

<https://doi.org/10.54371/ainj.v7i1.1361>

Development of a STEM-Based E-Module Integrated with Environmental Projects to Stimulate Senior High School Students' Critical and Creative Thinking Skills

Pengembangan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan untuk Menstimulasi Keterampilan Berpikir Kritis dan Kreatif Siswa SMA

*Metia Vinliani¹, Jayanti Syahfitri², Kashardi³

^{1,2,3}Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Indonesia

Correspondence Email: metiavinliani03@gmail.com

Article History: Submission: 2026-03-03 || Accepted: 2026-05-12 || Published: 2026-06-10

Sejarah Artikel: Penyerahan: 2026-03-03 || Diterima: 2026-05-12 || Dipublikasi: 2026-06-10

Abstract

This study aimed to develop a *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM)-based e-module integrated with environmental projects on environmental pollution topics to stimulate senior high school students' critical and creative thinking skills, as well as to examine its validity and practicality. The study was motivated by the limited availability of digital learning materials integrating real environmental contexts, STEM activities, and project-based learning in Biology instruction. The research employed a *Research and Development* method using the ADDIE model, which consists of analysis, design, development, implementation, and evaluation stages. The participants involved 104 public senior high school students in Bengkulu City, including 36 students in the limited trial and 68 students in the large-scale trial. Data were collected through content expert validation sheets, media expert validation sheets, student response questionnaires, and teacher response questionnaires, and analyzed using descriptive quantitative and qualitative techniques. The findings indicated that the developed e-module achieved a very high validity level, with content validation of 92% and media validation of 98%. The practicality test also showed that the e-module was categorized as very practical based on students' and teachers' responses. These findings demonstrate that the developed e-module is feasible for supporting contextual Biology learning and fostering students' critical and creative thinking skills.

Keywords: *STEM E-module, Environmental project, Environmental pollution, Critical thinking, Creative thinking.*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan e-modul berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) terintegrasi proyek lingkungan pada materi pencemaran lingkungan untuk menstimulasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa SMA, serta menguji tingkat kevalidan dan kepraktisannya. Penelitian dilatarbelakangi oleh masih terbatasnya bahan ajar digital yang mengintegrasikan konteks lingkungan nyata, aktivitas STEM, dan pembelajaran berbasis proyek dalam pembelajaran Biologi. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* dengan model ADDIE yang meliputi tahap analisis, desain, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Subjek penelitian terdiri atas 104 siswa SMA Negeri di Kota Bengkulu, dengan 36 siswa pada uji coba terbatas dan 68 siswa pada uji coba luas. Data dikumpulkan melalui lembar validasi ahli konten, validasi ahli media, angket respons siswa, dan angket respons guru, kemudian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa e-modul yang dikembangkan berada pada kategori sangat valid dengan persentase validasi konten sebesar 92% dan validasi media sebesar 98%. Hasil uji kepraktisan juga menunjukkan kategori sangat praktis berdasarkan respons siswa dan guru. Temuan ini menunjukkan bahwa e-modul layak digunakan untuk mendukung pembelajaran Biologi yang kontekstual dan berorientasi pada pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa.

Kata kunci: *E-modul STEM, Proyek lingkungan, Pencemaran lingkungan, Berpikir kritis, Berpikir kreatif.*

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang berlangsung secara progresif telah membawa perubahan mendasar dalam berbagai aspek kehidupan manusia, mulai dari peradaban, budaya, bisnis, pemerintahan, hingga pendidikan (Sriyanti, 2021). Dalam konteks pendidikan sains, era Revolusi Industri 4.0 menuntut sistem pembelajaran yang mampu menyiapkan individu menghadapi kompleksitas tantangan masa depan (Yuliati & Saputra, 2019). Peserta didik tidak lagi cukup hanya menguasai pengetahuan faktual, tetapi harus memiliki kecakapan berpikir dan belajar yang adaptif. Integrasi global yang ditopang oleh kemajuan teknologi informasi dan komunikasi mendorong

lahirnya pendidikan digital sebagai pendekatan baru dalam proses pembelajaran. Pendidikan digital memanfaatkan berbagai media multimedia seperti smartphone, komputer, notebook, video, audio, dan visual untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran (Verdinandus & Taufik, 2019). Seiring perkembangan tersebut, transformasi digital telah mengubah wajah pendidikan menjadi lebih visual, interaktif, dan fleksibel (Melati et al., 2023). Bahan ajar digital kini memungkinkan personalisasi pembelajaran serta peningkatan keterlibatan peserta didik pada berbagai jenjang pendidikan (Khalid & Owusu-Boateng, 2024).

