



E-MODUL BERBASIS RISET *ECOENZIM*: UPAYA MENINGKATKAN KETERAMPILAN PROSES SAINS MURID

Nurhayati^{1*}, Zaenal Abidin², Sulistiyono³, Agus Yadi Ismail⁴, Anna Fitri Hindriana⁵
Program Studi Magister Pendidikan Biologi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Kuningan¹²³⁴⁵
* e-mail korespondensi: 20241310008@uniku.ac.id

Diterima: 02/07/2026; Direvisi: 23/07/2026; Diterbitkan: 26/07/2026

ABSTRAK

Keterampilan Proses Sains (KPS) merupakan kemampuan penting yang harus dimiliki murid pada abad ke-21. Namun, murid Indonesia masih memiliki capaian KPS yang rendah. Salah satu penyebabnya adalah kurangnya bahan ajar digital yang kontekstual dan berbasis riset pada materi Bioteknologi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan e-modul berbasis riset *ECOENZIM* yang berorientasi pada *Sustainable Development Goals* (SDGs), serta menguji kelayakan dan efektivitasnya dalam meningkatkan sembilan indikator KPS murid kelas XII. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Pada tahap *Implementation*, digunakan desain *Quasi-Experimental Pretest-Posttest Control Group Design*. Penelitian dilakukan di SMAN 1 Cigalontang, Tasikmalaya, dengan kelas eksperimen (XII-B, n=29) yang menggunakan e-modul dan kelas kontrol (XII-G, n=31) yang menggunakan buku teks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa e-modul yang dikembangkan dinyatakan sangat layak digunakan berdasarkan penilaian para ahli dan respons peserta didik. Selain itu, e-modul terbukti efektif dalam meningkatkan keterampilan proses sains peserta didik. Peningkatan keterampilan proses sains pada kelas yang menggunakan e-modul lebih baik dibandingkan dengan kelas yang menggunakan pembelajaran konvensional, dengan perbedaan yang signifikan secara statistik. Pada sebagian besar indikator keterampilan proses sains, kelas eksperimen menunjukkan capaian yang lebih tinggi, terutama pada kemampuan mengamati. Dengan demikian, e-modul berbasis riset *ECOENZIM* yang berorientasi SDG 12 dan SDG 13 ini valid, praktis, dan efektif digunakan dalam pembelajaran Bioteknologi, serta dapat menjadi contoh pembelajaran kontekstual yang menghubungkan pendidikan keberlanjutan dengan kegiatan riset ilmiah.

Kata Kunci: e-modul; *ECOENZIM*; keterampilan proses sains; ADDIE; Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

ABSTRACT

Science Process Skills (SPS) are important skills for students in the 21st century. However, Indonesian students still show low achievement in SPS. One reason is the lack of contextual, research-based digital teaching materials in Biotechnology. This study aimed to develop an e-module based on ecoenzyme research, oriented toward the *Sustainable Development Goals* (SDGs), and to test its feasibility and effectiveness in improving nine indicators of SPS among twelfth-grade students. The study used the *Research and Development* (R&D) method with the ADDIE model (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). At the *Implementation* stage, a *Quasi-Experimental Pretest-Posttest Control Group Design* was used. The study was conducted at SMAN 1 Cigalontang, Tasikmalaya, with an experimental class (XII-B, n=29) using the e-module and a control class (XII-G, n=31) using textbooks. The results showed that the developed e-module was highly feasible for use based on expert validation and



students' responses. Furthermore, the e-module was proven to be effective in improving students' science process skills. Students in the experimental group demonstrated greater improvement in science process skills than those in the *Control Group*, with a statistically significant difference between the two groups. Across most science process skill indicators, the experimental group achieved better performance, particularly in the observation skill. Therefore, this ecoenzyme-based e-module, oriented toward SDG 12 and SDG 13, is valid, practical, and effective for use in Biotechnology learning, and can serve as an example of contextual learning that connects sustainability education with authentic scientific inquiry.

Keywords: *e-module; ecoenzyme; science process skills; ADDIE; Sustainable Development Goals*

PENDAHULUAN

Pendidikan abad ke-21 tidak hanya menuntut penguasaan materi pelajaran, tetapi juga kemampuan peserta didik dalam menghadapi berbagai persoalan ilmiah dan tantangan global. Salah satu kompetensi yang diperlukan adalah literasi sains, yaitu kemampuan individu untuk terlibat secara reflektif dalam isu-isu yang berkaitan dengan sains serta menggunakan pengetahuan dan bukti ilmiah dalam pengambilan keputusan (OECD, 2024). Dalam pembelajaran sains, pengembangan kompetensi tersebut perlu didukung oleh Keterampilan Proses Sains (KPS), yang memungkinkan peserta didik melakukan pengamatan, penyelidikan, pengolahan bukti, dan penarikan kesimpulan secara ilmiah (Rustaman et al., 2019). Pada saat yang sama, pendidikan juga memiliki peran strategis dalam mendukung Agenda 2030 yang mencakup 17 *Sustainable Development Goals* (SDGs) (United Nations, 2023). Peran tersebut dapat diwujudkan melalui *Education for Sustainable Development* (ESD), yaitu pendidikan yang membekali peserta didik dengan pengetahuan, keterampilan, nilai, dan sikap untuk berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan (UNESCO, 2020).

