



Menghidupkan Masa Depan dengan Mengolah Limbah Kulit Pisang Menjadi Bioenergi melalui Pendekatan Biorefinery dan Kimia Hijau

Silvana S.H Ta'asar^{1*}, Trifansa H. Rihuh¹, Elsa Ramadani Saleh¹, Suhendra Iskandar¹

¹ Pendidikan Guru Madrasah Ibtidaiyah, UIN Sultan Amai Gorontalo, Gorontalo, Indonesia.

Received: 3 Oktober 2026

Revised: 10 Oktober 2026

Accepted: 10 Oktober 2026

Published: 10 Oktober 2026

Corresponding Author:

Silvana S.H Ta'asar:

silvanashtaasar7@gmail.com

DOI:

© 2025 The Authors. This open access article is distributed under a (CC-BY License)



Phone*: +62...

Abstrak: Limbah kulit pisang merupakan limbah organik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi karena mengandung komponen lignoselulosa dan karbohidrat yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi limbah kulit pisang sebagai sumber bioenergi, khususnya bioetanol, berdasarkan karakteristik kimia, metode pengolahan, dan hasil konversi yang dilaporkan dalam penelitian terdahulu. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui studi literatur terhadap publikasi ilmiah yang relevan. Data dianalisis dengan mengidentifikasi dan membandingkan kandungan biomassa, tahapan *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, serta potensi pemanfaatannya. Hasil kajian menunjukkan bahwa selulosa dan hemiselulosa pada kulit pisang berpotensi dikonversi menjadi gula fermentabel melalui hidrolisis, sedangkan *pretreatment* berperan dalam meningkatkan aksesibilitas karbohidrat terhadap proses konversi. Produksi bioetanol dipengaruhi oleh metode pengolahan, konsentrasi substrat, jenis mikroorganisme, dan kondisi fermentasi. Salah satu penelitian melaporkan konsentrasi etanol sebesar 32,6 g/L melalui konfigurasi *presaccharification and simultaneous saccharification and fermentation* (PSSF), sedangkan penelitian lain menunjukkan potensi produksi etanol melalui fermentasi satu tahap. Selain bioetanol, kulit pisang juga berpotensi dimanfaatkan untuk produksi biohidrogen dan pengembangan biorefinery. Dengan demikian, pemanfaatan limbah kulit pisang berpeluang mendukung pengembangan energi terbarukan dan pengurangan limbah organik. Namun, optimasi proses serta evaluasi rendemen, kebutuhan energi, dan biaya produksi masih diperlukan untuk menilai kelayakan penerapannya pada skala yang lebih besar.

Kata kunci: bioetanol, bioenergi, hidrolisis, kulit pisang, lignoselulosa, fermentasi.

Pendahuluan

Buah pisang sudah tidak asing lagi bagi masyarakat karena memiliki banyak manfaat bagi kesehatan tubuh dan sangat mudah dijumpai di pasar tradisional maupun pasar modern. Olahan dari buah pisang sudah banyak diketahui masyarakat, misalnya keripik pisang, kolak pisang, bolu, ataupun kue berbahan dasar pisang. Banyaknya olahan dari buah pisang tersebut turut meningkatkan jumlah limbah kulit pisang yang dihasilkan. Minimnya pemanfaatan limbah kulit pisang secara optimal menyebabkan kulit pisang menjadi limbah organik yang berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Kulit pisang biasanya hanya dibuang sebagai limbah organik atau digunakan sebagai pakan ternak (Darajat, Septiani, and Fitria 2023). Padahal, apabila diolah dengan baik, kulit pisang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk bernilai tambah, termasuk bioenergi.

Pisang mencapai lebih dari 120 juta ton per tahun, dan sekitar 35–40% berat buah merupakan kulit yang sering dibuang begitu saja. Indonesia menghasilkan sekitar 8,7 juta ton pisang pada tahun 2022, sehingga berpotensi menghasilkan limbah kulit pisang dalam jumlah besar (Lazuardi, Ruyani, and Firdaus 2026). Tingginya produksi dan konsumsi pisang di Indonesia turut meningkatkan jumlah limbah kulit pisang yang dihasilkan dari rumah tangga maupun industri pengolahan makanan. Peningkatan jumlah limbah tersebut menunjukkan perlunya pengelolaan kulit pisang yang lebih optimal agar tidak hanya menjadi sampah organik, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya yang memiliki nilai ekonomi.

Limbah kulit pisang sesungguhnya memiliki kandungan nutrisi dan senyawa organik yang berpotensi diolah menjadi berbagai produk bernilai ekonomis. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kulit pisang mengandung mineral, metabolit sekunder, dan serat yang berpotensi dimanfaatkan untuk berbagai keperluan (Pratiwi et al. 2024). Selama ini, pemanfaatan kulit pisang pada umumnya masih terbatas pada pengolahan menjadi pupuk organik (Iskandar 2024), pakan ternak, serta produk lain. Padahal, kandungan bahan organik pada kulit pisang membuka peluang pemanfaatan yang lebih luas, salah satunya sebagai bahan baku bioenergi. Oleh karena itu, diperlukan kajian mengenai potensi kulit pisang sebagai sumber energi terbarukan yang dapat mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan.

