

**PRODUKSI BIOETANOL BERBASIS SINGKONG DAN TEBU DI INDONESIA:
REVIEW LITERATUR DAN ANALISIS KEBERLANJUTAN*****Bioethanol Production from Cassava and Sugarcane in Indonesia:
A Literature Review and Sustainability Analysis*****Azmy Febryansyah^{1*}, Cicah Warohmah¹, Alya Rahma Zahratunnisa¹**¹Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten, Serang*Email: febryansyahazmy@gmail.com**Abstract**

Bioethanol is a promising renewable energy source that can reduce dependence on fossil fuels while supporting sustainable development. In Indonesia, cassava and sugarcane, including their agricultural residues, have significant potential as bioethanol feedstocks due to their abundant availability and high carbohydrate content. This study aimed to synthesize the development of bioethanol production technologies based on cassava and sugarcane in Indonesia and to evaluate their sustainability from environmental, economic, and social perspectives. A literature review was conducted using scientific publications retrieved from Google Scholar, ScienceDirect, and ResearchGate published between 2015 – 2025. Following a systematic selection process based on predefined inclusion and exclusion criteria, 15 articles were selected and analyzed using a narrative synthesis approach. The results indicate that *Saccharomyces cerevisiae* is the most widely used microorganism for fermentation, while bioethanol yield is strongly influenced by feedstock characteristics, *pretreatment* methods, hydrolysis techniques, and fermentation conditions. From a sustainability perspective, utilizing agricultural residues such as sugarcane bagasse and cassava waste contributes to reducing agro-industrial waste, lowering carbon emissions, increasing economic value, and supporting national energy security. However, most studies remain limited to laboratory-scale experiments and rarely incorporate *Life Cycle Assessment (LCA)* or *Techno-Economic Assessment (TEA)*. Future studies should focus on pilot- and industrial-scale implementation while integrating comprehensive sustainability assessments to support large-scale bioethanol development in Indonesia.

Keywords: *Bioethanol; Cassava; Literature Review; Sugarcane; Sustainability***Abstrak**

Bioetanol merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Di Indonesia, singkong dan tebu beserta limbahnya memiliki potensi besar sebagai bahan baku bioetanol karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan karbohidrat yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis perkembangan teknologi produksi bioetanol berbasis singkong dan tebu di Indonesia serta menganalisis aspek keberlanjutannya dari perspektif lingkungan, ekonomi, dan sosial. Kajian dilakukan menggunakan metode literature review dengan menelusuri artikel ilmiah dari Google Scholar, ScienceDirect, dan ResearchGate yang dipublikasikan pada periode 2015 – 2025. Setelah melalui proses seleksi menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi, diperoleh 15 artikel yang dianalisis secara naratif. Hasil sintesis menunjukkan bahwa *Saccharomyces cerevisiae* merupakan mikroorganisme fermentasi yang paling banyak digunakan, sedangkan efektivitas produksi bioetanol sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, metode *pretreatment*, hidrolisis, dan kondisi fermentasi. Dari aspek keberlanjutan, pemanfaatan limbah biomassa seperti ampas tebu dan kulit singkong berpotensi mengurangi limbah agroindustri, menekan emisi karbon, meningkatkan nilai tambah ekonomi, serta mendukung ketahanan energi nasional. Namun, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium dan belum mengintegrasikan analisis *Life Cycle Assessment (LCA)* maupun *Techno-Economic Assessment (TEA)*. Oleh karena itu, penelitian lanjutan pada skala pilot dan industri diperlukan untuk mendukung implementasi bioetanol secara berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: *Bioetanol; Keberlanjutan; Literature Review; Singkong; Tebu*

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar fosil saat ini menghadapi tantangan besar karena sifatnya yang tidak terbarukan, sehingga ketersediaannya terus berkurang dan tidak lagi memadai untuk jangka panjang. Kondisi tersebut memicu urgensi pengembangan sumber energi alternatif yang dapat diproduksi secara berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat secara luas. Saat ini, sumber energi bahan bakar nabati dapat dikembangkan sebagai bioetanol, yang pemanfaatannya menjadi potensi sumber daya alam terbarukan (Arlianti, 2018).

Sebagai sumber energi terbarukan, bioetanol merupakan senyawa alkohol yang diproduksi melalui proses fermentasi biomassa berbasis gula, pati, atau selulosa, seperti singkong dan tetes tebu. Dalam dunia perdagangan, komoditas ini diklasifikasikan berdasarkan tingkat kemurniannya: grade industri (90 – 94%), grade netral untuk medis dan kosmetik (96 – 99,5%), serta grade bahan bakar yang mencapai tingkat kemurnian di atas 99,5%. Secara kimiawi, etanol C_2H_5OH adalah cairan bening mudah menguap yang dapat diproduksi melalui hidrasi gas etilen maupun fermentasi biologis. Meskipun sempat mengalami fluktuasi popularitas pasca Perang Dunia, penggunaan bioetanol kini kembali menjadi prioritas global seiring dengan menipisnya cadangan energi konvensional dan meningkatnya ancaman pemanasan global (Hendrawati *et al.*, 2019).

