

Pengembangan *E-module* Berbasis *Project Based Learning* (PjBL) Berbantuan *Artificial Intelligence* (AI) untuk Memberdayakan Keterampilan Berpikir Kritis dan Kolaborasi Siswa SMA

Fauziah Eka Rahaeni Putri^{1*}, Frida Kunti Setiowati², Muntholib³

^{1,2,3}Universitas Negeri Malang
E-mail: fauziahekar13@gmail.com^{1*}

Article Info	Abstract
Article History Received: 2026-02-23 Revised: 2026-04-10 Published: 2026-04-18 Keywords: <i>artificial intelligence (AI); e-module; critical thinking skills; collaboration skills, project based learning (PjBL)</i>	<p><i>This study aims to develop an e-module based on Project-Based Learning (PjBL) supported by Artificial Intelligence (AI) that meets the criteria of validity, practicality and effectiveness. The research method employed a Research and Development approach using the Lee and Owen model, which comprises the stages of Assessment/Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation (ADDIE). The product was validated by subject matter experts, experts in teaching media and materials, experts in learning tools, and Biology education practitioners, and was categorised as highly valid. The level of practicality was also classified as highly practical based on student responses during the e-module trial. The effectiveness test, conducted using a one-group pretest-posttest design, showed an improvement in students' critical thinking skills with an N-gain of 0.61 (moderate category). Students' collaboration skills also improved, as indicated by self-assessment with an N-gain of 0.91 and peer assessment with an N-gain of 0.89, both falling into the high category. This study demonstrates that the AI-assisted PjBL-based e-module is feasible, practical, and effective for enhancing students' critical thinking and collaboration skills, with the novelty being the integration of PjBL and AI as a learning support system within the e-module instructional material, which supports the development of critical thinking and collaboration.</i></p>
Artikel Info Sejarah Artikel Diterima: 2026-02-23 Direvisi: 2026-04-10 Dipublikasi: 2026-04-18 Kata kunci: <i>artificial intelligence (AI); e-module; keterampilan berpikir kritis; keterampilan kolaborasi, project based learning (PjBL)</i>	Abstrak <p>Penelitian ini bertujuan mengembangkan <i>e-module</i> berbasis <i>Project-Based Learning</i> (PjBL) berbantuan <i>Artificial Intelligence</i> (AI) yang memenuhi kriteria kevalidan, kepraktisan, dan keefektifan. Metode penelitian menggunakan pendekatan <i>Research and Development</i> dengan model Lee and Owen yang meliputi tahapan <i>Assessment/analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation</i> (ADDIE). Produk divalidasi oleh ahli materi, media dan bahan ajar, ahli perangkat pembelajaran, serta praktisi pendidikan Biologi dengan kategori sangat valid. Tingkat kepraktisan juga berada pada kategori sangat praktis berdasarkan respons siswa pada uji coba <i>e-module</i>. Uji efektivitas melalui desain <i>one group pretest-posttest</i> menunjukkan adanya peningkatan keterampilan berpikir kritis siswa dengan nilai <i>N-gain</i> 0,61 (kategori sedang). Keterampilan kolaborasi siswa juga mengalami peningkatan berdasarkan <i>self-assessment</i> dengan <i>N-gain</i> 0,91 dan berdasarkan <i>peer assessment</i> dengan <i>N-gain</i> 0,89, keduanya berkategori tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa <i>e-module</i> berbasis PjBL berbantuan AI layak, praktis, dan efektif untuk memberdayakan keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa, dengan kebaruan berupa integrasi PjBL dan AI sebagai sistem pendukung proses belajar dalam bahan ajar berupa <i>e-module</i> yang mendukung pemberdayaan berpikir kritis dan kolaborasi.</p>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang dinamis menuntut pendidikan berperan strategis dalam membekali generasi agar

mampu beradaptasi dan tidak tertinggal (Mukul & Büyüközkan, 2023; Ghory & Ghafory, 2021). Pendidikan perlu mengakomodasi kebutuhan siswa yang

hidup berdampingan dengan teknologi (JannathFirdouse & Kasim, 2024). Hal ini dapat diwujudkan melalui integrasi teknologi dalam strategi pembelajaran modern yang selaras dengan tuntutan keterampilan abad ke-21. Keterampilan tersebut, khususnya berpikir kritis dan kolaborasi, penting untuk menganalisis, mengevaluasi, serta menyelesaikan masalah nyata secara efektif (Utami *et al.*, 2024). Sejalan dengan tujuan ke-4 *Sustainable Development Goals* (SDGs) tentang *quality education*, pendidikan berkualitas harus memperkuat kedua keterampilan tersebut agar siswa siap berkontribusi dalam pembangunan berkelanjutan (Vega *et al.*, 2025).