Dalam konteks pendidikan Indonesia, Kurikulum Merdeka mendorong pembelajaran yang berpusat pada peserta didik, kontekstual, dan relevan dengan kebutuhan pembelajaran abad ke-21 (Kemendikbudristek, 2022). Materi Biotechnology kelas XII memiliki potensi untuk mendukung tuntutan tersebut karena membahas pemanfaatan organisme atau proses biologis dalam menghasilkan produk yang bermanfaat, mulai dari bioteknologi konvensional hingga modern (Campbell et al., 2020). Namun, kemampuan peserta didik Indonesia dalam menggunakan pengetahuan sains masih menghadapi tantangan. Hasil PISA 2022 menunjukkan bahwa skor sains Indonesia sebesar 383, masih berada di bawah rata-rata negara OECD (OECD, 2023). Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pembelajaran sains yang tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi juga memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk melakukan proses penyelidikan ilmiah.

Permasalahan serupa ditemukan berdasarkan observasi awal di SMAN 1 Cigalontang. Dari 32 peserta didik kelas XII yang diamati, sekitar 30% terlibat aktif dalam diskusi, sedangkan sebagian besar peserta didik masih mengalami kesulitan dalam memahami konsep fermentasi dan peran mikroorganisme dalam bioteknologi. Pembelajaran juga masih didominasi oleh penyampaian materi melalui metode ceramah dan penggunaan buku teks, sehingga kesempatan peserta didik untuk memperoleh pengalaman langsung dalam melakukan penyelidikan ilmiah masih terbatas. Hasil analisis kebutuhan selanjutnya menunjukkan bahwa sembilan indikator KPS yang meliputi mengamati, mengklasifikasi, mengukur, memprediksi, menyimpulkan, mengomunikasikan, merumuskan hipotesis, merancang eksperimen, dan menerapkan konsep belum berkembang secara optimal. Kondisi ini menunjukkan perlunya



bahan ajar yang mampu mengintegrasikan pemahaman konsep dengan aktivitas penyelidikan secara sistematis.

Salah satu bahan ajar yang berpotensi memenuhi kebutuhan tersebut adalah e-modul yang dirancang untuk memfasilitasi pembelajaran secara interaktif dan mandiri. Penelitian Karmila et al. (2023) menunjukkan bahwa e-modul berbasis *Problem Based Learning* memiliki tingkat kelayakan yang tinggi dan dapat mendukung pembelajaran sains. Muslihat et al. (2023) juga melaporkan pengaruh penggunaan e-modul terhadap literasi sains dengan *effect size* sebesar 1,7. Sementara itu, Hardin et al. (2025) mengembangkan e-modul berbasis *Socio-Scientific Issues* pada materi bioteknologi yang menunjukkan peningkatan kemampuan berpikir kritis dan literasi sains. Temuan-temuan tersebut memperlihatkan potensi e-modul sebagai bahan ajar dalam pembelajaran biologi. Namun, pengembangan e-modul yang mengintegrasikan kegiatan riset autentik berbasis permasalahan lingkungan sebagai inti aktivitas pembelajaran untuk melatih sembilan indikator KPS masih perlu dikembangkan lebih lanjut.

Salah satu konteks riset yang relevan untuk diintegrasikan ke dalam e-modul Bioteknologi adalah pembuatan *ECOENZIM*. *ECOENZIM* merupakan cairan hasil fermentasi bahan organik dengan gula dan air yang memiliki karakteristik kimia tertentu serta berpotensi dimanfaatkan dalam berbagai kebutuhan lingkungan (Ismail et al., 2024). Proses fermentasi *ECOENZIM* memungkinkan peserta didik mengamati perubahan yang terjadi selama proses berlangsung, melakukan pengukuran, mengklasifikasikan hasil pengamatan, memprediksi perubahan, merumuskan hipotesis, merancang prosedur, menganalisis hasil, menarik kesimpulan, dan mengomunikasikan temuan. Dengan demikian, riset *ECOENZIM* memiliki potensi untuk menjadi konteks pembelajaran yang menghubungkan konsep bioteknologi dengan praktik penyelidikan ilmiah. Penggunaan *ECOENZIM* dalam pembelajaran juga telah dikembangkan melalui LKPD berbasis proyek untuk melatih kepedulian terhadap lingkungan (Putri et al., 2025), tetapi pengintegrasian ke dalam e-modul berbasis riset yang secara khusus berorientasi pada pengembangan sembilan indikator KPS masih terbatas.

Integrasi riset *ECOENZIM* juga memiliki relevansi dengan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan karena memanfaatkan bahan organik yang tersedia di lingkungan sekitar sebagai konteks pembelajaran. Aktivitas tersebut dapat dikaitkan dengan SDG 12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab melalui pemanfaatan limbah organik serta mendukung penguatan kesadaran peserta didik terhadap persoalan lingkungan. Dengan demikian, pembelajaran bioteknologi tidak hanya diarahkan pada pemahaman konsep, tetapi juga pada pengalaman melakukan penyelidikan ilmiah dalam konteks permasalahan keberlanjutan yang dekat dengan kehidupan peserta didik.