Dalam proses pembelajaran, bahan ajar memegang peranan strategis sebagai sumber belajar yang disusun secara sistematis berdasarkan prinsip-prinsip pembelajaran. Bahan ajar tidak hanya berfungsi menyampaikan materi, tetapi juga membantu peserta didik memecahkan permasalahan yang berkaitan dengan topik pembelajaran (Rabbani & Muftianti, 2020). Secara umum, bahan ajar terbagi menjadi bahan ajar cetak dan digital. Bahan ajar cetak merupakan perangkat materi yang memuat ide, fakta, konsep, prinsip, kaidah, teori, dan informasi lain untuk mencapai tujuan pembelajaran (Laila et al., 2019). Namun, perkembangan teknologi mendorong pergeseran menuju media digital yang memanfaatkan internet serta perangkat elektronik seperti ponsel, laptop, dan komputer untuk mendukung proses penyampaian informasi (Tasruddin, 2020). Pemanfaatan bahan ajar digital terbukti mampu meningkatkan kualitas pembelajaran karena dapat membantu peserta didik mengembangkan keterampilan proses sains dan kemampuan berpikir tingkat tinggi (Lawe et al., 2021).

Keunggulan bahan ajar digital terletak pada sifatnya yang praktis, tahan lama, mudah diakses, serta mampu menghadirkan fitur interaktif seperti tautan, simulasi, animasi, gambar, dan audio (Rindaryati, 2021; Sriwahyuni et al., 2019). Transformasi dari bahan ajar cetak menuju digital melahirkan inovasi berupa e-modul, yaitu bentuk elektronik dari modul pembelajaran yang dirancang sistematis untuk mendukung belajar mandiri. E-modul memiliki potensi besar dalam meningkatkan motivasi dan hasil belajar peserta didik (Idayanti, 2024). Secara konseptual, e-modul merupakan modul dalam format elektronik yang dapat memuat teks, gambar, video, dan animasi sehingga lebih menarik dan mudah dipahami (Laili, 2019). Selain itu, e-modul berfungsi sebagai alat bantu pendidik dalam menyampaikan materi secara lebih efektif (Sunaryo, 2020; Wulandari et al., 2023). Karakteristiknya yang fleksibel menjadikan e-modul mudah diakses kapan saja dan di mana saja oleh peserta didik (Seruni et al., 2019). Pengembangan e-modul saat ini juga semakin inovatif dengan memanfaatkan aplikasi seperti Canva dan Flipbook sehingga menghasilkan buku digital interaktif yang user-friendly (Ismail, 2024).

Pengembangan e-modul akan lebih optimal apabila diintegrasikan dengan pendekatan pembelajaran yang relevan dengan tuntutan abad ke-21, salah satunya pendekatan STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics). Pembelajaran berbasis STEM mengarahkan peserta didik untuk memecahkan masalah nyata melalui proses ilmiah dan rekayasa, sehingga mampu menumbuhkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi STEM dalam e-modul efektif dalam melatih kemampuan pemecahan masalah dan penalaran siswa (Adipan & Asrizal, 2024). Selain itu, implementasi STEM dalam kurikulum terbukti meningkatkan capaian akademik maupun nonakademik peserta didik (Le et al., 2022). Lingkungan belajar yang fleksibel dan berbasis digital juga mendukung kemandirian belajar siswa dalam mata pelajaran STEM (Ilmi et al., 2023).