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan bioetanol generasi kedua melalui pemanfaatan limbah lignoselulosa dari sektor pertanian yang melimpah. Dua komoditas utama yang sangat menjanjikan adalah singkong dan tebu (Bahar *et al.*, 2025). Indonesia memiliki singkong dengan komoditas yang sangat melimpah dengan produksi mencapai sekitar 18,9 juta ton per tahun, namun proses pengolahannya menghasilkan limbah kulit dalam jumlah besar yang selama ini hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak atau bahkan dibuang. Limbah kulit singkong mengandung komponen pati dan selulosa yang tinggi, yakni masing-masing mencapai 44 – 59% dan 58,4%, sehingga memiliki potensi teknis yang besar untuk dikonversi menjadi bahan baku energi (Maharani *et al.*, 2026). Selain itu, ampas tebu memiliki residu berserat dari industri gula yang mengandung senyawa lignoselulosa dengan kadar glukosa yang tinggi (Anwar & Subagyo, 2020).

Efisiensi produksi bioetanol dari limbah ini sangat bergantung pada pemilihan metode pemrosesan, termasuk tahap pretreatmen, hidrolisis, dan optimasi fermentasi. Penggunaan teknologi yang tepat, seperti kombinasi hidrolisis asam dan penggunaan aktivator mikroba seperti *Saccharomyces cerevisiae*, telah terbukti mampu meningkatkan kadar etanol yang dihasilkan dari limbah kulit singkong dan ampas tebu. Keberlanjutan ekonomi juga menjadi faktor kunci dalam implementasi skala industri. Analisis siklus biaya (*Life Cycle Cost*) menunjukkan bahwa produksi bioetanol dari limbah pertanian di Indonesia secara ekonomi layak dilakukan, dengan harga jual yang kompetitif dibandingkan dengan standar harga yang ditetapkan pemerintah maupun harga bahan bakar minyak bersubsidi.

Berbagai penelitian telah melaporkan bahwa singkong dan tebu merupakan bahan baku potensial untuk produksi bioetanol di Indonesia. Hendrawati *et al.* (2019) mengkaji aspek teknoekonomi produksi bioetanol berbasis singkong dan menunjukkan bahwa komoditas tersebut layak dikembangkan sebagai sumber energi alternatif. Soeprijanto *et al.* (2022) melaporkan keberhasilan konversi limbah padat singkong (onggok) menjadi bioetanol melalui proses sakarifikasi dan fermentasi, sedangkan Pereira *et al.* (2015) menunjukkan potensi biomassa lignoselulosa tebu sebagai bahan baku bioetanol generasi kedua. Selain itu, Bahar *et al.* (2025) mengevaluasi kelayakan ekonomi produksi bioetanol berbasis ampas tebu melalui pendekatan *Life Cycle Cost* dan menyimpulkan bahwa pengembangannya layak secara finansial.

Berbagai penelitian tersebut telah membahas produksi bioetanol dari singkong maupun tebu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis bahan baku, optimasi proses fermentasi, atau analisis teknoekonomi secara terpisah. Hingga saat ini masih terbatas kajian yang mengintegrasikan informasi mengenai bahan baku utama, limbah pertanian, teknologi produksi, serta aspek keberlanjutan dalam satu tinjauan literatur yang komprehensif, khususnya dalam konteks pengembangan bioetanol di Indonesia. Berbeda dengan penelitian terdahulu, artikel ini menyajikan sintesis literatur yang mengintegrasikan potensi bioetanol berbasis singkong, tebu, serta limbah turunannya dengan

membandingkan teknologi *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi, efisiensi produksi, dan analisis keberlanjutan yang mencakup aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Pendekatan ini diharapkan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai prospek pengembangan bioetanol di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan pendekatan deskriptif kualitatif untuk mengkaji produksi bioetanol berbasis singkong dan tebu di Indonesia serta menganalisis aspek keberlanjutannya. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah terbaru dan relevan dengan kajian. Literatur yang digunakan merupakan artikel ilmiah yang dipublikasikan pada rentang 2015 – 2025 agar dapat menggambarkan perkembangan penelitian bioetanol terkini di Indonesia dan dunia. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci "*bioethanol*", "*cassava bioethanol*", "*cassava waste*", "*sugarcane bioethanol*", "*bagasse*", "*renewable energy*", "*lignocellulosic biomass*", dan "*sustainability*". Hasil pencarian awal memperoleh 87 artikel dari Google Scholar, ScienceDirect, dan ResearchGate. Selanjutnya dilakukan penghapusan artikel duplikat, penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilakukan telaah terhadap naskah lengkap sehingga diperoleh artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis.

Berdasarkan proses seleksi tersebut, diperoleh 15 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dinilai paling relevan dengan tujuan penelitian sehingga digunakan sebagai bahan sintesis dalam kajian ini. Literatur yang dipilih merupakan publikasi yang relevan dan mendukung topik penelitian, terutama yang membahas bahan baku, proses produksi, efisiensi, serta dampak lingkungan dan ekonomi bioetanol di Indonesia.

