



## Pendekatan Kritis terhadap Produksi Bioetanol Berbasis Eceng Gondok *Eichhornia crassipes*

(Studi Literatur sebagai Dasar Pengembangan Pembelajaran Berbasis Proyek di SMA/SMK)

Rodiatul Adawiyah<sup>1\*</sup>, Muhammad Suwignyo Prayogo<sup>2</sup>, Vivi Maratus Sholihah<sup>3</sup>, Siti Waaqi'ah Khofidhotur Rofiah<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Pendidikan Guru Madrasah Ibtidaiyah, Fakultas Tarbiyah dan Ilmu keguruan, Universitas Islam Negeri Kiai Haji Achmad Siddiq Jember, Indonesia

Email: [manusiacerdas438@gmail.com](mailto:manusiacerdas438@gmail.com)<sup>1</sup>, [wignyoprayogo@uinkhas.ac.id](mailto:wignyoprayogo@uinkhas.ac.id)<sup>2</sup>, [maratussholihahvivi@gmail.com](mailto:maratussholihahvivi@gmail.com)<sup>3</sup>, [waaqi183@gmail.com](mailto:waaqi183@gmail.com)<sup>4</sup>

\*Penulis Korespondensi : [manusiacerdas438@gmail.com](mailto:manusiacerdas438@gmail.com)

**Abstract.** *This study aims to critically analyze bioethanol production from water hyacinth (Eichhornia crassipes) based on previous research findings and to develop a project-based learning design for SMA/SMK students. This study employs a qualitative approach using a literature review method by analyzing relevant scientific articles published in the last five years. Data were collected through documentation and analyzed using descriptive qualitative techniques, including data reduction, data display, and conclusion drawing. The findings indicate that bioethanol production efficiency is strongly influenced by pretreatment methods, fermentation conditions, and process control, with yields generally categorized as low to moderate. Previous studies also reveal that project-based learning significantly enhances students' conceptual understanding and critical thinking skills. Based on the synthesis of these findings, this study proposes a structured project-based learning design that integrates bioethanol production as a contextual learning medium. The implications of this study emphasize the importance of aligning technical feasibility, educational objectives, and sustainability principles in developing science-based learning projects in secondary education.*

**Keywords:** *bioethanol; literature study; project-based learning; sustainability; water hyacinth.*

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kritis produksi bioetanol berbasis eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) berdasarkan hasil penelitian terdahulu serta mengembangkan rancangan pembelajaran berbasis proyek untuk siswa SMA/SMK. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur melalui analisis artikel ilmiah yang relevan dalam lima tahun terakhir. Pengumpulan data dilakukan melalui dokumentasi dan dianalisis menggunakan teknik deskriptif kualitatif melalui tahapan reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi produksi bioetanol sangat dipengaruhi oleh metode pretreatment, kondisi fermentasi, dan pengendalian variabel proses, dengan rendemen yang umumnya masih tergolong rendah hingga sedang. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis proyek mampu meningkatkan pemahaman konsep dan keterampilan berpikir kritis siswa secara signifikan. Berdasarkan sintesis hasil penelitian tersebut, penelitian ini menghasilkan rancangan pembelajaran berbasis proyek yang terstruktur dengan memanfaatkan produksi bioetanol sebagai media pembelajaran kontekstual. Implikasi penelitian ini menekankan pentingnya integrasi antara kelayakan teknis, tujuan pendidikan, dan prinsip keberlanjutan dalam pengembangan proyek pembelajaran berbasis sains di tingkat pendidikan menengah.

**Kata kunci:** Bioetanol; Eceng Gondok; Keberlanjutan; Pembelajaran Berbasis Proyek; Studi Literatur.

### 1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi global yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil tidak hanya menyebabkan keterbatasan sumber daya, tetapi juga berdampak terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan degradasi lingkungan (Dwisari et al., 2023). Dalam konteks ini, bioetanol menjadi salah satu sumber energi alternatif yang potensial karena dapat diproduksi dari biomassa yang melimpah dan dapat diperbarui.