Kondisi di Indonesia menunjukkan bahwa keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa masih belum optimal. Hal ini diperkuat oleh hasil survei *Program for International Student Assessment* (PISA) yang menunjukkan bahwa rerata skor siswa Indonesia pada tahun 2022 mengalami penurunan dibandingkan tahun 2018 pada bidang matematika, sains, dan membaca (OECD, 2023). Penurunan tersebut menunjukkan adanya permasalahan dalam kemampuan siswa dalam menguasai keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi. Data juga menunjukkan bahwa Indonesia secara konsisten berada pada peringkat bawah dalam hasil PISA sejak tahun 2000 hingga 2022 (Yusmar & Fadilah, 2023). Fakta ini menegaskan perlunya upaya sistematis untuk meningkatkan kualitas keterampilan abad ke-21 siswa.

Rendahnya keterampilan tersebut dipengaruhi oleh sistem pembelajaran yang

belum adaptif dan masih didominasi pendekatan konvensional (Siregar *et al.*, 2022). Pembelajaran cenderung berorientasi pada hafalan dan penyampaian satu arah sehingga membatasi keterlibatan aktif siswa. Kondisi ini menghambat siswa dalam mengeksplorasi ide, menganalisis informasi, serta mengemukakan pendapat secara logis. Selain itu, penggunaan modul cetak yang statis belum mampu mendukung interaksi dan kemandirian belajar siswa (Istiawati *et al.*, 2025; Sidiq & Najuah, 2020). Akibatnya, pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi belum optimal dalam proses pembelajaran.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pengembangan *e-module* sebagai bahan ajar digital yang interaktif dan adaptif (Azzarkasyi *et al.*, 2019; Surindra & Irmayanti, 2025). *E-module* perlu dipadukan dengan model *Project-Based Learning* (PjBL) yang mendorong siswa belajar melalui proyek nyata dan kolaboratif (Hasiana, 2025; Putri *et al.*, 2022; Putri *et al.*, 2025). PjBL melatih siswa dalam merencanakan, menyelidiki, dan mempresentasikan hasil sehingga memperkuat keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi (Fadhilah & Thahir, 2023; Siregar & Syafriani, 2024). Integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran melalui personalisasi dan dukungan interaktif (Viruel *et al.*, 2025; Dinger *et al.*, 2024; Sako, 2024; Anggraini *et al.*, 2024). Kombinasi *e-module*, PjBL, dan AI memungkinkan terciptanya pembelajaran yang lebih kontekstual, adaptif, dan berpusat pada siswa.

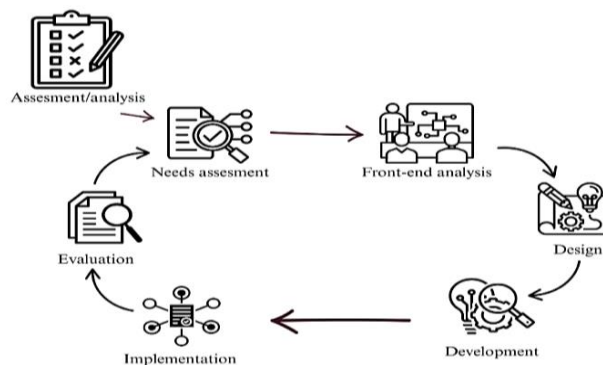
Meskipun berbagai inovasi telah dikembangkan, implementasi *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI di sekolah masih belum optimal. Hasil studi pendahuluan di SMA Negeri 1 Pinrang menunjukkan bahwa pembelajaran Biologi masih didominasi pendekatan berpusat pada guru dan penggunaan modul konvensional. Pengukuran awal menunjukkan keterampilan berpikir kritis siswa berada pada kategori sangat rendah, sedangkan keterampilan kolaborasi berada pada kategori sedang. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara tuntutan pembelajaran abad ke-21 dan praktik pembelajaran di sekolah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI untuk memberdayakan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi siswa, serta mengkaji kevalidan, kepraktisan, dan keefektifannya.