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa penggunaan modul digital interaktif mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik secara signifikan pada seluruh indikator yang diukur (Fina, N. 2025). Modul yang dirancang dengan tampilan menarik, dilengkapi gambar, video, dan kuis interaktif terbukti dapat menstimulasi motivasi, rasa ingin tahu, serta kemampuan analisis dan evaluasi siswa dalam proses pembelajaran (Pradarta, I. 2025). Hal ini menegaskan bahwa inovasi bahan ajar digital memiliki potensi kuat untuk mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi apabila dirancang secara kontekstual dan interaktif (Syahfitri, 2024).

Secara teoretis, pendekatan STEM merupakan strategi pembelajaran yang sangat relevan untuk mengembangkan keterampilan abad ke-21 (Siddiq & Asrizal, 2023). Pendekatan ini mengintegrasikan sains, teknologi, rekayasa, dan matematika dalam konteks pemecahan masalah nyata. Sejak diperkenalkan oleh National Science Foundation pada 1990-an, STEM telah menjadi

fokus dalam upaya peningkatan kualitas pendidikan (Putra et al., 2024). Penerapan STEM dalam pembelajaran sains mampu mendorong berkembangnya keterampilan berpikir tingkat tinggi yang sangat dibutuhkan di dunia kerja modern (Muttaqiin, 2023). Bahkan, integrasi STEM dalam kurikulum terbukti efektif meningkatkan kemampuan berpikir kritis melalui aktivitas analisis, evaluasi, dan pengambilan keputusan berbasis bukti (Abdullah, 2025).

Keterampilan berpikir kritis sendiri merupakan kompetensi esensial dalam pendidikan modern. Kemampuan ini mencakup aktivitas memecahkan masalah, membuat keputusan, menganalisis argumen, serta mengevaluasi informasi (Davidi et al., 2021). Individu yang memiliki kemampuan berpikir kritis mampu memahami situasi secara komprehensif dan mempertimbangkan berbagai perspektif sebelum menarik kesimpulan (Apriyanti et al., 2024). Mereka juga lebih terampil membedakan fakta dan opini serta menyusun argumentasi yang logis (Susanti et al., 2022). Temuan penelitian lain juga menunjukkan bahwa penerapan model pembelajaran inovatif berbantuan media mampu memberikan perbedaan signifikan terhadap kemampuan berpikir kritis siswa, yang mengindikasikan pentingnya pemilihan strategi dan media pembelajaran yang tepat dalam proses belajar (Herlina et al., 2020). Namun demikian, tuntutan era inovasi tidak hanya memerlukan berpikir kritis, tetapi juga berpikir kreatif. Berpikir kreatif berkaitan dengan kemampuan menghasilkan ide baru, melihat permasalahan dari sudut pandang berbeda, dan menemukan solusi.

Berpikir kreatif merupakan kemampuan kognitif kompleks yang memungkinkan individu mengombinasikan pengetahuan lama dengan informasi baru. Keterampilan ini perlu dilatih sejak dini melalui pengalaman belajar yang bermakna (Kwangmuang et al., 2021). Peserta didik yang kreatif cenderung lebih adaptif dan mampu menyelesaikan masalah nyata secara efektif (Sahrul et al., 2022). Pengembangan kreativitas juga membuka peluang munculnya potensi minat dan bakat peserta didik (Lassig, 2021). Oleh karena itu, pendidik perlu merancang pembelajaran inovatif yang mampu menstimulasi berpikir kreatif sekaligus kritis. Meskipun urgensi integrasi STEM dalam e-modul sangat tinggi, fakta di lapangan menunjukkan masih terdapat berbagai kendala. Banyak guru belum memiliki kompetensi memadai dalam merancang perangkat pembelajaran STEM secara holistik (Sugianto et al., 2023). Kesulitan memahami keterkaitan antara sains, teknologi, rekayasa, dan matematika juga menjadi hambatan implementasi (Tobing & Sulastri, 2024). Selain itu, keterbatasan bahan ajar yang sesuai dengan kurikulum serta minimnya pelatihan berkelanjutan bagi guru turut menghambat pengembangan keterampilan berpikir kritis melalui STEM (Chania et al., 2020).