Salah satu potensi pemanfaatan limbah kulit pisang adalah sebagai bahan baku bioetanol. Kulit pisang merupakan salah satu limbah lignoselulosa yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan karbohidrat pada kulit pisang, khususnya fraksi yang dapat dikonversi menjadi gula fermentabel, berpotensi dimanfaatkan untuk menghasilkan bioetanol melalui serangkaian proses pengolahan. Proses tersebut meliputi *pretreatment* untuk membantu membuka struktur lignoselulosa, hidrolisis untuk mengubah karbohidrat menjadi gula sederhana, serta fermentasi untuk mengonversi gula menjadi bioetanol (Lazuardi et al. 2026). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa limbah kulit pisang mampu menghasilkan bioetanol apabila didahului oleh proses hidrolisis dan fermentasi yang sesuai (Ulma, Pratama, and Kurniawati 2025). Selain itu, penelitian lain membuktikan bahwa *pretreatment* menggunakan *deep eutectic solvent* (DES) kolin klorida–gliserol berpotensi meningkatkan efisiensi konversi limbah kulit pisang menjadi bioetanol (Ghufran, Kurnia, and Romi 2026).

Pengembangan bioenergi dari limbah kulit pisang menjadi penting seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dan perlunya pemanfaatan sumber energi terbarukan. Indonesia memiliki sumber daya alam yang melimpah, terutama di bidang pertanian dan perkebunan. Namun, peningkatan aktivitas pertanian dan industri pengolahan pangan juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar yang memerlukan pengelolaan tepat agar tidak menimbulkan pencemaran lingkungan. Seiring dengan beragamnya jenis makanan olahan dari buah pisang, jumlah limbah yang dihasilkan dari rumah tangga dan industri pengolahan pisang juga berpotensi meningkat (Fatimura, Masriatini, and Putri 2020; Gurning, Puarada, and Fuadi 2021). Dengan demikian, pemanfaatan kulit pisang sebagai bahan baku bioenergi dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi timbunan limbah organik sekaligus menghasilkan produk energi yang memiliki nilai tambah.

Potensi pemanfaatan kulit pisang sebagai bioenergi perlu dikaji dengan memperhatikan karakteristik bahan baku, metode pengolahan, kondisi proses, serta hasil konversi yang dilaporkan dalam penelitian terdahulu. Perbedaan varietas pisang, komposisi kimia kulit pisang, metode *pretreatment*, jenis hidrolisis, dan kondisi fermentasi dapat memengaruhi keberhasilan produksi bioetanol. Oleh sebab itu, studi literatur diperlukan untuk mengidentifikasi dan membandingkan hasil penelitian yang telah dilakukan,

mengetahui metode pengolahan yang berpotensi meningkatkan efisiensi konversi, serta mengidentifikasi tantangan yang masih dihadapi dalam pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai sumber bioenergi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan melalui studi literatur untuk mengkaji potensi limbah kulit pisang sebagai bahan baku bioenergi, khususnya bioetanol, berdasarkan kandungan kimia, tahapan pengolahan, dan metode konversi dari hasil penelitian terdahulu. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai peluang pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai sumber energi terbarukan, mendukung pengurangan limbah organik, serta mendorong pengembangan pemanfaatan biomassa lokal yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif untuk mengkaji potensi pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai bahan baku bioenergi, khususnya bioetanol. Pendekatan ini digunakan untuk menggambarkan kandungan dan potensi kulit pisang serta proses pemanfaatannya sebagai sumber energi terbarukan berbasis biomassa. Pemilihan kulit pisang sebagai objek penelitian didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah dan kandungan lignoselulosa berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berpotensi dikonversi menjadi gula fermentabel untuk menghasilkan bioetanol.

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, yaitu dengan mengidentifikasi, mengumpulkan, dan mengkaji informasi dari berbagai sumber ilmiah yang relevan mengenai limbah kulit pisang, kandungan lignoselulosa, proses pretreatment, hidrolisis, fermentasi, serta pemanfaatannya dalam produksi bioetanol. Data yang diperoleh kemudian dikelompokkan berdasarkan informasi mengenai karakteristik kulit pisang, proses konversi biomassa, dan potensi pemanfaatannya sebagai sumber energi terbarukan. Studi literatur juga digunakan untuk mengetahui hasil penelitian terdahulu mengenai pengolahan kulit pisang menjadi bioetanol.

Analisis data dilakukan secara deskriptif, yaitu dengan membandingkan dan menginterpretasikan informasi yang diperoleh dari berbagai literatur. Tahapan analisis meliputi identifikasi potensi limbah kulit pisang, analisis kandungan yang mendukung produksi bioetanol, pengkajian tahapan pretreatment, hidrolisis, dan fermentasi, serta analisis manfaat pemanfaatan kulit pisang sebagai bahan baku bioenergi. Hasil analisis kemudian disajikan secara sistematis untuk memberikan gambaran mengenai potensi limbah kulit pisang sebagai sumber energi terbarukan sekaligus sebagai salah satu alternatif untuk mengurangi permasalahan limbah organik.

Hasil dan Pembahasan

Limbah kulit pisang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi karena mengandung bahan organik dan karbohidrat yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar. Karakteristik kimia dan fisik bahan baku merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan proses konversi biomassa, terutama dalam produksi bioetanol dan biohidrogen. Oleh karena itu, analisis terhadap kandungan karbohidrat, struktur lignoselulosa, kadar padatan volatil, dan rasio karbon terhadap nitrogen diperlukan untuk mengetahui kesesuaian kulit pisang sebagai substrat bioenergi.

Penelitian Faradhani, Ratnaningsih, and Rinanti (2020) menunjukkan bahwa kulit pisang mengandung lignoselulosa yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol. Kandungan lignoselulosa tersebut menjadi penting karena selulosa dan hemiselulosa dapat diuraikan menjadi gula sederhana yang selanjutnya difermentasi untuk menghasilkan etanol. Meskipun demikian, keberadaan lignin dapat menghambat akses enzim terhadap komponen karbohidrat sehingga diperlukan perlakuan awal untuk meningkatkan efektivitas proses hidrolisis.

