

LITERATUR REVIEW: POTENSI LIMBAH PERTANIAN DAN PERKEBUNAN DALAM PRODUKSI BIOETANOL GENERASI KEDUA DI INDONESIA

Fhuji Winardi*, Dwi Hilda Putri

¹Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Sumatera Barat, Indonesia.

Jl. Prof. Dr. Hamka Air Tawar Barat, Kecamatan Padang Utara, Kota Padang

e-mail: fhujiwinardi2004@gmail.com

Abstract

*Increasing global energy demand and the depletion of fossil resources are driving the search for renewable fuels, such as second-generation bioethanol from lignocellulosic waste. Bioethanol production faces technical challenges, particularly in pretreatment and conversion efficiency due to the complexity of biomass structure. This review article aims to analyze methods for utilizing Indonesian agricultural and plantation waste for second-generation bioethanol production, identify opportunities and challenges, and provide strategic recommendations. The method used is a literature review of articles published in the last five years from Google Scholar and ScienceDirect with the keywords “second-generation bioethanol production in Indonesia” and “bioethanol production from agricultural waste in Indonesia.” The review results show a diversity of raw materials such as TKKS, bagasse, fruit peels, and a predominance of chemical pretreatment and acid hydrolysis to degrade lignin. Fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* at varying concentrations and times resulted in varying bioethanol yields, with the highest bioethanol yield from pineapple peel waste with intensive pretreatment at 59%. Based on the analysis, it can be concluded that production success depends on the optimal synergy of pretreatment, hydrolysis, and fermentation, with a need for innovation in environmentally friendly methods and process optimization.*

Keywords: *second-generation bioethanol; agricultural waste; plantation waste; pretreatment; fermentation*

Abstrak

Permintaan energi global yang meningkat dan penipisan sumber daya fosil mendorong pencarian bahan bakar terbarukan, seperti bioetanol generasi kedua dari limbah lignoselulosa. Produksi bioetanol menghadapi tantangan teknis, terutama pada *pretreatment* dan efisiensi konversi akibat kompleksitas struktur biomassa. Artikel *review* ini bertujuan menganalisis metode pemanfaatan limbah pertanian dan perkebunan Indonesia untuk produksi bioetanol generasi kedua, mengidentifikasi peluang dan tantangan, serta memberikan rekomendasi strategis. Metode yang digunakan adalah *literature review* terhadap artikel terpublikasi dalam lima tahun terakhir dari *Google Scholar* dan *ScienceDirect* dengan kata kunci “produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia” dan “produksi bioetanol dari limbah pertanian

di Indonesia”. Hasil *review* menunjukkan keragaman bahan baku seperti TKKS, ampas tebu, kulit buah dan dominasi *pretreatment* kimia serta hidrolisis asam untuk mendegradasi lignin. Fermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae* dengan konsentrasi dan waktu bervariasi menghasilkan variasi *yield* bioetanol, *yield* bioetanol tertinggi dari limbah kulit buah nanas dengan *pretreatment* intensif sebesar 59%. Berdasarkan analisis, dapat diketahui bahwa keberhasilan produksi bergantung pada sinergi optimal *pretreatment*, hidrolisis, dan fermentasi, dengan kebutuhan inovasi pada metode ramah lingkungan dan optimasi proses.

Kata kunci: *bioetanol generasi kedua; limbah pertanian; limbah perkebunan; pretreatment; fermentasi*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan pertumbuhan populasi global telah meningkatkan permintaan energi yang tinggi, namun di sisi lain memicu penurunan ketersediaan sumber daya alam tak terbarukan seperti bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil merupakan sumber daya vital yang menjadi penopang utama dalam industri global (Khabibulloh et al., 2024). Penggunaan bahan bakar fosil secara terus-menerus tanpa jeda untuk memenuhi kebutuhan manusia telah menyebabkan cadangannya semakin menipis. Hal ini menimbulkan kekhawatiran serius akan kelangsungan pasokan di masa depan, mengingat sifatnya yang tidak dapat diperbaharui (Syafitri & Putri, 2022).