Hasil survei dan observasi di beberapa SMA di Kota Bengkulu, yaitu SMA Negeri 7, SMA Negeri 2, dan SMA Negeri 4, menunjukkan bahwa penggunaan bahan ajar di sekolah masih banyak didominasi oleh buku cetak dan LKS yang cenderung menyajikan materi secara informatif, linear, dan kurang mengintegrasikan konteks dunia nyata. Bahan ajar semacam ini sering kali belum memberi ruang yang cukup bagi peserta didik untuk menghubungkan konsep Biologi dengan persoalan lingkungan yang mereka temui dalam kehidupan sehari-hari. Akibatnya, peserta didik dapat memahami definisi atau konsep dasar, tetapi belum optimal dalam menganalisis kasus nyata, mengembangkan solusi, serta mengemukakan gagasan kreatif berdasarkan data dan bukti ilmiah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bahan ajar tradisional perlu diperkuat dengan pendekatan yang lebih kontekstual, interdisipliner, dan berorientasi pada pemecahan masalah. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara tuntutan pembelajaran abad ke-21 dengan praktik pembelajaran di lapangan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan e-modul Biologi berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan pada materi pencemaran lingkungan dengan proyek eco-enzyme. Penelitian dibatasi pada peserta didik di tiga SMA Kota Bengkulu dan berfokus pada tahap pengembangan untuk menghasilkan e-modul berbasis flipbook yang valid dan praktis. Rumusan masalah penelitian meliputi proses dan hasil pengembangan e-modul, tingkat kevalidan, serta tingkat kepraktisan produk yang dikembangkan. Sejalan dengan itu, tujuan penelitian ini adalah menghasilkan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang memenuhi kriteria valid dan praktis sehingga layak digunakan dalam pembelajaran Biologi SMA.

II. METODE

Penelitian ini menggabungkan metode kualitatif dan kuantitatif (Sugiyono, 2019) dengan menggunakan desain penelitian pengembangan (*Research and Development*), model pengembangan

ADDIE (*Analyze, Design, Development, Implementation, Evaluation*) (Suharsaputra, 2023). Penelitian yang dilakukan menghasilkan produk yaitu bahan ajar berupa E-Modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan pada materi pencemaran lingkungan. Penelitian akan dilaksanakan di sekolah Menengah Atas Negeri kota Bengkulu tahun ajaran 2025/2026. Waktu penelitian pada bulan Januari-Februari. Subjek penelitian melibatkan tiga SMA Negeri di Kota Bengkulu dengan total 104 siswa. Sebanyak 36 siswa dari satu kelas di SMA Negeri 2 digunakan pada uji coba I, sedangkan 68 siswa dari SMA Negeri 7 dan SMA Negeri 4 digunakan pada uji coba II. Adapun objek penelitian mencakup e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang dikembangkan, serta keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa sebagai outcome penggunaan e-modul.

Penelitian ini menggunakan model ADDIE sebagai kerangka sistematis dalam pengembangan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan pada materi pencemaran lingkungan. Tahap analisis (*analysis*) dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan melalui angket guru, analisis karakteristik peserta didik, kondisi pembelajaran, serta penetapan tujuan pengembangan. Tahap desain (*design*) berfokus pada penyusunan kerangka e-modul, sistematika materi, storyboard, serta penyusunan instrumen validasi dan angket. Struktur e-modul meliputi bagian pendahuluan, materi berbasis proyek, latihan, rangkuman, dan komponen pendukung pembelajaran berbasis proyek.

Tahap pengembangan (*develop*) mencakup validasi dan uji kepraktisan. Validasi dilakukan oleh ahli konten dan ahli media untuk menilai kelayakan materi, tampilan, dan integrasi STEM. Setelah revisi, dilakukan uji kepraktisan melalui uji coba I pada 36 siswa SMA Negeri 2 Kota Bengkulu dan uji coba II pada 68 siswa di SMA Negeri 4 dan SMA Negeri 7 Kota Bengkulu. Data dianalisis secara deskriptif untuk menentukan tingkat kepraktisan produk. Penelitian ini dibatasi sampai tahap pengembangan, sedangkan implementasi tidak dilakukan. Evaluasi internal digunakan sebagai umpan balik perbaikan produk, sementara evaluasi eksternal dirancang untuk menilai peningkatan kemampuan berpikir kritis dan kreatif melalui perbandingan pretest dan posttest. Produk akhir berupa e-modul yang dinyatakan valid dan praktis untuk pembelajaran Biologi.

