan konversi satu bahan baku dengan menggunakan berbagai proses untuk menghasilkan beragam produk. Sementara itu, pada tahap III, yang dikenal sebagai biorefinery terintegrasi, digunakan beragam bahan baku dan teknologi baik secara simultan maupun berurutan untuk menghasilkan berbagai produk bernilai tinggi.

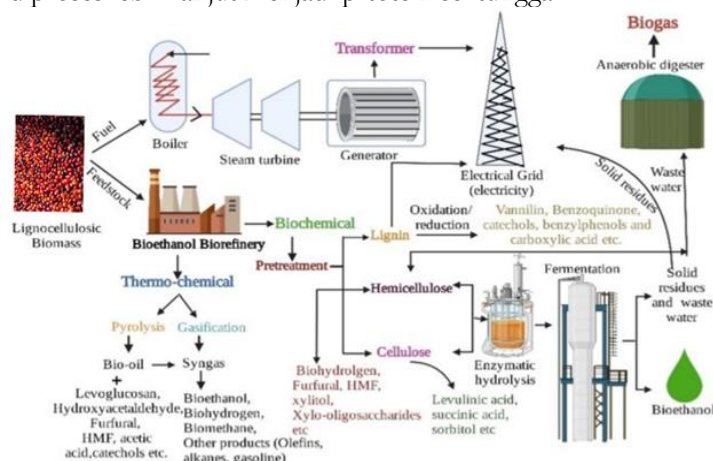
Proses biorefinery yang menggunakan biomassa lignoselulosa sebagai bahan baku utama terbagi ke dalam dua jalur utama, yakni jalur biokimia dan jalur termokimia (**Gambar 2**). Selulosa dan hemiselulosa kemudian dihidrolisis secara enzimatik menjadi gula sederhana, yang selanjutnya difermentasi menjadi bioetanol. Lignin yang tersisa diproses untuk menghasilkan bahan kimia seperti vanilin, serta biogas melalui proses lanjutan. Sementara itu, pada jalur termokimia, biomassa diproses melalui pirolisis dan gasifikasi untuk menghasilkan minyak nabati dan *syngas*, yang dapat dikonversi menjadi berbagai bahan kimia dan bahan bakar nabati lainnya. Energi dan produk sampingan dari kedua jalur tersebut digunakan untuk listrik, bahan bakar, dan bahan kimia bernilai tinggi, dengan limbah yang dihasilkan diproses lebih lanjut untuk produksi biogas atau bahan lainnya.

Diagram (**Gambar 3**) menggambarkan alur proses produksi bioetanol dari biomassa lignoselulosa dengan menggunakan pendekatan biorefinery secara skematis. Diagram ini mengilustrasikan penerapan berbagai proses konversi biokimia untuk menghasilkan produk primer dan sekunder yang bernilai ekonomi tinggi.