METODE

Penelitian ini merupakan jenis penelitian dan pengembangan (*research and development*) yang bertujuan menghasilkan *e-module* berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) berbantuan *Artificial Intelligence* (AI). Penelitian pra-eksperimen dengan desain *one group pretest-posttest*. Desain ini melibatkan satu kelompok subjek yang diberikan tes awal sebelum perlakuan dan tes akhir setelah perlakuan. Perlakuan yang dimaksud adalah penggunaan *e-module* berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) berbantuan *Artificial Intelligence* (AI) dalam proses pembelajaran yang dilaksanakan selama tiga siklus, dengan setiap siklus terdiri dari dua kali pertemuan. Tujuan

penggunaan desain ini adalah untuk mengetahui perubahan keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa setelah mengikuti rangkaian pembelajaran.

Pengembangan *e-module* dalam penelitian ini menggunakan model ADDIE yang dikemukakan oleh Lee & Owens (2004). Model ini terdiri atas lima tahap, yaitu *assessment/analysis*, *design*, *development*, *implementation*, dan *evaluation*. Ilustrasi skema model ADDIE ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap *assessment/analysis* dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan dan kondisi awal pembelajaran. Tahap *design* berfokus pada perancangan struktur *e-module*, sintaks PjBL, serta integrasi AI sebagai sistem pendukung proses belajar (*learning support system*). Tahap *development*, *implementation*, dan *evaluation* dilakukan untuk menghasilkan produk yang valid, praktis, dan efektif.



Gambar 1. Ilustrasi skema model penelitian dan pengembangan ADDIE

Subjek dalam penelitian ini adalah siswa kelas X.H SMA Negeri 1 Pinrang. Pemilihan subjek dilakukan melalui teknik *random sampling* dari seluruh populasi siswa kelas X. Kelas X.H dipilih sebagai kelas yang menerima perlakuan penggunaan *e-module* dalam pembelajaran Biologi. Materi

yang diajarkan dalam penelitian ini adalah Keanekaragaman Hayati. Subjek penelitian berperan sebagai responden dalam pengumpulan data terkait keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi.

Teknik pengumpulan data meliputi validitas, kepraktisan, dan keefektifan *e-module*. Validitas *e-module* diukur menggunakan instrumen lembar validasi oleh ahli materi, ahli media dan bahan ajar, ahli perangkat pembelajaran, serta praktisi pendidikan Biologi. Kepraktisan *e-module* diukur melalui angket respons siswa sebagai pengguna produk. Keefektifan *e-module* diukur menggunakan tes esai keterampilan berpikir kritis, angket *self-assessment* dan *peer-assessment* dengan sumber data dari siswa. Data dianalisis menggunakan rata-rata *pretest* dan *posttest* serta perhitungan *N-gain*, yang didukung oleh data triangulasi dari observasi dan LKPD untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi siswa.

Analisis kevalidan *e-module* dilakukan berdasarkan skor penilaian para validator dengan menghitung persentase tingkat validitas menggunakan rumus berikut.

$$\text{Validasi (\%)} = \frac{\text{Skor Total}}{\text{Skor Maksimal}} \times 100\%$$

Selanjutnya, tingkat kepraktisan *e-module* dianalisis berdasarkan hasil angket respons siswa dan penilaian praktisi pendidikan Biologi. Persentase kepraktisan dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\text{Kepraktisan (\%)} = \frac{\text{Skor Total}}{\text{Skor Maksimal}} \times 100\%$$

Efektivitas *e-module* ditentukan berdasarkan peningkatan hasil tes

keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa yang dianalisis menggunakan skor *N-gain*. Perhitungan dilakukan dengan rumus berikut.

$$N\text{-gain} = \frac{\text{Skor Posttest} - \text{Skor Pretest}}{\text{Skor Ideal} - \text{Skor Pretest}} \times 100\%$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilaksanakan di SMA Negeri 1 Pinrang dengan melibatkan 36 siswa kelas X. Produk yang dihasilkan berupa *e-module* Keanekaragaman Hayati berbasis PjBL berbantuan AI. Penelitian ini menghasilkan data sebagai berikut.

1. Kevalidan *E-module* Berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) Berbantuan *Artificial Intelligence* (AI)

Tahap uji kevalidan bertujuan memastikan bahwa aspek isi, tampilan, struktur pembelajaran, serta evaluasi telah memenuhi standar kelayakan (Sireci & Benítez, 2023). Pada tahap ini, *e-module* divalidasi oleh tiga dosen Pendidikan Biologi yang meliputi ahli materi, ahli media dan bahan ajar, ahli perangkat pembelajaran, serta satu praktisi Pendidikan Biologi. Masukan dari validator menjadi dasar revisi untuk menyempurnakan *e-module* sebelum digunakan dalam pembelajaran.