Data penelitian terdiri atas data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif meliputi hasil validasi e-modul serta respons pendidik dan peserta didik setelah penggunaan produk. Data kuantitatif berupa skor kemampuan berpikir kritis dan kreatif siswa. Secara rinci, data validasi mencakup validasi isi materi pencemaran lingkungan yang disusun sesuai kompetensi dan tujuan pembelajaran menggunakan skala Likert, validasi konstruk media yang menilai tampilan, suara, kemenarikan, dan kemudahan penggunaan, serta validasi bahasa yang menelaah ketepatan penggunaan bahasa, kalimat, ukuran teks, kata baku, dan tanda baca. Adapun data respons diperoleh melalui angket skala Likert yang diisi peserta didik setelah pembelajaran menggunakan e-modul serta oleh guru Biologi di tiga SMA Kota Bengkulu. Instrumen penelitian yang digunakan pada penelitian ini berupa lembar validasi ahli konten, validasi ahli media dan angket respon peserta didik terhadap E-Modul. penelitian ini dilakukan dua tahapan analisis data, tahap pertama menggunakan metode kualitatif dan tahap kedua menggunakan metode kuantitatif. Analisis data yang dilakukan antara lain:

1. Analisis Uji Kevalidan E-Modul

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik E-Modul yang valid. Validitas E-Modul diukur menggunakan pernyataan pada lembar validitas yang bagikan pada validator. Hasil dari angket validitas dihitung untuk mengetahui persentasenya. Perhitungan persentase menggunakan rumus berikut:

$$P = \frac{\sum (\text{Skor} \times f)}{\text{skor tertinggi}} \times 100\%$$

Keterangan:

P = Jumlah persentase;

f = Frekuensi validator

Hasil persentase yang didapatkan kemudian diinterpretasikan berdasarkan tabel berikut (Riduwan, 2010).

Tabel.1 Kategori Kevalidan E-Modul

Skor	Tingkat Pencapaian (%)	Keterangan
5	80-100	Sangat Valid
4	61-80	Valid
3	41-60	Cukup Valid
2	21-40	Kurang Valid
1	0-20	Tidak Valid

Tabel 1 menunjukkan kategori kevalidan e-modul berdasarkan rentang persentase pencapaian skor validasi. Kategori tersebut digunakan sebagai dasar untuk menafsirkan hasil penilaian dari validator ahli terhadap kelayakan produk yang dikembangkan. Berdasarkan tabel tersebut, persentase 80–100% termasuk dalam kategori sangat valid, 61–80% termasuk valid, 41–60% termasuk cukup valid, 21–40% termasuk kurang valid, dan 0–20% termasuk tidak valid. Dengan adanya kriteria ini, hasil validasi e-modul dapat ditafsirkan secara lebih objektif dan terukur, sehingga peneliti dapat menentukan apakah produk layak digunakan, perlu direvisi sebagian, atau perlu diperbaiki secara menyeluruh. Dalam penelitian ini, kriteria pada Tabel 1 menjadi acuan utama untuk menilai hasil validasi ahli konten dan ahli media sebelum e-modul diujicobakan kepada guru dan peserta didik.

2. Analisis Uji Kepraktisan E-Modul

Analisis dilakukan untuk menggambarkan data hasil penulis mengenai kepraktisan modul elektronik dengan Lembar praktis berupa lembar angket respon siswa. Data hasil tanggapan siswa dan pendidik melalui angket yang terkumpul, kemudian ditabulasi. Hasil tabulasi dicari persentasenya, dengan rumus:

$$P = \frac{\sum \text{ skor per item}}{\text{ skor maks}} \times 100\%$$

Keterangan :

P= Persentase skor yang dicari (hasil dibulatkan hingga mencapai bilangan bulat)

ΣR= Jumlah jawaban yang diberikan oleh validator/ pilihan yang terpilih

N = Jumlah skor maksimal atau ideal

Dengan kategori praktis modul, sebagai berikut (Riduwan & Sunarto, 2013):