Bioetanol merupakan salah satu jenis bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui. Bioetanol dihasilkan melalui proses fermentasi gula yang berasal dari biomassa, seperti limbah pertanian atau limbah perkebunan. Sebagai bahan bakar, bioetanol memiliki peran penting dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca (Khairati, 2024). Di Indonesia, bioetanol mulai mendapat perhatian serius sebagai bagian dari strategi energi terbarukan, terutama dalam upaya mencapai target proporsi energi nasional yang lebih hijau (Pemerintah Indonesia, 2023). Namun, produksi bioetanol di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, termasuk ketersediaan bahan baku yang kompetitif dengan kebutuhan pangan (Yusmur et al., 2022).

Bioetanol banyak dibuat dari molases, sirup jagung, atau bahan pangan bernilai tinggi. Namun, bahan baku tersebut menimbulkan persaingan dengan penggunaannya

sebagai sumber makanan. Diperlukan bahan lain seperti limbah pertanian atau perkebunan yang mengandung lignoselulosa (Beluhan et al., 2023). Bioetanol generasi kedua adalah bioetanol yang diproduksi dari biomassa yang mengandung selulosa dan hemiselulosa, seperti limbah pertanian dan perkebunan. Bioetanol ini sering disebut juga sebagai etanol selulosa. Pada bioetanol generasi kedua, komponen lignoselulosa yang terdiri atas lignin, hemiselulosa, dan selulosa harus dipecah terlebih dahulu agar selulosa dan hemiselulosa dapat dikonversi menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi menjadi etanol (Niu et al., 2024).

Produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia memiliki sejumlah keunggulan. Keunggulan utama dari bioetanol generasi kedua adalah pemanfaatan bahan baku limbah pertanian atau perkebunan yang melimpah, murah, dan tidak bersaing dengan bahan pangan, seperti jerami padi, ampas tebu, tongkol jagung, kulit singkong, dan tandan kosong kelapa sawit. Indonesia sebagai negara tropis memiliki sumber biomassa lignoselulosa yang sangat berpotensi untuk dikembangkan menjadi bioetanol (Fikry et al., 2025). Bioetanol generasi kedua dapat mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 94% dibandingkan dengan bahan bakar fosil, sedangkan bioetanol generasi pertama mencapai pengurangan sekitar 78% (Highina et al., 2014). Bioetanol generasi kedua terbukti lebih ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan dibandingkan bahan bakar fosil maupun bioetanol generasi pertama (Rifa'i et al., 2022).

Pengembangan industri bioetanol generasi kedua menghadapi berbagai kendala teknologi, terutama terkait tingginya biaya pada proses *pretreatment* atau perlakuan pendahuluan serta rendahnya efisiensi hasil bioetanol yang didapatkan (Khabibulloh et al., 2024). Struktur lignoselulosa yang kompleks, khususnya keberadaan lignin yang sulit diuraikan, menjadi penyebab utama hambatan dalam proses konversi biomassa menjadi bioetanol. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi dan fasilitas yang lebih maju untuk meningkatkan efisiensi konversi tersebut, termasuk inovasi dalam penggunaan enzim yang dapat menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan

hasil bioetanol (Huang et al., 2022).

Review artikel ini disusun dengan tujuan untuk menganalisis, membandingkan, dan mensintesis berbagai metode pemanfaatan limbah pertanian dan perkebunan Indonesia dalam produksi bioetanol generasi kedua, serta mengidentifikasi peluang dan tantangan pengembangannya berdasarkan studi-studi terdahulu guna memberikan rekomendasi strategis bagi penelitian dan pengembangan bioetanol yang berkelanjutan di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Artikel *review* disusun dengan menggunakan pendekatan kajian *literature review* dengan memfokuskan pada potensi limbah pertanian dan perkebunan dalam produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia. Proses pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah seperti *Google Scholar* dan *ScienceDirect*. Proses pencarian dilakukan dengan menggabungkan kombinasi kata kunci yang relevan, seperti “produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia”, “produksi bioetanol dari limbah pertanian di Indonesia”, “produksi bioetanol dari limbah perkebunan di Indonesia”, “*second generation bioethanol production in Indonesia*”, “*bioethanol production from agricultural waste in Indonesia*”, dan “*bioethanol production from plantation waste in Indonesia*”. Pencarian difokuskan untuk menemukan artikel yang dipublikasikan dalam lima tahun terakhir, baik dalam bahasa inggris maupun bahasa indonesia.