Hasil validasi ahli materi setelah revisi menunjukkan persentase kelayakan sebesar 100% dengan kategori sangat valid. Hal ini menunjukkan bahwa aspek kelayakan isi, ketepatan konsep, dan penyajian materi telah memenuhi seluruh indikator penilaian. Substansi materi dinilai akurat dan sesuai dengan capaian pembelajaran, sehingga *e-module* layak digunakan sebagai sumber belajar dari segi kualitas materi.

Hasil validasi ahli media dan bahan ajar setelah revisi menunjukkan persentase kelayakan sebesar 100% dengan kategori sangat valid. Penilaian mencakup aspek desain, grafika, dan karakteristik *e-module*. Tampilan dan sistematika penyajian dinilai telah memenuhi standar kelayakan media pembelajaran. Revisi yang dilakukan mampu menyempurnakan kualitas visual dan keterbacaan produk. *E-module* dinyatakan layak digunakan dari aspek media dan bahan ajar.

Hasil validasi ahli perangkat pembelajaran setelah revisi menunjukkan persentase sebesar 93,3% dengan kategori sangat valid. Seluruh komponen perangkat pembelajaran dinilai telah sesuai dengan standar perencanaan pembelajaran. Tujuan pembelajaran, alur tujuan pembelajaran, serta integrasi keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi telah tersusun secara sistematis. Revisi yang dilakukan berhasil memperbaiki kekurangan pada penilaian awal. Perangkat pembelajaran dinyatakan siap diimplementasikan dalam kegiatan pembelajaran.

Hasil validasi praktisi Pendidikan Biologi setelah revisi menunjukkan persentase kelayakan 100% dengan kategori sangat valid. Penilaian mencakup aspek kelayakan isi, penyajian, desain, grafika, dan kegunaan *e-module*. Produk dinilai praktis dan mudah diterapkan dalam pembelajaran di kelas. Seluruh indikator penilaian telah terpenuhi setelah dilakukan perbaikan.

Capaian hasil validasi dari beberapa ahli menunjukan bahwa seluruh komponen, baik isi, tampilan, maupun struktur pembelajaran telah memenuhi standar

kelayakan. Tingginya kevalidan ini mengindikasikan bahwa proses pengembangan telah dilakukan secara sistematis dan berbasis kebutuhan, sehingga menghasilkan produk yang sesuai dengan karakteristik materi dan peserta didik. Validitas tinggi mencerminkan kesesuaian antara tujuan pembelajaran, materi, dan evaluasi yang terintegrasi secara utuh dalam *e-module* (Ula et al., 2025).

Namun, nilai validitas yang sangat tinggi juga perlu dikritisi karena berpotensi menunjukkan adanya subjektivitas penilaian validator atau keterbatasan jumlah validator. Meskipun demikian, revisi yang dilakukan berdasarkan masukan ahli telah memperkuat kualitas produk. Hal ini menunjukkan bahwa proses validasi tidak hanya berfungsi sebagai penilaian, tetapi juga sebagai mekanisme perbaikan produk. Dengan demikian, *e-module* yang dikembangkan memiliki landasan yang kuat untuk dinyatakan layak dalam proses pembelajaran.

2. Kepraktisan *E-module* Berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) Berbantuan *Artificial Intelligence* (AI)

Kepraktisan *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI dinilai melalui tiga tahap uji coba, yaitu perorangan (*one to one trial*), kelompok kecil (*small group trial*), dan lapangan (*field trial*). Tahap penilaian dilakukan untuk mengukur kemudahan penggunaan dan tingkat pemahaman siswa terhadap *e-module*. Data dikumpulkan melalui angket respons siswa setelah menggunakan *e-module*, kemudian dianalisis untuk menghitung persentase kepraktisan.

Hasil uji coba perorangan menunjukkan persentase kepraktisan dengan rerata 97,12% dalam kategori sangat praktis. Uji coba kelompok kecil menunjukkan rerata 98,77% dan uji coba lapangan sebesar 94,01%, keduanya juga dalam kategori sangat praktis. Konsistensi hasil pada setiap tahap uji coba menunjukkan bahwa *e-module* memiliki tingkat kepraktisan tinggi dan layak digunakan dalam pembelajaran. Tingginya kepraktisan ini mencerminkan kemudahan akses, kejelasan navigasi, dan efisiensi penggunaan *e-module* dalam mendukung aktivitas belajar (Kuncahyo, 2018; Utama & Zulyusri, 2022).