Tabel.2 Kategori Kepraktisan E-modul

Koefisien Validitas	Keterangan
0-48	Sangat Tidak Praktis
49-61	Tidak Praktis
62-74	Cukup Praktis
75-87	Praktis
88-100	Sangat Praktis

Tabel 2 menunjukkan kategori kepraktisan e-modul berdasarkan rentang persentase skor yang diperoleh dari angket respons pengguna, baik peserta didik maupun guru. Kategori ini digunakan untuk menafsirkan sejauh mana e-modul mudah digunakan, menarik, jelas, dan sesuai dengan kebutuhan pembelajaran di kelas. Berdasarkan tabel tersebut, persentase 88–100% termasuk dalam kategori sangat praktis, 75–87% termasuk praktis, 62–74% termasuk cukup praktis, 49–61%

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Hasil penelitian disusun berdasarkan lima tahapan pengembangan ADDIE: analisis, desain, pengembangan, implementasi, dan evaluasi, yang saling terkait membentuk proses pengembangan E-Modul berbasis Eco-STEM terintegrasi projek lingkungan.

1. Tahap Analisis

Tahap ini mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran, karakteristik peserta didik, serta kesesuaian kurikulum. Hasil analisis menunjukkan pembelajaran pencemaran lingkungan masih berfokus pada teori dengan metode ceramah, penggunaan media digital terbatas, dan integrasi STEM belum optimal. Peserta didik mampu memahami konsep dasar, tetapi kesulitan dalam menganalisis kasus nyata dan merancang solusi. Guru menekankan perlunya bahan ajar digital yang sistematis, interaktif, dan kontekstual. Karakteristik peserta didik SMA menunjukkan minat tinggi pada proyek dan media digital, namun kemampuan regulasi diri dan integrasi konsep lintas disiplin masih perlu bimbingan. Materi pencemaran lingkungan dipilih karena relevan dengan kehidupan sehari-hari dan memungkinkan penerapan pendekatan STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) dalam proyek nyata.

Tabel 3. Capaian Pembelajaran (CP) Biologi Materi Pencemaran Lingkungan Fase F (SMA)

Elemen CP Biologi	Capaian Pembelajaran
Pemahaman Konsep	Peserta didik mampu menjelaskan konsep pencemaran lingkungan, jenis-jenis pencemaran (air, udara, tanah), sumber penyebab, serta dampaknya terhadap makhluk hidup dan ekosistem.
Keterampilan Proses Sains	Peserta didik mampu mengidentifikasi masalah lingkungan di sekitar, mengumpulkan dan menganalisis data sederhana, serta menyajikan hasil analisis secara sistematis.
Penalaran Ilmiah	Peserta didik mampu menganalisis hubungan sebab-akibat dalam kasus pencemaran lingkungan serta merumuskan alternatif solusi berbasis data.
Keterampilan Rekayasa (<i>Engineering</i>)	Peserta didik mampu merancang solusi atau produk sederhana sebagai upaya penanggulangan pencemaran lingkungan melalui pendekatan proyek.
Literasi Kuantitatif	Peserta didik mampu menginterpretasikan data numerik terkait tingkat pencemaran dan melakukan perhitungan sederhana yang relevan.
Sikap Ilmiah dan Kepedulian Lingkungan	Peserta didik menunjukkan tanggung jawab, kepedulian, dan partisipasi aktif dalam menjaga kelestarian lingkungan.
Berpikir Kritis dan Kreatif	Peserta didik mampu mengemukakan gagasan inovatif dan solusi alternatif terhadap permasalahan pencemaran lingkungan.

Sumber: Diadaptasi dari Capaian Pembelajaran Biologi Fase F Kurikulum Merdeka.