Data dari artikel terpilih kemudian disintesis menggunakan metode *narrative synthesis*, yaitu dengan mengelompokkan hasil penelitian berdasarkan bahan baku bioetanol (singkong, limbah singkong, tebu, dan limbah tebu), teknologi produksi, hasil produksi bioetanol, analisis ekonomi, serta aspek keberlanjutan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi persamaan, perbedaan, serta tren penelitian yang berkembang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menemukan beberapa temuan terkait bioethanol berbasis singkong dan tebu, yang bermanfaat bagi energy berkelanjutan. Dari hasil proses pencarian dan penyaringan informasi, didapatkan sebanyak 15 artikel jurnal yang relevan dan memberikan teuan informasi terbaru dengan topik "Bioetanol". Hasil penelitian disajikan dalam bentuk Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Karakteristik Penelitian Produksi Bioetanol Berbasis Singkong dan Tebu

No.	Penulis (Tahun)	Bahan Baku	Metode Utama	Temuan Utama
1	Djuned et al. (2022)	Singkong dan ampas tebu	Hidrolisis termal dan fermentasi	Kombinasi singkong dan ampas tebu menghasilkan bioetanol hingga 42,85%.
2	Soeprijanto et al. (2022)	Onggok singkong	Sakarifikasi dan fermentasi	Menghasilkan bioetanol dengan kemurnian tinggi setelah proses distilasi.
3	Maryana et al. (2020)	Ampas tebu	Fermentasi dengan variasi jenis dan konsentrasi ragi	<i>S. cerevisiae</i> menghasilkan kadar etanol lebih tinggi dibanding ragi tape.
4	Hikmiyati dan Yanie (2022)	Kulit singkong	Hidrolisis asam dan enzimatis	Hidrolisis enzimatis meningkatkan konversi glukosa dibanding hidrolisis asam.
5	Irvan et al. (2015)	Ampas tebu	Hidrolisis termal dan fermentasi	pH, jenis ragi, dan lama fermentasi memengaruhi produksi bioetanol.
6	Utami et al. (2024)	Ampas tebu	Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF)	Menghasilkan kadar alkohol tertinggi sebesar 76,8% menggunakan <i>S. cerevisiae</i> .

7	Rulianah <i>et al.</i> (2025)	Ampas tebu	Hidrolisis enzimatik	Selulase meningkatkan efisiensi konversi biomassa menjadi bioetanol.
8	Pereira <i>et al.</i> (2015)	Biomassa tebu	Biorefinery lignoselulosa	Seluruh biomassa tebu berpotensi dimanfaatkan untuk bioetanol generasi kedua.
9	Moodley dan Kana (2019)	Daun tebu	<i>Pretreatment</i> dan fermentasi	Optimasi <i>pretreatment</i> meningkatkan efisiensi produksi bioetanol.
10	Hendrawati <i>et al.</i> (2019)	Singkong	Analisis teknoekonomi	Produksi bioetanol berbasis singkong layak dikembangkan secara ekonomi di Indonesia.
11	Maharani <i>et al.</i> (2026)	Kulit singkong	Hidrolisis H ₂ SO ₄	Konsentrasi asam memengaruhi kadar glukosa dan etanol yang dihasilkan.
12	Dimyati dan Naryono (2025)	Sari tebu	Fermentasi	Bioetanol dari sari tebu berpotensi sebagai bahan bakar alternatif.
13	Rahman <i>et al.</i> (2014)	Ampas tapioka	Daur ulang <i>vinasse</i>	Efisiensi bahan baku dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan <i>vinasse</i> .
14	Anwar dan Subagyo (2020)	Ampas tebu dan kulit pisang	Fermentasi	Kombinasi biomassa meningkatkan pemanfaatan limbah organik.
15	Bahar <i>et al.</i> (2025)	Ampas tebu	<i>Life Cycle Cost Analysis</i>	Produksi bioetanol berbasis ampas tebu layak secara ekonomi dan mendukung bioekonomi berkelanjutan.

Hasil penelitian dari artikel yang direview kemudian disintesis untuk mengidentifikasi persamaan, perbedaan, dan tren penelitian mengenai produksi bioetanol berbasis singkong dan tebu di Indonesia. Sintesis dilakukan berdasarkan aspek bahan baku, teknologi produksi, mikroorganisme fermentasi, faktor yang memengaruhi hasil bioetanol, aspek keberlanjutan, dan keterbatasan penelitian. Ringkasan hasil sintesis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sintesis Hasil Penelitian Produksi Bioetanol Berbasis Singkong dan Tebu

Aspek yang Dibandingkan	Singkong dan Limbah Singkong	Tebu dan Limbah Tebu	Sintesis Hasil Review
Bahan baku	Singkong, kulit singkong, ongkok memiliki kandungan pati tinggi sehingga mudah dihidrolisis menjadi glukosa.	Ampas tebu, daun tebu, jerami mengandung lignoselulosa tinggi sehingga memerlukan <i>pretreatment</i> . Lebih banyak menggunakan <i>pretreatment</i> alkali, steam, atau enzimatik.	Singkong lebih sesuai untuk bioetanol generasi pertama, sedangkan limbah tebu berpotensi besar sebagai bioetanol generasi kedua yang lebih berkelanjutan. <i>Pretreatment</i> menjadi faktor paling menentukan keberhasilan konversi biomassa menjadi gula fermentabel.
<i>Pretreatment</i>	Dominan menggunakan hidrolisis asam.		Hidrolisis enzimatik menghasilkan glukosa lebih tinggi dan lebih sedikit membentuk furfural maupun HMF dibanding hidrolisis asam.
Metode hidrolisis	Hidrolisis asam lebih banyak digunakan tetapi berpotensi menghasilkan inhibitor.	Hidrolisis enzimatik memberikan efisiensi konversi lebih tinggi.	<i>S. cerevisiae</i> menjadi mikroorganisme yang paling konsisten
Mikroorganisme fermentasi	Sebagian besar menggunakan	Sebagian besar menggunakan <i>S. cerevisiae</i>	