Tingginya kepraktisan ini menunjukkan bahwa desain *e-module* telah mempertimbangkan aspek keterbacaan, navigasi, dan kemudahan akses secara optimal. Hal ini juga menunjukkan bahwa siswa dapat memahami instruksi dan alur pembelajaran tanpa mengalami kesulitan yang berarti. Kepraktisan yang tinggi menunjukkan bahwa media pembelajaran mampu menjembatani interaksi antara siswa dan materi secara efektif (Nisa *et al.*, 2020; Sari *et al.*, 2024). *E-module* interaktif meningkatkan kemudahan belajar dan kemandirian siswa. Meskipun demikian, kepraktisan yang tinggi tidak serta-merta menjamin efektivitas pembelajaran, sehingga perlu dianalisis lebih lanjut pada aspek hasil belajar. Dengan demikian, kepraktisan *e-module* menunjukkan potensi besar sebagai bahan ajar yang mudah diterapkan di kelas.

3. Keefektifan *E-module* Berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) Berbantuan *Artificial Intelligence* (AI) dalam

Memberdayakan Keterampilan Berpikir Kritis dan Keterampilan Kolaborasi

Keefektifan *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI dianalisis berdasarkan peningkatan keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa. Data dikumpulkan melalui soal esai keterampilan berpikir kritis, angket *self-assessment* dan *peer-assessment* untuk keterampilan kolaborasi, serta didukung oleh hasil observasi pembelajaran dan Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) pada setiap pertemuan. Hasil analisis keefektifan disajikan sebagai berikut.

1. Keterampilan Berpikir Kritis

Rerata nilai keterampilan berpikir kritis siswa meningkat dari 35,72 pada *pretest* menjadi 75,19 pada *posttest*. Peningkatan ini menunjukkan pergeseran dari kategori sangat rendah ke kategori sedang. Jika ditinjau pada setiap indikator, terjadi peningkatan pada seluruh aspek keterampilan berpikir kritis (Tabel 1). Peningkatan ini menunjukkan bahwa *e-module* mampu memfasilitasi siswa dalam mengembangkan keterampilan berpikir kritis melalui aktivitas model PjBL mendorong siswa untuk terlibat dalam proses investigasi dan pemecahan masalah, serta berbantuan AI yang tidak hanya sebagai alat bantu tetapi juga sebagai (*learning support system*) karena dirancang untuk memberikan umpan balik adaptif, memfasilitasi eksplorasi informasi yang terverifikasi secara mandiri, serta mengorganisasi ide dan solusi pada setiap tahapan PjBL.

Tabel 1. Selisih Peningkatan Keterampilan Berpikir Kritis untuk Setiap Indikator

Indikator	Rerata Nilai Pretest	Rerata Nilai Posttest	Selisih Peningkatan
Mengaplikasikan	30,56	76,74	48,18
Mengevaluasi	30,56	69,44	38,89
Menggunakan data untuk mengembangkan wawasan kritis	43,06	82,99	39,93
Menganalisis	44,91	74,54	74,54
Mensintesis	29,51	72,22	72,22
Rerata	35,72	75,19	39,47

Berdasarkan Tabel 1, rerata peningkatan keseluruhan indikator mencapai 39,47. Selain itu, hasil observasi selama enam pertemuan menunjukkan peningkatan nilai rerata keterampilan berpikir kritis di setiap siklus pembelajaran, yaitu siklus 1 sebesar 53,89, siklus 2 sebesar 70, dan siklus 3 sebesar 87,22. Peningkatan juga terjadi pada nilai rerata keterampilan berpikir kritis di LKPD, yaitu siklus 1 sebesar 64,67, siklus 2 sebesar 83, dan siklus 3 sebesar 97. Hasil perhitungan *N-gain* berdasarkan nilai *pretest* dan *posttest* disajikan pada (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil perhitungan *N-gain* keterampilan berpikir kritis

Hasil	<i>N-gain</i>	Kategori
Keterampilan Berpikir Kritis	0,61	Efektivitas Sedang

Berdasarkan Tabel 2, nilai rerata *N-gain* sebesar 0,61 termasuk kategori sedang, yang menunjukkan efektivitas *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa. Meskipun, kategori peningkatan yang masih berada pada tingkat sedang menunjukkan bahwa pengembangan keterampilan berpikir kritis memerlukan

waktu dan latihan yang berkelanjutan. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun *e-module* efektif, diperlukan integrasi yang lebih intensif dalam jangka panjang.

