

## MINI REVIEW: MENKKAJI POTENSI BAKTERI UNTUK PRODUKSI BIOETHANOL BERKELANJUTAN

### A MINI REVIEW: EXPLORING BACTERIAL POTENTIAL FOR SUSTAINABLE BIOETHANOL PRODUCTION

Muhammad Raihan Aswat, Rudi Kartika\*, Dirga Hosea Seventeen Jofri, Muhammad Adhitya Rizkirullah, Andi Kurniawan, Andi Aulia Urrahman Azka

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Samarinda

\*Corresponding author: [rudi\\_biokimia@yahoo.com](mailto:rudi_biokimia@yahoo.com)

#### ABSTRACT

The need for renewable energy such as bioethanol is increasingly urgent to overcome dependence on fossil fuels and food security issues. The use of bacteria to ferment non-food lignocellulosic biomass is a strategic alternative due to its ability to process a variety of substrates, including pentose that cannot be metabolized by yeast. This article presents a systematic literature review of international journals (2015-2025) to evaluate the effectiveness of various bacteria in bioethanol production. The study methodology focused on comparing the types of microorganisms, raw materials, process methodologies, bioethanol yields produced. The results of the study highlight the great potential of specific bacteria. *Zymomonas mobilis* showed the highest efficiency, achieving 100% yield through a cell-free system due to its superior Entner-Doudoroff metabolic pathway. Other bacteria such as *Escherichia coli* (90%) and *Bacillus subtilis* (76.8%) demonstrated excellent raw material flexibility. Additionally, engineered *Clostridium thermocellum* (70%) stood out for its ability to perform Consolidated Bioprocessing at high temperatures. However, challenges were encountered with *Enterobacter* sp., which only produced 23.6% ethanol due to its natural metabolism, which tends toward mixed acid fermentation. It was concluded that the use of bacteria is highly effective for bioethanol production but its effectiveness is highly dependent on strain selection and process engineering.

**Keywords:** Bioethanol, Bacteria, *Zymomonas mobilis*, Entner-Doudoroff,

#### ABSTRAK

Kebutuhan akan energi terbarukan seperti bioetanol semakin mendesak untuk mengatasi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan isu ketahanan pangan. Pemanfaatan bakteri untuk memfermentasi biomassa lignoselulosa non-pangan menjadi alternatif strategis karena kemampuannya mengolah beragam substrat, termasuk gula pentosa (C5) yang tidak dapat dimetabolisme oleh ragi. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur sistematis terhadap jurnal internasional (2015-2025) untuk mengevaluasi efektivitas berbagai bakteri dalam produksi bioetanol. Metodologi kajian berfokus pada perbandingan jenis mikroorganisme, bahan baku, metodologi proses, dan rendemen etanol yang dihasilkan. Hasil kajian menyoroti potensi besar bakteri spesifik. *Zymomonas mobilis* menunjukkan efisiensi tertinggi, mencapai 100% rendemen melalui sistem bebas sel karena jalur metabolik Entner-Doudoroff (ED) yang unggul. Bakteri lain seperti *Escherichia coli* (90% dari hidrolisat kayu) dan *Bacillus subtilis* (76,8% dari ampas tebu) menunjukkan fleksibilitas bahan baku yang sangat baik. Selain itu, *Clostridium thermocellum* yang direkayasa (70%) menonjol karena kemampuannya melakukan Consolidated Bioprocessing (CBP) pada suhu tinggi. Namun, tantangan ditemukan pada *Enterobacter* sp. yang hanya menghasilkan 23,6% etanol akibat metabolisme alaminya yang cenderung ke fermentasi asam campuran. Disimpulkan bahwa penggunaan bakteri sangat efektif untuk produksi bioetanol, namun efektivitasnya sangat bergantung pada pemilihan galur dan rekayasa proses.

**Kata kunci:** Bioetanol, Bakteri, *Zymomonas mobilis*, Entner-Doudoroff

#### PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sumber energi alternatif yang berkelanjutan semakin meningkat seiring dengan berkurangnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya dampak negatif terhadap lingkungan akibat emisi karbon [1]. Bioetanol merupakan salah satu energi terbarukan yang banyak dikembangkan karena sifatnya yang ramah lingkungan, dapat diperbarui, dan kompatibel sebagai campuran bahan bakar transportasi [2]. Produksi

bioetanol secara konvensional mengandalkan fermentasi gula dari tanaman berpati atau bergula seperti tebu dan jagung, tetapi pendekatan ini menimbulkan isu kompetisi terhadap kebutuhan pangan, sehingga perlu dikembangkan sumber dan metode produksi lain yang lebih berkelanjutan [3].