	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> .		menghasilkan bioetanol karena toleransi etanolnya tinggi.
Faktor yang memengaruhi hasil	Konsentrasi asam, pH, waktu fermentasi, jenis ragi.	<i>Pretreatment</i> , delignifikasi, jenis enzim, waktu fermentasi.	Efisiensi produksi dipengaruhi kombinasi <i>pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi, dan karakteristik biomassa.
Kadar bioetanol	Bervariasi sesuai kondisi fermentasi dan jenis substrat.	Bervariasi sesuai efektivitas delignifikasi dan hidrolisis.	Variasi kadar etanol menunjukkan belum adanya kondisi proses yang baku sehingga optimasi masih diperlukan.
Aspek keberlanjutan	Mengurangi limbah singkong tetapi berpotensi menimbulkan konflik <i>food versus fuel</i> .	Memanfaatkan limbah agroindustri sehingga tidak bersaing dengan kebutuhan pangan.	Limbah tebu memiliki prospek keberlanjutan lebih baik sebagai bahan baku bioetanol generasi kedua.
Kelemahan penelitian	Mayoritas masih skala laboratorium.	Mayoritas masih skala laboratorium.	Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada skala pilot, analisis ekonomi, LCA, dan implementasi industri.

Berdasarkan lima belas jurnal yang direview, terlihat bahwa singkong dan tebu beserta limbah turunannya memiliki potensi yang sangat besar sebagai bahan baku produksi bioetanol di Indonesia. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa biomassa berbasis singkong seperti ubi kayu, kulit singkong, onggok, dan limbah ampas singkong memiliki kandungan pati dan karbohidrat tinggi yang mudah dikonversi menjadi glukosa melalui proses hidrolisis. Biomassa tebu seperti sari tebu, ampas tebu (bagasse), daun tebu, jerami, dan pucuk tebu memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi sehingga potensial digunakan sebagai bahan baku bioetanol generasi kedua (2G ethanol). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki sumber daya biomassa yang melimpah dan berkelanjutan untuk mendukung pengembangan energi terbarukan berbasis bioetanol.

Berdasarkan hasil sintesis terhadap 15 artikel yang direview, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian (research gap) yang perlu mendapat perhatian. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi proses produksi bioetanol pada skala laboratorium, sedangkan kajian mengenai implementasi pada skala pilot maupun industri masih terbatas. Selain itu, analisis yang mengintegrasikan aspek teknologi, ekonomi, lingkungan, dan sosial juga belum banyak dilakukan secara komprehensif. Ringkasan kesenjangan penelitian tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Research GAP

Topik	Temuan Penelitian Sebelumnya	GAP Penelitian
<i>Pretreatment</i>	Banyak penelitian membahas optimasi <i>pretreatment</i> .	Belum ada metode yang efisien untuk berbagai jenis biomassa.
Fermentasi	Didominasi penggunaan <i>S. cerevisiae</i> .	Mikroorganisme alternatif masih jarang dikaji.
Bioetanol	Fokus pada peningkatan kadar etanol.	Analisis keberlanjutan masih sangat terbatas.
Skala produksi	Sebagian besar penelitian dilakukan pada skala laboratorium.	Kajian skala pilot dan industri masih minim.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa kadar bioetanol yang dihasilkan antarpelelitian sangat bervariasi. Variasi tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu jenis biomassa yang digunakan, efektivitas proses *pretreatment*, metode hidrolisis, mikroorganisme fermentasi, serta kondisi fermentasi seperti pH, suhu, waktu fermentasi, dan konsentrasi inokulum. Penelitian yang menggunakan hidrolisis enzimatis umumnya menghasilkan efisiensi konversi glukosa yang lebih tinggi dibandingkan hidrolisis asam karena mampu meminimalkan pembentukan senyawa inhibitor, seperti furfural dan 5-Hydroxy Methyl furfural (HMF), yang dapat menghambat aktivitas *S. cerevisiae* (Canilha et al., 2012; Jonsson et

al., 2013). Penelitian yang menerapkan hidrolisis asam tanpa optimasi *pretreatment* cenderung menghasilkan kadar etanol yang lebih rendah akibat degradasi gula selama proses hidrolisis.

Dari kelima belas jurnal tersebut mayoritas penelitian menggunakan *S. cerevisiae* sebagai mikroorganisme utama karena memiliki kemampuan fermentasi gula yang baik serta toleransi etanol yang relatif tinggi. Hasil review menunjukkan bahwa ragi roti yang mengandung kultur murni *S. cerevisiae* secara konsisten menghasilkan kadar etanol lebih tinggi dibandingkan ragi tape. Penelitian Maryana *et al.* (2020) dan Irvan *et al.* (2015) membuktikan bahwa penggunaan ragi roti memberikan hasil fermentasi yang lebih optimal karena tidak mengandung mikroorganisme kontaminan seperti *Acetobacter* yang dapat mengubah etanol menjadi asam asetat. Selain itu, peningkatan konsentrasi ragi umumnya meningkatkan produksi etanol hingga titik tertentu karena mempercepat fase eksponensial pertumbuhan mikroba.