Berdasarkan uraian tersebut, kesenjangan penelitian terletak pada masih terbatasnya pengembangan e-modul Bioteknologi yang mengintegrasikan riset *ECOENZIM*, orientasi SDGs, dan pengembangan sembilan indikator KPS dalam satu desain pembelajaran. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji kelayakan e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi SDGs serta menganalisis efektivitas penggunaannya dalam meningkatkan KPS peserta didik berdasarkan sembilan indikator. Penelitian ini diharapkan menghasilkan bahan ajar digital yang kontekstual dan layak digunakan serta memberikan bukti empiris mengenai potensinya dalam mendukung pengembangan KPS melalui pembelajaran bioteknologi yang relevan dengan isu pembangunan berkelanjutan.



METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan ADDIE yang terdiri atas tahap *Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation* (Branch, 2009). Model ADDIE digunakan sebagai kerangka pengembangan e-modul mulai dari analisis kebutuhan hingga evaluasi produk. Pada tahap *Implementation*, efektivitas e-modul terhadap Keterampilan Proses Sains (KPS) peserta didik diuji menggunakan metode *quasi-experiment* dengan *Pretest-Posttest Control Group Design*. Desain penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain Penelitian

Kelompok <i>Pretest</i> Perlakuan <i>Posttest</i>			
Eksperimen	O ₁	X	O ₂
Kontrol	O ₃	–	O ₄

Keterangan: X = pembelajaran menggunakan e-modul berbasis riset ECOENZIM berorientasi SDGs.

Desain *quasi-experiment* dipilih karena peneliti tidak melakukan penugasan peserta didik secara acak ke dalam kelompok eksperimen dan kontrol. Kelompok penelitian menggunakan kelas yang telah terbentuk secara alami (*intact groups*) sesuai dengan kondisi pembelajaran di sekolah (Creswell, 2014).

Penelitian dilaksanakan di SMAN 1 Cigalontang, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat, pada semester genap tahun pelajaran 2025/2026. Tahap *Analysis, Design, dan Development* dilaksanakan pada awal semester, sedangkan tahap *Implementation* dilaksanakan selama empat pertemuan dengan total alokasi waktu 10 jam pelajaran (JP). Populasi penelitian adalah seluruh peserta didik kelas XII SMAN 1 Cigalontang tahun pelajaran 2025/2026 yang menempuh mata pelajaran Biologi, terdiri atas tujuh rombongan belajar dengan jumlah 210 peserta didik. Sampel dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* dengan mempertimbangkan kesamaan guru pengampu, jumlah peserta didik yang relatif seimbang, serta ketersediaan akses teknologi untuk mendukung penggunaan e-modul digital. Berdasarkan pertimbangan tersebut, kelas XII-B dipilih sebagai kelas eksperimen yang terdiri atas 29 peserta didik dan menggunakan e-modul berbasis riset ECOENZIM berorientasi SDGs, sedangkan kelas XII-G dipilih sebagai kelas kontrol yang terdiri atas 31 peserta didik dan mengikuti pembelajaran menggunakan bahan ajar yang biasa digunakan di sekolah. Dengan demikian, jumlah sampel penelitian adalah 60 peserta didik. Kesetaraan kemampuan awal kedua kelompok diperiksa berdasarkan skor *Pretest* KPS. Hasil pengujian menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kemampuan awal kedua kelompok ($p > 0,05$).

Data penelitian meliputi data kelayakan produk, respons pengguna, dan KPS peserta didik. Data kelayakan e-modul diperoleh melalui lembar validasi yang diberikan kepada ahli materi, ahli pendidikan, dan ahli media. Instrumen validasi menggunakan skala Likert lima tingkat. Data respons pengguna diperoleh melalui angket yang mencakup empat aspek penilaian untuk memperoleh informasi mengenai kepraktisan penggunaan e-modul. Data KPS dikumpulkan menggunakan tes tertulis yang diberikan sebelum (*Pretest*) dan setelah (*Posttest*) pembelajaran pada kelas eksperimen dan kelas kontrol. Instrumen tes terdiri atas soal pilihan ganda berbasis konteks dan uraian singkat yang mencakup sembilan indikator KPS, yaitu mengamati, mengklasifikasi, mengukur, memprediksi, menyimpulkan, mengomunikasikan, merumuskan hipotesis, merancang eksperimen, dan menerapkan konsep. Sebelum digunakan dalam penelitian, instrumen melalui validasi isi oleh validator ahli, uji keterbacaan, dan uji empiris pada peserta didik di luar sampel penelitian. Hasil uji empiris digunakan untuk



menentukan validitas butir dan reliabilitas instrumen, dengan koefisien Cronbach's Alpha $\geq 0,70$ sebagai kriteria reliabilitas yang dapat diterima.