Salah satu biomassa yang memiliki potensi besar adalah eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), yang banyak ditemukan di perairan tropis, termasuk di Indonesia. Tanaman ini dikenal sebagai gulma air dengan laju pertumbuhan yang sangat cepat dan sering menimbulkan permasalahan ekologis seperti eutrofikasi dan penurunan kualitas air. Namun demikian, kandungan lignoselulosa yang tinggi menjadikan eceng gondok berpotensi sebagai bahan baku produksi bioetanol (Rezania et al., 2017; Amani & Aris, 2023).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji produksi bioetanol dari eceng gondok, dengan fokus pada optimasi proses seperti pretreatment, hidrolisis, dan fermentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi produksi bioetanol sangat dipengaruhi oleh metode pretreatment, konsentrasi bahan kimia, serta kondisi fermentasi seperti suhu dan pH (Wulandari et al., 2023; Wahyuni et al., 2025). Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berorientasi pada aspek teknis dan dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga belum banyak mengaitkan hasilnya dengan konteks pendidikan, khususnya dalam pembelajaran berbasis proyek.

Di sisi lain, dalam dunia pendidikan, pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning*) merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan keterlibatan siswa serta keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah (Condliffe et al., 2017). Pembelajaran ini menekankan pada keterlibatan aktif siswa dalam menyelesaikan masalah nyata, sehingga sangat relevan untuk diterapkan dalam pembelajaran sains yang bersifat kontekstual.

Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan antara produksi bioetanol berbasis eceng gondok dengan pengembangan pembelajaran berbasis proyek masih terbatas. Terdapat kesenjangan antara penelitian teknis yang berfokus pada efisiensi produksi dengan implementasi pembelajaran yang berorientasi pada pengalaman belajar siswa. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mampu mengintegrasikan kedua aspek tersebut dalam satu kerangka analisis yang komprehensif.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kritis produksi bioetanol berbasis eceng gondok berdasarkan hasil penelitian terdahulu serta mengembangkan rancangan pembelajaran berbasis proyek yang dapat diterapkan di tingkat SMA/SMK. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan model pembelajaran yang kontekstual, aplikatif, dan berorientasi pada isu keberlanjutan energi.

## 2. KAJIAN TEORITIS

Bioetanol merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang dihasilkan melalui proses fermentasi bahan organik yang mengandung gula atau polisakarida. Dalam konteks biomassa lignoselulosa, produksi bioetanol melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu pretreatment, hidrolisis, fermentasi, dan destilasi. Tahap pretreatment berfungsi untuk membuka struktur kompleks lignoselulosa agar selulosa lebih mudah diakses oleh enzim, sedangkan hidrolisis bertujuan mengkonversi polisakarida menjadi gula sederhana. Selanjutnya, tahap fermentasi mengubah gula tersebut menjadi etanol dengan bantuan mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae*, yang dikenal memiliki efisiensi tinggi dalam produksi etanol (Zabed et al., 2017; Kumar et al., 2020).

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) termasuk biomassa lignoselulosa yang memiliki kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang cukup tinggi, sehingga berpotensi sebagai bahan baku bioetanol. Selain itu, ketersediaannya yang melimpah serta pertumbuhannya yang cepat menjadikan tanaman ini sebagai sumber biomassa yang berkelanjutan. Dalam perspektif lingkungan, pemanfaatan eceng gondok juga memiliki nilai tambah karena dapat membantu mengurangi pencemaran dan eutrofikasi perairan akibat pertumbuhan gulma yang tidak terkendali (Rezania et al., 2017; Nandiyanto et al., 2024).

Namun demikian, produksi bioetanol berbasis lignoselulosa menghadapi berbagai tantangan teknis, terutama pada tahap pretreatment dan hidrolisis. Struktur kompleks lignin yang melindungi selulosa seringkali menghambat efisiensi konversi menjadi gula fermentasi. Oleh karena itu, berbagai metode pretreatment, baik secara fisik, kimia, maupun biologis, telah dikembangkan untuk meningkatkan aksesibilitas selulosa (Behera et al., 2014; Sindhu et al., 2016). Selain itu, faktor-faktor seperti suhu, pH, waktu fermentasi, serta jenis mikroorganisme juga sangat mempengaruhi rendemen bioetanol yang dihasilkan (Kumar et al., 2020).