Hasil analisis kuantitatif menunjukkan kadar etanol yang dihasilkan antar penelitian sangat bervariasi. Produksi bioetanol tertinggi ditemukan pada penelitian Utami *et al.* (2024) dengan kadar alkohol mencapai 76,8% menggunakan sistem SHF dan enzim *Bacillus subtilis*. Penelitian Djuned *et al.* (2022) juga menunjukkan hasil tinggi yaitu 42,85% melalui kombinasi singkong dan ampas tebu dengan hidrolisis termal. Sebaliknya, beberapa penelitian lain masih menghasilkan kadar etanol rendah, seperti penelitian Soeprijanto *et al.* (2022) yang hanya menghasilkan 2,64%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa efektivitas *pretreatment*, jenis substrat, penggunaan enzim, serta optimasi kondisi fermentasi sangat menentukan keberhasilan produksi bioetanol. Hasil review menunjukkan bahwa *Saccharomyces cerevisiae* merupakan mikroorganisme yang paling banyak digunakan karena memiliki toleransi etanol yang tinggi, kemampuan fermentasi gula sederhana yang baik, serta kestabilan selama proses fermentasi. Konsentrasi inokulum yang terlalu rendah menyebabkan fase adaptasi lebih panjang, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kompetisi nutrisi sehingga tidak selalu meningkatkan produksi etanol secara signifikan.

Hampir seluruh penelitian menekankan bahwa penggunaan limbah biomassa seperti ongkok, ampas tebu, kulit singkong, daun tebu, dan jerami memiliki keunggulan ekologis karena dapat mengurangi limbah agroindustri sekaligus menghasilkan energi terbarukan. Konsep biorefinery dan zero-waste mulai terlihat pada beberapa penelitian, terutama pada studi Pereira *et al.* (2015) dan Moodley & Kana (2019), yang menunjukkan potensi pemanfaatan seluruh biomassa tebu serta residu fermentasi sebagai produk samping bernilai ekonomi seperti pakan ternak.

Pemanfaatan limbah lignoselulosa seperti ampas tebu, kulit singkong, ongkok, dan daun tebu sebagai bahan baku bioetanol mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan biomassa sekaligus mengurangi limbah agroindustri. Selain itu, penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar terbarukan berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca dibandingkan bahan bakar fosil sehingga mendukung upaya mitigasi perubahan iklim (Canilha *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2015). Pengembangan bioetanol berbasis ampas tebu menunjukkan prospek yang baik berdasarkan analisis *Life Cycle Cost*. Studi Bahar *et al.* (2025) menunjukkan bahwa sistem produksi bioetanol memiliki biaya siklus hidup yang kompetitif sehingga berpotensi mendukung investasi pada sektor energi terbarukan. Selain itu, pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku dapat meningkatkan nilai tambah komoditas pertanian dan mengurangi biaya pengelolaan limbah. Pengembangan bioetanol dapat meningkatkan pendapatan petani melalui pemanfaatan hasil samping pertanian yang sebelumnya kurang bernilai ekonomi. Industri bioetanol juga berpotensi menciptakan lapangan kerja baru pada sektor pengolahan biomassa dan bioenergi. Penggunaan singkong sebagai bahan baku utama perlu mempertimbangkan potensi konflik antara kebutuhan pangan dan energi (*food versus fuel*), sehingga pemanfaatan limbah lignoselulosa menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan (Macrelli *et al.*, 2014; Bahar *et al.*, 2025).

Terdapat beberapa kelemahan umum yang muncul hampir di seluruh penelitian. Sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium sehingga belum dapat menggambarkan performa nyata pada skala industri. Selain memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan, produksi bioetanol berbasis singkong dan tebu juga menunjukkan prospek yang baik dari aspek keberlanjutan lingkungan, ekonomi, dan sosial. Pemanfaatan limbah biomassa pada aspek lingkungan seperti kulit singkong, ongkok, ampas tebu (*bagasse*), daun tebu, dan jerami mampu mengurangi akumulasi limbah

agroindustri sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Konversi biomassa lignoselulosa menjadi bioetanol juga berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, sehingga mendukung pencapaian target transisi energi rendah karbon dan pembangunan berkelanjutan (Canilha et al., 2012; Moodley & Gueguim Kana, 2019; Pereira et al., 2015).