Implementasi e-modul dirancang melalui tiga kegiatan yang saling melengkapi untuk mengakomodasi durasi fermentasi *ECOENZIM* yang lebih panjang daripada waktu pembelajaran. Pertama, peserta didik menggunakan simulasi proses fermentasi dalam e-modul untuk mengobservasi dan menganalisis perubahan *ECOENZIM* dari hari pertama hingga bulan ketiga berdasarkan dataset fermentasi yang telah terdokumentasi. Kedua, peserta didik melakukan praktik pembuatan *ECOENZIM* secara langsung dan melaksanakan lima sesi pengamatan terstruktur dengan interval dua hari selama periode pembelajaran. Pengamatan mencakup perubahan pH, warna, aroma, dan indikator pembentukan gas yang dicatat melalui lembar observasi digital. Ketiga, peserta didik mengobservasi dan membandingkan spesimen *ECOENZIM* autentik yang telah disiapkan sebelumnya pada tiga tingkat kematangan, yaitu satu, dua, dan tiga bulan. Ketiga kegiatan tersebut digunakan untuk memberikan pengalaman penyelidikan yang mengintegrasikan data simulasi, pengamatan langsung jangka pendek, dan perbandingan spesimen pada tingkat kematangan yang berbeda.

Data kelayakan e-modul dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggunakan persentase skor yang diperoleh dibandingkan dengan skor maksimum. Hasil persentase kemudian diinterpretasikan ke dalam kategori sangat layak (80–100%), layak (60–79%), cukup layak (40–59%), dan tidak layak (<40%) dengan mengacu pada kriteria yang digunakan oleh Karmila et al. (2023).

Peningkatan KPS peserta didik dianalisis menggunakan skor *normalized gain* (N-Gain) dengan rumus:

$$\text{N-Gain} = (\text{Skor Posttest} - \text{Skor Pretest}) / (\text{Skor maksimum} - \text{Skor Pretest})$$

Skor N-Gain diinterpretasikan ke dalam kategori tinggi (N-Gain $\geq 0,70$), sedang ($0,30 \leq \text{N-Gain} < 0,70$), dan rendah (N-Gain $< 0,30$) (Hake, 1999). Analisis N-Gain dilakukan terhadap skor KPS secara keseluruhan dan pada masing-masing indikator untuk memperoleh gambaran peningkatan kemampuan secara lebih rinci.

Sebelum pengujian hipotesis, data diuji menggunakan uji normalitas Shapiro–Wilk dan uji homogenitas Levene. Karena data N-Gain tidak seluruhnya memenuhi asumsi normalitas, perbedaan peningkatan KPS antara kelas eksperimen dan kelas kontrol dianalisis menggunakan uji Mann–Whitney U pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Besarnya pengaruh dihitung berdasarkan nilai statistik Z dari uji Mann–Whitney menggunakan rumus $r = |Z|/\sqrt{N}$, dengan N merupakan jumlah keseluruhan peserta didik yang dianalisis. Nilai *effect size* diinterpretasikan sebagai kecil ($r < 0,30$), sedang ($0,30 \leq r < 0,50$), dan besar ($r \geq 0,50$). Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan SPSS versi 25.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Kelayakan dan Kepraktisan E-Modul

Penilaian terhadap e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi SDGs dilakukan melalui validasi ahli materi, ahli pendidikan, dan ahli media. Selain itu, kepraktisan e-modul dinilai berdasarkan respons peserta didik kelas eksperimen setelah menggunakan e-modul dalam pembelajaran. Hasil penilaian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Penilaian E-Modul

No.	Sumber Penilaian	Persentase (%)	Kategori
1	Ahli materi	82,50	Sangat Layak



No.	Sumber Penilaian	Persentase (%)	Kategori
2	Ahli pendidikan	94,00	Sangat Layak
3	Ahli media	85,00	Sangat Layak
4	Respons kepraktisan peserta didik (n = 29)	74,44	Praktis

Sumber: Hasil pengolahan data, 2026

Berdasarkan Tabel 1, hasil validasi ahli menunjukkan bahwa e-modul memenuhi kategori Sangat Layak. Persentase penilaian ahli materi sebesar 82,50%, ahli pendidikan sebesar 94,00%, dan ahli media sebesar 85,00%. Penilaian tertinggi diperoleh dari ahli pendidikan, sedangkan penilaian terendah diperoleh dari ahli materi. Sementara itu, respons peserta didik terhadap kepraktisan penggunaan e-modul memperoleh persentase sebesar 74,44% dan termasuk dalam kategori Praktis. Hasil tersebut menunjukkan bahwa e-modul telah memenuhi kriteria kelayakan berdasarkan penilaian para ahli dan dapat digunakan secara praktis oleh peserta didik dalam kegiatan pembelajaran.

