

Review:
**Teknologi Konversi Crude Glycerol menjadi Bioetanol:
Solusi Berkelanjutan untuk Transisi Energi Terbarukan**

Herliati Rahman

Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Universitas Jayabaya

herliati@ftijayabaya.ac.id

Abstrak

Artikel ini menyajikan tinjauan komprehensif mengenai teknologi produksi bioetanol berbasis *crude glycerol*, produk sampingan dari industri biodiesel, sebagai solusi transisi menuju energi terbarukan yang berkelanjutan. *Crude glycerol*, yang sering dianggap limbah, memiliki potensi besar untuk diubah menjadi bioetanol melalui fermentasi. Tinjauan ini mengumpulkan dan menganalisis berbagai penelitian tentang metode konversi, kondisi fermentasi optimal, serta tantangan dan peluang dalam produksi bioetanol dari *crude glycerol*. Hasil studi menunjukkan bahwa mikroorganisme seperti *Escherichia coli* dan *Saccharomyces cerevisiae* mampu mengkonversi *crude glycerol* menjadi bioetanol dengan yield bervariasi tergantung kondisi fermentasi. Penggunaan pretreatment untuk mengurangi impurities dalam *crude glycerol* dan penambahan nutrisi tambahan terbukti meningkatkan hasil bioetanol. Artikel ini juga membahas tantangan dalam mengoptimalkan kondisi fermentasi dan peluang dalam pengembangan teknologi konversi, seperti rekayasa genetika dan inovasi pretreatment. Kesimpulannya, teknologi produksi bioetanol berbasis *crude glycerol* menawarkan potensi signifikan untuk mendukung transisi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, meskipun diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi tantangan teknis dan operasional.

Kata Kunci: Biodiesel, Energi terbarukan, Keberlanjutan, Rekayasa genetik

Abstract

This article presents a comprehensive review of bioethanol production technology based on crude glycerol, a by-product of the biodiesel industry, as a solution for transitioning to sustainable renewable energy. Crude glycerol, often considered waste, has significant potential to be converted into bioethanol through fermentation. This review compiles and analyzes various studies on conversion methods, optimal fermentation conditions, as well as the challenges and opportunities in producing bioethanol from crude glycerol. The findings indicate that microorganisms such as Escherichia coli and Saccharomyces cerevisiae can convert crude glycerol into bioethanol with yields varying depending on fermentation conditions. The use of pretreatment to reduce impurities in crude glycerol and the addition of extra nutrients have been shown to enhance bioethanol yields. The article also discusses the challenges in optimizing fermentation conditions and the opportunities in developing conversion technologies, such as genetic engineering and innovative pretreatment methods. In conclusion, bioethanol production technology based on crude glycerol offers significant potential to support the transition to sustainable and environmentally friendly energy, although further research is needed to address technical and operational challenges.

Keywords: Biodiesel, Genetic engineering, Renewable energy, Sustainability

PENDAHULUAN

Transisi menuju energi baru terbarukan menjadi semakin mendesak di tengah meningkatnya kesadaran global tentang perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya fosil [1], [2]. Indonesia, sebagai negara dengan keanekaragaman sumber daya alam, memiliki tanggung jawab besar dalam menciptakan solusi berkelanjutan untuk kebutuhan energi nasional [3], [4], [5]. Bioetanol, sebagai salah satu bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan, telah menarik perhatian luas karena potensinya dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca [6], [7]. Bioetanol merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang dihasilkan melalui proses fermentasi biomassa, yang merupakan bahan baku yang dapat diperbaharui secara alami melalui kegiatan pertanian dan industri [8]. Keberadaan bioetanol memberikan keunggulan signifikan dalam upaya mengurangi ketergantungan pada minyak bumi dan mengurangi emisi karbon [9], [10]. Sebagai bahan bakar, bioetanol digunakan dalam campuran dengan bensin untuk kendaraan bermotor, dan campuran ini dikenal sebagai E10 (10% bioetanol) atau E85 (85% bioetanol), tergantung pada konsentrasi etanol dalam campuran tersebut [11], [12]. Seiring dengan pergeseran global menuju energi terbarukan, dunia perlu menggali potensi pengembangan sumber energi ramah lingkungan dan berkelanjutan, tidak terkecuali Indonesia [13][14].

Produksi bioetanol umumnya menggunakan bahan baku seperti jagung, tebu, atau biomassa lignoselulosa. Namun, bahan baku tersebut seringkali bersaing dengan kebutuhan pangan serta memiliki biaya produksi yang tinggi. [15]. Oleh karena itu, penelitian intensif terus dilakukan untuk mengembangkan teknologi proses produksi bioetanol yang lebih efisien, ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan [16]. *Crude glycerol*, produk sampingan dari proses produksi biodiesel, menawarkan solusi yang menarik untuk menjawab tantangan ini. *Crude glycerol* tersedia melimpah karena setiap produksi biodiesel menghasilkan sekitar 10% *crude glycerol* sebagai limbah, yang jika tidak diolah dengan benar, dapat menimbulkan masalah lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan *crude glycerol* sebagai bahan baku produksi bioetanol tidak hanya membantu mengatasi masalah limbah, tetapi juga menyediakan sumber bahan bakar terbarukan yang lebih ekonomis [17], [18]. Produksi bioetanol dari bahan baku gliserol, disebut dengan teknologi bioetanol generasi ke-4 [19]. Hasil penelitian menunjukkan, metode ini dapat mengatasi beberapa kelemahan yang ada pada metode-metode sebelumnya. Beberapa isu fundamental seperti waktu reaksi yang lama dan yield yang rendah masih menjadi tantangan saat ini [20].

Keunggulan dari teknologi konversi *crude glycerol* menjadi bioetanol yaitu dapat menggabungkan proses hidrolisis dan fermentasi dalam satu tahap [21]. Hal ini dimungkinkan karena gliserol merupakan sumber karbon tunggal yang secara langsung dapat diubah menjadi etanol tanpa melalui tahap hidrolisis secara terpisah [22]. Meskipun teknologi ini memberikan harapan yang dapat diandalkan, namun tentu saja masih dihadapkan pada berbagai tantangan. Oleh karena itu, diperlukan kajian mendalam terhadap perkembangan hasil dan tantangan-tantangan yang muncul dari teknologi tersebut. Hal ini menjadi peluang bagi para peneliti untuk mengembangkan yang lebih inovatif [23].

Artikel ini merupakan tinjauan literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan dan menganalisis berbagai penelitian yang telah dilakukan terkait teknologi produksi bioetanol dengan berbagai metode. Artikel ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian dan pengembangan lebih lanjut di bidang bioetanol berbasis *crude glycerol*.