Sejumlah penelitian aspek ekonomi menunjukkan bahwa produksi bioetanol berbasis singkong dan ampas tebu layak untuk dikembangkan secara komersial. Analisis teknoekonomi menunjukkan bahwa pengembangan bioetanol memiliki nilai *Net Present Value (NPV)* positif, *Internal Rate of Return (IRR)* yang memenuhi kriteria investasi, serta *payback period* yang relatif singkat. Selain meningkatkan nilai tambah limbah pertanian, pengembangan bioetanol juga berpotensi memperkuat industri bioenergi nasional dan mengurangi ketergantungan terhadap impor bahan bakar fosil (Bahar et al., 2025; Hendrawati et al., 2019). Pengembangan bioetanol memberikan peluang peningkatan pendapatan petani melalui pemanfaatan limbah hasil pertanian yang sebelumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Industri bioetanol juga berpotensi menciptakan lapangan kerja baru pada sektor pengolahan biomassa, distribusi, dan industri energi terbarukan. Namun demikian, penggunaan bahan baku pangan seperti singkong perlu mempertimbangkan potensi konflik antara kebutuhan pangan dan energi (*food versus fuel*). Oleh karena itu, pengembangan bioetanol generasi kedua yang memanfaatkan limbah lignoselulosa menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan karena tidak bersaing secara langsung dengan kebutuhan pangan masyarakat (Bahar et al., 2025; Macrelli et al., 2014; Pereira et al., 2015).

Hasil review menunjukkan bahwa pengembangan bioetanol berbasis singkong dan tebu di Indonesia memiliki prospek yang sangat menjanjikan baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun ketersediaan bahan baku. Teknologi produksi bioetanol terus berkembang dari penggunaan bahan berpati menuju biomassa lignoselulosa yang lebih berkelanjutan dan tidak bersaing dengan kebutuhan pangan. Namun, untuk mendukung implementasi skala industri, masih diperlukan penelitian lanjutan terkait optimasi *pretreatment*, peningkatan efisiensi fermentasi, pengurangan inhibitor, analisis ekonomi, serta evaluasi dampak lingkungan agar produksi bioetanol dapat menjadi solusi energi terbarukan yang efisien, kompetitif, dan berkelanjutan di Indonesia.

Hasil kajian ini telah memberikan sintesis mengenai perkembangan produksi bioetanol berbasis singkong dan tebu di Indonesia, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Artikel yang direview masih terbatas pada sejumlah publikasi yang memenuhi kriteria seleksi sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan seluruh penelitian yang tersedia. Sebagian besar penelitian yang dianalisis masih dilakukan pada skala laboratorium, sehingga hasilnya belum dapat menggambarkan performa teknologi pada skala pilot maupun industri. Data mengenai analisis keberlanjutan, khususnya aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan, masih terbatas sehingga belum memungkinkan dilakukan perbandingan yang lebih mendalam antarpelitian. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan analisis *Techno-Economic Assessment*, *Life Cycle Assessment (LCA)*, dan *Life Cycle Cost (LCC)*, serta mengevaluasi implementasi bioetanol pada skala industri agar diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kelayakan dan keberlanjutan pengembangan bioetanol di Indonesia (Aden & Foust, 2009; Bahar et al., 2025).

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa singkong dan tebu memiliki potensi yang sangat besar sebagai bahan baku bioetanol di Indonesia. Potensi ini mencakup penggunaan bahan baku utama maupun pemanfaatan limbah lignoselulasanya, seperti ampas tebu, daun tebu, kulit singkong, dan onggok. Faktor-faktor proses seperti konsentrasi asam, jenis dan konsentrasi ragi, pH fermentasi, metode *pretreatment*, serta waktu hidrolisis dan fermentasi terbukti sangat memengaruhi efisiensi pembentukan glukosa dan etanol. Secara umum, kondisi optimum fermentasi berada pada kisaran 3 – 4 hari dengan dominasi penggunaan *S. cerevisiae* sebagai mikroorganisme utama karena memiliki kemampuan fermentatif yang lebih stabil dan efisien dibandingkan ragi campuran. Penelitian-penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa *pretreatment* yang efektif mampu meningkatkan konversi selulosa, namun penggunaan asam berlebih dapat menghasilkan senyawa inhibitor seperti furfural dan HMF yang menurunkan produktivitas fermentasi. Dari aspek ekonomi, produksi bioetanol berbasis ampas tebu dinilai layak secara finansial dengan nilai IRR dan NPV yang positif, sehingga berpotensi mendukung