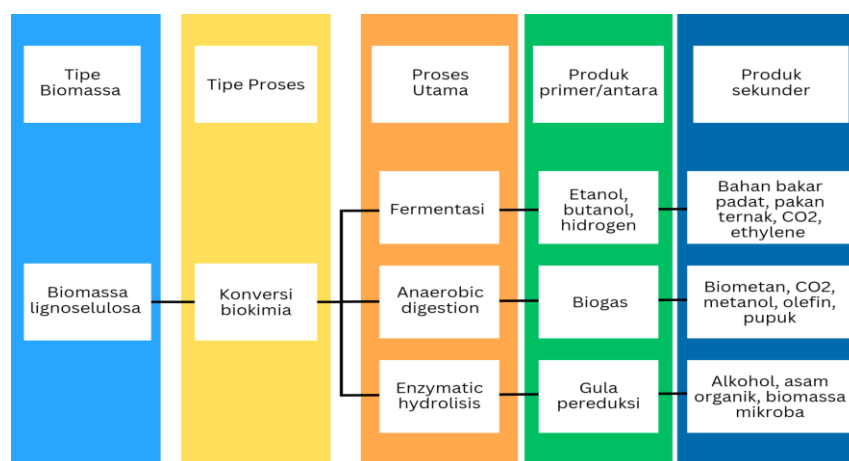
Beberapa produk samping yang dihasilkan dalam produksi bioetanol berdasarkan konsep Devi, *et al.* (2022) dan Offei (2021) diantaranya asam organik, gliserol, Lignin, suksinat, furfural, hidroksimetilfurfural (HMF), residual lignin, dan biomassa mikroba yang dihasilkan dari proses fermentasi. Penelitian yang dilakukan oleh Do Viet, *et al.*, (2019) proses produksi bioetanol dapat menghasilkan penghambat ragi seperti 5-hidroksimetil-2-furfuraldehid (HMF) dan furfural masing-masing adalah 2,11 dan 3,37 g/L. HMF yang merupakan produk dehidrasi dari fruktosa dan glukosa, yang memiliki potensi besar dalam industri kimia. Senyawa ini dapat diubah menjadi asam levulinat, asam formiat, dan 2,5-furandicarboxylate (FDCA), yang digunakan sebagai prekursor dalam pembuatan bioplastik dan bahan bakar berbasis furan. Selain itu, HMF juga berperan dalam produksi bahan kimia bernilai tinggi seperti polyester dan resin (Kuchеров *et al.*, 2018).

Furfural yang diproduksi melalui hidrolisis biomassa lignoselulosa dan dehidrasi pentosa memiliki berbagai kegunaan dalam industri, antara lain sebagai pelarut dalam berbagai proses industri serta sebagai prekursor dalam sintesis nilon dan polimer lainnya (Pundir *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2017). Dengan pemanfaatan HMF dan furfural, potensi ekonomi dari limbah lignoselulosa seperti kulit kopi dapat ditingkatkan, mendukung konsep biorefinery yang berkelanjutan.

Selain produksi produk sampingan seperti HMF dan furfural, yang bernilai tinggi dalam industri kimia, proses fermentasi yang digunakan dalam produksi bioetanol juga menghasilkan biomassa *Saccharomyces cerevisiae*. Biomassa tersebut tetap masih memiliki komponen nutrisi, termasuk protein, asam lemak, vitamin, dan mineral. Hasilnya, biomassa tersebut dapat dikumpulkan dan diproses lebih lanjut menjadi prtotein sel tunggal.



Gambar 2. Konsep bioekonomi sirkular/biorefinery dari biomassa lignoselulosa yang telah dimodifikasi (Devi, *et al.*, 2022).



Gambar 3. Skema konsep biorefinery yang telah dimodifikasi (Offei, 2021).

Protein sel tunggal (PST) dapat digunakan sebagai sumber protein alternatif dalam berbagai aplikasi, terutama dalam pakan ternak dan akuakultur. PST yang dihasilkan mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae*, memiliki kandungan protein yang tinggi dan kaya akan nutrisi, menjadikannya bahan pakan yang ideal untuk ikan, unggas, dan hewan ternak lainnya. Selain itu, PST dapat digunakan dalam formulasi pakan untuk meningkatkan kualitas nutrisi dan pertumbuhan hewan, serta sebagai pengganti sebagian atau seluruh tepung ikan, yang sering kali mahal dan tidak berkelanjutan (Nanda, *et al.*, 2014).

4.3. Bio-ekonomi Sirkular

Bioekonomi sirkular adalah paradigma yang mengintegrasikan prinsip keberlanjutan dengan pemanfaatan sumber daya biologis, bertujuan untuk menciptakan sistem ekonomi yang efisien dan ramah lingkungan. Dalam kerangka ini, biorefinery berfungsi sebagai pusat inovasi yang mengolah berbagai jenis biomassa, termasuk limbah pertanian, limbah industri dan sumber daya hayati lainnya menjadi produk bernilai tinggi seperti bioetanol, bioplastik dan senyawa biokimia (Stegmann, *et al.*, 2020). Proses ini tidak hanya berfokus pada produksi energi terbarukan, tetapi juga pada pengurangan limbah dan pemanfaatan semua komponen biomassa secara optimal. Pendekatan bio-ekonomi sirkular untuk produksi bioetanol dan produksi produk bernilai tambah lainnya dari biomassa lignoselulosa diilustrasikan pada **Gambar 2 & 3**.