METODE PENELITIAN

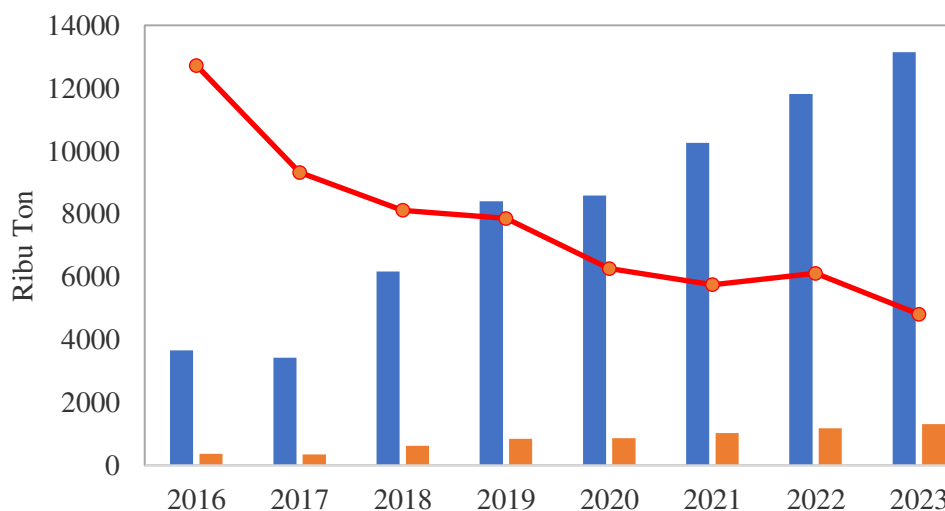
Metode yang digunakan dalam studi ini adalah kajian literatur yang melibatkan beberapa hasil penelitian mengenai metode konversi, kondisi fermentasi yang optimal, serta tantangan dan peluang yang dihadapi dalam proses tersebut. Sumber-sumber informasi beragam mencakup laporan penelitian, prosiding konferensi, dan artikel ilmiah yang relevan menjadi acuan dalam penulisan artikel ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Crude Gliserol

Dikenal luas bahwa konsumsi biodiesel secara global, termasuk di Indonesia, terus meningkat secara signifikan dari tahun ke tahun [6]. Peningkatan ini sejalan dengan pertumbuhan jumlah kendaraan dan upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil [24]. Namun, salah satu tantangan utama dalam produksi biodiesel adalah pembentukan gliserol sebagai produk samping selama reaksi transesterifikasi [25]. Secara umum metode produksi biodiesel menghasilkan gliserol sekitar 10 persen dari total berat biodiesel yang dihasilkan. Dengan kata lain, untuk setiap 100 kg biodiesel yang diproduksi, menunjukkan sekitar 10 kg gliserol juga dihasilkan [26]. Selain itu, menurut penelitian sebelumnya, pasar gliserol menunjukkan reaksi yang kuat terhadap peningkatan ketersediaan gliserol di pasar [27]. Seperti disebutkan bahwa gliserol adalah limbah dari produksi biodiesel, maka dapat menyebabkan masalah pencemaran lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, banyak penelitian dan upaya industri difokuskan pada pengembangan cara-cara untuk memanfaatkan gliserol tersebut agar tidak menjadi limbah, termasuk dalam konteks penggunaannya sebagai sumber energi yang bernilai jual. Gambar 1 menunjukkan produksi biodiesel dari Tahun 2016 hingga Tahun 2023 yang terus meningkat [28].

Salah satu diversifikasi pemanfaatan gliserol adalah konversi menjadi etanol [29]. Penggunaan gliserol limbah dari proses produksi biodiesel mencerminkan pendekatan yang berkelanjutan dan efisien dalam mengelola limbah dan sumber daya yang tersedia, serta memberikan kontribusi positif pada upaya global untuk mengurangi emisi dan dampak lingkungan [30].



Gambar 1. Produksi biodiesel dan gliserol mentah Indonesia dari tahun 2016 hingga 2023 [28]

Tentunya, penting untuk mengeksplorasi lebih lanjut mengenai kemampuan gliserol sebagai sumber biomassa yang langsung dapat dikonversi menjadi etanol dengan bantuan mikroorganisme tertentu, seperti jamur atau bakteri [31], [32]. Proses ini menawarkan keunggulan signifikan dalam hal menghilangkan tahap hidrolisis yang umumnya diperlukan pada bahan baku lain yang berasal dari biomassa lignoselulosa [33].

Dengan menggunakan gliserol sebagai bahan baku, secara teori dapat terjadi peningkatan efisiensi produksi dan peningkatan yield bioetanol yang dihasilkan pada waktu yang bersamaan. Dengan demikian, potensi untuk mengurangi waktu reaksi yang diperlukan dan meningkatkan jumlah bioetanol yang dihasilkan menjadi lebih besar [34]. Hal ini dapat menjadi langkah progresif dalam mereduksi biaya keseluruhan produksi bioetanol, sekaligus meningkatkan keberlanjutan ekonomi dari proses tersebut. Oleh karena itu, eksplorasi lebih lanjut mengenai proses konversi gliserol menjadi bioetanol memiliki implikasi yang signifikan dalam memperkuat infrastruktur energi terbarukan dan berkelanjutan [35], [36].

Produksi Bioetanol

Fermentasi mikroba merupakan salah satu metode yang paling efektif dan banyak diteliti untuk mengkonversi biomassa menjadi bioetanol [37], [38], [39], [40]. Berbagai jenis mikroorganisme telah diuji untuk tujuan ini, dengan hasil yang menunjukkan variasi dalam efisiensi konversi dan ketahanan terhadap kondisi fermentasi. Mikroorganisme yang umum digunakan yaitu *Escherichia coli* dan *Saccharomyces cerevisiae* [41], [42]. *Saccharomyces cerevisiae* (ragi) adalah salah satu jenis jamur yang paling umum digunakan untuk merombak gula menjadi bioetanol pada kondisi anaerobik [43]. Hal ini karena *saccharomyces cerevisiae* memiliki toleransinya terhadap kondisi fermentasi yang beragam dan kemampuannya menghasilkan bioetanol dalam jumlah signifikan. Salah satu kelebihan *S. cerevisiae* adalah kemampuannya untuk bertahan dalam lingkungan dengan kadar etanol tinggi hingga 50%, yang memungkinkan proses fermentasi yang lebih panjang dan yield etanol yang lebih tinggi [44], [45].

Escherichia coli adalah juga bakteri yang paling sering digunakan dalam fermentasi anaerobik untuk mengonversi *crude glycerol* menjadi bioetanol. Dalam kondisi anaerobik, *E. coli* dapat memanfaatkan *crude glycerol* secara efisien, menghasilkan bioetanol dengan yield yang signifikan [46], [47]. Penelitian menunjukkan bahwa *E. coli* mampu bertahan dalam kondisi fermentasi dimana terdapat impurities seperti garam dan methanol meskipun tetap menjadi tantangan. Teknik rekayasa genetika dapat digunakan untuk meningkatkan toleransi *E. coli* terhadap impurities ini, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi proses fermentasi [48].