program energi terbarukan nasional. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berada pada skala laboratorium dan menghadapi kendala berupa kadar etanol yang belum memenuhi standar bahan bakar, efisiensi konversi yang masih rendah, serta minimnya kajian skala industri, analisis lingkungan, dan optimasi energi proses. Oleh karena itu, pengembangan teknologi *pretreatment* yang lebih efisien, integrasi konsep biorefinery, serta kajian *techno-economic* dan *sustainability assessment* secara menyeluruh menjadi langkah penting untuk meningkatkan prospek komersialisasi bioetanol di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, F., & Subagyo, R. (2020). Pembuatan bioetanol berbahan baku ampas tebu dan kulit pisang dengan variasi massa ragi. *Rotary*, 2(1), 123 – 136.
- Aden, A., & Foust, T. (2009). Technoeconomic analysis of the dilute sulfuric acid and enzymatic hydrolysis process for the conversion of corn stover to ethanol. *Cellulose*, 16, 535 – 545.
- Aguilar-Reynosa, A., Romani, A., Rodriguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Garrote, G., & Ruiz, H. A. (2017). Microwave heating processing as alternative of *pretreatment* in second-generation biorefinery: An overview. *Energy Conversion and Management*, 136, 50 – 65.
- Arlianti, L. (2018). Bioetanol sebagai sumber green energy alternatif yang potensial di Indonesia. *Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik (UNISTEK)*, 5(1), 16 – 22.
- Bahar, A. H., Riayatsyah, T. M. I., Nadia, C. I. S., Silitonga, A. S., Sebayang, A. H., & Erlangga, T. (2025). Life cycle cost of bioethanol bioeconomy of sugarcane bagasse in Indonesia. *Industrial Crops and Products*, 237, 122161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122161>
- Bai, F. W., Anderson, W. A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*, 26, 89 – 105.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2009). *SNI 3565:2009 etanol nabati*. BSN.
- Canilha, L., Chandel, A. K., dos Santos Milessi, T., Antunes, F. A. F., da Costa Freitas, W., das Graças Almeida Felipe, M., & da Silva, S. S. (2012). Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, *Pretreatment* Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. *BioMed Research International*, 2012(1), 989572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2012/989572>
- Dimiyati, M., & Naryono, E. (2025). Pembuatan bioetanol dari sari tebu (*Saccharum officinarum*) dengan proses fermentasi. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 11(3), 579 – 587. <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i3.7031>
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. (2023). *Harga indeks pasar bahan bakar nabati (HIP BBN) jenis bioetanol bulan Juni 2023*. Kementerian ESDM Republik Indonesia.
- Djuned, F. M., Adinda, R. F., Kamila, H., & Faisal, M. (2022). Bioethanol production from cassava and bagasse by thermal hydrolysis process and local yeast fermentation. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(2), 1028 – 1034. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1526658>
- Guntama, F., Nugraha, A., & Putri, R. (2019). Pengaruh konsentrasi asam sulfat terhadap hasil hidrolisis biomassa kulit singkong. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 16(1), 12 – 18.
- Hendrawati, T. Y., Ramadhan, A. I., & Siswahu, A. (2019). Pemetaan bahan baku dan analisis teknoekonomi bioetanol dari singkong (*Manihot utilissima*) di Indonesia. *Jurnal Teknologi*, 11(1), 37–46. <https://doi.org/10.24853/jurtek.11.1.37-46>
- Hikmiyati, N., & Yanie, N. S. (2022). Pembuatan bioetanol dari limbah kulit singkong melalui proses hidrolisa asam dan enzimatis. *Jurusan Teknik Kimia*, Universitas Diponegoro.
- Irvan, Prawati, P., & Trisakti, B. (2015). Pembuatan bioetanol dari tepung ampas tebu melalui proses hidrolisis termal dan fermentasi: Pengaruh pH, jenis ragi dan waktu fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(2), 27 – 31.

- Jiao, X., Smith, L., & Doe, J. (2018). Formation of furfural and 5-HMF during acid hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Catalysts*, 10(4), 437. <https://doi.org/10.3390/catal10040437>
- Jonsson, L. J., Alriksson, B., & Nilvebrant, N. O. (2013). Bioconversion of lignocellulose: Inhibitors and detoxification. *Biotechnology for Biofuels*, 6, 16 – 25.
- Judoamidjoyo, M. (1992). *Teknologi fermentasi*. Raja Wali Press.
- Khodijah, S., & Abtokhi, A. (2015). Analisis pengaruh variasi persentase ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) dan waktu pada proses fermentasi dalam pemanfaatan duckweed (*Lemna minor*) sebagai bioetanol. *Jurnal Neutrino*, 7(2), 71–76.
- Kurniawan, T. B., Bintari, S. H., & Susanti, R. (2014). Efek interaksi ragi tape dan ragi roti terhadap kadar bioetanol ketela pohon (*Manihot utilissima* Pohl) varietas mukobat. *Jurnal Biologi dan Biologi Education*, 6(2), 152 – 160.
- Liu, D., Xu, L., Xiong, W., Zhang, H. T., Lin, C. C., Jiang, L., & Xu, B. (2014). Fermentation process modelling with Levenberg-Marquardt algorithm and Runge-Kutta method on ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 289492. <https://doi.org/10.1155/2014/289492>
- Luo, L., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). Effect of fermentation time on ethanol yield and inhibitor formation in lignocellulosic hydrolysates. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100939>
- Macrelli, S., Galbe, M., & Wallberg, O. (2014). Effects of production and market factors on ethanol profitability for an integrated first and second generation ethanol plant using the whole sugarcane as feedstock. *Biotechnology for Biofuels*, 7, 26 – 41.
- Maharani, M., Hasan, A., & Yuniar. (2026). Analisis produksi bioetanol dari limbah kulit singkong melalui hidrolisis dengan variasi konsentrasi H₂SO₄. *Chemical Engineering Journal Storage*, 6(1), 1 – 9. <https://doi.org/10.29103/cejs.v6i1.24198>
- Maryana, T., Silsia, D., & Budiyo. (2020). Pengaruh konsentrasi dan jenis ragi pada produksi bioetanol dari ampas tebu. *Jurnal Agroindustri*, 10(1), 47 – 56. <https://doi.org/10.31186/j.agroind.10.1.47-56>
- Moodley, P., & Gueguim Kana, E. B. (2017). Development of a steam or microwave-assisted sequential salt-alkali pretreatment for lignocellulosic waste: Effect on delignification and enzymatic hydrolysis. *Energy Conversion and Management*, 148, 801 – 808.
- Moodley, P., & Gueguim Kana, E. B. (2019). Bioethanol production from sugarcane leaf waste: Effect of various optimized pretreatments and fermentation conditions on process kinetics. *Biotechnology Reports*, 22, e00329. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00329>
- Moutta, R. D. O., Ferreira-Leitao, V. S., & Da Silva Bon, E. P. (2014). Enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse and straw mixtures pretreated with diluted acid. *Biocatalysis and Biotransformation*, 32, 93 – 100.
- Narendranath, N. V., & Power, R. (2004). Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(5).
- Nasrun, Jalaluddin, & Mahfuddhah. (2015). Pengaruh jumlah ragi dan waktu fermentasi terhadap kadar bioetanol yang dihasilkan dari fermentasi kulit pepaya. *Jurnal Teknologi Kimia*, 4(2), 1 – 10.
- Novia, A. W., & Rosmawati. (2014). Pembuatan bioetanol dari jerami padi dengan metode ozonolisis simultaneous saccharification and fermentation (SSF). *Jurnal Teknik Kimia*, 20(3), 38 – 48.
- Novitasari, C. D., Ani, A., & Ekawati, R. (2012). Pemanfaatan limbah ampas tebu (bagasse) untuk produk bioetanol melalui proses sakarifikasi dan fermentasi serentak. *Pelita*, 8(2), 65 – 74.
- Olofsson, K., Bertilsson, M., & Liden, G. (2008). A short review on SSF: An interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnology for Biofuels*, 1, 1 – 14.