Proses seleksi artikel dilaksanakan dengan cara bertahap. Artikel yang ditemukan dalam pencarian awal diseleksi berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan kesesuaian dengan topik yang dibahas. Artikel yang berhasil melewati tahap awal ini kemudian diunduh dan dianalisis secara mendalam untuk mengevaluasi relevansi dan kualitasnya. Data penting yang dikumpulkan mencakup judul, penulis, tahun terbit, limbah pertanian atau perkebunan yang digunakan, tahapan riset yang dikerjakan, dan hasil dari penelitian tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan penelusuran literatur yang telah dilakukan, diperoleh berbagai informasi dari sejumlah penelitian terkait produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia. Dalam bagian ini, akan dijelaskan temuan utama dari setiap sumber artikel, kemudian dianalisis secara menyeluruh untuk melihat kesamaan, perbedaan, serta kontribusi penelitian dalam memperdalam pemahaman terhadap produksi bioetanol generasi kedua di Indonesia. Ringkasan hasil dari sepuluh jurnal atau karya ilmiah yang telah dikaji dapat dilihat pada tabel berikut:

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
1	Hydrolysis Process of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Bioethanol Production with <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Oil Palm Empty Fruit Bunches</i> /Tandan Kosong Kelapa Sawit dari PT Perkebunan Nusantara V Sei Tapung, Rokan Hulu, Riau.	Persiapan Tandan Kosong Kelapa Sawit, proses delignifikasi, <i>bleaching</i> , hidrolisis dengan HCl 1, 2, dan 3 M, proses fermentasi dengan Ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> dengan rentang waktu 24, 48, 72, 96, dan 120 jam.	Konsentrasi optimum HCl dalam proses hidrolisis tandan kosong kelapa sawit adalah 2 M, dengan kadar glukosa tertinggi sebesar 11,661 g/L dan kandungan bioetanol tertinggi sebesar 6% dengan waktu fermentasi optimal selama 96 jam.	Ahmad, A., Chairul, Rita, N., Wulandari, R., & Alvia Sari, V. (2023).
2	Efektivitas Variasi Konsentrasi HCl Pada Proses Hidrolisis Ongkok Singkong Dalam Pembuatan Bioetanol Generasi Kedua	Ongkok Singkong	<i>Pre-treatment</i> ongkok singkong, proses hidrolisis asam, fermentasi dengan ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , dan proses destilasi untuk mendapatkan kadar bioetanol.	Konsentrasi HCl dari 0,1 N hingga 0,3 N secara signifikan meningkatkan keberhasilan proses hidrolisis ongkok singkong. Konsentrasi HCl 0,3 N menghasilkan kadar gula tertinggi sebesar 8,0 %Brix, kadar bioetanol sebesar 11,5%, dan rendemen bioetanol mencapai 22,12%.	Alvita, L. R., Sri Rezki, A., & Nadya Roza, F. (2025).

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
3	Pengaruh Konsentrasi Ragi (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) Pada Proses Fermentasi Limbah Kulit Buah Sukun (<i>Artocarpus altilis</i>) Dalam Pembuatan Bioetanol	Kulit Sukun	Persiapan tepung kulit sukun, tepung kulit sukun dihidrolisis dengan HCl 1 M pada suhu sekitar 90-95°C selama 60 menit. Fermentasi dilakukan dengan menambahkan ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada tiga variasi konsentrasi (8%, 9%, dan 10%) ke larutan hasil hidrolisis yang telah diatur pH-nya menjadi 4 dengan NaOH 30%. Larutan difermentasi satu minggu pada suhu ruang, diikuti dengan proses pemurnian menggunakan <i>rotary evaporator</i> selama 20 menit.	Variasi konsentrasi ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> berpengaruh signifikan terhadap kadar etanol yang dihasilkan dari proses fermentasi limbah kulit buah sukun. Kadar etanol yang diperoleh dari sampel dengan konsentrasi ragi 8%, 9%, dan 10% masing-masing adalah sebesar 12,7%, 15,0%, dan 18,2%.	Mulyadi, D., Mulyani, R., & Hidayah, L. (2023).
4	Pemanfaatan Kulit Manggis (<i>Garcinia mangostana</i> L.) sebagai Bioetanol Generasi Dua (G2) dengan Variasi Konsentrasi Ragi Melalui Metode <i>Simultaneous Saccharification and Fermentation</i> (SSF)	Kulit Manggis	Preparasi kulit manggis, proses delignifikasi, produksi bioetanol dengan metode <i>Simultaneous Saccharification and Fermentation</i> (SSF) dengan campuran enzim <i>Aspergillus niger</i> dan <i>Trichoderma reesei</i> serta ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , dan proses akhir distilasi.	Kadar etanol dalam sampel bioetanol kulit manggis masih sangat rendah, yaitu sekitar 2%. Selain itu, kandungan metanol dan air melebihi standar mutu bahan bakar bioetanol, dengan kadar metanol mencapai 38% dan kandungan air sebesar 59%.	Mulyadi, D., Khumaisah, L. L., & Rahayu, S. (2023).
5	Produksi Bioetanol dari Hidrolisat Ampas Tebu	Ampas Tebu dari PG Kebon Agung	Produksi ekstrak kasar enzim selulase dari <i>Bacillus subtilis</i> , hidrolisis ampas tebu	Perlakuan terbaik diperoleh pada saat fermentasi selama 48 jam menggunakan	Utami, C. R., Palupi, H. T., &