Hingga saat ini, produksi bioetanol dari berbagai biomassa telah berkembang dengan pola yang beragam, tergantung pada faktor lokasi, teknologi yang digunakan, dan sumber bahan baku yang tersedia [49], [50]. Bioetanol generasi pertama dari singkong, jagung, gandum menunjukkan hasil yang dicapai cukup signifikan, mencapai sekitar 60-70 miliar liter per tahun secara global [51], [52]. Beberapa negara, seperti Amerika Serikat, Brasil, dan Eropa, telah menjadi produsen utama bioetanol dari sumber-sumber generasi pertama ini. Namun sumber bahan baku tersebut belum mampu memenuhi permintaan produksi bioetanol global sebagai energi alternatif. Hal ini karena akan berhadapan dengan krisis pangan dunia dan ketersediaan lahan pertanian [53]. Bioetanol generasi kedua, yang diproduksi dari bahan baku lignoselulosa seperti residu pertanian dan biomassa kayu, menghadapi beberapa tantangan utama. Proses pretreatment yang kompleks dan mahal diperlukan untuk memecah struktur lignoselulosa, dan efisiensi hidrolisis enzimatis sering terhambat oleh senyawa pengotor. Mikroorganisme harus dioptimalkan untuk memfermentasi berbagai gula kompleks seperti xilosa dan arabinosa, sementara impurities dari proses pretreatment dapat

menghambat fermentasi [39], [54]. Sementara itu, bioetanol generasi ketiga, yang diproduksi dari alga dan mikroorganisme lainnya, menghadapi tantangan signifikan dalam skala besar. Tantangan utama termasuk optimasi pertumbuhan alga, yang memerlukan kondisi lingkungan yang spesifik seperti cahaya, nutrisi, dan CO₂ yang cukup. Produksi bioetanol dari alga juga memerlukan teknologi pemanenan dan ekstraksi yang efisien dan hemat biaya, karena alga memiliki kandungan air yang tinggi. Selain itu, biaya operasional dan infrastruktur yang tinggi untuk pembudidayaan dan pengolahan alga menjadi hambatan ekonomi yang besar. Teknologi konversi biomassa alga menjadi bioetanol juga masih dalam tahap pengembangan awal, sehingga efisiensinya belum sebanding dengan bahan baku konvensional. [55], [56].

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi keberlangsungan reaksi fermentasi secara umum. Kondisi operasi yang optimal agar reaksi fermentasi berlangsung optimal meliputi: suhu berada antara 27-45°C, pH sekitar 4,5-7, dan waktu fermentasi yang bervariasi antara 24 hingga 72 jam [57] [58]. Tabel 1 merangkum hasil bioetanol yang dilaporkan dari berbagai penelitian dengan bahan baku generasi pertama hingga generasi ke tiga yang ditemukan dalam literatur.

Bioetanol generasi ke-4 menggabungkan hasil rekayasa genetika bahan baku dan mikroorganisme yang disintesis secara genomik. Modifikasi genetik memfasilitasi peningkatan sifat-sifat yang diinginkan dalam organisme, yang mencakup optimalisasi fitur-fitur seperti pemanfaatan beragam jenis gula seperti pentosa dan heksosa, peningkatan sintesis lipid, dan improvisasi fotosintesis pada alga. *Crude glycerol* juga telah diidentifikasi sebagai kandidat yang paling layak untuk produksi bioetanol generasi ke-4 [59]. Namun bioetanol dari bahan baku ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Tabel 1. Hasil penelitian bioetanol generasi ke-1 hingga ke-3. τ : Waktu fermentasi (Jam); T : Suhu fermentasi (°C); L: Liter; T = 1000 kg

Ref.	Strain Mikroba	Biomassa	Kondisi Operasi	Produk Etanol (g/L)	Proses
[60]	<i>S. cerevisiae</i>	Jagung	$\tau = 75$; T = 28 pH = 5,5	35,6	Simultan Sakarifikasi dan fermentasi (SSF)
[45]	<i>S. cerevisiae</i>	Sorgum	$\tau = 42$ T = 30 pH = 6,8	81,5	Hidrolisa enzimatik & fermentasi
[53]	<i>S. cerevisiae</i>	Kentang	$\tau = 72$ T = 35 pH = 4,76	31	Hidrolisis asam
[54]	<i>Candida tropicalis</i>	Sekam	$\tau = 48$ T = 37 pH = 6,5	26	Pre-treatment dan fermentasi
[61]	<i>Kluyveromyces marxianus</i>	Bagas	$\tau = 90$ T = 45 pH = 5	17,83	pre-treatment dengan sakarifikasi dan fermentasi
[56]	<i>S. cerevisiae</i>	Alga Hijau (Chlorella Vulgaris)	$\tau = 168$ T = 30 pH = 5-6	15	hidrolisis enzimatik terpisah

Tabel 2 merangkum laporan hasil penelitian bioetanol generasi ke-4 dan rekayasa genetika bahan baku dan mikroorganisme. Yield bioetanol bervariasi bergantung pada mikroorganisme dan kondisi fermentasi yang diterapkan, dengan rata-rata yield berkisar antara 11,66 hingga 56,1 g/L produk etanol. Teknik optimasi dengan penggunaan co-substrat mampu meningkatkan yield bioethanol. Hal ini karena penambahan co-substrat menyediakan lingkungan yang lebih mendukung bagi pertumbuhan mikroorganisme [35][46], [62].

Tabel 2. Hasil penelitian bioetanol generasi ke-4. T: Suhu fermentasi (°C); L: Liter; T = 1000 kg; τ : waktu Fermentasi (Jam)

Ref.	Strain Mikroba	Biomassa	Deskripsi proses hilir	Kondisi Operasi	Produk Etanol (g/L)
[63]	Rekayasa genetika sianobakteri	Alga	Menghasilkan etanol secara langsung dengan adanya CO ₂ dan cahaya matahari.	$\tau = 72$; T = 28 pH = -	11,66
[64]	perpaduan antara <i>Saccharomyces cerevisiae</i> dan <i>Pichia stipitis</i>	<i>Glucose-xylose</i>	Campuran glukosa-xilosa (perbandingan 3:1) difermentasi menggunakan strain hibrida.	$\tau = 72$; T = 30 pH = 6,8	56,1
[65]	Strain yang dimodifikasi secara genetik dari <i>S. cerevisiae</i>	<i>Glucose-glycerol</i>	Fermentasi campuran glukosa dan gliserol pada pengadukan 200 rpm.	$\tau = 24$; T = 30 pH = 4,76	55,0
[66]	<i>E. coli</i>	<i>Crude Glycerol</i>	Hidrolisis-fermentasi in-situ	$\tau = 50$; T = 37 pH = 6,5	37,7

TANTANGAN

Meskipun banyak mikroorganisme menunjukkan kemampuan yang baik dalam fermentasi *crude glycerol*, tantangan utama adalah pada penanganan impurities dan optimasi kondisi fermentasi [67]. Keberadaan berbagai impurities, seperti garam, methanol, dan bahan organik lainnya dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan menurunkan efisiensi proses fermentasi [68]. Pretreatment menjadi langkah penting untuk mengatasi masalah ini. Teknik-teknik seperti filtrasi, netralisasi, dan destilasi parsial dapat membantu mengurangi impurities. Namun sebagai konsekuensi proses ini memerlukan tambahan biaya dan kompleksitas produksi [18], [27]. Proses pretreatment terbukti dapat menghilangkan impurities hingga 90%, namun menambah biaya produksi sebesar 15-20% [69].