Hasil ini konsisten dengan penelitian Handayani & Wulandari (2023) yang menyatakan bahwa *e-module* terintegrasi pembelajaran berbasis proyek tervalidasi dan mendapat tingkat kepuasan tinggi dari siswa dan pendidik. Integrasi PjBL dengan teknologi AI juga membawa perubahan melalui sistem pengajaran cerdas dan chatbot yang memberikan bimbingan serta umpan balik secara *real-time* (Ahmad *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2020). Temuan ini diperkuat oleh penelitian Fadhilah & Thahir (2023) yang menunjukkan efektivitas *e-module* dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa.

2. Keterampilan Kolaborasi

Rerata nilai *self-assessment* meningkat dari 78,65 pada kondisi awal menjadi 97,99 pada kondisi akhir dengan kategori sangat tinggi. Peningkatan ini menunjukkan bahwa siswa mampu melakukan refleksi, menilai peran, serta memantau kontribusinya dalam proses pembelajaran. Selain itu, rerata nilai *peer-assessment* juga meningkat dari 69,64 menjadi 96,71 dengan kategori sangat tinggi. Secara keseluruhan, peningkatan kedua jenis penilaian ini menunjukkan perkembangan pada keterampilan kolaborasi siswa setelah penggunaan *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI.

Seluruh indikator mengalami kenaikan dari kondisi awal ke kondisi akhir (Tabel 3). Peningkatan ini menunjukkan bahwa *e-module* berbasis PjBL mampu menciptakan lingkungan belajar yang

mendorong interaksi dan kerja sama antar siswa karena menempatkan siswa dalam situasi kolaboratif yang menuntut komunikasi, koordinasi, dan tanggung jawab bersama. Integrasi AI juga berperan dalam mendukung kolaborasi melalui fasilitasi komunikasi digital dan pemantauan kontribusi anggota kelompok.

Tabel 3. Selisih peningkatan keterampilan kolaborasi untuk setiap indikator

Indikator	Rerata Nilai Pretest	Rerata Nilai Posttest	Selisih Peningkatan
<i>Self-Assessment</i>			
Bekerja secara produktif	75	97,22	22,22
Menunjukkan rasa hormat	85,28	98,89	13,61
Kompromi	79,31	98,61	19,31
Tanggung jawab bersama; Setiap orang berkontribusi	75	97,22	22,22
Rerata	78,65	97,99	19,34
<i>Peer-Assessment</i>			
Bekerja secara produktif	71,99	95,98	24
Menunjukkan rasa hormat	68,64	95,31	26,67
Kompromi	70,54	98,21	27,68
Tanggung jawab bersama; Setiap orang berkontribusi	67,41	97,32	29,91
Rerata	69,64	96,71	27,06

Berdasarkan Tabel 3, rerata selisih peningkatan keseluruhan indikator mencapai 19,34 pada *self-assessment* dan 27,06 pada *peer-assessment*. Selain itu, hasil observasi selama enam pertemuan menunjukkan peningkatan nilai rerata keterampilan kolaborasi pada setiap siklus pembelajaran, yaitu siklus 1 sebesar 50,75, siklus 2 sebesar 71,82, dan siklus 3 sebesar 93,00, menunjukkan perkembangan yang konsisten sesuai tahapan PjBL yang

diterapkan. Sejalan dengan hal itu, nilai rerata keterampilan kolaborasi pada LKPD juga mengalami peningkatan, yaitu siklus 1 sebesar 65,69, siklus 2 sebesar 80,56, dan siklus 3 sebesar 95,26. Adapun hasil perhitungan *N-gain* berdasarkan nilai *self-assessment* dan *peer-assessment* keterampilan kolaborasi disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil perhitungan *N-gain* keterampilan kolaborasi

Hasil	<i>N-gain</i>	Kategori
<i>Self-assessment</i> Keterampilan Kolaborasi	0,91	Efektivitas Tinggi
<i>Peer-assessment</i> Keterampilan Kolaborasi	0,89	Efektivitas Tinggi

Berdasarkan Tabel 2, nilai rerata *N-gain* sebesar 0,91 pada *self-assessment* dan 0,89 pada *peer-assessment* termasuk kategori efektivitas tinggi. Hal ini menunjukkan *e-module* berbasis PjBL berbantuan AI efektif meningkatkan keterampilan kolaborasi siswa. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hany & Syafriani, (2024) yang menyatakan bahwa *e-module* berbasis proyek mendorong siswa lebih aktif mengeksplorasi dan memecahkan permasalahan di lingkungan sekitar. Integrasi PjBL dengan teknologi AI melalui sistem pengajaran cerdas dan chatbot yang memberikan umpan balik secara *real-time* juga memperkuat efektivitas pembelajaran (Ahmad *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2020).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan yang telah dilaksanakan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. *E-module* berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) berbantuan *Artificial*

Intelligence (AI) memenuhi kriteria valid setelah melalui proses validasi oleh ahli dan direvisi sesuai dengan saran yang diberikan..