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
	Sistem Selulase <i>B. subtilis</i> Diikuti Fermentasi dengan Variasi Waktu dan Jenis Inokulum	Pakisaji Malang	menggunakan ekstrak kasar selulase <i>Bacillus subtilis</i> , fermentasi hasil hidrolisis dengan variasi waktu 24, 48, dan 72 jam dengan inokulum <i>Saccharomyces cerevisiae</i> 5% dan Ragi tape 5%.	inokulum <i>Saccharomyces cerevisiae</i> 5%, dengan rendemen bioetanol sebesar 122,16 mL/kg dan kadar alkohol mencapai 76,8%.	Ernawati, E. (2024).
6	Pengaruh Waktu Fermentasi Dan Konsentrasi H ₂ SO ₄ Terhadap Kadar Glukosa Pada Pembuatan Bioetanol Dari Tongkol Jagung	Tongkol Jagung	Bahan baku limbah tongkol jagung dicuci, dijemur, digiling, dan disaring. Selanjutnya, dibuat starter dengan mencampur ragi, gula, dan pupuk, kemudian diinkubasi 4 jam. Proses hidrolisis, di mana limbah dicampur larutan H ₂ SO ₄ dengan variasi konsentrasi dan dipanaskan selama satu jam. Larutan hasil hidrolisis diatur pH dan ditambahkan starter untuk proses fermentasi yang dilakukan selama 3 hingga 5 hari. Setelah fermentasi selesai, larutan disaring dan dilakukan proses distilasi untuk mengekstrak etanol.	Semakin tinggi konsentrasi larutan H ₂ SO ₄ hingga 1 N, maka kadar glukosa yang dihasilkan juga meningkat, dengan kadar tertinggi mencapai sekitar 14,40% pada sampel yang dihidrolisis dengan larutan H ₂ SO ₄ 1 N. Waktu fermentasi yang paling optimal untuk mendapatkan kadar glukosa tertinggi adalah pada hari ke-3, dengan kadar sekitar 14%.	Kiswanto, C. M. J., & Rubianto, L. (2022).
7	Produksi Bioetanol dari Limbah Kulit Jeruk Siam dengan Variasi Konsentrasi Pretreatment	Kulit Jeruk Siam Semboro	Persiapan kulit jeruk siam semboro yang dihaluskan menjadi bubuk. Tahap <i>pretreatment</i> dengan merendam 80 gram serbuk kulit jeruk	Perlakuan <i>pretreatment</i> dengan larutan NaOH pada konsentrasi 7% yang diikuti dengan fermentasi selama 7 hari menghasilkan	Tamimi, A., Ana Mufarida, N., & Hairul Bahri, M. (2025).