Salah satu aspek kunci dari biorefinery adalah kemampuannya untuk mengintegrasikan berbagai teknologi konversi, yang memungkinkan pemrosesan simultan dari berbagai jenis biomassa. Misalnya, lignoselulosa yang merupakan komponen utama dari banyak limbah pertanian, dapat diolah melalui berbagai metode seperti fermentasi, pirolisis, dan gasifikasi untuk menghasilkan bioenergi dan produk kimia (Rodionova, *et al.*, 2022). Dengan pendekatan ini, biorefinery dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi konvensional.

Lebih jauh lagi, biorefinery mendukung bio-ekonomi sirkular dengan menciptakan nilai tambah dari limbah yang sebelumnya dianggap tidak berguna. Melalui proses valorisasi, limbah dapat diubah menjadi produk yang dapat digunakan kembali, sehingga mengurangi volume limbah yang dihasilkan dan memperpanjang siklus hidup produk. Misalnya, lignin yang dihasilkan dari proses pemisahan selulosa dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk produksi bahan bakar, bahan kimia atau bahkan sebagai bahan konstruksi (Ubando, *et al.* 2020).

Selain itu, penerapan prinsip-prinsip ekonomi sirkular dalam biorefinery juga mencakup pengembangan sistem manajemen yang efisien untuk pengumpulan, penyimpanan dan pengolahan biomassa (Rodionova, *et al.*, 2022). Dengan memanfaatkan teknologi digital dan analisis data, biorefinery dapat mengoptimalkan rantai pasokan biomassa, meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya produksi. Hal ini tidak hanya meningkatkan daya saing produk bio-ekonomi, tetapi juga berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan global, seperti pengurangan emisi karbon dan perlindungan keanekaragaman hayati (Devi, *et al.*, 2022).

Pemanfaatan teknologi biorefinery untuk produksi bioetanol berbasis lignoselulosa dari limbah kulit kopi (*Coffea* sp.) dengan menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* menunjukkan potensi yang signifikan dalam mendukung bio-ekonomi sirkular. Proses ini tidak hanya memaksimalkan konversi limbah biomassa menjadi produk energi terbarukan, tetapi juga menciptakan model pengelolaan sumber daya yang lebih efisien. Dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan dampak lingkungan, pendekatan ini memperkuat upaya global untuk mencapai keberlanjutan jangka panjang dan menawarkan solusi inovatif untuk tantangan lingkungan global.

5. Simpulan

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa limbah kulit kopi memiliki potensi besar sebagai bahan baku bioetanol melalui pendekatan biorefinery yang terintegrasi. Optimalisasi metode pretreatment, khususnya dengan alkali, serta fermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae*, terbukti meningkatkan efisiensi konversi lignoselulosa menjadi bioetanol. Sebagai langkah strategis, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih aplikatif untuk mengembangkan proses produksi yang efisien, ramah lingkungan, dan layak diterapkan dalam skala industri, guna mendukung penguatan sistem bio-ekonomi sirkular yang berkelanjutan.