2. *E-module* berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) berbantuan *Artificial Intelligence* (AI) memenuhi kriteria praktis untuk digunakan dalam pembelajaran, sebagaimana yang ditunjukkan oleh respon positif dari pengguna.

E-module berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) berbantuan *Artificial Intelligence* (AI) memenuhi kriteria efektif dalam memberdayakan keterampilan berpikir kritis dan keterampilan kolaborasi siswa, yang ditunjukkan oleh adanya peningkatan pada kedua keterampilan tersebut, sehingga produk yang dikembangkan dapat digunakan sebagai alternative bahan ajar digital yang mendukung pembelajaran Biologi, khususnya pada konteks implementasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S. F., Rahmat, M. K., Mubarik, M. S., Alam, M. M., & Hyder, S. I. (2021). Artificial Intelligence and Its Role in Education. *Sustainability*, 13(22), 12902. <https://doi.org/10.3390/su132212902>
- Anggraini, W., Komikesari, H., Pratiwi, M., & Ningtias, P. A. (2024). Development Of An E-Module Based On The Self-Organized Learning Environment (SOLE) Model Assisted By Artificial Intelligence (AI) On Kinematics Material. *ORBITA: Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*, 10(2), 173. <https://doi.org/10.31764/orbita.v10i2.26992>
- Azzarkasyi, M., Rizal, S., & Kasmawati, K. (2019). Asian Journal of Science Education. *Asian Journal of Science Education*, 3(1), 81–89.
- Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial Intelligence in Education: A Review. *IEEE Access*, 8, 75264–75278. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510>
- Dinger, B., Byun, S.-E., & Park, J. (2024). Integrating AI Into Curricula: Project-Based Learning In Digital Entrepreneurship. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17543266.2024.2438170>
- Fadhilah, N., & Thahir, R. (2023). Development of Electronic Module with Project based Learning. *BIOEDUSCIENCE*, 7(3), 350–357. <https://doi.org/10.22236/ibes/11817>
- Ghory, S., & Ghafory, H. (2021). The Impact of Modern Technology in The Teaching and Learning Process. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 4(3), 168–173. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v4i3.73>
- Handayani, W., & Wulandari, S. S. (2023). Developing E-Modules for Correspondence Subject based on Project-Based Learning. *Journal of Office Administration : Education and Practice*, 3(3), 152–162. <https://doi.org/10.26740/joaep.v3n3.p152-162>
- Hany, N. C., & Syafriani, D. (2024). Development of A Chemistry E-Module Based on Project Based Learning Using the Flipbook Application to Improve Learning Outcomes and Train Collaboration on Acid Base Material. *Jurnal Teknologi Pendidikan : Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pembelajaran*, 9(2), 168. <https://doi.org/10.33394/jtp.v9i2.10949>