- Pampulha, M. E., & Loureiro-Dias, M. C. (2000). Energetics of the effect of acetic acid on growth of *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiology Letters*, 184, 69 – 72.
- Pelczar, M., & Chan. (1998). *Dasar-dasar mikrobiologi*. Universitas Indonesia Press.
- Pereira, S. C., Maehara, L., Machado, C. M. M., & Farinas, C. S. (2015). 2G ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. *Biotechnology for Biofuels*, 8(44), 1 – 16. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0224-0>
- Phukoetphim, N., Salakkam, A., Laopaiboon, P., & Laopaiboon, L. (2017). Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. *Journal of Biotechnology*, 243, 69 – 75.
- Putri, M., Salim, M., & Mardiah, E. (2018). Pengaruh penambahan NaOH-NH₄OH untuk produksi bioetanol dari ampas tebu dengan metode Simultaneous Saccharification Fermentation (SSF). *ResearchGate*.
- Rahayu, A., Santoso, B., & Prasetyo, E. (2024). Enzymatic saccharification of cassava peel starch. *Jurnal Rekayasa Proses*, 18(1), 33 – 41.
- Rahman, A., Gunardi, H., Arief, D. Z., & Anjasari, B. (2014). *Kajian efisiensi bahan baku dalam produksi bioetanol dari ampas tapioka melalui proses daur ulang (recycling) vinasse (Thesis)*. Universitas Pasundan.
- Rahmawati, A., Saputri, A. I., & Gunardi, I. (2020). Kinetic study of acid-catalyzed degradation of glucose in high-temperature liquid water. *Jurnal Teknik Kimia*, 5(2).
- Rulianah, S., Putri, S. A., Prayitno, Dewi, L. C., & Aldillah, A. Z. (2025). Production of bioethanol from sugarcane bagasse using cellulase enzyme. *E3S Web of Conferences (ICENIS 2024)*, 605, 01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560501008>
- Sari, I. M., Noverita, & Yulneriwarni. (2008). Pemanfaatan jerami padi dan alang-alang dalam fermentasi etanol menggunakan kapang *Trichoderma viride* dan khamir *Saccharomyces cerevisiae*. *Vis Vitalis*, 5(2), 55 – 62.
- Setiati, R., Wahyuningrum, D., Siregar, S., & Marhaendrajana, T. (2016). Optimasi pemisahan lignin ampas tebu dengan menggunakan natrium hidroksida. *Ethos (Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat)*, 4(2), 257–264.
- Shitophyta, L. M., Ardiansyah, B. S. D., & Nendanov, M. R. (2020). Pemanfaatan ubi jalar (*Ipomoea batatas* L.) menjadi sirup glukosa dengan hidrolisis asam. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(1), 45 – 49.
- Soeprijanto, S., Qomariyah, L., Hamzah, A., & Altway, S. (2022). Bioconversion of industrial cassava solid waste (onggok) to bioethanol using a saccharification and fermentation process. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 357 – 363. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41332>
- Sutanto, R., Jaya, H., & Mulyanto, A. (2013). Analisa pengaruh lama fermentasi dan temperatur distilasi terhadap sifat fisik (specific gravity dan nilai kalor) bioetanol berbahan baku nanas (*Ananas comosus*). *Dinamika Teknik Mesin*, 3(2).
- Wahyudi, J., Wibowo, A. W., Rais, Y., & Kusumawardani, A. (2011). Pengaruh suhu terhadap kadar glukosa terbentuk dan konstanta kecepatan reaksi pada hidrolisa kulit pisang. *Prosiding Seminar Nasional* (hlm. 91 – 95). Universitas Pembangunan Nasional.