Daftar Pustaka

1. Abun, A., Amani, H. Z., & Ramadhan, R. F. 2024. The effect of local soybean fermentation duration using yeast on total plate count, temperature, pH, and water content. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 28(2), 43–51. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2024.28.2.0289>
2. Ana, D., Pampang, H., & Yunita, L. 2015. Potensi Limbah Kulit Durian Sebagai Bahan Baku Pembuatan Energi Alternatif. *Seminar Nasional Teknologi*, 843-850.
3. Azrin, M., Bahri, S., Nurlaila, R., Meriatna, M., Muarif, A., & Fibarzi, W. U. 2023. Pembuatan Bioetanol Dari Limbah Kulit Kopi Secara Fermentasi Menggunakan Ragi Roti. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 3(2), 151-162. <https://ojs.unimal.ac.id/cejs/article/view/7868>
4. Aransiola, E. F., Shittu, T. D., Oyewusi, T. F., Adetoyese, A. O., Fagbeyiro, O. S., & Eyibio, U. P. 2020. Lignocellulosic Pretreatment Methods for Bioethanol Production. In *Valorization of Biomass to Value-Added Commodities: Current Trends, Challenges, and Future Prospects* (pp. 135-162). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38032-8_8
5. Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. 2014. Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and bioprocess technology*, 7, 3493-3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
6. Biratu, G., Gonfa, G., Bekele, M., & Woldemariam, H. W. 2024. Extraction and characterization of pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp obtained from four different coffee producing regions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 274 (2), 133321, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133321>
7. Cahyaningtiyas, A., & Sindhuwati, C. 2021. Pengaruh Penambahan Konsentrasi *Saccharomyces cerevisiae* Pada Pembuatan Etanol dari Air Tebu Dengan Proses Fermentasi. *Jurnal Teknologi Separasi*, 7(2), 89-94.2010.
8. Capolupo, L., & Faraco, V. (2016). Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(22), 9451-9467. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7884-y>
9. de Carvalho Oliveira F, Srinivas K, Helms GL. 2018. Characterization of coffee (*Coffea arabica*) husk lignin and degradation products obtained after oxygen and alkali addition. *Bioresour Technol*, 257:172–180. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.01.041>
10. de Jong E, H Stichnothe, G Bell & H Jørgensen. 2020. Bio-Based Chemicals. A 2020 Update. Diunduh dari <https://www.ieabio-energy.com/wp-content/uploads/2020/02/Bio-based-chemicals-a-2020-update-final-200213.pdf>
11. Devi, A., Bajar, S., Kour, H., Kothari, R., Pant, D., & Singh, A. 2022. Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: a circular bioeconomy approach. *Bioenergy Research*, 15(4), <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>
12. Do Viet, P., Le Pham, T. Q., & Le Nguyen, D. D. 2019. Production of bioethanol from Robusta coffee pulp (*Coffea robusta* L.) in Vietnam. *Foods and Raw materials*, 7(1), 10-17.
13. Fitria, N., & Lindasari, E. 2021. Optimasi Perolehan Bioetanol dari Kulit Nanas (*Ananas cosmosus*) dengan Penambahan Urea, Variasi Konsentrasi Inokulasi Starter dan Waktu Fermentasi. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 9(1), 1-10.
14. Gondim, F. F., Rodrigues, J. G. P., Aguiar, V. O., de Fátima Vieira Marques, M., & Monteiro, S. N. 2024. Biocomposites of Cellulose Isolated from Coffee Processing By-Products and Incorporation in Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Matrix: An Overview. *Polymers*, 16(3), 314. <https://doi.org/10.3390/polym16030314>
15. Gupta, A., & Verma, J. P. 2015. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 550-567. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.032>
16. Guru, P. K., Gupta, M., Rani, A., Sahu, P., Diwan, P., Pawar, G., & Gangil, S. (2025). Optimisation of combined acid and enzymatic hydrolysis of paddy straw to produce fermentable hydrolysate. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.1186/s13068-025-02622-9>