Potensi tersebut juga didukung oleh penelitian Abd-Alla et al. (2026), yang melaporkan bahwa kulit pisang memiliki kadar padatan volatil sebesar 93,7%, kandungan gula pereduksi sebesar 550 mg/g, total karbohidrat sebesar 133,25 mg/g, serta rasio C/N sebesar 21,5. Berdasarkan hasil tersebut, kulit pisang berpotensi digunakan sebagai substrat untuk produksi biofuel melalui proses biologis. Penelitian tersebut juga memperlihatkan bahwa karakteristik substrat berhubungan dengan keberhasilan produksi biohidrogen melalui fermentasi anaerob.

Selanjutnya, penelitian Klein et al. (2024) mengkaji karakterisasi biomassa kulit pisang dan pemanfaatannya dalam proses biorefinery. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hidrolisis enzimatis kulit pisang dapat menghasilkan gula pereduksi hingga 11,88 g/L, yang dapat digunakan sebagai substrat

fermentasi untuk menghasilkan etanol. Temuan ini memperkuat potensi kulit pisang sebagai sumber karbon untuk produksi bioenergi sekaligus menunjukkan bahwa karakteristik bahan baku perlu dikaji bersama dengan kondisi pengolahan yang digunakan.

Secara keseluruhan, ketiga penelitian tersebut menunjukkan bahwa kandungan karbohidrat dan karakteristik biomassa merupakan dasar penting dalam pemanfaatan kulit pisang sebagai sumber bioenergi. Namun, data kandungan kimia tidak dapat langsung dibandingkan tanpa memperhatikan perbedaan metode analisis, kondisi sampel, dan satuan yang digunakan. Sebagai contoh, kandungan gula pereduksi tidak selalu setara dengan total karbohidrat karena keduanya menggambarkan komponen yang berbeda. Oleh karena itu, karakterisasi bahan baku perlu dihubungkan dengan tahapan pengolahan dan hasil konversi yang dilaporkan dalam masing-masing penelitian.

Tahapan pengolahan kulit pisang umumnya diawali dengan persiapan bahan baku, seperti pemotongan, pengeringan, dan pengecilan ukuran. Proses tersebut bertujuan mempermudah penanganan biomassa dan meningkatkan kontak antara substrat dengan bahan kimia atau enzim yang digunakan pada tahap berikutnya. Pada biomassa lignoselulosa, pretreatment juga berperan dalam mengubah struktur bahan sehingga komponen karbohidrat lebih mudah diakses selama hidrolisis.

Tabel 1. Kandungan Kulit Pisang yang Berpotensi untuk Produksi Bioetanol (Abdulla et al. 2022; Faradhani et al. 2020; Klein et al. 2024; Palacios et al. 2021; Sarkar et al. 2022; Yogendrarajah and Ranganathan 2026)

No.	Kandungan/Komponen	Peran dalam Produksi Bioetanol	Tahap Konversi
1	Selulosa	Polimer glukosa yang menjadi sumber gula fermentabel untuk produksi bioetanol.	Hidrolisis menjadi glukosa, dilanjutkan fermentasi.
2	Hemiselulosa	Polimer karbohidrat yang dapat menghasilkan gula sederhana, seperti xilosa dan arabinosa.	Hidrolisis menjadi gula sederhana, dilanjutkan fermentasi sesuai kemampuan mikroorganisme.
3	Lignin	Komponen struktural yang dapat menghambat akses enzim terhadap selulosa dan hemiselulosa.	Pretreatment untuk meningkatkan aksesibilitas polisakarida.
4	Glukosa	Gula sederhana yang dapat difermentasi menjadi etanol oleh mikroorganisme yang sesuai.	Fermentasi.
5	Gula sederhana lainnya	Gula yang tersedia secara alami atau terbentuk selama pengolahan dan berpotensi mendukung produksi bioetanol.	Fermentasi sesuai jenis gula dan kemampuan mikroorganisme.
6	Pektin	Polisakarida penyusun dinding sel yang berpotensi dikonversi menjadi gula sederhana melalui proses yang sesuai.	Hidrolisis menggunakan enzim yang sesuai, jika diperlukan.

Penelitian Faradhani et al. (2020) menggunakan kulit pisang yang dihaluskan menjadi serbuk, kemudian diberi perlakuan awal menggunakan *Aspergillus fumigatus*. Perlakuan tersebut dilakukan pada beberapa perbandingan inokulum terhadap substrat dan waktu kontak yang berbeda. Hasilnya menunjukkan penghilangan lignin tertinggi sebesar 7,3%. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perlakuan biologis dapat dimanfaatkan untuk membantu menguraikan struktur lignoselulosa kulit pisang sebelum proses hidrolisis.

Sementara itu, penelitian Yogendrarajah dan Ranganathan (2026) menggunakan hidrolisis asam sulfat pada konsentrasi 0,75 M untuk meningkatkan produksi bioetanol dari kulit pisang. Penelitian Klein et al. (2024) juga menggunakan asam sulfat dalam tahap pretreatment dan mengoptimalkan proses berdasarkan konsentrasi asam, massa kulit pisang, serta konsentrasi enzim selulase. Kedua penelitian

tersebut memperlihatkan bahwa perlakuan kimia dapat dikombinasikan dengan hidrolisis enzimatis untuk meningkatkan ketersediaan gula yang dapat difermentasi.