Pemanfaatan bakteri sebagai agen fermentasi dalam produksi bioetanol menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan, terutama dalam pengolahan biomassa lignoselulosa atau limbah pertanian [4]. Bakteri memiliki karakteristik pertumbuhan cepat, kemampuan beradaptasi dengan kondisi lingkungan luas, serta dapat memfermentasi berbagai jenis monosakarida termasuk pentosa yang tidak dapat dimetabolisme oleh ragi konvensional seperti *Saccharomyces cerevisiae* [5]. Dengan demikian, bakteri memungkinkan peningkatan efisiensi konversi biomassa menjadi bioetanol pada skala industri.

Salah satu bakteri yang paling banyak diteliti untuk produksi bioetanol adalah *Zymomonas mobilis*, yang memfermentasi glukosa melalui jalur Entner–Doudoroff yang menghasilkan etanol dengan efisiensi lebih tinggi dan produksi biomassa lebih rendah dibandingkan ragi [6]. Selain itu, kelompok bakteri *Clostridium* juga berpotensi besar karena memiliki enzim selulolitik yang mampu menghidrolisis selulosa secara langsung, sehingga dapat memanfaatkan biomassa kompleks tanpa proses *pretreatment* enzimatik yang intensif [7]. Kemampuan ini membuat bakteri sangat relevan dalam pendekatan *Consolidated Bioprocessing* (CBP), di mana hidrolisis dan fermentasi dapat berlangsung dalam satu tahap proses.

Walaupun potensinya besar, tantangan dalam pemanfaatan bakteri sebagai penghasil bioetanol masih signifikan, seperti toleransi etanol yang rendah, stabilitas proses fermentasi, kebutuhan rekayasa genetika untuk peningkatan rendemen, dan optimasi kondisi fermentasi agar sesuai dengan skala industri [8]. Oleh karena itu, kajian literatur komprehensif diperlukan untuk memahami efektivitas berbagai bakteri penghasil bioetanol, parameter proses fermentasi yang memengaruhi hasil, serta arah pengembangan teknologi di masa mendatang.

## METODE

Dengan melakukan studi literatur yang berkaitan dan eksklusif. Adapun kriteria literatur yang digunakan, yaitu artikel-artikel penelitian yang dipublikasikan dari tahun 2015-2025. Penelitian berfokus pada kemampuan bakteri untuk menghasilkan bioetanol. Literatur merupakan artikel-artikel yang dipublikasikan pada jurnal internasional. Kriteria eksklusif pada studi literatur ini antara lain, bakteri yang digunakan, sumber bakteri yang diperoleh, metodologi pembuatan bioetanol dan rendemen etanol yang dihasilkan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan membandingkan lima artikel yang menguji kemampuan bakteri untuk menghasilkan bioetanol dari bahan baku dan metodologi yang dilakukan dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 1.** Perbandingan Hasil Bioetanol yang Dihasilkan oleh Beberapa Bakteri

Mikroorganisme	Bahan Baku Utama	Metodologi	Rendemen Etanol	Referensi
<i>Bacillus subtilis</i>	Hidrolisat Ampas Tebu	Hidrolisis Selulase ( <i>B. subtilis</i> ) dan Fermentasi Inokulum Campuran	122,16 mL/kg (76,8%)	[9]
<i>Escherichia coli</i>	Hidrolisat Kayu Jati	Sakarifikasi dan Detoksifikasi	90%	[10]
<i>Enterobacter</i> sp.	Limbah Kulit Pisang Kering	Fermentasi Substrat	23,6%	[11]
<i>Zymomonas mobilis</i>	Glukosa/Natrium Glukonat	Sistem Ekstrak Bebas Sel	100%	[12]
<i>Clostridium thermocellum</i>	<i>Clostridium thermocellum</i> (rekayasa)	Rekayasa metabolik pada suhu tinggi	21,3 g/L (70%)	[13]

Berdasarkan tabel diatas, menunjukkan bahwa bakteri dapat menawarkan solusi inovatif untuk menghasilkan bioetanol. Terlebih sebagai alternatif ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) yang sangat umum digunakan sebagai penghasil etanol. Dapat dilihat pada kelima penelitian yang menggunakan bakteri sebagai bahan produksi etanol, menunjukkan kemampuan yang berbeda-beda dimana bakteri *Zymomonas mobilis* dari Natrium Glukonat menggunakan metode sistem ekstrak bebas sel mampu menghasilkan kadar etanol sebesar

100%. Diikuti dengan bakteri-bakteri lain seperti *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* dan *Clostridium thermocellum* yang juga efektif menghasilkan etanol > 70%. Dan pada bakteri *Enterobacter* sp. hanya dapat menghasilkan etanol dengan kadar 23,6%.