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
	Alkali dan Lama Fermentasi Anaerob di Kabupaten Jember		dalam larutan NaOH konsentrasi 3%, 5%, dan 7%, selama 1 jam pada suhu 100°C, diikuti penyaringan dan pencucian hingga pH larutan menjadi netral. Dilakukan proses hidrosilasi menggunakan HCl 0,5 M untuk memecah lignin dan memaksimalkan ketersediaan selulosa. Fermentasi anaerob dengan inokulasi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> selama 3, 5, dan 7 hari.	kadar bioetanol tertinggi sebesar 43% dan <i>yield</i> tertinggi sebesar 52,68%. Selain itu, kombinasi NaOH 7% dan waktu fermentasi 7 hari juga menghasilkan pH terendah sebesar 4,1.	
8	Pemanfaatan Limbah Kulit Nanas Menjadi Bioetanol dengan Variasi Konsentrasi Ragi dan Lama Fermentasi	Kulit Nanas	Persiapan limbah kulit nanas yang dibersihkan, dihaluskan, dan disterilisasi. Tahap <i>pretreatment</i> dan hidrolisis enzimatis dengan penambahan enzim selulase selama 10 jam pada suhu 60°C. Sampel hasil hidrolisis diukur pH dan difermentasi menggunakan ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> yang ditambahkan beserta nutrisi berupa NPK dan urea, selama 4 sampai 8 hari secara anaerob pada suhu ruang dengan variasi waktu fermentasi. Hasil fermentasi didistilasi pada	Kadar bioetanol tertinggi diperoleh pada fermentasi selama 5 hari dengan penambahan ragi 4%, mencapai 59% berdasarkan kurva standar baku dan 57,23% melalui analisis GC-MS. Kadar bioetanol menurun setelah hari ke-5 karena aktivitas ragi berkurang akibat kekurangan nutrisi dan ketersediaan glukosa menurun.	Simanjuntak, F. L. B., Yerizam, M., & Meidinariesty, A. (2024).

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
9	Pengaruh Perlakuan Awal Ampas Biji Jewawut (<i>Setaria italica</i> L.) dengan <i>Microwave Irradiation</i> untuk Produksi Bioetanol	Ampas Biji Jewawut	temperatur 78°C untuk mendapatkan distilat bioetanol. Persiapan sampel ampas biji jewawut dengan memisahkan, menjemur, menggiling, dan menyaringnya hingga didapat serbuk. Dilakukan proses hidrolisis menggunakan perlakuan <i>microwave</i> dengan variasi suhu (75°C, 100°C, 125°C, 150°C, dan 175°C) dan penambahan larutan H ₂ SO ₄ 2%, setelah itu disaring untuk memperoleh filtrat yang mengandung gula pereduksi. Hasil hidrolisis dinetralkan dan difermentasi menggunakan ragi <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada pH 4,5 selama lima hari. Hasil fermentasi kemudian dilakukan distilasi bertingkat untuk memperoleh etanol.	Proses hidrolisis menggunakan <i>microwave</i> pada suhu 150°C dan konsentrasi H ₂ SO ₄ 5% menghasilkan kadar gula pereduksi tertinggi sebesar 32,8 g/L. Hasil fermentasi menunjukkan produksi bioetanol dengan kadar maksimal 6,08% berdasarkan analisis kromatografi gas dan sekitar 5% berdasarkan pengujian berat jenis.	Kolo, S. M. D., Obenu, N. M., & Rohy, N. T. (2022).
10	Produksi Bioetanol Generasi Kedua dari Pelepah Kelapa Sawit dengan Variasi <i>Pre-Treatment</i> H ₂ SO ₄ dan	Pelepah Kelapa Sawit	Proses <i>pretreatment</i> basa menggunakan larutan KOH yang diperoleh dari ekstrak abu Tandan Kosong Sawit, dilanjutkan dengan <i>pretreatment</i> oksidatif menggunakan larutan	Proses hidrolisis dengan konsentrasi H ₂ SO ₄ optimal sebesar 2 M menghasilkan jumlah gula maksimum sebesar 161,98 g/L. Pada proses fermentasi,	Ahmad, A., Amri, I., & Nabilah, R. (2020).

No.	Judul Penelitian	Jenis Limbah	Tahapan Penelitian	Hasil Penelitian	Referensi
	Waktu Fermentasi		H ₂ O ₂ 3%. Setelah itu, proses hidrolisis dilakukan dengan variasi konsentrasi H ₂ SO ₄ (1,5 M, 2 M, dan 2,5 M) selama 3 jam pada suhu 100°C. Selanjutnya, <i>Separated Hydrolysis and Fermentation</i> (SHF) oleh <i>Saccharomyces cerevisiae</i> dengan variasi waktu yaitu 24, 48, 72, 96, dan 120 jam. Pemisahan bioetanol dari campuran hasil fermentasi menggunakan <i>rotary evaporator</i> dan analisis kadar bioetanolnya.	waktu fermentasi yang paling efektif untuk menghasilkan bioetanol adalah selama 96 jam, dengan kadar bioetanol tertinggi sebesar 55,25 g/L atau sekitar 7%.	