Dalam kajian keberlanjutan, produksi bioetanol tidak hanya dinilai dari aspek efisiensi teknis, tetapi juga dari dampaknya terhadap lingkungan dan ekonomi. Konsep keberlanjutan menekankan keseimbangan antara aspek ekologis, ekonomi, dan sosial. Proses produksi yang efisien secara teknis belum tentu berkelanjutan apabila memerlukan energi tinggi, bahan kimia berbahaya, atau menghasilkan limbah dalam jumlah besar (Wang et al., 2019; Singh et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi sistem produksi bioetanol, terutama dalam konteks pemanfaatan biomassa limbah seperti eceng gondok.

Di sisi lain, dalam konteks pendidikan, pembelajaran berbasis proyek (Project-Based Learning) merupakan pendekatan yang menekankan keterlibatan aktif peserta didik dalam

proses pembelajaran melalui penyelesaian masalah nyata. Model ini memungkinkan siswa untuk mengintegrasikan pengetahuan teoretis dengan keterampilan praktis, serta mengembangkan kemampuan berpikir kritis, kolaboratif, dan kreatif (Kokotsaki et al., 2016; Condliffe et al., 2017). Pembelajaran berbasis proyek juga dinilai efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep sains terapan, karena siswa secara langsung terlibat dalam proses eksplorasi, eksperimen, dan refleksi.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis proyek mampu meningkatkan hasil belajar dan keterampilan berpikir kritis siswa, khususnya dalam bidang sains dan teknologi (Rohman et al., 2022). Di sisi lain, penelitian terkait produksi bioetanol dari eceng gondok juga menunjukkan bahwa variasi metode pretreatment dan kondisi fermentasi dapat mempengaruhi hasil produksi secara signifikan (Hasan & Sardar, 2021; Zhang et al., 2018). Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih dilakukan secara terpisah, baik dalam konteks teknis laboratorium maupun dalam kajian pendidikan, sehingga belum banyak yang mengintegrasikan keduanya dalam satu kerangka analisis yang utuh.

Berdasarkan uraian tersebut, kajian teoritis dalam penelitian ini berlandaskan pada integrasi antara teori produksi bioetanol berbasis lignoselulosa, konsep keberlanjutan, dan pendekatan pembelajaran berbasis proyek. Secara konseptual, penelitian ini menekankan bahwa pemanfaatan produksi bioetanol sebagai konteks pembelajaran tidak hanya berpotensi meningkatkan pemahaman siswa terhadap konsep ilmiah, tetapi juga menjadi sarana untuk mengkaji efisiensi proses dan keberlanjutan secara lebih kritis dan kontekstual. Dengan demikian, kajian ini menjadi landasan dalam menganalisis hubungan antara proses produksi bioetanol, prinsip keberlanjutan, dan pengembangannya dalam pembelajaran berbasis proyek di tingkat SMA/SMK.

### **3. METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian studi literatur. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara kritis berbagai hasil penelitian terdahulu terkait produksi bioetanol berbasis eceng gondok serta mengintegrasikannya dalam pengembangan pembelajaran berbasis proyek di tingkat SMA/SMK. Sumber data dalam penelitian ini berupa artikel jurnal ilmiah, prosiding, dan karya ilmiah yang relevan dengan topik bioetanol dan pembelajaran berbasis proyek. Pemilihan sumber dilakukan secara purposive berdasarkan kesesuaian topik, kredibilitas sumber, serta keterbaruan penelitian.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi dengan cara mengidentifikasi, mengklasifikasikan, dan mengkaji isi penelitian terdahulu. Analisis data

dilakukan menggunakan teknik analisis deskriptif kualitatif melalui tahapan reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada: 1.) Efisiensi produksi bioetanol (rendemen, metode, variabel proses), 2.) Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil produksi, 3.) Temuan terkait pembelajaran berbasis proyek, 4.) Sintesis hasil penelitian sebagai dasar pengembangan desain proyek pembelajaran.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Sintesis Penelitian Terdahulu

**Tabel 1.** Ringkasan Penelitian Terdahulu Produksi Bioetanol Eceng Gondok.

No	Peneliti	Fokus Penelitian	Temuan Utama
1	Zhang et al. (2018)	Pretreatment kombinasi	Meningkatkan yield signifikan
2	Hasan & Sardar (2021)	Review bioetanol	Eceng gondok potensial
3	Nandiyanto et al. (2024)	Biomassa	Kandungan lignoselulosa tinggi
4	Wang et al. (2019)	Kelayakan ekonomi	Layak secara ekonomi
5	Kumar et al. (2020)	Bioetanol lignoselulosa	Dipengaruhi proses hidrolisis

Sumber: Diolah dari berbagai penelitian.