17. Harsono, S. S., Fauzi, M., Purwono, G. S., & Soemarno, D. 2015. Second generation bioethanol from Arabica coffee waste processing at smallholder plantation in Ijen Plateau region of East Java. *Procedia Chemistry*, 14, 408-413.
18. Hidayat, M. R. 2013. Teknologi *Pretreatment* Bahan Lignoselulosa Dalam Produksi Bioetanol. *Biopropal Industri*, 4(1), 33-48.
19. Hutapea, C. B. R., & Sitorus, R. E. 2017. Studi Teknik Produksi Gula Reduksi dari Limbah Kulit Buah Kopi (Parchment hull/endocarp). *Undergraduate thesis*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
20. Irwan, Sukainah, A., & Putra, R. P. 2023. Pemanfaatan Kulit Tanduk Biji Kopi Arabika (*Coffea arabica*) Sebagai Substrat Pertumbuhan *Aspergillus niger* dalam Memproduksi Enzim Selulase. *Multidisciplinary Scientific Journal*, 1(9), 525-537. <https://doi.org/10.57185/mutiara.v1i9.77>
21. Kementerian ESDM. 2021, January 19. Menteri ESDM: Cadangan Minyak Indonesia Tersedia untuk 9,5 Tahun dan Cadangan Gas 19,9 Tahun. Kementerian ESDM. Diakses Oktober 24, 2024, dari <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun>
22. Kementerian ESDM. 2022. *Tiap Hari, Indonesia Rogoh US\$ 100 Juta Untuk Impor Minyak dan BBM*. Ditjen Migas. Retrieved Oktober 24, 2024, from [https://migas.esdm.go.id/post/Tiap-Hari-Indonesia-Rogoh-US\\$-100-Juta-Untuk-Impor-Minyak-dan-BBM-](https://migas.esdm.go.id/post/Tiap-Hari-Indonesia-Rogoh-US$-100-Juta-Untuk-Impor-Minyak-dan-BBM-)
23. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional. 2023. *Indonesia Emas 2045 Nusantara Berdaulat, Maju, dan Berkelanjutan*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional. Jakarta.
24. Kuchеров, F. A., Romashov, L. V., Galkin, K. I., & Ananikov, V. P. (2018). Chemical transformations of biomass-derived C6-furanic platform chemicals for sustainable energy research, materials science, and synthetic building blocks. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 6(7), 8064-8092. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00971>
25. Kustyawati, M. E. 2018. *Saccharomyces cerevisiae Metabolit dan Agensi Modifikasi Pangan*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
26. Li, D., Long, L., & Ding, S. (2020). Alkaline organosolv pretreatment of different sorghum stem parts for enhancing the total reducing sugar yields and p-coumaric acid release. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01746-4>
27. Listiandari, I. F., & Herdyastuti, N. 2022. The effect of adding NaOH and fermentation time on Robusta coffee husk (*Coffea canephora*) bioethanol production with SSF (Simultaneous Sacharification and Fermentation) method. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 15(2), 630-638. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.15.2.0882>
28. Masruroh, N., & Fardian, I. 2022. Ekonomi Sirkular: Sebuah Solusi Masa Depan Berkelanjutan. In *Ekonomi Sirkular dan Pembangunan Berkelanjutan* (pp. 1-22). Jejak Pustaka. Yogyakarta.
29. Menezes, E. G., do Carmo, J. R., Alves, J. G. L., Menezes, A. G., Guimarães, I. C., Queiroz, F., & Pimenta, C. J. 2014. Optimization of alkaline *pretreatment* of coffee *pulp* for production of bioethanol. *Biotechnology progress*, 30(2), 451-462. <https://doi.org/10.1002/btpr.1856>
30. Muhamad, N. 2023, November 21. *Bauran Energi Indonesia Didominasi oleh Bahan Bakar Fosil pada 2021* | Databoks. Databoks. Diakses Oktober 24, 2024, dari <https://databoks.katadata.co.id/energi/statistik/d38f6b0ca0f9252/bauran-energi-indonesia-didominasi-oleh-bahan-bakar-fosil-pada-2021> 2021P2021.2015.
31. Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S.N., Kozinski, J.A., Dalai, A.K. 2014. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels. Biomass. *Convers. Biorefinery*. 4(2), 157-191. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>.
32. Offei, F. 2021. Integrated Biorefinery Approach to Lignocellulosic and Algal Biomass Fermentation Processes. *Fermentation-Processes, Benefits and Risks*, 60.
33. Oehlenschläger, K., Schepp, E., Stiefelmaier, J., Holtmann, D., & Ulber, R. 2024. Simultaneous fermentation and enzymatic biocatalysis—a useful process option?. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02519-z>
34. Parajuli, R., Dalgaard, T., Jørgensen, U., Adamsen, A. P. S., Knudsen, M. T., Birkved, M., ... & Schjørring, J. K. 2015. Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.041>.
35. Presiden Republik Indonesia. 2006. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006*. Kementerian Keuangan.
36. Pundir, A., Thakur, M. S., Prakash, S., Kumari, N., Sharma, N., He, Z., ... & Kumar, M. 2024. Furfural as a low-volume, high-value asset from agricultural residues: A review on production, agricultural applications and environmental sustainability. *Heliyon*, 10(15). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35077>
37. Putri, N. D., Hastuti, E. D., & Budihastuti, R. 2017. Pengaruh Pemberian Limbah Kopi terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.). *Jurnal Biologi*, 6(4), 41-50.
38. Pramita, D. L., Yenien, E., & Muria, S. R. 2014. Pembuatan Bioetanol Dari Kulit Nenas Menggunakan Enzim Selulase Dan Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* Dengan Proses Simultaneous Sacharification And Fermentation (SSF) Terhadap Variasi Konsentrasi Inokulum Dan Waktu Fermentasi. *Doctoral dissertation*, Riau University.
39. Rahmasari, E., Wisaniyasa, N. W., & Putra, I. N. K. 2022. Pengaruh Konsentrasi Starter dan Gula terhadap Karakteristik Wine Jahe. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 11(3), 555-567.
40. Rifa'i, A. F., Pamungkas, W. A., Setyawati, R. B., Setiawan, C. P., & Waluyo, J. 2022. Kajian Teknoekonomi Bioetanol Berbahan Molasses Sebagai Alternatif Substitusi BBM. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 6(1), 57-68. <https://dx.doi.org/10.20961/equilibrium.v6i1.63158>