Efektivitas E-Modul terhadap Keterampilan Proses Sains

Efektivitas e-modul terhadap Keterampilan Proses Sains (KPS) dianalisis berdasarkan skor *Pretest*, *Posttest*, dan N-Gain pada kelas eksperimen dan kelas kontrol. Hasil analisis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil KPS Kelas Eksperimen dan Kelas Kontrol

Statistik	Eksperimen (n = 29)	Kontrol (n = 31)
Rata-rata <i>Pretest</i>	63,13	67,19
Rata-rata <i>Posttest</i>	91,47	90,29
Rata-rata N-Gain	0,746 (Tinggi)	0,634 (Sedang)

Hasil uji perbedaan N-Gain: $U = 287,000$; $Z = -2,407$; $p = 0,016$
Effect size: $r = 0,311$ (Sedang)

Sumber: Hasil pengolahan data, 2026

Berdasarkan Tabel 2, rata-rata skor *Pretest* kelas eksperimen sebesar 63,13 dan meningkat menjadi 91,47 pada *Posttest*. Pada kelas kontrol, rata-rata skor meningkat dari 67,19 pada *Pretest* menjadi 90,29 pada *Posttest*. Hasil analisis N-Gain menunjukkan bahwa kelas eksperimen memperoleh rata-rata sebesar 0,746 dengan kategori Tinggi, sedangkan kelas kontrol memperoleh rata-rata sebesar 0,634 dengan kategori Sedang.

Hasil uji Mann-Whitney U terhadap skor N-Gain menunjukkan nilai $U = 287,000$, $Z = -2,407$, dan $p = 0,016$. Karena nilai $p < 0,05$, terdapat perbedaan yang signifikan pada peningkatan KPS antara kelas eksperimen dan kelas kontrol. Besarnya pengaruh berdasarkan nilai *effect size* sebesar $r = 0,311$ dan termasuk dalam kategori Sedang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan KPS pada kelas yang menggunakan e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi SDGs berbeda secara signifikan dibandingkan dengan kelas kontrol.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi *Sustainable Development Goals* (SDGs) memiliki kelayakan yang tinggi berdasarkan penilaian para ahli. Validasi ahli materi memperoleh persentase 82,50%, ahli pendidikan 94,00%, dan ahli media 85,00%, yang seluruhnya berada pada kategori Sangat Layak. Sementara itu, respons kepraktisan peserta didik mencapai 74,44% dan termasuk kategori Praktis. Hasil tersebut



menunjukkan bahwa proses pengembangan melalui tahapan ADDIE mampu menghasilkan produk pembelajaran yang memenuhi aspek materi, pendidikan, dan media. Hal ini sesuai dengan karakteristik model ADDIE yang menempatkan proses analisis, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi sebagai tahapan sistematis dalam menghasilkan produk pembelajaran yang sesuai dengan kebutuhan pengguna (Branch, 2009). Dalam konteks penelitian pengembangan, proses tersebut juga memungkinkan data kuantitatif dan hasil evaluasi produk digunakan secara sistematis untuk menilai kualitas bahan ajar sebelum dan selama implementasinya (Creswell, 2014).

Tingginya penilaian ahli menunjukkan bahwa e-modul memiliki kesesuaian antara isi materi, desain pembelajaran, dan penyajian media. E-modul dirancang untuk mendukung pembelajaran mandiri melalui petunjuk penggunaan, materi yang terstruktur, aktivitas penyelidikan, serta evaluasi pembelajaran. Karakteristik tersebut sejalan dengan prinsip modul pembelajaran yang menekankan sifat *self-instruction*, *self-contained*, *stand-alone*, *adaptive*, dan *user-friendly* (Direktorat Pembinaan SMK, 2017). Penilaian ahli pendidikan yang mencapai 94,00% juga menunjukkan bahwa desain aktivitas dalam e-modul memiliki kesesuaian yang tinggi dengan kebutuhan pembelajaran. Hal ini relevan dengan arah Kurikulum Merdeka yang mendorong pembelajaran berpusat pada peserta didik, kontekstual, dan memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk terlibat aktif dalam proses pembelajaran (Kemendikbudristek, 2022).

Hasil kelayakan tersebut sejalan dengan penelitian terdahulu mengenai pengembangan e-modul dalam pembelajaran sains. Karmila et al. (2023) menunjukkan bahwa e-modul berbasis *Problem Based Learning* memiliki tingkat kelayakan yang tinggi dan berpotensi mendukung literasi sains serta numerasi peserta didik. Muslihat et al. (2023) juga menemukan bahwa penggunaan e-modul berbasis *Problem Based Learning* dapat memberikan pengaruh terhadap literasi sains. Pada materi bioteknologi, Hardin et al. (2025) menunjukkan bahwa e-modul berbasis *Socio-Scientific Issues* dapat digunakan untuk mendukung kemampuan berpikir kritis dan literasi sains. Temuan penelitian ini memperluas hasil penelitian tersebut dengan menempatkan kegiatan riset *ECOENZIM* sebagai inti aktivitas belajar, sehingga e-modul tidak hanya menyajikan materi secara digital, tetapi juga mengarahkan peserta didik untuk terlibat dalam proses penyelidikan ilmiah.

Dari aspek kepraktisan, respons peserta didik sebesar 74,44% menunjukkan bahwa e-modul berada pada kategori Praktis. Meskipun persentasenya lebih rendah dibandingkan hasil validasi ahli, hasil tersebut menunjukkan bahwa produk dapat digunakan dalam kondisi pembelajaran yang sebenarnya. Perbedaan antara penilaian ahli dan respons pengguna juga memberikan informasi penting bahwa kelayakan konseptual dan desain produk tidak selalu identik dengan pengalaman pengguna ketika produk diimplementasikan. Kompleksitas aktivitas riset, penggunaan perangkat digital, serta tuntutan peserta didik untuk melakukan pengamatan dan analisis secara mandiri dapat memengaruhi persepsi kepraktisan. Oleh karena itu, hasil respons pengguna dapat menjadi dasar evaluasi lebih lanjut untuk menyederhanakan navigasi, petunjuk aktivitas, dan penyajian informasi tanpa mengurangi kedalaman proses ilmiah yang dikembangkan.