Pada umumnya, bioetanol yang dihasilkan oleh mikroorganisme (bakteri) dilakukan melalui proses fermentasi gula menjadi etanol [2]. Kemampuan bakteri untuk menghasilkan etanol berasal dari aktivitas enzimatik dalam jalur metabolik piruvat, dimana terdapat dua rute utama yaitu, dekarboksilasi non oksidatif dan dekarboksilasi oksidatif yang berujung pada pembentukan asetaldehida dan etanol [14]. Hal ini yang menjadi poin penting dalam produksi bioetanol karena bakteri memiliki kemampuan adaptif dan regenerasi yang relatif cepat sehingga dapat meningkatkan efektifitas produksi bioetanol [15].

Dari data Tabel 1. dimana bakteri *Zymomonas mobilis* dapat menghasilkan etanol hingga 100% melalui metode sistem sel bebas. Kemampuan ini ditunjukkan karena *Zymomonas mobilis* menggunakan jalur Entner-Doudoroff (ED) yang dapat menghasilkan lebih banyak etanol per unit glukosa dibandingkan melalui jalur glikolisis standar [16]. Lalu pada *Bacillus subtilis* digunakan untuk produksi selulase sehingga ampas tebu sebagai bahan baku hidrolisis menunjukkan kemampuan adaptasi bakteri untuk menghasilkan bioetanol hingga 90% [9]. Fleksibilitas bahan baku juga ditunjukkan oleh bakteri *E. coli* dengan konfigurasi dalam fermentasi gula pentosa (C5) seperti xilosa yang melimpah dalam lignoselulosa dimana gula ini tidak dapat difermentasi oleh ragi alami [10]. Selanjutnya, *Clostridium thermocellum* yang direkayasa sehingga mampu memproduksi bioetanol pada suhu tinggi. Ini menjadi metode yang dapat dipilih karena mengurangi biaya pendinginan dan risiko kontaminasi [17]. Dengan kemampuannya yang menghasilkan etanol hingga 70% bakteri ini menjadi kandidat utama untuk metode *Consolidated Bioprocessing* (CBP) dimana bakteri dapat melakukan hidrolisis dan fermentasi secara bersamaan.

Meskipun beberapa bakteri memiliki efektifitas yang menjanjikan dalam menghasilkan bioetanol. Terdapat beberapa tantangan yang dihadapi agar produksi bioetanol dapat dilakukan. Seperti pada *Enterobacteriaceae*. yang hanya mampu menghasilkan bioetanol dengan kadar 23,6%. Hal ini terjadi karena pada famili *Enterobacter* sp. secara alami melakukan fermentasi asam campuran dimana karbon dialihkan untuk memproduksi asetat, laktat dan suksinat selain etanol [18]. Dan juga pada bakteri lain seperti *E. coli* dan *Z. mobilis* yang sensitif terhadap inhibitor furan dan fenolik. Dimana kedua senyawa ini banyak ditemukan pada lignoselulosa [19]. Terutama pada *E. coli* yang memerlukan langkah detoksifikasi dimana langkah ini akan menambah biaya dan kompleksitas proses [10]. Serta adanya rekayasa genetik dari bakteri untuk menonaktifkan jalur asam dan/atau menyisipkan jalur etanol baru terkadang sulit dilakukan karena keterbatasan sifat alami jalur bakteri [13].

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi literatur sebanyak 5 artikel. Dapat disimpulkan bahwa *Zymomonas mobilis* merupakan bakteri yang dapat menghasilkan bioetanol tertinggi dengan kadar 100% dengan efisiensi jalur metabolik Entner-Doudoroff (ED). Bakteri lain seperti *Bacillus subtilis*, *E. coli* dan *Clostridium thermocellum* dapat dijadikan alternatif produksi bioetanol dengan kemampuan adaptif pada bahan baku untuk hidrolisis gula serta merekayasa gen bakteri. Namun, beberapa bakteri tipe liar seperti pada famili *Enterobacteriaceae* tidak termasuk alternatif unggul karena metabolisme alami mereka yang hanya sedikit memproduksi etanol.