Hasil sintesis ini menunjukkan bahwa eceng gondok memiliki potensi besar sebagai bahan baku bioetanol karena kandungan selulosa yang cukup tinggi serta ketersediaannya yang melimpah di lingkungan perairan tropis. Namun, tantangan utama terletak pada struktur lignoselulosa yang kompleks, yang menyebabkan proses konversi menjadi bioetanol tidak efisien tanpa perlakuan awal (pretreatment) yang tepat (Hasan & Sardar, 2021; Nandiyanto et al., 2024).

##### Analisis Kritis Efisiensi Produksi Bioetanol

**Tabel 2.** Faktor yang Mempengaruhi Produksi Bioetanol.

Faktor	Pengaruh	Implikasi
Pretreatment	Sangat tinggi	Menentukan akses selulosa
Hidrolisis	Tinggi	Produksi gula fermentasi
Fermentasi	Tinggi	Produksi etanol
Kondisi (pH, suhu)	Tinggi	Stabilitas proses

Berdasarkan Tabel.2 ini menunjukkan efisiensi produksi bioetanol dari eceng gondok itu sangat dipengaruhi oleh tahap pretreatment, yang bertujuan untuk menghilangkan lignin dan membuka struktur selulosa. Tanpa pretreatment yang optimal, enzim tidak dapat mengakses selulosa secara efektif, sehingga hasil fermentasi menjadi rendah (Zhang et al., 2018). Namun demikian, penelitian menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi melalui pretreatment kimia seperti penggunaan asam kuat seringkali diikuti oleh peningkatan biaya produksi serta potensi dampak lingkungan. Hal ini menimbulkan dilema antara efisiensi teknis dan keberlanjutan lingkungan (Wang et al., 2019) .

Selain itu, proses hidrolisis dan fermentasi juga menjadi faktor penentu dalam produksi bioetanol. Hidrolisis berfungsi mengubah selulosa menjadi gula sederhana, sedangkan fermentasi mengubah gula tersebut menjadi etanol. Kedua proses ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu dan pH. Ketidaksiesuaian kondisi dapat menyebabkan penurunan aktivitas mikroorganisme dan menurunkan hasil produksi (Kumar et al., 2020). Lebih lanjut, penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan kombinasi pretreatment (fisik, kimia, dan biologis) dapat meningkatkan efisiensi produksi bioetanol secara signifikan. Namun, kompleksitas proses ini menjadi tantangan tersendiri dalam implementasinya, terutama dalam skala pendidikan (Nandiyanto et al., 2024). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa produksi bioetanol berbasis eceng gondok memiliki potensi tinggi, namun masih menghadapi tantangan dalam efisiensi dan keberlanjutan proses.

### Implikasi dalam Pembelajaran Berbasis Proyek

**Tabel 3.** Rancangan Pembelajaran Berbasis Proyek.

Tahap	Aktivitas Siswa	Kompetensi
Orientasi	Identifikasi masalah energi	Literasi sains
Eksplorasi	Studi literatur bioetanol	Kognitif
Desain	Perancangan proyek	Analitis
Implementasi	Simulasi produksi	Psikomotor
Evaluasi	Refleksi & presentasi	Kritis

Pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning*) merupakan pendekatan yang efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan pemahaman konsep siswa. Berdasarkan Tabel.3 terdapat berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa PjBL mampu mendorong siswa untuk terlibat secara aktif dalam pembelajaran melalui penyelesaian masalah nyata (Condliffe et al., 2017). Studi terbaru menunjukkan bahwa penerapan PjBL secara signifikan meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa karena mereka terlibat dalam

proses investigasi, analisis, dan refleksi terhadap permasalahan yang dihadapi (Aswan et al., 2024; Eshun et al., 2026) .