Selain perlakuan kimia dan biologis, penelitian Palacios et al. (2021) menerapkan konfigurasi proses berupa *simultaneous saccharification and fermentation* (SSF) dan *presaccharification and simultaneous saccharification and fermentation* (PSSF). Pendekatan tersebut memungkinkan proses pemecahan karbohidrat dan fermentasi berlangsung secara terintegrasi, meskipun pada PSSF terdapat tahap prahidrolisis sebelum proses sakarifikasi dan fermentasi simultan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi proses dan konsentrasi substrat memengaruhi konsentrasi etanol yang dihasilkan.

Berdasarkan berbagai pendekatan tersebut, pemilihan pretreatment perlu mempertimbangkan efektivitas pembukaan struktur biomassa, kebutuhan bahan kimia, waktu proses, dan kemudahan penerapan. Perlakuan biologis berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan kimia tertentu, sedangkan perlakuan asam dapat membantu menguraikan struktur biomassa dengan lebih cepat. Akan tetapi, efektivitas masing-masing metode tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan satu parameter, seperti penghilangan lignin atau konsentrasi gula, tanpa mempertimbangkan hasil akhir produksi bioenergi.

Hidrolisis merupakan tahap penting dalam produksi bioetanol dari kulit pisang karena bertujuan mengubah karbohidrat kompleks menjadi gula sederhana yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme selama fermentasi. Hidrolisis dapat dilakukan menggunakan asam atau enzim, bergantung pada karakteristik substrat dan metode pengolahan yang dipilih.

Penelitian Faradhani et al. (2020) melaporkan bahwa tahap hidrolisis setelah perlakuan biologis menghasilkan kadar gula sebesar 1,353 g/L. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan awal menggunakan *Aspergillus fumigatus* dapat diikuti oleh pembentukan gula dari biomassa kulit pisang. Namun, penelitian tersebut masih memerlukan tahap fermentasi lanjutan untuk membuktikan besarnya produksi bioetanol yang dapat dicapai.

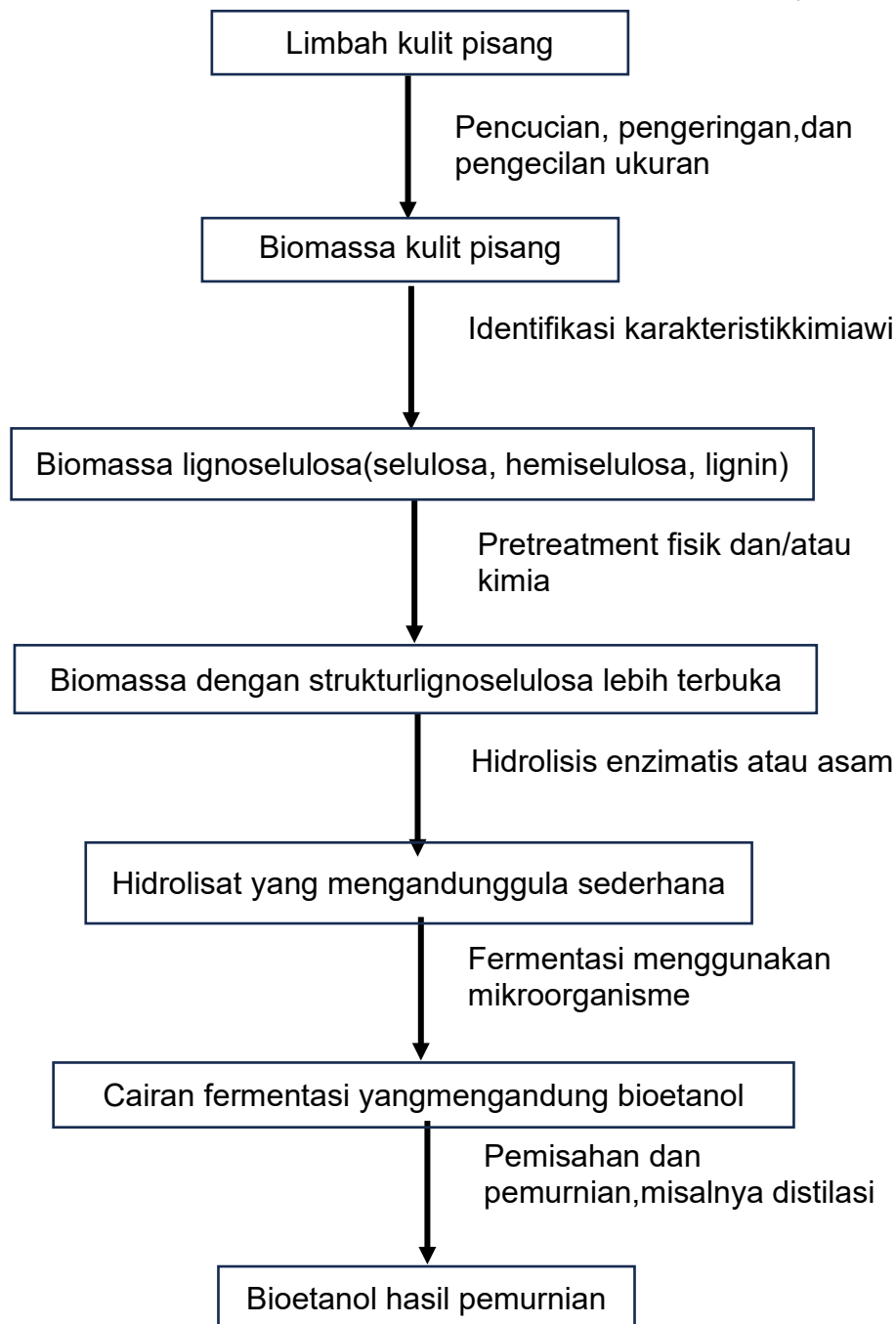
Pada penelitian Abdulla et al. (2022), hidrolisis asam encer dioptimalkan berdasarkan konsentrasi asam sulfat, suhu, dan waktu. Konsentrasi gula pereduksi tertinggi yang dilaporkan adalah 5,306 mg/mL, yang diperoleh pada kondisi hidrolisis tertentu. Hidrolisat kemudian digunakan dalam fermentasi menggunakan sel *Saccharomyces cerevisiae* yang diimobilisasi dengan natrium alginat dan kalsium klorida. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa optimasi hidrolisis perlu diikuti oleh pengaturan kondisi fermentasi untuk meningkatkan pemanfaatan gula oleh mikroorganisme.