3.2 Pembahasan

Produksi bioetanol generasi kedua dari limbah pertanian ataupun perkebunan menawarkan solusi terhadap krisis energi dan masalah limbah. Kajian *review* terhadap sepuluh artikel penelitian menunjukkan keragaman bahan baku, mulai dari limbah perkebunan seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan pelepah sawit (Ahmad et al., 2023; Ahmad et al., 2020), limbah pengolahan seperti onggok singkong (Alvita et al., 2025) dan ampas tebu (Utami et al., 2024), hingga limbah buah-buahan seperti kulit sukun, manggis, nanas, dan jeruk (Mulyadi, Khumaisah, et al., 2023; Mulyadi, Mulyani, et al., 2023; Simanjuntak et al., 2024; Tamimi et al., 2025). Perbedaan mendasar dalam komposisi lignin, selulosa, dan hemiselulosa pada setiap bahan baku tersebut secara langsung mempengaruhi kompleksitas *pretreatment* dan hasil akhir bioetanol, di mana limbah dengan lignin tinggi seperti kulit manggis (Mulyadi,

Khumaisah, et al., 2023) menghasilkan etanol yang jauh lebih rendah dibandingkan limbah yang lebih mudah terdegradasi seperti kulit nanas (Simanjuntak et al., 2024).

Pada tahap *pretreatment*, metode kimia terbukti dominan dan efektif untuk mendelignifikasi biomassa. *Pretreatment* alkali dengan NaOH digunakan pada kulit jeruk siam (Tamimi et al., 2025), sementara KOH dari abu TKKS diaplikasikan pada pelepah sawit (Ahmad et al., 2020). Perbandingan hasil menunjukkan bahwa konsentrasi alkali yang lebih tinggi yaitu 7% NaOH pada kulit jeruk menghasilkan *yield* bioetanol yang sangat tinggi sebesar 52,68%, mengindikasikan efektivitasnya. Sebaliknya, *pretreatment* fisik-termal dengan iradiasi *microwave* pada ampas biji jawawut (Kolo et al., 2022) menawarkan alternatif yang cepat dan efisien, menghasilkan gula pereduksi hingga 32,8 g/L pada suhu 150°C, yang setara atau bahkan lebih baik daripada beberapa metode kimia konvensional.

Tahap hidrolisis untuk mengkonversi selulosa menjadi gula fermentabel dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu menggunakan asam dan enzim. Hidrolisis asam dengan HCl atau H₂SO₄ adalah yang paling umum digunakan. Pola yang konsisten teramati di berbagai penelitian (Ahmad et al., 2020; Ahmad et al., 2023; Kiswanto & Rubianto, 2022), di mana peningkatan konsentrasi asam dalam batas tertentu berbanding lurus dengan peningkatan *yield* gula. Sebagai contoh, konsentrasi HCl 2 M optimal untuk TKKS, sementara H₂SO₄ 1 N optimal untuk tongkol jagung. Di sisi lain, hidrolisis enzimatik menggunakan enzim selulase dari *B. subtilis* pada ampas tebu (Utami et al., 2024) menghasilkan rendemen bioetanol yang sangat tinggi, yaitu sebanyak 122,16 mL/kg, menunjukkan keunggulan enzim dalam spesifisitas dan tidak menghasilkan inhibitor, meski biayanya lebih mahal. Keberhasilan hidrolisis enzimatik pada ampas tebu ini kontras dengan kegagalan relatif metode *Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF) pada kulit manggis (Mulyadi, Khumaisah, et al., 2023) yang hanya menghasilkan 2% etanol.

Tahap fermentasi dengan khamir *Saccharomyces cerevisiae* lebih sering digunakan pada penelitian, menegaskan kekuatannya sebagai agen fermentasi gula C6.