Selain itu, hasil meta-analisis menunjukkan bahwa PjBL memiliki dampak positif terhadap keterampilan abad 21, termasuk kemampuan kolaborasi dan pemecahan masalah (Tafakur et al., 2023) . Dalam konteks pendidikan vokasi (SMK), pendekatan ini sangat relevan karena mampu menghubungkan teori dengan praktik secara langsung (Triyasa et al., 2025). Integrasi produksi bioetanol dalam pembelajaran memberikan nilai tambah karena :

- a. Menghadirkan masalah nyata (energi & lingkungan)
- b. Melatih siswa memahami proses ilmiah
- c. Mengembangkan keterampilan analisis dan eksperimen

Namun demikian, implementasi PjBL juga memiliki tantangan, seperti keterbatasan fasilitas, waktu, dan kesiapan guru. Oleh karena itu, diperlukan adaptasi dalam bentuk proyek sederhana atau simulasi agar tetap sesuai dengan kondisi sekolah.

### **Analisis Keberlanjutan dan Relevansi Pendidikan**

Produksi bioetanol berbasis eceng gondok tidak hanya memiliki nilai teknis sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga mengandung dimensi ekologis yang signifikan. Eceng gondok dikenal sebagai spesies invasif dengan laju pertumbuhan sangat cepat yang dapat mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, seperti menurunkan kadar oksigen terlarut, menghambat penetrasi cahaya, dan merusak keanekaragaman hayati (Nandiyanto et al., 2024). Oleh karena itu, pemanfaatannya sebagai bahan baku bioetanol dapat dipandang sebagai strategi *waste-to-energy* yang tidak hanya mengurangi limbah biologis, tetapi juga memberikan nilai tambah terhadap sumber daya yang sebelumnya dianggap sebagai masalah lingkungan.

Lebih lanjut, pendekatan valorisasi biomassa menunjukkan bahwa eceng gondok dapat diolah menjadi berbagai produk bernilai seperti biofuel, bioplastik, hingga biochar, yang berkontribusi terhadap pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*) (Singh et al., 2025). Hal ini memperkuat posisi eceng gondok sebagai sumber daya strategis dalam ekonomi sirkular, di mana limbah diubah menjadi produk yang bermanfaat secara ekonomi dan ekologis.

Namun demikian, dari perspektif teknis dan ekonomi, produksi bioetanol berbasis lignoselulosa seperti eceng gondok masih menghadapi berbagai kendala. Kompleksitas struktur lignoselulosa menyebabkan proses konversi menjadi bioetanol membutuhkan tahapan pretreatment yang intensif dan biaya yang relatif tinggi (Hasan & Sardar, 2021). Selain itu, efisiensi produksi yang masih tergolong rendah (sekitar <10% dalam beberapa studi

eksperimental) menunjukkan bahwa teknologi ini belum sepenuhnya optimal untuk skala industri (Joshi et al., 2025).

Dari sudut pandang keberlanjutan, kondisi ini menimbulkan dilema antara efisiensi teknis dan dampak lingkungan. Penggunaan bahan kimia dalam proses pretreatment, misalnya, dapat meningkatkan hasil produksi tetapi berpotensi menimbulkan limbah sekunder yang mencemari lingkungan (Kumar et al., 2020). Oleh karena itu, pengembangan teknologi bioetanol perlu mempertimbangkan keseimbangan antara aspek efisiensi, biaya, dan dampak ekologis.

Dalam konteks pendidikan, kompleksitas ini justru menjadi peluang pedagogis yang sangat penting. Integrasi isu keberlanjutan dalam pembelajaran berbasis proyek memungkinkan siswa untuk memahami bahwa suatu teknologi tidak hanya dinilai dari keberhasilannya secara teknis, tetapi juga dari dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat. Pembelajaran berbasis proyek memberikan ruang bagi siswa untuk mengeksplorasi hubungan antara sains, teknologi, dan keberlanjutan secara lebih holistik.

Penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Project-Based Learning* (PjBL) mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah siswa karena mereka terlibat langsung dalam proses investigasi dan refleksi terhadap permasalahan nyata (Rohman et al., 2022). Dalam konteks ini, produksi bioetanol dari eceng gondok dapat dijadikan sebagai proyek kontekstual yang mengintegrasikan konsep bioteknologi, kimia, dan lingkungan.