Penelitian Shahab et al. (2026) menggunakan mikroorganisme penghasil amilase untuk membantu menghidrolisis pati pada kulit pisang menjadi glukosa. Bentuk bahan baku, mulai dari potongan hingga serbuk, diuji untuk mengetahui pengaruh preparasi terhadap efisiensi hidrolisis. Glukosa yang dihasilkan selanjutnya difermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae*, dan keberadaan etanol dianalisis menggunakan FTIR serta GC-MS. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa karakteristik fisik substrat dan aktivitas enzim dapat berperan dalam menentukan keberhasilan konversi biomassa.

Secara umum, hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa pembentukan gula fermentabel merupakan penghubung utama antara karakteristik kimia kulit pisang dan produksi bioetanol. Namun, konsentrasi gula yang tinggi belum tentu menghasilkan konsentrasi etanol yang tinggi karena keberhasilan fermentasi juga dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme, kondisi lingkungan, konsentrasi substrat, serta kemungkinan adanya senyawa penghambat.

Fermentasi merupakan tahap konversi gula fermentabel menjadi bioetanol atau produk bioenergi lainnya dengan bantuan mikroorganisme. Jenis mikroorganisme, suhu, waktu fermentasi, konsentrasi substrat, dan konfigurasi proses merupakan beberapa faktor yang dapat memengaruhi hasil konversi.

Penelitian Palacios et al. (2021) membandingkan penggunaan dua jenis khamir, yaitu *Saccharomyces cerevisiae* dan *Kluyveromyces marxianus*, dalam produksi etanol dari kulit pisang. Pada konfigurasi SSF dengan konsentrasi kulit pisang 10% (b/b), konsentrasi etanol yang dihasilkan masing-masing mencapai 13 g/L dan 11 g/L dalam waktu 10–12 jam. Sementara itu, konfigurasi PSSF dengan konsentrasi kulit pisang 25% (b/v) menghasilkan konsentrasi etanol tertinggi sebesar 32,6 g/L setelah 64 jam menggunakan *S. cerevisiae*. Pada kondisi PSSF yang sama, produksi etanol oleh *K. marxianus* mengalami penghambatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan mikroorganisme perlu disesuaikan dengan konfigurasi proses dan konsentrasi substrat.



Gambar 1. Skema transformasi lignoselulosa pada limbah kulit pisang menjadi bioetanol melalui tahapan pretreatment, hidrolisis, fermentasi, dan pemurnian (Abdulla et al. 2022; Faradhani et al. 2020; Klein et al. 2024; Palacios et al. 2021; Sarkar et al. 2022; Yogendrarajah and Ranganathan 2026)

Penelitian Yogendrarajah and Ranganathan (2026) juga memperlihatkan pentingnya optimasi kondisi fermentasi. Dengan menggunakan kulit *Musa paradisiaca*, penelitian tersebut melaporkan peningkatan hasil bioalkohol hingga 8,15 kali dibandingkan kondisi yang belum dioptimalkan. Kondisi yang dilaporkan meliputi waktu fermentasi 40 jam, hidrolisis menggunakan asam sulfat 0,75 M, inokulum khamir 100 g/L, dan konsentrasi substrat 75 g/100 mL. Analisis GC menunjukkan bahwa sampel alkohol kasar mengandung etanol sebesar 89,6%. Nilai tersebut perlu dibedakan dari konsentrasi etanol dalam cairan fermentasi maupun rendemen etanol terhadap massa kulit pisang.

Pendekatan lain ditunjukkan dalam penelitian Sarkar et al. (2022), yang mengevaluasi produksi etanol satu tahap menggunakan bakteri dari genus *Klebsiella*. Strain SWET4 dilaporkan mampu memfermentasi kulit pisang tanpa penambahan sumber karbon lain dan tanpa pretreatment terpisah. Pada konsentrasi substrat 40 g/L, suhu 40 °C, dan pH 8, konsentrasi etanol mencapai 5,48 g/L setelah lima hari, dengan rendemen sebesar 0,137 g etanol per gram kulit pisang kering. Meskipun hasil tersebut menunjukkan kemungkinan penyederhanaan proses, penelitian lanjutan tetap diperlukan untuk meningkatkan produktivitas dan menilai kelayakannya pada skala industri.

Selain pemilihan mikroorganisme dan kondisi fermentasi, penelitian Maghraby et al. (2025) menguji penambahan nanopartikel kobalt ferit (CoFe_2O_4), grafitik karbon nitrida ($\text{g-C}_3\text{N}_4$), dan kompositnya untuk meningkatkan produksi etanol. Penelitian tersebut melaporkan peningkatan hasil etanol pada penambahan 100 ppm CoFe_2O_4 dibandingkan kontrol tanpa nanopartikel. Penyinaran cahaya tampak juga dilaporkan memberikan pengaruh terhadap produksi etanol. Namun, penggunaan nanomaterial memerlukan evaluasi lebih lanjut terhadap biaya, keamanan, kemungkinan residu, dan kebutuhan pemisahan sebelum dapat dinilai sebagai alternatif proses yang layak.