Selain itu, toleransi mikroorganisme terhadap kondisi fermentasi menjadi hal yang sangat penting. Tidak semua mikroorganisme yang digunakan untuk fermentasi memiliki toleransi yang tinggi terhadap impurities dan kondisi fermentasi yang keras. Misalnya, *Saccharomyces cerevisiae* dan *Escherichia coli* memiliki batas toleransi terhadap konsentrasi tinggi impurities, yang dapat membatasi efisiensi konversi bioetanol [70]. *Saccharomyces cerevisiae* misalnya, menunjukkan penurunan efisiensi konversi sebesar 30% ketika kandungan methanol dalam *crude glycerol* melebihi 5% [71]. Pengembangan strain

mikroorganisme yang lebih tahan terhadap impurities dan kondisi lingkungan yang ekstrem merupakan tantangan teknis yang memerlukan penelitian lebih lanjut dalam bidang bioteknologi dan rekayasa genetika [72], [73].

Menemukan kondisi fermentasi yang optimal, termasuk suhu, pH, dan waktu fermentasi, yang sesuai untuk berbagai mikroorganisme merupakan tantangan tersendiri [71]. Kondisi yang optimal untuk satu jenis mikroorganisme mungkin tidak cocok untuk mikroorganisme lain [74], [75]. Penelitian yang mendalam diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan parameter fermentasi untuk setiap jenis mikroorganisme yang digunakan, guna mencapai yield bioetanol yang maksimal. Sebagai contoh, suhu optimal untuk fermentasi oleh *Escherichia coli* mungkin berada di kisaran 37°C [76], sedangkan *Saccharomyces cerevisiae* mungkin membutuhkan suhu sekitar 30°C [77]. Optimasi ini dapat meningkatkan yield bioetanol hingga 25-35% [78].

PELUANG

Rekayasa genetika menawarkan peluang besar untuk mengatasi berbagai tantangan teknis yang telah disebutkan [79], [80]. Mikroorganisme dapat dimodifikasi untuk meningkatkan toleransi terhadap impurities, mengoptimalkan jalur metabolik untuk konversi *crude glycerol*, dan meningkatkan yield bioetanol [81], [82]. Sebagai contoh, strain *Escherichia coli* yang telah dimodifikasi secara genetik untuk mengekspresikan enzim tertentu yang meningkatkan metabolisme gliserol dapat meningkatkan yield bioetanol hingga 20-30% dibandingkan strain non-modifikasi [54], [83].

Selain itu, inovasi dalam teknologi pretreatment juga dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi proses fermentasi [69], [84]. Metode yang lebih efisien dan hemat biaya untuk menghilangkan impurities dari *crude glycerol* akan membuat proses ini lebih ekonomis dan ramah lingkungan [85], [86]. Sebagai contoh, teknologi pretreatment berbasis adsorben biologis dapat mengurangi impurities hingga 90%, sehingga meningkatkan efisiensi fermentasi hingga 40% [19], [87].

Peluang lain yang terbuka adalah integrasi produksi bioetanol dari *crude glycerol* ke dalam sistem biorefinery yang lebih luas [88], [89]. Mengintegrasikan proses ini menawarkan kesempatan untuk meningkatkan efisiensi dan nilai ekonomi dari seluruh proses produksi biodiesel [90], [91]. Dalam sistem biorefinery, berbagai produk sampingan dari produksi biodiesel dapat diolah menjadi produk bernilai tambah, termasuk bioetanol [92]. Pendekatan ini dapat meningkatkan total pendapatan hingga 15-20% dan mengurangi limbah industri hingga 50% [93].

Tidak dapat dipungkiri bahwa teknologi konversi *crude glycerol* menjadi bioetanol memberikan dampak positif yang signifikan terhadap lingkungan dan keberlanjutan [94]. Produksi bioetanol dari *crude glycerol* berkontribusi besar dalam mengurangi limbah industri biodiesel [95], mengurangi polusi, dan menurunkan emisi gas rumah kaca [96]. Berdasarkan studi, produksi bioetanol dari *crude glycerol* dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 65% dibandingkan dengan produksi bahan bakar fosil konvensional [97].

Aspek lain yang sangat penting adalah terciptanya keberlanjutan ekonomi [98]. Pemanfaatan *crude glycerol*, yang merupakan produk sampingan dengan nilai ekonomi rendah, sebagai bahan baku untuk bioetanol dapat mengurangi biaya produksi secara signifikan. Diperkirakan, penggunaan *crude glycerol* sebagai bahan baku dapat mengurangi biaya produksi bioetanol hingga 30-40% dibandingkan dengan penggunaan bahan baku konvensional seperti jagung atau tebu [99]. Keberhasilan dalam skala industri dapat menarik investasi dan menciptakan lapangan kerja di sektor energi terbarukan, dengan potensi peningkatan lapangan kerja hingga 10-15% dalam sektor ini, yang secara langsung berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan [100].