Lebih jauh lagi, pembelajaran berbasis proyek yang mengangkat isu keberlanjutan dapat membantu membentuk kesadaran ekologis (*environmental awareness*) dan tanggung jawab sosial siswa. Siswa tidak hanya memahami bagaimana menghasilkan bioetanol, tetapi juga mampu mengevaluasi dampak proses tersebut terhadap lingkungan dan mempertimbangkan alternatif solusi yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, pembelajaran tidak hanya berorientasi pada hasil akhir, tetapi juga pada proses berpikir reflektif dan kritis terhadap implikasi teknologi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa produksi bioetanol berbasis eceng gondok memiliki relevansi yang tinggi dalam pendidikan, khususnya dalam mendukung pembelajaran berbasis proyek yang berorientasi pada keberlanjutan. Integrasi antara aspek teknis dan edukatif ini menjadi penting untuk mempersiapkan siswa menghadapi tantangan global di bidang energi dan lingkungan secara lebih kritis dan bertanggung jawab.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil studi literatur, dapat disimpulkan bahwa eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) memiliki potensi yang signifikan sebagai bahan baku bioetanol karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan lignoselulosa yang tinggi. Namun demikian, efisiensi produksinya masih sangat dipengaruhi oleh tahapan pretreatment, hidrolisis, dan fermentasi, serta kontrol variabel seperti suhu dan pH. Kompleksitas proses ini menunjukkan bahwa produksi bioetanol berbasis eceng gondok belum sepenuhnya optimal secara teknis dan ekonomi, sehingga masih memerlukan pengembangan lebih lanjut agar dapat diterapkan secara luas.

Dari perspektif pendidikan, hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi produksi bioetanol dalam pembelajaran berbasis proyek memiliki potensi besar dalam meningkatkan pemahaman konsep, keterampilan berpikir kritis, serta kemampuan pemecahan masalah siswa. Pembelajaran berbasis proyek memungkinkan siswa untuk mengaitkan konsep sains dengan permasalahan nyata, khususnya terkait isu energi terbarukan dan lingkungan. Selain itu, aspek keberlanjutan yang terkandung dalam pemanfaatan eceng gondok memberikan nilai tambah dalam membentuk kesadaran ekologis dan tanggung jawab sosial siswa terhadap dampak teknologi.

Namun demikian, implementasi pembelajaran berbasis proyek berbasis bioetanol juga memiliki keterbatasan, seperti keterbatasan fasilitas laboratorium, kompleksitas proses, serta kebutuhan pengawasan dalam penggunaan bahan kimia. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian dalam bentuk penyederhanaan proyek atau penggunaan simulasi agar tetap aman dan sesuai dengan kondisi sekolah.

Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar pengembangan pembelajaran berbasis proyek di SMA/SMK mempertimbangkan keseimbangan antara aspek teknis, keamanan, dan tujuan pembelajaran. Guru dapat mengadaptasi proyek produksi bioetanol menjadi skala sederhana atau berbasis eksperimen terbimbing. Selain itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat menguji secara empiris efektivitas rancangan proyek yang telah dikembangkan dalam meningkatkan hasil belajar siswa. Pengembangan metode produksi bioetanol yang lebih ramah lingkungan dan efisien juga menjadi penting untuk mendukung integrasi antara inovasi teknologi dan pendidikan berkelanjutan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, motivasi, serta masukan yang konstruktif selama proses penyusunan artikel ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan baik.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh tim penyusun naskah atas kerja sama yang solid, kontribusi pemikiran, serta dedikasi dalam setiap tahapan penyusunan, mulai dari perencanaan hingga penyelesaian akhir artikel ini.

Ucapan terima kasih turut disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan lancar. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak tersebut, artikel ini tidak akan tersusun secara optimal.