Tabel 2. Rangkuman Treatment untuk Optimalisasi Produksi Bioetanol dari Limbah Kulit Pisang (Abdulla et al. 2022; Faradhani et al. 2020; Klein et al. 2024; Palacios et al. 2021; Sarkar et al. 2022; Yogendrarajah and Ranganathan 2026)

No.	Tahapan Treatment	Prosedur/Perlakuan	Tujuan Optimalisasi
1	Persiapan bahan baku	Kulit pisang dicuci, dikeringkan, dan diperkecil ukurannya.	Mengurangi pengotor, menyeragamkan bahan, dan meningkatkan luas permukaan biomassa.
2	Pretreatment fisik	Pengecilan ukuran atau perlakuan fisik lain yang sesuai.	Membantu membuka struktur biomassa dan meningkatkan aksesibilitas selulosa serta hemiselulosa.
3	Pretreatment kimia	Perlakuan menggunakan bahan kimia yang sesuai, misalnya asam atau alkali, berdasarkan karakteristik biomassa.	Mengurangi hambatan struktural akibat lignin dan komponen pengikat sehingga polisakarida lebih mudah dihidrolisis.
4	Hidrolisis	Hidrolisis asam atau enzimatik terhadap fraksi karbohidrat biomassa.	Memecah polisakarida menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi.
5	Optimasi kondisi hidrolisis	Pengaturan konsentrasi bahan kimia atau enzim, suhu, waktu, dan pH sesuai metode yang digunakan.	Meningkatkan pelepasan gula dan mengurangi pembentukan senyawa penghambat fermentasi.
6	Fermentasi	Hidrolisat difermentasi menggunakan mikroorganisme yang sesuai, misalnya khamir penghasil etanol.	Mengonversi gula fermentabel menjadi bioetanol.
7	Optimasi fermentasi	Pengaturan pH, suhu, waktu fermentasi, konsentrasi gula, dan kondisi inokulum sesuai mikroorganisme.	Meningkatkan hasil dan produktivitas bioetanol serta mengurangi gula tersisa.
8	Pemisahan dan pemurnian	Bioetanol dipisahkan dari cairan fermentasi, misalnya melalui distilasi dan proses pemurnian lanjutan jika diperlukan.	Meningkatkan konsentrasi dan kemurnian bioetanol yang dihasilkan.
9	Evaluasi hasil produksi	Pengukuran konsentrasi bioetanol, rendemen, produktivitas, dan gula sisa.	Menentukan kondisi proses terbaik serta membandingkan efisiensi setiap perlakuan.

Penelitian Uzoejinwa et al. (2025) turut menguji penggunaan nanopartikel ZnO dan MnO₂ pada fermentasi campuran limbah kulit pisang dan kulit kentang. Hasil tertinggi yang dilaporkan adalah 29,72 g/L bioetanol dari kulit pisang sebagai satu-satunya bahan baku dalam campuran yang diuji, dengan penambahan nanopartikel ZnO. Meskipun hasil ini relevan sebagai pendekatan peningkatan produksi bioetanol, kontribusi penambahan nanopartikel dan perbedaan komposisi substrat perlu dianalisis secara terpisah sebelum dibandingkan dengan penelitian yang tidak menggunakan bahan tambahan tersebut.

Dengan demikian, produksi bioenergi dari kulit pisang tidak hanya bergantung pada kandungan bahan baku, tetapi juga pada kesesuaian antara metode pengolahan, jenis mikroorganisme, dan kondisi proses. Hasil dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa optimasi dapat meningkatkan produksi bioetanol, tetapi perbandingan langsung antarpublikasi perlu dilakukan secara hati-hati karena konsentrasi substrat, satuan hasil, lama fermentasi, dan metode analisisnya berbeda.

Selain bioetanol, kulit pisang berpotensi dikonversi menjadi biohidrogen melalui fermentasi anaerob. Biohidrogen merupakan bahan bakar yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi dan menjadi alternatif dalam pengembangan sistem energi rendah karbon.

Penelitian Abd-Alla et al. (2026) mengkaji produksi biohidrogen dan ABE melalui konversi mikrobiologis kulit pisang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi kulit pisang sebesar 20% (b/v) menghasilkan produksi hidrogen sebesar 1.400 mL/L pada pengujian konsentrasi substrat, sedangkan konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 40%, menunjukkan penghambatan produksi. Penelitian tersebut juga mengidentifikasi isolat *Bacillus stercoris* W26 yang menghasilkan hidrogen sebesar 1.750 mL/L. Selain itu, isolat W17 menghasilkan produk ABE dengan konsentrasi yang dilaporkan sebesar 1,033 g/L, terutama berupa etanol.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa kulit pisang tidak hanya berpotensi menjadi bahan baku bioetanol, tetapi juga dapat dimanfaatkan dalam proses produksi biohidrogen dan produk fermentasi lainnya. Meskipun demikian, hasil produksi hidrogen dari penelitian tersebut tidak dapat langsung dibandingkan dengan hasil produksi etanol karena keduanya berbeda dalam jenis produk, mekanisme konversi, dan satuan pengukuran.

Dengan demikian, pemilihan metode konversi perlu disesuaikan dengan produk bioenergi yang ditargetkan. Produksi bioetanol berfokus pada konversi gula fermentabel menjadi alkohol, sedangkan produksi biohidrogen memerlukan kondisi fermentasi yang mendukung pembentukan hidrogen. Kedua pendekatan tersebut memperlihatkan peluang pemanfaatan kulit pisang sebagai biomassa untuk pengembangan energi terbarukan.

Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah kulit pisang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi, terutama bioetanol dan biohidrogen. Potensi tersebut didukung oleh kandungan bahan organik yang dapat dikonversi melalui proses biologis maupun kombinasi perlakuan kimia dan enzimatis. Pemanfaatan ini memberikan peluang untuk mengubah limbah yang sebelumnya kurang bernilai menjadi produk yang berpotensi mendukung kebutuhan energi terbarukan.

Dari sisi produksi bioetanol, penelitian Palacios et al. (2021) menunjukkan bahwa konfigurasi PSSF mampu menghasilkan konsentrasi etanol sebesar 32,6 g/L pada kondisi pengujian yang digunakan. Sementara itu, penelitian Yogendrarajah and Ranganathan (2026) melaporkan peningkatan hasil bioalkohol setelah optimasi proses, dan penelitian Sarkar et al. (2022) menunjukkan kemungkinan produksi etanol melalui proses fermentasi satu tahap. Hasil-hasil tersebut menggambarkan bahwa terdapat berbagai jalur teknologi yang dapat dikembangkan sesuai karakteristik bahan baku, kebutuhan proses, dan kemampuan pengolahan yang tersedia.

Dari sisi diversifikasi produk energi, penelitian Abd-Alla et al. (2026) menunjukkan potensi produksi biohidrogen dari kulit pisang melalui fermentasi anaerob. Temuan ini memperluas peluang pemanfaatan kulit pisang sebagai bahan baku bioenergi, tidak terbatas pada bahan bakar cair. Namun, setiap produk memiliki kebutuhan proses dan karakteristik pemanfaatan yang berbeda sehingga penilaian potensi energi perlu memperhatikan hasil produksi, kebutuhan energi proses, dan efisiensi konversinya.

Selain menghasilkan produk energi, pemanfaatan kulit pisang berpotensi mendukung pengurangan limbah organik dari rumah tangga dan industri pengolahan pangan. Penelitian Klein et al. (2024) menunjukkan bahwa pengolahan kulit pisang dapat diarahkan pada konsep biorefinery, yakni pemanfaatan biomassa untuk menghasilkan lebih dari satu produk bernilai tambah. Penelitian tersebut tidak hanya mengkaji produksi etanol, tetapi juga mengevaluasi pemulihan D-limonena dari biomassa.

Pendekatan biorefinery membuka peluang untuk meningkatkan nilai guna bahan baku melalui pemanfaatan beberapa komponen biomassa, meskipun kelayakan integrasi produk tersebut masih perlu ditinjau berdasarkan kebutuhan proses dan biaya pemulihan.

Potensi pemanfaatan kulit pisang sebagai bioenergi juga perlu dinilai secara menyeluruh dari aspek lingkungan dan ekonomi. Penggunaan limbah sebagai bahan baku dapat membantu mengurangi pembuangan bahan organik, tetapi manfaat lingkungan bersihnya bergantung pada kebutuhan energi untuk pengeringan, konsumsi bahan kimia, penggunaan air, pengolahan residu, dan pemurnian produk. Demikian pula, tingginya konsentrasi etanol pada skala laboratorium belum secara otomatis menunjukkan kelayakan ekonomi pada skala industri.

Oleh karena itu, pengembangan bioenergi berbasis limbah kulit pisang perlu diarahkan pada optimasi proses yang efisien, penggunaan bahan dan energi yang proporsional, serta pengelolaan residu yang aman. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi rendemen produk, produktivitas, kebutuhan energi proses, biaya produksi, dan dampak lingkungan secara terpadu. Dengan pendekatan tersebut, kulit pisang berpotensi menjadi salah satu sumber biomassa lokal yang mendukung pemanfaatan limbah secara berkelanjutan dan pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur, limbah kulit pisang memiliki potensi yang besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi, khususnya dalam produksi bioetanol. Kulit pisang mengandung komponen lignoselulosa berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dapat dikonversi menjadi gula fermentabel melalui tahapan pretreatment dan hidrolisis, kemudian difermentasi untuk menghasilkan bioetanol. Ketersediaan limbah kulit pisang yang melimpah menjadikannya salah satu biomassa yang berpotensi dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan. Secara keseluruhan, pengolahan limbah kulit pisang menjadi bioenergi dan produk bernilai tambah merupakan alternatif yang berpotensi mendukung pengelolaan limbah secara berkelanjutan.