KESIMPULAN

Produksi bioetanol telah menjadi komponen krusial dalam peralihan global menuju energi terbarukan. Salah satu tantangan yang dihadapi dalam produksi biodiesel, yakni peningkatan produksi gliserol sebagai produk sampingan, telah ditemui solusi yang berkelanjutan. Konversi gliserol, atau *crude glycerol* (CG), yang dihasilkan dari proses produksi biodiesel menjadi bioetanol sebagai bahan bakar terbarukan, menawarkan sejumlah manfaat signifikan. Proses ini tidak hanya mengatasi masalah limbah industri, tetapi juga meningkatkan keberlanjutan dalam pemanfaatan sumber daya alam dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Teknologi rekayasa genetika memainkan peran kunci dalam mendukung konversi gliserol menjadi bioetanol yang lebih efisien. Konversi ini tidak hanya berdampak pada pengurangan limbah dari produksi biodiesel, tetapi juga memberikan kontribusi dalam mengurangi emisi karbon dan mempercepat transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Pemanfaatan *crude gliserol* sebagai bahan baku untuk bioetanol adalah contoh konkret bagaimana inovasi dalam bidang rekayasa genetika dan teknologi dapat mengubah produk sampingan industri yang tidak bernilai menjadi sumber daya yang berharga, serta mendukung transisi menuju energi terbarukan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi. Dukungan Pelatihan Penulisan Artikel Ilmiah yang diberikan telah menjadi landasan yang kuat dalam menjalankan berbagai program dan proyek kami yang bertujuan untuk mendorong penelitian, inovasi, dan pengembangan teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Frankowski, A. Wawro, J. Batog, K. Szambelan, and A. Łacka, "Bioethanol Production Efficiency from Sorghum Waste Biomass," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/en15093132.
- [2] S. Ayu Arsita, G. Eko Saputro, and S. Susanto, "Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia," *Jurnal Syntax Transformation*, vol. 2, no. 12, pp. 1779–1788, Dec. 2021, doi: 10.46799/jst.v2i12.473.
- [3] Y. Yudiantono, J. Windarta, and A. Adiarso, "Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 3, pp. 201–217, Nov. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.14264.
- [4] T. Ratna Poerwantika, Shylvia Windary, Faturahman Rasyid, and Bebbby Estefany Santoso, "Diplomasi Lingkungan: Indonesia Dalam Mewujudkan Transisi Energi Post – COP26," *Jurnal Multidisiplin Madani*, vol. 2, no. 9, pp. 3596–3609, Sep. 2022, doi: 10.55927/mudima.v2i9.1182.

- [5] A. W. Siagian, M. S. Daffa Alghazali, and R. F. Alify, "Menuju Transisi Energi 2050: Quo Vadis Energi Baru dan Terbarukan," *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, vol. 9, no. 1, pp. 187–202, Apr. 2023, doi: 10.38011/jhli.v9i1.471.
- [6] N. C. Y. K V, M. P. R, S. M, and G. B. R, "Simultaneous refining of biodiesel-derived crude glycerol and synthesis of value-added powdered catalysts for biodiesel production: A green chemistry approach for sustainable biodiesel industries," *J Clean Prod*, vol. 363, p. 132448, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132448.
- [7] E. O. Ahlgren, M. Börjesson Hagberg, and M. Grahn, "Transport biofuels in global energy–economy modelling – a review of comprehensive energy systems assessment approaches," *GCB Bioenergy*, vol. 9, no. 7. Blackwell Publishing Ltd, pp. 1168–1180, Jul. 01, 2017. doi: 10.1111/gcbb.12431.
- [8] H. Herliati, S. Sefaniyah, and A. Indri, "Pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai Bahan Baku pembuatan Bioetanol," *J Teknol*, vol. 6, no. 1, Feb. 2019, doi: 10.31479/jtek.v6i1.1.
- [9] R. Herliati, A. Nehemia, and H. P. Astuti, "Investigating the potential of avocado seeds for bioethanol production: A study on boiled water delignification pretreatment," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 4, pp. 648–654, Jul. 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.52532.
- [10] N. Qomariyah, H. Tamtomo, and Z. Akbar, "Renewable Energy Kolaboratif: Pengembangan Sektor Green Energy Melalui Pertambangan Yang Ramah Lingkungan Di Jambi Dan Kalimantan Selatan," *Jurnal Informatika, Sistem Informasi dan Kehutanan (FORSINTA)*, vol. 2, no. 2, pp. 79–89, Oct. 2023, doi: 10.53978/jfsa.v2i2.296.
- [11] B. Sayin Kul and M. Ciniviz, "An evaluation based on energy and exergy analyses in SI engine fueled with waste bread bioethanol-gasoline blends," *Fuel*, vol. 286, p. 119375, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119375.
- [12] A. Nur, Y. Putrasari, and I. K. Reksowardojo, "The Effect of Ethanol-Diesel Blends on The Performance of A Direct Injection Diesel Engine," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 49–56, Jul. 2012, doi: 10.14203/j.mev.2012.v3.49-56.
- [13] A. Rahman, N. B. Prihantini, and Nasruddin, "Fatty acid of microalgae as a potential feedstock for biodiesel production in Indonesia," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jan. 2019. doi: 10.1063/1.5086606.
- [14] M. Azhar and D. A. Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," *Administrative Law and Governance Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 398–412, Nov. 2018, doi: 10.14710/alj.v1i4.398-412.
- [15] M. A. de Almeida and R. Colombo, "Production Chain of First-Generation Sugarcane Bioethanol: Characterization and Value-Added Application of Wastes," *Bioenergy Res*, vol. 16, no. 2, pp. 924–939, Jun. 2023, doi: 10.1007/s12155-021-10301-4.
- [16] Aidha Zulaika, Herliati Rahman, Sari Sekar Ningru, and Aliffia Fita Maulida, "Exploring microbial lipases: Screening and identification for biocatalyst potential in bioethanol synthesis from glycerol-based biodiesel waste" *Results in Engineering*, vol. 23, 2024, pp. 102427, June 2024, doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102427.