Penggunaan visual, simulasi, dan representasi digital dalam e-modul juga berperan dalam membantu peserta didik memahami proses bioteknologi yang berlangsung dalam rentang waktu panjang. Hindriana et al. (2026) menjelaskan bahwa penggunaan representasi visual yang sesuai dapat membantu pengelolaan beban kognitif ketika peserta didik mempelajari konsep ilmiah yang abstrak dan kompleks. Dalam penelitian ini, proses fermentasi *ECOENZIM* yang membutuhkan waktu relatif panjang direpresentasikan melalui kombinasi simulasi



berbasis data, pengamatan langsung, dan observasi spesimen pada tingkat kematangan yang berbeda. Strategi tersebut memungkinkan peserta didik memperoleh gambaran proses fermentasi secara lebih utuh tanpa harus membatasi pembelajaran hanya pada durasi implementasi di kelas.

Efektivitas e-modul terhadap Keterampilan Proses Sains (KPS) ditunjukkan oleh peningkatan skor pada kelas eksperimen dan kelas kontrol. Kelas eksperimen mengalami peningkatan rata-rata dari 63,13 pada *Pretest* menjadi 91,47 pada *Posttest*, sedangkan kelas kontrol meningkat dari 67,19 menjadi 90,29. Berdasarkan analisis *normalized gain*, kelas eksperimen memperoleh N-Gain sebesar 0,746 dengan kategori Tinggi, sedangkan kelas kontrol memperoleh N-Gain sebesar 0,634 dengan kategori Sedang berdasarkan kriteria Hake (1999). Meskipun kedua kelompok mengalami peningkatan, nilai N-Gain yang lebih tinggi pada kelas eksperimen menunjukkan bahwa pembelajaran menggunakan e-modul berbasis riset *ECOENZIM* memberikan peningkatan KPS yang lebih besar dibandingkan pembelajaran pada kelas kontrol.

Perbedaan peningkatan tersebut diperkuat oleh hasil uji Mann–Whitney U yang menunjukkan nilai $U = 287,000$, $Z = -2,407$, dan $p = 0,016$. Nilai $p < 0,05$ menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada peningkatan KPS antara kedua kelompok. Besarnya pengaruh yang diperoleh adalah $r = 0,311$ dan termasuk kategori Sedang berdasarkan interpretasi ukuran efek (Cohen, 1988). Dengan demikian, efektivitas e-modul tidak hanya ditunjukkan oleh perbedaan kategori N-Gain secara deskriptif, tetapi juga didukung oleh bukti inferensial dan ukuran pengaruh. Temuan ini penting karena perbedaan yang signifikan secara statistik perlu dipertimbangkan bersama besarnya efek untuk memperoleh gambaran yang lebih proporsional mengenai dampak suatu intervensi pembelajaran.

Peningkatan KPS pada kelas eksperimen dapat dijelaskan melalui karakteristik pembelajaran yang menempatkan peserta didik sebagai pelaku penyelidikan. KPS tidak berkembang hanya melalui penyampaian konsep, tetapi membutuhkan kesempatan untuk mengamati, mengklasifikasi, mengukur, memprediksi, menyimpulkan, mengomunikasikan, merumuskan hipotesis, merancang eksperimen, dan menerapkan konsep (Rustaman et al., 2019). Penelitian Chengere et al. (2025) menunjukkan bahwa aktivitas laboratorium berbasis penyelidikan dapat meningkatkan KPS peserta didik sekolah menengah karena memberikan kesempatan untuk terlibat secara langsung dalam proses ilmiah. Temuan serupa dikemukakan oleh Hindriana et al. (2021), yang menunjukkan bahwa kegiatan eksperimen menggunakan bahan lokal dapat mendukung pengembangan keterampilan proses sains dasar dan terintegrasi. Dengan demikian, peningkatan KPS dalam penelitian ini dapat dikaitkan dengan keterlibatan peserta didik dalam rangkaian aktivitas penyelidikan yang menjadi bagian utama dari penggunaan e-modul.

ECOENZIM memberikan konteks autentik untuk mengembangkan KPS karena proses pembuatannya melibatkan fenomena fermentasi yang dapat diamati dan dianalisis. Fermentasi merupakan salah satu proses biologis yang relevan dengan materi bioteknologi dan melibatkan aktivitas organisme dalam menghasilkan perubahan pada suatu substrat (Campbell et al., 2020). Karakteristik kimia *ECOENZIM* yang dihasilkan dari bahan buah dan sayuran juga menunjukkan bahwa proses tersebut dapat dikaji melalui berbagai parameter yang dapat diamati dan diukur (Ismail et al., 2024). Oleh karena itu, penggunaan *ECOENZIM* memungkinkan konsep bioteknologi dipelajari tidak hanya sebagai pengetahuan deklaratif, tetapi melalui kegiatan pengumpulan dan interpretasi data yang berasal dari fenomena nyata.