## DAFTAR REFERENSI

- Akbar, M. Z. (2025). *Produksi bioetanol limbah sabut kelapa menggunakan enzim selulase Aspergillus niger dan ragi roti dengan metode Simultaneous Saccharification Fermentation (SSF)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim). <http://etheses.uin-malang.ac.id/id/eprint/76592>
- Amani, Y., & Aris, M. Z. (2023). Karakteristik biomassa eceng gondok sebagai energi alternatif. *Jurnal Energi Elektrik*, 12(1). <https://doi.org/10.29103/jee.v12i1.12492>
- Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., & Kumar, S. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.047>
- Bell, S. (2010). Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House*, 83(2), 39–43. <https://doi.org/10.1080/00098650903505415>
- Condliffe, B., Quint, J., Visher, M. G., Bangser, M. R., Drohojowska, S., Saco, L., & Nelson, E. (2017). Project-Based Learning: A Literature Review. MDRC. <https://doi.org/10.7916/D8RN36HM>
- Dwisari, V., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Pemanfaatan energi matahari: masa depan energi terbarukan. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 376–384. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3322>
- Firmansyah, M. Y., Wahyudi, D. D., & Widodo, L. U. (2022). Pemanfaatan eceng gondok menjadi bioetanol dengan proses fermentasi. *Envirotek*, 14(1). <https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i1.191>
- Hasan, M. S., & Sardar, R. I. (2021). A production of bioethanol through the bioconversion of water hyacinth: A review. *International Journal of Advanced Chemistry Research*, 3(2), 25–33. <https://doi.org/10.33545/26646781.2021.v3.i2a.39>
- Irsan, M., Radhiansyah, R., Yurika, Y., Noor, N. C., Taryana, E., Abidin, A., & Qadri, U. L. (2025). Sistem Energi: Konsep, Teknologi, dan Implementasi Berkelanjutan. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah. <https://shorturl.at/EIX1V>
- Kokotsaki, D., Menzies, V., & Wiggins, A. (2016). Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools*, 19(3), 267–277. <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- Kumar, A., Singh, L. K., & Ghosh, S. (2020). Bioethanol production from lignocellulosic biomass: Current perspectives and technological progress. *Bioresource Technology*, 303, 122135. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122135>

- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2024). Progress in the utilization of water hyacinth as an effective biomass material. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03655-6>
- Prasetyo, S., Anggoro, S., & Soeprbowati, T. R. (2021). Penurunan Kepadatan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) di Danau Rawapening dengan Memanfaatkannya sebagai Bahan Dasar Kompos. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 23(1), 57-62. <https://doi.org/10.14710/bioma.23.1.57-62>
- Pratama, A. B., & Juwita, E. (2025). Karakteristik biooil dari eceng gondok melalui proses pirolisis. *Jurnal Sinergi Polmed*. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v7i1.2877>
- Rezania, S., Din, M. F. M., Taib, S. M., Dahalan, F. A., Kamyab, H., Singh, L., & Sairan, F. M. (2017). Comprehensive review on water hyacinth for bioenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.061>
- Rohman, M. H., Marwoto, P., & Priatmoko, S. (2022). Pemanfaatan eceng gondok sebagai model pembelajaran berbasis proyek (STEAM-PjBL). *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pendidikan Fisika*, 8(1), 11–22. <https://doi.org/10.21009/1.08102>
- Saini, J. K., Saini, R., & Tewari, L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks. *3 Biotech*, 5(4), 337–353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-3>
- Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A. (2016). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 215, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.070>
- Singh, R., et al. (2025). Sustainable bio-valorisation of water hyacinth biomass. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.10235>
- Wahyuni, S., Setyorini, D., Arruan, F., & Harsyid, M. (2025). Fermentasi eceng gondok untuk peningkatan bioetanol. *Jurnal Lanskap dan Lingkungan*, 2(2). <https://doi.org/10.20956/julia.v2i2.43020>
- Wang, Z., Zhu, J., & Zhuang, X. (2019). Economic feasibility of bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Sustainability*, 11(3), 905. <https://doi.org/10.3390/su11030905>
- Wulandari, P. A., Fatimura, M., & Fitriyanti, R. (2023). Pengaruh konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan waktu fermentasi terhadap produksi bioetanol eceng gondok. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 4(2). <https://doi.org/10.23960/jtii.v4i2.75>
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production and purification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.050>
- Zhang, Q., Cai, W., Xu, Y., & Liu, Y. (2018). Enhancing enzymatic hydrolysis of water hyacinth. *Bioresource Technology*, 256, 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.027>