- [17] M. Raza, A. Inayat, and B. Abu-Jdayil, "Crude Glycerol as a Potential Feedstock for Future Energy via Thermochemical Conversion Processes: A Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12813, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132212813.
- [18] Y. Liu, B. Zhong, and A. Lawal, "Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct," *RSC Adv*, vol. 12, no. 43, pp. 27997–28008, 2022, doi: 10.1039/D2RA05090K.
- [19] R. Herliati, "Purifying Crude Glycerol from Biodiesel Production for Sustainable Energy Solutions," *J Teknol*, vol. 11, no. 1, pp. 85–99, Nov. 2023, doi: 10.31479/jtek.v11i1.269.
- [20] P. Godoy, Á. Mourenza, S. Hernández-Romero, J. González-López, and M. Manzanera, "Microbial Production of Ethanol From Sludge Derived From an Urban Wastewater Treatment Plant," *Front Microbiol*, vol. 9, Nov. 2018, doi: 10.3389/fmicb.2018.02634.
- [21] H. I. Hamouda, H. N. Nassar, H. R. Madian, M. H. El-Sayed, A. A. El-Ghamry, and N. Sh. El-Gendy, "Isolation of fermentative microbial isolates from sugar cane and beet molasses and evaluation for enhanced production of bioethanol," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 38, no. 15, pp. 2170–2180, Aug. 2016, doi: 10.1080/15567036.2015.1030050.
- [22] J. Pradima, M. R. Kulkarni, and Archana, "Review on enzymatic synthesis of value added products of glycerol, a by-product derived from biodiesel production," *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 394–405, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.reffit.2017.02.009.
- [23] A. Ditia *et al.*, "Telaah Potensi Penerapan Teknologi Terkini pada Hidrolisis Selulosa dengan Sistem Pengendalian Terintegrasi dalam Proses Bioetanol G2," *Jurnal Selulosa*, vol. 11, no. 01, p. 21, Jun. 2021, doi: 10.25269/jsel.v11i01.320.
- [24] W. Trisunaryanti and C. Anwar, "Pembuatan Biodiesel sebagai Bahan Bakar Alternatif: Transesterifikasi Minyak Kelapa dengan Metanol Menggunakan Katalis NaOH," *Lembaran publikasi minyak dan gas bumi*, vol. 38, no. 3, pp. 40–49, Mar. 2022, doi: 10.29017/LPMGB.38.3.762.
- [25] A. Soly Peter *et al.*, "Optimization of biodiesel production by transesterification of palm oil and evaluation of biodiesel quality," *Mater Today Proc*, vol. 42, pp. 1002–1007, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.995.
- [26] Y. Liu, B. Zhong, and A. Lawal, "Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct," *RSC Adv*, vol. 12, no. 43, pp. 27997–28008, 2022, doi: 10.1039/D2RA05090K.
- [27] R. Shanmughom and S. K. Raghu, "Purification strategies for crude glycerol: A transesterification derivative," 2023, p. 020012. doi: 10.1063/5.0155313.
- [28] Adi Ahdiat, "Volume Produksi Biodiesel Indonesia (2009-2023)," Kata Data.
- [29] N. A. A. Adnan, S. N. Suhaimi, S. Abd-Aziz, M. A. Hassan, and L.-Y. Phang, "Optimization of bioethanol production from glycerol by *Escherichia coli* SS1," *Renew Energy*, vol. 66, pp. 625–633, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.12.032.
- [30] G. Zimon *et al.*, "The Impact of Fossil Fuels, Renewable Energy, and Nuclear Energy on South Korea's Environment Based on the STIRPAT Model: ARDL, FMOLS, and CCR Approaches," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 6198, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16176198.

- [31] T. Mueansichai, T. Rangseesuriyachai, N. Thongchul, and S. Assabumrungrat, "Lignocellulosic Bioethanol Production of Napier Grass Using *Trichoderma reesei* and *Saccharomyces cerevisiae* Co-Culture Fermentation," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 2, May 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.43740.
- [32] C. Dong, Y. Wang, H. Wang, C. S. K. Lin, H. Y. Hsu, and S. Y. Leu, "New generation urban biorefinery toward complete utilization of waste derived lignocellulosic biomass for biofuels and value-added products," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 918–925. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.231.
- [33] S. Xu, M. Elsayed, G. A. Ismail, C. Li, S. Wang, and A. E.-F. Abomohra, "Evaluation of bioethanol and biodiesel production from *Scenedesmus obliquus* grown in biodiesel waste glycerol: A sequential integrated route for enhanced energy recovery," *Energy Convers Manag*, vol. 197, p. 111907, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111907.
- [34] S. Marx, "Glycerol-free biodiesel production through transesterification: a review," *Fuel Processing Technology*, vol. 151, pp. 139–147, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.05.033.
- [35] F. Zhao, Y. Wu, Q. Wang, M. Zheng, and Q. Cui, "Glycerol or crude glycerol as substrates make *Pseudomonas aeruginosa* achieve anaerobic production of rhamnolipids," *Microb Cell Fact*, vol. 20, no. 1, p. 185, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12934-021-01676-2.
- [36] C. R. Chilakamarry *et al.*, "Bioconversion of Glycerol into Biofuels—Opportunities and Challenges," *Bioenergy Res*, vol. 15, no. 1, pp. 46–61, Mar. 2022, doi: 10.1007/s12155-021-10353-6.
- [37] J. M. Clomburg and R. Gonzalez, "Anaerobic fermentation of glycerol: a platform for renewable fuels and chemicals," *Trends Biotechnol*, vol. 31, no. 1, pp. 20–28, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.tibtech.2012.10.006.
- [38] M. Krajang, K. Malairuang, J. Sukna, K. Rattanapradit, and S. Chamsart, "Single-step ethanol production from raw cassava starch using a combination of raw starch hydrolysis and fermentation, scale-up from 5-L laboratory and 200-L pilot plant to 3000-L industrial fermenters," *Biotechnol Biofuels*, vol. 14, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13068-021-01903-3.
- [39] S. A. Haji Esmaeili, A. Sobhani, J. Szmerekovsky, A. Dybing, and G. Pourhashem, "First-generation vs. second-generation: A market incentives analysis for bioethanol supply chains with carbon policies," *Appl Energy*, vol. 277, p. 115606, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115606.
- [40] K. Robak and M. Balcerak, "Review of Second-Generation Bioethanol Production from Residual Biomass," *Food Technol Biotechnol*, vol. 56, no. 2, 2018, doi: 10.17113/ftb.56.02.18.5428.
- [41] S. S. Soleimani, A. Adiguzel, and H. Nadaroglu, "Production of bioethanol by facultative anaerobic bacteria," *Journal of the Institute of Brewing*, vol. 123, no. 3, pp. 402–406, Jul. 2017, doi: 10.1002/jib.437.
- [42] J. Zhang, A. Rentizelas, X. Zhang, and J. Li, "Sustainable production of lignocellulosic bioethanol towards zero waste biorefinery," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102627, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102627.