Kekuatan utama desain pembelajaran dalam penelitian ini terletak pada penggunaan tiga bentuk pengalaman pengamatan yang saling melengkapi. Peserta didik memperoleh data proses



fermentasi melalui simulasi dalam e-modul, melakukan pengamatan terhadap *ECOENZIM* yang dibuat sendiri selama periode implementasi, serta membandingkan spesimen autentik pada usia satu, dua, dan tiga bulan. Desain tersebut menjadi solusi pedagogis terhadap keterbatasan waktu pembelajaran karena proses fermentasi tidak dapat diamati secara lengkap hanya dalam empat pertemuan. Pengalaman langsung dan penggunaan konteks lokal juga memiliki relevansi dengan hasil penelitian Hindriana et al. (2021), sedangkan penggunaan representasi visual untuk melengkapi fenomena yang sulit diamati secara langsung sesuai dengan prinsip pengelolaan beban kognitif dalam pembelajaran konsep kompleks (Hindriana et al., 2026).

Integrasi *ECOENZIM* dalam pembelajaran juga memperkuat hubungan antara materi bioteknologi dan isu keberlanjutan. Penelitian Putri et al. (2025) menunjukkan bahwa *ECOENZIM* dapat diintegrasikan dalam perangkat pembelajaran berbasis proyek untuk melatih kepedulian terhadap lingkungan. Dalam penelitian ini, konteks tersebut diperluas dengan menjadikan riset *ECOENZIM* sebagai wahana pengembangan KPS. Pemanfaatan bahan organik sebagai objek penyelidikan memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk memahami bahwa konsep sains memiliki keterkaitan dengan permasalahan konsumsi, produksi, dan pengelolaan sumber daya dalam kehidupan sehari-hari.

Orientasi tersebut sejalan dengan *Education for Sustainable Development* yang menekankan pentingnya pendidikan dalam membekali peserta didik dengan pengetahuan, keterampilan, nilai, dan kemampuan bertindak dalam menghadapi persoalan keberlanjutan (UNESCO, 2020). Agenda pembangunan berkelanjutan juga menempatkan pendidikan dan pola konsumsi serta produksi yang bertanggung jawab sebagai bagian penting dari transformasi menuju pembangunan berkelanjutan (United Nations, 2023). Oleh karena itu, penggunaan limbah organik sebagai konteks riset memberikan ruang untuk menghubungkan pembelajaran bioteknologi dengan SDGs, terutama SDG 12 mengenai konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab. Integrasi tersebut menjadikan pembelajaran sains tidak berhenti pada penguasaan konsep, tetapi juga menghubungkan kegiatan ilmiah dengan persoalan lingkungan yang dekat dengan kehidupan peserta didik.

Pengembangan KPS melalui pembelajaran kontekstual juga relevan dengan tuntutan literasi sains. Hasil PISA 2022 menunjukkan bahwa capaian sains peserta didik Indonesia masih memerlukan perhatian dan penguatan melalui pembelajaran yang memberi kesempatan untuk menggunakan pengetahuan ilmiah dalam menghadapi persoalan nyata (OECD, 2023). Kerangka sains PISA 2025 semakin menekankan kemampuan peserta didik untuk terlibat secara reflektif dengan isu sains dan menggunakan informasi serta bukti ilmiah dalam pengambilan keputusan (OECD, 2024). Dalam konteks tersebut, aktivitas riset *ECOENZIM* memberikan pengalaman kepada peserta didik untuk mengamati fenomena, mengumpulkan data, membangun penjelasan, dan mengomunikasikan hasil penyelidikan. Meskipun penelitian ini secara khusus mengukur KPS, aktivitas tersebut memiliki relevansi dengan kompetensi ilmiah yang dibutuhkan dalam literasi sains.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi e-modul, riset *ECOENZIM*, orientasi SDGs, dan pengembangan KPS dalam satu desain pembelajaran. Berbeda dengan pengembangan e-modul yang berfokus pada penyajian materi atau penggunaan konteks masalah, *ECOENZIM* dalam penelitian ini ditempatkan sebagai inti kegiatan belajar yang mengarahkan proses penyelidikan peserta didik. Selain itu, kombinasi simulasi berbasis data, praktik langsung, dan observasi spesimen pada tingkat kematangan berbeda menjadi strategi untuk mengatasi ketidaksesuaian antara durasi fermentasi dan waktu pembelajaran formal.