- Hasiana, I. (2025). Kemampuan Berpikir Kritis Pada Anak Usia Dini. *Jurnal Pelita PAUD*, 9(2), 583–590. <https://doi.org/10.33222/pelitapaud.v9i2.4844>
- Istiawati, N. F., Sinaga, R. M., & Pujiati, P. (2025). Pelatihan Penyusunan Modul Pembelajaran Berbasis Liveworksheets Bagi Guru Sma/ Smk/ Sederajat Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Altifani Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(6), 1172–1179. <https://doi.org/10.59395/altifani.v5i6.939>
- JannathlFirdouse, & Kasim, M. (2024). A Review on Technological Innovations in Education. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(6). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i06.34022>
- Kuncahyo. (2018). Pengembangan E-Module (Modul Digital) dalam Pembelajaran Tematik di Sekolah Dasar. *JMIE: Journal of Madrasah Ibtidaiyah Education*, 2(2), 219–231.
- Mukul, E., & Büyüközkan, G. (2023). Digital Transformation in Education: A Systematic Review of Education 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122664. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664>
- Nisa, W. L., Ismet, I., & Andriani, N. (2020). Development of E-Modules Based on Multi-representations in Solid-State Physics Introductory Subject. *Berkala Ilmiah Pendidikan Fisika*, 8(2), 73. <https://doi.org/10.20527/bipf.v8i1.7690>
- OECD. (2023). Results Factsheets Indonesia PISA. *The Language of Science Education*, 1, 1–9. <https://oecdch.art/a40de1dbaf/C108>.
- Putri, M. R., Rienovita, E., & Hidayani, R. (2025). Kemandirian Belajar Dengan Menggunakan Model Project Based Learning Teknologi Pendidikan , *Universitas Pendidikan Indonesia*. 13.
- Putri, R. K., Bukit, N., & Simanjuntak, M. P. (2022). The Effect of Project Based Learning Model's on Critical Thinking Skills, Creative Thinking Skills, Collaboration Skills, & Communication Skills (4C) Physics in Senior High School. *Proceedings of the 6th Annual International Seminar on Transformative Education and Educational Leadership (AISTEEL 2021)*, 591(Aisteel), 323–330. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.211110.103>
- Sako, T. (2024). Enhancing Critical Thinking through AI-Assisted Collaborative Task-Based Learning: A Case Study of Prospective Teachers in Japan. *Journal of English Language Teaching and Linguistics*, 9(2), 157. <https://doi.org/10.21462/jeltl.v9i2.1319>
- Sari, M. T., Hartono, H., & Sumarni, S. (2024). Empowering Environmental Consciousness: Creating High School E-Modules for Sustainable Change. *AL-ISHLAH: Jurnal Pendidikan*, 16(1), 87–97. <https://doi.org/10.35445/alishlah.v16i1.4018>
- Sidiq, R., & Najuah. (2020). Pengembangan E-Modul Interaktif Berbasis Android pada Mata Kuliah Strategi Belajar Mengajar. *Jurnal Pendidikan Sejarah*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.21009/JPS.091.01>
- Sireci, S., & Benítez, I. (2023). Evidence for Test Validation: A Guide for Practitioners. *Psicothema*, 35(3), 217–226. <https://doi.org/10.7334/psicothema2022.477>
- Siregar, N. S., Julianto, A., & Ismunandar, A. (2022). Dampak Perubahan Kurikulum terhadap Buku Paket Bahasa Indonesia sebagai Kebijakan Pendidikan. *Jurnal Pendidikan Islam Al-Affan*, 3(1), 1–11.

- <https://doi.org/10.69775/jpia.v3i1.89>
Siregar, N., & Syafriani, D. (2024). Development Of E-Modules Based On Project Based Learning (PjBL) To Increase Student's Interest In Learning And Learning Outcomes On Reaction Rate Material. *Jurnal Teknologi Pendidikan: Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pembelajaran*, 9(2), 263. <https://doi.org/10.33394/jtp.v9i2.11156>
- Surindra, B., & Irmayanti, E. (2025). Development of Problem Solving-Based E-Module to Improve the Effectiveness of Learning in School. *International Journal of Research and Review*, 12(1), 389–395. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20250148>
- Ula, A., Setyono, P., Yamtinah, S., & Havyarimana, C. (2025). Validity of the Content of Science E-Module Based on Problem Based Learning Containing Ethnoscience to Improve Students' Critical Thinking Ability. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 13(1), 158–177. <https://doi.org/10.24815/jpsi.v13i1.41509>
- Utama, N., & Zulyusri. (2022). JBP : Jurnal Biologi dan Pembelajarannya Meta-Analisis Praktikalitas Penggunaan E-modul Oleh Guru Dan Peserta Didik Dalam Pembelajaran. *Meta-Analisis Praktikalitas Penggunaan E-Modul Oleh Guru Dan Peserta Didik Dalam Pembelajaran*, 9, 27–33. <https://ojs.unpkediri.ac.id/index.php/biologi>
- Utami, B. A., Siahaan, A., Amanda, A., Ruth, D., Saragih, C., & Harefa, M. S. (2024). Guru untuk Menghadapi Tantangan Global. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Terpadu*, 8(6), 69–74.
- Vega, A., Maharani, I. V. A., Putri, J. A., Hartono, M. R. A. M., & Navridya, R. U. (2025). Kesetaraan Akses Pendidikan: Analisis Pengimplementasian Nilai Pancasila Dalam Pemerataan Akses Pendidikan Di Indonesia. *Lentera Ilmu*, 1(2), 44–57. <https://doi.org/10.59971/li.v1i2.51>
- Viruel, S. R., Rivas, E. S., & Palmero, J. R. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Project-Based Learning: Teacher Perceptions and Pedagogical Implications. *Education Sciences*, 15(2), 150. <https://doi.org/10.3390/educsci15020150>
- Yusmar, F., & Fadilah, R. E. (2023). Analisis Rendahnya Literasi Sains Peserta Didik Indonesia: Hasil Pisa Dan Faktor Penyebab. *LENSA (Lentera Sains): Jurnal Pendidikan IPA*, 13(1), 11–19. <https://doi.org/10.24929/lensa.v13i1.283>