- [43] A. Mishra, A. K. Sharma, S. Sharma, A. S. Mathur, R. P. Gupta, and D. K. Tuli, "Lignocellulosic bioethanol production employing newly isolated inhibitor and thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* DBTIOC S24 strain in SSF and SHF," *RSC Adv*, vol. 6, no. 29, 2016, doi: 10.1039/C6RA00007J.
- [44] H. R. Mashuni, and Budiarni, "Application of Local Adsorbant From Southeast Sulawesi Clay Immobilized *Saccharomyces Cerevisiae* Bread's Yeast Biomass for Adsorption Of Mn(II) Metal Ion," *J Phys Conf Ser*, vol. 846, May 2017, doi: 10.1088/1742-6596/846/1/012010.
- [45] J. S. Tan, P. Phapugrangkul, C. K. Lee, Z.-W. Lai, M. H. Abu Bakar, and P. Murugan, "Banana frond juice as novel fermentation substrate for bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*," *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 21, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.bcab.2019.101293.
- [46] Z. Girgin Ersoy, S. Barisci, and O. Dinc, "Mechanisms of the *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* inactivation by ozone," *LWT*, vol. 100, pp. 306–313, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.095.
- [47] Chaitanya Reddy Chilakamarri, AM Mimi Sakinah, AW Zularism, Irshad Ahamad Khilji, Ranjna Sirohi, and Venugopal Jayarama Reddy, "Bioconversion of glycerol waste to ethanol by *Escherichia coli* and optimisation of process parameters," *Indian J Exp Biol*, vol. 60, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.56042/ijeb.v60i09.65145.
- [48] H. Hasman, M. A. Schembri, and P. Klemm, "Antigen 43 and Type 1 Fimbriae Determine Colony Morphology of *Escherichia coli* K-12," *J Bacteriol*, vol. 182, no. 4, pp. 1089–1095, Feb. 2000, doi: 10.1128/JB.182.4.1089-1095.2000.
- [49] D. Maga *et al.*, "Comparative life cycle assessment of first- and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 24, no. 2, pp. 266–280, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1505-1.
- [50] I. S. Tan, M. K. Lam, H. C. Y. Foo, S. Lim, and K. T. Lee, "Advances of macroalgae biomass for the third generation of bioethanol production," *Chin J Chem Eng*, vol. 28, no. 2, pp. 502–517, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.cjche.2019.05.012.
- [51] A. F. Murawski de Mello, L. Porto de Souza Vandenberghe, K. K. Valladares-Diestra, G. Amaro Bittencourt, W. J. Martinez Burgos, and C. R. Soccol, "Corn First-Generation Bioethanol Unities with Energy and Dried Grains with Solubles (DDGS) Production," 2022, pp. 109–132. doi: 10.1007/978-3-031-01241-9_6.
- [52] S. K. Mohanty and M. R. Swain, "Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future," in *Bioethanol Production from Food Crops*, Elsevier, 2019, pp. 45–59. doi: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00003-5.
- [53] H. Chen and X. Fu, "Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 468–478, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.069.
- [54] M. J. Díaz, M. Moya, and E. Castro, "Bioethanol Production from Steam-Exploded Barley Straw by Co-Fermentation with *Escherichia coli* SL100," *Agronomy*, vol. 12, no. 4, p. 874, Apr. 2022, doi: 10.3390/agronomy12040874.

- [55] M. Fazil Khan, A. Garg, S. Jain, G. Dwivedi, and T. Nath Verma, "Optimization of low-temperature transesterification of low FFA blend of sunflower oil and algae oil," *Fuel*, vol. 279, p. 118459, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118459.
- [56] R. Bibi *et al.*, "Algal bioethanol production technology: A trend towards sustainable development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 976–985, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.126.
- [57] L. R. Kumar, S. K. Yellapu, R. D. Tyagi, and X. Zhang, "A review on variation in crude glycerol composition, bio-valorization of crude and purified glycerol as carbon source for lipid production," *Bioresour Technol*, vol. 293, p. 122155, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122155.
- [58] M. Taccari, L. Canonico, F. Comitini, I. Mannazzu, and M. Ciani, "Screening of yeasts for growth on crude glycerol and optimization of biomass production," *Bioresour Technol*, vol. 110, pp. 488–495, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.109.
- [59] Q. (Sophia) He, J. McNutt, and J. Yang, "Utilization of the residual glycerol from biodiesel production for renewable energy generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 63–76, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.110.
- [60] N. Patni, S. G. Pillai, and A. H. Dwivedi, "Wheat as a Promising Substitute of Corn for Bioethanol Production," *Procedia Eng*, vol. 51, pp. 355–362, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.01.049.
- [61] E. Raja Sathendra, G. Baskar, R. Praveenkumar, and E. Gnansounou, "Bioethanol production from palm wood using *Trichoderma reesei* and *Kluyveromyces marxianus*," *Bioresour Technol*, vol. 271, pp. 345–352, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.134.
- [62] V. R. Reis, A. P. G. Bassi, J. C. G. da Silva, and S. R. Ceccato-Antonini, "Characteristics of *Saccharomyces cerevisiae* yeasts exhibiting rough colonies and pseudohyphal morphology with respect to alcoholic fermentation," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 44, no. 4, pp. 1121–1131, Dec. 2013, doi: 10.1590/S1517-83822014005000020.
- [63] J. Böhm, K. Kauss, K. Michl, L. Engelhardt, E.-M. Brouwer, and M. Hagemann, "Impact of the carbon flux regulator protein *pirC* on ethanol production in engineered cyanobacteria," *Front Microbiol*, vol. 14, Aug. 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1238737.
- [64] K. D. Jetti, R. R. GNS, D. Garlapati, and S. K. Nammi, "Improved ethanol productivity and ethanol tolerance through genome shuffling of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia stipitis*," *International Microbiology*, vol. 22, no. 2, pp. 247–254, Jun. 2019, doi: 10.1007/s10123-018-00044-2.
- [65] Sadat Mohamed Rezk Khattab TW, "Production the industrial levels of bioethanol from glycerol by engineered yeast 'Bioethanol-4 generation,'" 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.04.132589>.
- [66] O. Cofré, M. Ramírez, J. M. Gómez, and D. Cantero, "Pilot scale fed-batch fermentation in a closed loop mixed reactor for the biotransformation of crude glycerol into ethanol and hydrogen by *Escherichia coli* MG1655," *Biomass Bioenergy*, vol. 91, pp. 37–47, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.04.015.

- [67] G. Kildegaard, M. del P. Balbi, G. Salierno, M. Cassanello, C. De Blasio, and M. Galvagno, "A Cleaner Delignification of Urban Leaf Waste Biomass for Bioethanol Production, Optimised by Experimental Design," *Processes*, vol. 10, no. 5, p. 943, May 2022, doi: 10.3390/pr10050943.
- [68] M. Zhang and H. Wu, "Effect of major impurities in crude glycerol on solubility and properties of glycerol/methanol/bio-oil blends," *Fuel*, vol. 159, pp. 118–127, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.062.
- [69] R. Dhabhai, E. Ahmadifeijani, A. K. Dalai, and M. Reaney, "Purification of crude glycerol using a sequential physico-chemical treatment, membrane filtration, and activated charcoal adsorption," *Sep Purif Technol*, vol. 168, pp. 101–106, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.seppur.2016.05.030.
- [70] M. Arshad, T. Hussain, M. Iqbal, and M. Abbas, "Enhanced ethanol production at commercial scale from molasses using high gravity technology by mutant *S. cerevisiae*," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 48, no. 3, pp. 403–409, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.bjm.2017.02.003.
- [71] N. R. Baral *et al.*, "Approaches for More Efficient Biological Conversion of Lignocellulosic Feedstocks to Biofuels and Bioproducts," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 7, no. 10, pp. 9062–9079, May 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b01229.
- [72] D. R. P. Azeredo, V. Alvarenga, A. S. Sant'Ana, and A. U. O. Sabaa Srur, "An overview of microorganisms and factors contributing for the microbial stability of carbonated soft drinks," *Food Research International*, vol. 82, pp. 136–144, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.foodres.2016.01.024.
- [73] M. S. Singhvi and D. V. Gokhale, "Lignocellulosic biomass: Hurdles and challenges in its valorization," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 103, no. 23–24, pp. 9305–9320, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00253-019-10212-7.
- [74] B. Popoola, "Isolation of Microorganisms Associated with Palm Oil Contaminated Soil," vol. 5, no. 2, 2022, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/370985354>
- [75] A. Jamil, S. Farooq, and I. Hashmi, "Ozone Disinfection Efficiency for Indicator Microorganisms at Different pH Values and Temperatures," *Ozone Sci Eng*, vol. 39, no. 6, pp. 407–416, Nov. 2017, doi: 10.1080/01919512.2017.1322489.
- [76] A. R. Tuttle, N. D. Trahan, and M. S. Son, "Growth and Maintenance of *Escherichia coli* Laboratory Strains," *Curr Protoc*, vol. 1, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1002/cpz1.20.
- [77] A. P. Jacobus, J. Gross, J. H. Evans, S. R. Ceccato-Antonini, and A. K. Gombert, "*Saccharomyces cerevisiae* strains used industrially for bioethanol production," *Essays Biochem*, vol. 65, no. 2, Jul. 2021, doi: 10.1042/EBC20200160.
- [78] G. A. Tenkolu, K. D. Kuffi, and G. T. Gindaba, "Optimization of fermentation condition in bioethanol production from waste potato and product characterization," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 4, pp. 5205–5223, Feb. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02974-4.
- [79] H. Zabeed, J. N. Sahu, A. Suely, A. N. Boyce, and G. Faruq, "Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 475–501, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.076.