Referensi

- Abd-Alla, Mohamed Hemida, Shymaa Ryhan Bashandy, Wafaa Abdelnaser Sleem, and David Mamdouh Khalaf. 2026. "Sustainable Biohydrogen Production from Banana Peels Using Microbial Fermentation." *BMC Biotechnology* 26(1):5. doi: 10.1186/s12896-025-01080-3.
- Abdulla, Johnny, Jawan, and Sani. 2022. "Agrowastes of Banana Peels as an Eco-Friendly Feedstock for the Production of Biofuels Using Immobilized Yeast Cells." P. 012022 in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Sabah: Institute of Physics Publishing.
- Darajat, Z., M. Septiani, and Fitria. 2023. "Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang Menjadi Sabun Cuci Piring Dengan Bahan Aditif Kulit Jeruk." *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat METHABDI* 3(1):6–10. doi: 10.46880/methabdi.Vol3No1.pp6-10.
- Faradhani, Bunga, Ratnaningsih, and Astri Rinanti. 2020. "Delignification of Bioethanol Production from Saba Banana Peel (*Musa Paradisiaca* Formatypica) by *Aspergillus Fumigatus*." *International Journal of Scientific and Technology Research* 9(3):1427–30.
- Fatimura, Muhrinsyah, Rully Masriatini, and Fenny Putri. 2020. "PEMANFAATAN LIMBAH KULIT PISANG MENJADI KARBON AKTIF DENGAN VARIASI KONSENTRASI AKTIVATOR NaCl." *Jurnal Redoks* 5(2):87–95. doi: 10.31851/redoks.v5i2.4924.
- Ghufran, Irfani, Alkanda Kurnia, and Muhammad Romi. 2026. "Peran Pretreatment Deep Eutectic Solvent (Kolin Klorida – Gliserol) Dalam Peningkatan Produksi Bioetanol Dari Limbah Kulit Pisang Melalui Fermentasi *Saccharomyces Cerevisiae*." 2(1):31–40. doi: 10.70716/purechem.v2i1.660.
- Gurning, Riris Nadia Syafrilia, Sakral Hasby Puarada, and Misril Fuadi. 2021. "Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang." *E-Dimas: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat* 12(1):106–11.
- Iskandar, Suhendra. 2024. "Analysis of the Impact of Black Tea Waste on The Fertility Quality of Rainbow Chili Plants (*Capsicum Annum* L.)." *Jurnal Pijar MIPA* 19(2):326–30. doi: 10.29303/jpm.v19i2.6473.
- Klein, Gabriel Henrique, Vitória Dassoler Longo, Larissa Capeletti Romani, Loisleini Fontoura Saldanha, Arielle Cristina Fornari, Suzana Fátima Bazoti, Aline Frumi Camargo, Sérgio L. Alves, and Helen Treichel. 2024. "Utilization of Banana Peel Waste for the Production of Bioethanol and Other High-

- Value-Added Compounds." *Food and Humanity* 3:100376. doi: 10.1016/j.foohum.2024.100376.
- Lazuardi, Putri Ramadan, Aceng Ruyani, and M. Lutfi Firdaus. 2026. "Life Cycle Assessment Dan Keberlanjutan Ekonomi-Lingkungan Produksi Bioetanol Dari Kulit Pisang Kepok Kuning: Systematic Review." *Papanda Journal of Mathematics and Science Research* 5(1):170–84. doi: 10.56916/pjmsr.v5i1.3092.
- Maghraby, Mona, Samar Saeed, Ashraf Y. Elnaggar, Shams H. Abdel-Hafez, and Yasser A. Attia. 2025. "Enhancing Bioethanol Production from Banana Peel Biomass Using Photoactivated Nanoparticles: A Study of CoFe₂O₄ and g-C₃N₄ Composites." *Sugar Tech* 27(4):1213–27. doi: 10.1007/s12355-025-01578-2.
- Palacios, A. Sócrates, Anna Ilyina, Cristóbal N. Ramos-González, Rodolfo Aguilar, José Luis Martínez-Hernández, Elda Patricia Segura-Ceniceros, Monica Lizeth Chávez González, Miguel Aguilar, Mercedes Ballesteros, and José Miguel Oliva. 2021. "Ethanol Production from Banana Peels at High Pretreated Substrate Loading: Comparison of Two Operational Strategies." *Biomass Conversion and Biorefinery* 11(5):1587–96. doi: 10.1007/s13399-019-00562-7.
- Pratiwi, Zahra Anggita, Talitha Anindya Shafa Auryana, Ratna Ayu Kusuma Ningrum, Ardiana Auliya Zahroh, and Fitria Iriane Goldiana. 2024. "Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang Sebagai Inovasi Produk Minuman Kaya Antioksidan." *Jurnal Pengabdian Masyarakat* 4(3):43.
- Sarkar, Debapriya, Sushant Prajapati, Kasturi Poddar, and Angana Sarkar. 2022. "Ethanol Production by Klebsiella Sp. SWET4 Using Banana Peel as Feasible Substrate." *Biomass Conversion and Biorefinery* 12(5):1479–91. doi: 10.1007/s13399-020-00880-1.
- Shahab, Aamina, Syed Khalida Izhar, Shareen Fatima Rizvi, and Roohi Roohi. 2026. "Fermentative Enzymatic Valorization of Raw Banana Peels Using Bacillus Sp. SA-45 for Generation of Bioethanol for Surface Sterilization." *Waste and Biomass Valorization* 17(7):3899–3915. doi: 10.1007/s12649-025-03347-4.
- Ulma, Z., P. A. A. Pratama, and M. W. Kurniawati. 2025. "Optimasi Variasi Nutrisi NPK Dengan Proses Hidrolisa Asam Terhadap Peningkatan Nilai Brix Dan Kadar Bioetanol Dari Limbah Kulit Pisang Kepok." *JURNAL TEKNOLOGI TECHNOSCIENTIA* 18(01):44–51.
- Uzoejinwa, Ezeama, Anioke, Ogwo, Ifeanyiobiorah, and Obiora. 2025. "EFFECT OF ZINC OXIDE, MANGANESE DIOXIDE NANOPARTICLES AND THEIR BLENDS ON YIELD AND QUALITY OF BIOETHANOL PRODUCED FROM CO-FERMENTATION OF BANANA AND POTATO PEELS." *Nigerian Journal of Technology* 44(1):123–32. doi: 10.4314/njt.v44i1.14.
- Yogendrarajah, and Ranganathan. 2026. "Process Optimization and Yield Enhancement of Bioethanol Production from Musa Paradisiaca Peel Waste." *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka* 54(1):101–11. doi: 10.4038/jnsfsr.v54i1.12547.