## DATAR PUSTAKA

- [1] A. Demirbas, "Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections," *Energy Convers Manag*, vol. 49, no. 8, pp. 2106–2116, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.02.009.
- [2] M. Balat and H. Balat, "Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel," *Appl Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2273–2282, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.015.
- [3] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout, and A. K. Dalai, "Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 578–597, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.003.
- [4] L. R. Lynd, P. J. Weimer, W. H. van Zyl, and I. S. Pretorius, "Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology," *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 66, no. 3, pp. 506–577, 2002, doi: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002.
- [5] Y. H. P. Zhang, M. E. Himmel, and J. R. Mielenz, "Outlook for cellulase improvement: Screening and selection strategies," *Biotechnol Adv*, vol. 24, no. 5, pp. 452–481, 2006, doi: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.003.

- [6] P. L. Rogers, Y. J. Jeon, K. J. Lee, and H. G. Lawford, “Zymomonas mobilis for fuel ethanol and higher value products,” *Adv Biochem Eng Biotechnol*, vol. 108, pp. 263–288, 2007, doi: 10.1007/10\_2007\_064.
- [7] M. Taha, M. Foda, E. Shahsavari, A. Aburto-Medina, and A. S. Ball, “Commercial feasibility of lignocellulose biodegradation: Possibilities and challenges,” *Curr Opin Biotechnol*, vol. 38, pp. 190–197, 2016, doi: 10.1016/j.copbio.2016.02.012.
- [8] H. Li, H. D. Shin, and R. Chen, “Integrated bioprocessing for bioethanol production from lignocellulosic biomass,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 11, p. 100498, 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100498.
- [9] C. R. Utami, H. T. Palupi, and E. Ernawati, “Produksi Bioetanol dari Hidrolisat Ampas Tebu Sistem Selulase *B. Subtilis* dengan Variasi Waktu dan Jenis Inokulum,” *Indonesian Sugar Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 80–92, Dec. 2024, doi: 10.54256/isrj.v4i2.130.
- [10] E. Sierra-Ibarra *et al.*, “Ethanol production by *Escherichia coli* from detoxified lignocellulosic teak wood hydrolysates with high concentration of phenolic compounds,” *J Ind Microbiol Biotechnol*, vol. 49, no. 2, Mar. 2022, doi: 10.1093/jimb/kuab077.
- [11] D. Sarkar, S. Prajapati, K. Poddar, and A. Sarkar, “Production of ethanol by *Enterobacter* sp. EtK3 during fruit waste biotransformation,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 145, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104795.
- [12] A. Aminian and E. Motamedian, “Investigating ethanol production using the *Zymomonas mobilis* crude extract,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28396-4.
- [13] L. Tian *et al.*, “Enhanced ethanol formation by *Clostridium thermocellum* via pyruvate decarboxylase,” *Microb Cell Fact*, vol. 16, no. 1, Oct. 2017, doi: 10.1186/s12934-017-0783-9.
- [14] V. G. Yadav, M. De Mey, C. G. Lim, P. K. Ajikumar, and G. Stephanopoulos, “The future of biofuels: Genetic engineering of microbial pathways for production of advanced biofuels,” *RSC Adv*, vol. 8, no. 46, pp. 26191–26212, 2018, doi: 10.1039/C8RA04011H.
- [15] M. X. He *et al.*, “Engineering microbial tolerance to inhibitors for biofuel production,” *Front Microbiol*, vol. 10, p. 435, 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.00435.
- [16] B. C. Saha, “*Zymomonas mobilis* an alternative microorganism for fuel ethanol production,” *J Microbiol Methods*, vol. 137, pp. 10–14, 2017.
- [17] L. R. Lynd, A. M. Guss, W. R. Kenealy, B. Papanek, T. Rydzak, and X. Shao, “Advances in consolidated bioprocessing,” *Curr Opin Biotechnol*, vol. 45, pp. 222–230, 2017.
- [18] D. P. Clark and J. S. Lolkema, “Variations in the mixed-acid fermentation pathways of *Escherichia coli*,” *Adv Microb Physiol*, vol. 48, pp. 47–90, 2003.
- [19] L. J. Jönsson and C. Martín, “Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory compounds and strategies for minimizing their effects,” *Bioresour Technol*, vol. 199, pp. 103–112, 2016.