- [80] M. A. Kassim, T. K. Meng, R. Kamaludin, A. H. Hussain, and N. A. Bukhari, "Bioprocessing of sustainable renewable biomass for bioethanol production," in *Value-Chain of Biofuels*, Elsevier, 2022, pp. 195–234. doi: 10.1016/B978-0-12-824388-6.00004-X.
- [81] H. Chen and X. Fu, "Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 468–478, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.069.
- [82] R. P. John, G. S. Anisha, K. M. Nampoothiri, and A. Pandey, "Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol," *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 1, pp. 186–193, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.139.
- [83] O. Cofré, M. Ramírez, J. M. Gómez, and D. Cantero, "Optimization of culture media for ethanol production from glycerol by *Escherichia coli*," *Biomass Bioenergy*, vol. 37, pp. 275–281, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.12.002.
- [84] S. Rezaia *et al.*, "Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview," *Energy*, vol. 199, p. 117457, May 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117457.
- [85] K. Zhang, Y. Qin, F. He, J. Liu, Y. Zhang, and L. Liu, "Concentration of aqueous glycerol solution by using continuous-effect membrane distillation," *Sep Purif Technol*, vol. 144, pp. 186–196, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.seppur.2015.02.034.
- [86] A. S. Elgharbawy, W. A. Sadik, O. M. Sadek, and M. A. Kasaby, "Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks," *Fuel*, vol. 284, p. 118970, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118970.
- [87] O. S. Muniru, C. S. Ezeanyanaso, E. U. Akubueze, C. C. Igwe, and G. N. Elemo, "Review of Different Purification Techniques for Crude Glycerol from Biodiesel Production," *Journal of Energy Research and Reviews*, pp. 1–6, Dec. 2018, doi: 10.9734/jenrr/2019/v2i129728.
- [88] V. Acevedo-García, C. Padilla-Rascón, M. J. Díaz, M. Moya, and E. Castro, "Fermentable sugars production from acid-catalysed steam exploded barley straw," *Chem Eng Trans*, vol. 70, pp. 1939–1944, 2018, doi: 10.3303/CET1870324.
- [89] M. R. Monteiro, C. L. Kugelmeier, R. S. Pinheiro, M. O. Batalha, and A. da Silva César, "Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 109–122, May 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.019.
- [90] I. M. Rizwanul Fattah *et al.*, "State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production," *Front Energy Res*, vol. 8, Jun. 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.00101.
- [91] J. J. Torres, N. E. Rodriguez, J. T. Arana, N. A. Ochoa, J. Marchese, and C. Pagliero, "Ultrafiltration polymeric membranes for the purification of biodiesel from ethanol," *J Clean Prod*, vol. 141, pp. 641–647, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.130.
- [92] C. K. Kohout *et al.*, "Bacterial growth dynamics and corresponding metabolite levels in the extraction area of an Austrian sugar beet factory using antimicrobial treatment," *J Sci Food Agric*, vol. 100, no. 6, pp. 2713–2721, Apr. 2020, doi: 10.1002/jsfa.10303.
- [93] S. Chozhavendhan, G. Karthiga Devi, B. Bharathiraja, R. Praveen Kumar, and S. Elavazhagan, "Assessment of crude glycerol utilization for sustainable development of biorefineries," in *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*, Elsevier, 2020, pp. 195–212. doi: 10.1016/B978-0-12-818996-2.00009-0.

- [94] M. Tomatis, H. Kumar Jeswani, and A. Azapagic, “Environmental impacts of valorisation of crude glycerol from biodiesel production – A life cycle perspective,” *Waste Management*, vol. 179, pp. 55–65, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.03.005.
- [95] V. Naranje, R. Swarnalatha, O. Batra, and S. Salunkhe, “Technological Assessment on Steam Reforming Process of Crude Glycerol to Produce Hydrogen in an Integrated Waste Cooking-Oil-Based Biodiesel Production Scenario,” *Processes*, vol. 10, no. 12, p. 2670, Dec. 2022, doi: 10.3390/pr10122670.
- [96] K. G. Biswas and L. Das, “Role of Biodiesel in Indian Renewable Energy,” *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, vol. 3, no. 3–4, pp. 67–71, Dec. 2016, doi: 10.1007/s40518-016-0062-0.
- [97] R. Johansson, S. Meyer, J. Whistance, W. Thompson, and D. Debnath, “Greenhouse gas emission reduction and cost from the United States biofuels mandate,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109513, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109513.
- [98] G. R. Soekarno, S. Sundari, M. Sidik Boedoyo, and L. Sianipar, “Pajak Karbon sebagai Instrumen Kebijakan untuk Mendorong Transisi Energi dan Pertumbuhan Ekonomi yang Berkelanjutan,” *Jurnal Kajian Ekonomi dan Bisnis Islam*, vol. 5, no. 4, p. 2024, 2024.
- [99] P. S. Kong, M. K. Aroua, and W. M. A. W. Daud, “Conversion of crude and pure glycerol into derivatives: A feasibility evaluation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63, pp. 533–555, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.054.
- [100] L. Zhao, X. Zhang, J. Xu, X. Ou, S. Chang, and M. Wu, “Techno-Economic Analysis of Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass in China: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover,” *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 5, pp. 4096–4117, May 2015, doi: 10.3390/en8054096.