Desain tersebut memungkinkan peserta didik memperoleh pengalaman pengamatan yang lebih komprehensif sekaligus mempertahankan karakter autentik dari proses penyelidikan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi SDGs layak dan praktis digunakan serta memberikan peningkatan KPS yang secara statistik lebih tinggi dibandingkan pembelajaran pada kelas kontrol. Temuan ini memperlihatkan bahwa pengembangan bahan ajar digital akan lebih bermakna ketika teknologi tidak hanya digunakan sebagai media penyajian informasi, tetapi diintegrasikan dengan aktivitas penyelidikan autentik dan persoalan keberlanjutan. Dengan demikian, e-modul yang dikembangkan memberikan kontribusi praktis bagi pembelajaran Bioteknologi sekaligus menawarkan desain pembelajaran yang menghubungkan penguasaan konsep, proses ilmiah, teknologi digital, dan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang layak dan praktis digunakan dalam pembelajaran Bioteknologi. Kelayakan e-modul ditunjukkan oleh hasil validasi ahli materi sebesar 82,50%, ahli pendidikan sebesar 94,00%, dan ahli media sebesar 85,00%, yang seluruhnya termasuk kategori Sangat Layak. Respons peserta didik terhadap penggunaan e-modul memperoleh persentase sebesar 74,44% dengan kategori Praktis. Penggunaan e-modul juga efektif dalam meningkatkan Keterampilan Proses Sains (KPS), yang ditunjukkan oleh N-Gain kelas eksperimen sebesar 0,746 dengan kategori Tinggi, lebih tinggi dibandingkan kelas kontrol sebesar 0,634 dengan kategori Sedang. Perbedaan peningkatan KPS antara kedua kelompok signifikan secara statistik ($U = 287,000$; $p = 0,016$) dengan *effect size* sebesar 0,311 dalam kategori Sedang. Dengan demikian, e-modul berbasis riset *ECOENZIM* berorientasi SDGs dapat digunakan sebagai alternatif bahan ajar kontekstual untuk mendukung pengembangan KPS peserta didik dalam pembelajaran Bioteknologi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan e-modul dalam periode yang lebih panjang agar peserta didik dapat mengamati proses fermentasi secara lebih utuh serta menguji efektivitasnya pada populasi dan konteks pembelajaran yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Branch, R. M. (2009). *Instructional Design: The ADDIE approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6>
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2020). *Biology: A global approach* (12th ed.). Pearson Education Limited.
- Chengere, A. M., Bono, B. D., Zinabu, S. A., Jilo, K. W., & Vallespin, M. R. D. (2025). Enhancing secondary school students' science process skills through guided inquiry-based laboratory activities in biology. *PLOS ONE*, 20(4), e0320692. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320692>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power Analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Direktorat Pembinaan SMK. (2017). *Panduan penyusunan modul pembelajaran*. Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan.



- Hake, R. R. (1999). *Analyzing change/gain scores*. American Educational Research Association.
- Hardin, A. R., Hindriana, A. F., & Abidin, Z. (2025). *Development of e-module based on socio-scientific issues integrated with Islamic values to improve critical thinking skills and scientific literacy in biotechnology material. Report of Biological Education*, 6(1), 49–55. <https://doi.org/10.37150/ffgafh96>
- Hindriana, A. F., Setiawati, I., Abidin, Z., & Handayani. (2021). Application of VIPSTA experiment with local materials to improve students' basic and integrated science process skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1806(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1806/1/012045>
- Hindriana, A. F., Turki, H. I., Prihatin, Y., Setiawati, I., Abidin, Z., & Pratami, A. R. (2026). Cognitive load management: Learning abstract and complex scientific concepts using visual metaphors and metonymies. *Cakrawala Pendidikan*, 45(1), 84–100. <https://doi.org/10.21831/cp.v45i1.83196>
- Ismail, A. Y., Nainggolan, M. F., & Nauli, A. P. (2024). Characterizing the chemical composition of eco-enzymes derived from vegetable and fruit sources. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(3), 1051–1060. <https://doi.org/10.18280/ij dne.190334>
- Karmila, M., Abidin, Z., & Sulistyono, S. (2023). Pengembangan e-modul berbasis *problem-based learning* dengan media Wepik terhadap peningkatan kemampuan literasi sains dan numerasi siswa MA. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(22), 611–626. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10129984>
- Kemendikbudristek. (2022). *Panduan pengembangan kurikulum operasional satuan pendidikan*. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.
- Muslihat, R., Hindriana, A. F., & Abidin, Z. (2023). Pengembangan e-modul berbasis *problem-based learning* dengan media Canva untuk meningkatkan literasi sains pada materi pencemaran lingkungan kelas X SMAN 1 Mandirancan. *Jurnal PGSD*, 9(1), 1–16. URL: <https://journal.unucirebon.ac.id/index.php/jpgsd>
- Nations, U. (2023). *The Sustainable Development Goals report 2023*. United Nations Publications.
- OECD. (2023). *PISA 2022 results: Factsheets—Indonesia*. OECD Publishing.
- OECD. (2024). *PISA 2025 science framework*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/458fd2d5-en>
- Putri, O. Y., Agnafia, D. N., & Anfa, Q. (2025). Pengembangan LKPD *eco-enzyme* berbasis *project-based learning* untuk melatih sikap peduli lingkungan. *Jurnal Pendidikan Matematika dan Sains*, 13(1), 183–197. <https://doi.org/10.21831/jpms.v13i1.85421>
- Rustaman, N. Y., Dirdjosoemarto, S., Yudianto, S. A., Achmad, Y., Subekti, R., Rochintaniawati, D., & Nurjhani, M. (2019). *Strategi belajar mengajar biologi*. UPI Press.
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable Development: A roadmap*. UNESCO Publishing.