41. Rodionova, M. V., Bozieva, A. M., Zharmukhamedov, S. K., Leong, Y. K., Lan, J. C. W., Veziroglu, A., ... & Allakhverdiev, S. I. 2022. A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3), 1481-1498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.122>
42. Seftian, D., Antonius, F., & Faizal, M.. (2012). Pembuatan Etanol dari Kulit Pisang menggunakan Metode Hidrolisis Enzimatis dan Fermentasi. Vol 18(1). Jurnal Teknik Kimia No. 1, hal 12-16.
43. Simbolon, N. C., Wijaya, I. M. M., & Gunam, I. B. W. 2018. Isolasi dan Karakterisasi Khamir Potensial Penghasil Bioetanol dari Industri Arak di Karangasem Bali. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*, 6(4), 316-326. <https://doi.org/10.24843/JRMA.2018.v06.i04.p062023.2002>.
44. Singh, T. A., Pal, N., Sharma, P., & Passari, A. K. 2023. Spent coffee ground: transformation from environmental burden into valuable bioactive metabolites. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(4), 887-898. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09669-w>
45. Stegmann, P., Londo, M., & Junginger, M. 2020. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 6, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>
46. Syaiful, A. Z., Hermawati, & Sonda, M. 2022. Pengaruh Lama Pengaktifan Ragi Untuk Fermentasi Kulit Kopi Arabika Menjadi Bioetanol. *Saintis*, 3(2), 37-49.
47. Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W. H. 2020. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresour technol*, 299, 122585. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>
48. Van Nguyen, D., Duong, C. T. T., Vu, C. N. M., Nguyen, H. M., Pham, T. T., Tran-Thuy, T. M., & Nguyen, L. Q. 2023. Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. *Data in Brief*, 51, 109781. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109781>
49. Yuniarti, D. P., Hatina, S., & Efrinalia, W. 2018. Pengaruh Jumlah Ragi dan Waktu Fermentasi pada Pembuatan Bioetanol dengan Bahan Baku Ampas Tebu. *Jurnal Redoks*, 3(2), 1-12. <https://dx.doi.org/10.31851/redoks.v3i2.2391>
50. Zhang, L., Xi, G., Yu, K., Yu, H., & Wang, X. 2017. Furfural production from biomass-derived carbohydrates and lignocellulosic residues via heterogeneous acid catalysts. *Industrial crops and products*, 98, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.014>