Variabel utama yang dibandingkan pada setiap penelitian adalah konsentrasi inokulum dan waktu fermentasi. Penelitian pada kulit sukun (Mulyadi, Mulyani, et al., 2023) secara jelas menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ragi dari 8% menjadi 10% meningkatkan kadar etanol dari 12,7% menjadi 18,2%. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian pada kulit nanas (Simanjuntak et al., 2024) di mana konsentrasi ragi 4% menghasilkan hasil terbaik. Untuk waktu fermentasi, hasilnya lebih bervariasi tergantung substrat. Fermentasi optimal terjadi pada 96 jam untuk TKKS dan pelepah sawit (Ahmad et al., 2020; Ahmad et al., 2023), 48 jam untuk ampas tebu (Utami et al., 2024), dan 5-7 hari untuk kulit nanas dan jeruk (Simanjuntak et al., 2024; Tamimi et al., 2025). Pola umum terlihat bahwa fermentasi yang terlalu lama, misalnya lebih dari 5 hari pada kulit nanas justru menurunkan *yield* akibat habisnya nutrisi dan akumulasi etanol yang toksik.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Secara keseluruhan, perbandingan sepuluh penelitian yang di *review* mengungkap bahwa keberhasilan produksi bioetanol bergantung pada sinergi optimal dari ketiga tahapan utama. *Pretreatment* yang efektif adalah kunci untuk membuka akses terhadap selulosa, yang kemudian menentukan efisiensi hidrolisis. Hidrolisis secara enzimatik cenderung memberikan hasil yang lebih tinggi dan lebih bersih, sementara hidrolisis asam lebih mudah diaplikasikan. Fermentasi dengan *S. cerevisiae* yang paling banyak diaplikasikan pada penelitian, dengan konsentrasi 4-10% dan waktu 2-5 hari sebagai parameter umum. *Yield* tertinggi dalam *review* ini dihasilkan dari limbah buah seperti kulit nanas dan kulit jeruk siam yang mendapat *pretreatment* intensif, menyatakan bahwa kandungan selulosa yang mudah diakses dan *pretreatment* yang tepat lebih krusial daripada jenis bahan baku limbah yang digunakan.

4.2 Saran

Penelitian kedepannya perlu berfokus pada eksplorasi metode *pretreatment* yang lebih efisien dan ramah lingkungan seperti fisik-termal dan biologis, optimasi proses

Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) melalui rekayasa enzim dan bioreaktor, eksplorasi mikroorganisme tahan terhadap senyawa *inhibitor* dan mampu memfermentasi gula C5 pentosa, serta integrasi analisis *techno-economic assessment* (TEA) dan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai kelayakan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan dari proses produksi secara keseluruhan.

5. REFERENSI

- Ahmad, A., Amri, I., & Nabilah, R. (2020). Produksi Bioetanol Generasi Kedua dari Pelepah Kelapa Sawit dengan Variasi Pre-Treatment H₂SO₄ dan Waktu Fermentasi. *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 1(1), 12–27. <https://doi.org/10.31258/jbchees.1.1.12-27>
- Ahmad, A., Chairul, Rita, N., Wulandari, R., & Alvia Sari, V. (2023). Hydrolysis process of oil palm empty fruit bunches for bioethanol production with *Saccharomyces cerevisiae*. *Materials Today: Proceedings*, 87, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.100>
- Alvita, L. R., Sri Rezki, A., & Nadya Roza, F. (2025). Efektivitas Variasi Konsentrasi HCl Pada Proses Hidrolisis Onggok Singkong Dalam Pembuatan Bioetanol Generasi Kedua. *JoASCE (Journal Applied of Science and Chemical Engineering)*, 3(1), 07–14. <https://jurnal.polinela.ac.id/joasce/article/view/4188>
- Beluhan, S., Mihajlovski, K., Šantek, B., & Ivančić Šantek, M. (2023). The Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass: Pretreatment Methods, Fermentation, and Downstream Processing. *Energies*, 16(19), 7003. <https://doi.org/10.3390/en16197003>
- Fikry, I., Wuryaningrum, N. D., Aang Wahidin, A. W., Abdillah, H. N., & Leonard, R. (2025). Perkembangan Bio-Ethanol Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Energi Dan Mekanika*, 4(2), 128. <https://doi.org/10.26760/JREM.v4i2.128>
- Highina, B. K., Bugaje, I. M., & Umar, B. (2014). A Review On Second Generation Biofuel: A Comparison Of Its Carbon Footprints. *European Journal of Engineering and Technology*, 2(2).
- Huang, C., Jiang, X., Shen, X., Hu, J., Tang, W., Wu, X., Ragauskas, A., Jameel, H., Meng, X., & Yong, Q. (2022). Lignin-enzyme interaction: A roadblock for efficient enzymatic hydrolysis of lignocellulosics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111822>
- Khabibulloh, M. J. M., Suhartatik, N., & Mustofa, A. (2024). Masa Depan dan Pengembangan Bioetanol di Indonesia. *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*, 13(2), 210–223. <https://doi.org/10.30598/jagritekno.2024.13.1.210>
- Khairati, M. (2024). Bioethanol: Advances, Benefits, and Future Prospects. *International Journal of Research and Review*, 11(8), 568–574.

<https://doi.org/10.52403/ijrr.20240860>

- Kiswanto, C. M. J., & Rubianto, L. (2022). Pengaruh Waktu Fermentasi Dan Konsentrasi H₂SO₄ Terhadap Kadar Glukosa Pada Pembuatan Bioetanol Dari Tongkol Jagung. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 2022(4), 765–770. <http://distilat.polinema.ac.id>
- Kolo, S. M. D., Obenu, N. M., & Rohy, N. T. (2022). Pengaruh Perlakuan Awal Ampas Biji Jewawut (*Setaria italica* L.) dengan Microwave Irradiation Untuk Produksi Bioetanol. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(2), 183. <https://doi.org/10.20961/alchemy.18.2.59819.183-192>
- Mulyadi, D., Khumaisah, L. L., & Rahayu, S. (2023). Pemanfaatan Kulit Manggis (*Garcinia mangostana* L.) sebagai Bioetanol Generasi Dua (G2) dengan Variasi Konsentrasi Ragi Melalui Metode Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). *Jurnal Teknik Mesin*, 20(2), 46–54. <https://doi.org/10.9744/jtm.20.2.46-54>
- Mulyadi, D., Mulyani, R., & Hidayah, L. (2023). Pengaruh Konsentrasi Ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) Pada Proses Fermentasi Limbah Kulit Buah Sukun (*Artocarpus altilis*) Dalam Pembuatan Bioetanol. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(3), 154–161. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17708>
- Niu, Y., Joseph, N., Hemashini, T., & Leh, C. P. (2024). Valorization of lignocellulosic biomass: Progress in the production of second-generation bioethanol. *Renewable Energies*, 2(2). <https://doi.org/10.1177/27533735241284221>
- Pemerintah Indonesia. (2023). *Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 73 Tahun 2023 tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Umum Energi Nasional dan Rencana Umum Energi Daerah*. Peraturan Perundang-undangan. Sekretariat Negara: Jakarta.
- 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), 61. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v6i1.63158>
- Simanjuntak, F. L. B., Yerizam, M., & Meidinariasty, A. (2024). Pemanfaatan Limbah Kulit Nanas Menjadi Bioetanol dengan Variasi Konsentrasi Ragi dan Lama Fermentasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(4). <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/536>
- Syafitri, R., & Putri, E. (2022). Masalah Global Warming Dan Hubungannya Dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil. *Jurnal Bakti Sosial*, 1(1), 14–22. <https://doi.org/10.63736/jbs.v1i1.3>
- Tamimi, A., Ana Mufarida, N., & Hairul Bahri, M. (2025). Produksi Bioetanol dari Limbah Kulit Jeruk Siam dengan Variasi Konsentrasi Pretreatment Alkali dan Lama Fermentasi Anaerob di Kabupaten Jember. *Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)*, 5(3), 2808–148. <https://doi.org/10.54082/jupin.idpaper>
- Utami, C. R., Palupi, H. T., & Ernawati, E. (2024). Produksi Bioetanol dari Hidrolisat Ampas Tebu Sistem Selulase B. Subtilis dengan Variasi Waktu dan Jenis Inokulum. *Indonesian Sugar Research Journal*, 4(2), 80–92.

Yusmur, A., Ardiansyah, R., & Marlinda, S. (2022). Biomass Sources for Sustainable Bioenergy Production in Indonesia. *BIODIVERS - BIOTROP Science Magazine*, 1(2), 21–26. <https://doi.org/10.56060/bdv.2022.1.2.1977>