2. Tahap Desain

Desain modul menerjemahkan temuan analisis menjadi rancangan E-Modul berbasis Eco-STEM yang sistematis, terstruktur, dan kontekstual. Tujuan pembelajaran mencakup: analisis pencemaran, interpretasi data lingkungan, perancangan solusi sederhana, penerapan matematika dan sains, serta penguatan sikap peduli lingkungan. Struktur modul mencakup: sampul, kata pengantar, peta konsep, kegiatan sains, teknologi dan rekayasa, matematika, lembar aktivitas dan diskusi, refleksi, evaluasi akhir, dan daftar pustaka. Aktivitas modul mengikuti alur Eco-STEM: identifikasi masalah, eksplorasi konsep, perancangan solusi, penerapan teknologi/matematika, dan refleksi hasil. Desain visual menekankan keterbacaan, estetika, serta integrasi ikon STEM, sedangkan instrumen penilaian mencakup validasi ahli, angket kepraktisan, dan evaluasi hasil belajar berbasis pilihan ganda, uraian, dan proyek.

Tabel 4. *Storyboard* E-Modul Berbasis Eco-STEM pada Materi Pencemaran Lingkungan

No	Komponen E-Modul	Keterangan
1	Halaman Sampul E-Modul	1) Judul E-Modul berbasis Eco-STEM 2) Mata pelajaran Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) 3) Materi Pencemaran Lingkungan 4) Kelas dan jenjang Pendidikan

		5) Ilustrasi lingkungan tercemar (air, udara, tanah)
2	Kata Pengantar dan Identitas Modul	1) Uraian singkat tujuan pengembangan modul 2) Kompetensi inti dan kompetensi dasar 3) Indikator dan tujuan pembelajaran 4) Profil pelajar dan pendekatan Eco-STEM
3	Penyajian Permasalahan Kontekstual	1) Narasi kasus pencemaran di lingkungan sekitar 2) Ilustrasi/gambar pendukung 3) Pertanyaan pemantik analisis penyebab dan dampak
4	Kegiatan <i>Science</i> (Sains)	1) Identifikasi jenis dan karakteristik pencemaran 2) Analisis zat pencemar dan dampaknya 3) Eksperimen sederhana (misalnya penyaringan air) 4) Pengamatan dan pencatatan data
5	Kegiatan <i>Technology</i> dan <i>Engineering</i>	1) Perancangan solusi sederhana (alat penyaring/pengelolaan sampah) 2) Langkah perencanaan dan pemilihan bahan 3) Proses pembuatan dan uji coba 4) Evaluasi hasil proyek
6	Kegiatan <i>Mathematics</i>	1) Penyajian data dalam table 2) Pembuatan grafik sederhana 3) Perhitungan persentase tingkat pencemaran 4) Analisis data secara kuantitatif
7	Lembar Aktivitas dan Diskusi	1) Tugas analisis dampak pencemaran 2) Diskusi solusi berbasis Eco-STEM 3) Ruang jawaban terstruktur
8	Refleksi Pembelajaran	1) Pertanyaan reflektif pemahaman konsep 2) Evaluasi sikap peduli lingkungan 3) Rencana aksi sederhana menjaga lingkungan
9	Evaluasi Akhir	1) Soal pilihan ganda 2) Soal uraian berbasis studi kasus 3) Penilaian proyek dan keterampilan proses
10	Daftar Pustaka	1. Referensi materi pencemaran lingkungan 2. Sumber teori dan pendekatan Eco-STEM terbaru

3. Tahap Pengembangan (*Develop*)

Tahap ini bertujuan merealisasikan desain E-Modul berbasis Eco-STEM menjadi produk digital interaktif yang siap diuji. Pengembangan meliputi validasi ahli konten dan media untuk memastikan kelayakan materi, tampilan, dan keterpaduan STEM dengan projek lingkungan. Hasil validasi digunakan untuk revisi sebelum uji coba terbatas dan lanjutan.

a. Uji Validitas

1. Validasi Konten

- a) Validator I menilai konten E-Modul 88% (Sangat Valid), namun menyarankan penambahan kisi-kisi soal.
- b) Revisi dilakukan, termasuk penambahan indikator berpikir kritis dan kreatif.
- c) Validator II menilai setelah revisi 96% (Sangat Valid).
- d) Rata-rata validasi konten dari dua ahli: 92% (Sangat Valid).
- e) Kesimpulan: materi sesuai CP, kontekstual, dan mendukung pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Validasi Konten oleh Dua Ahli

Validator	Skor	Persentase	Kategori
Validator I	66/75	88%	Sangat Valid
Validator II	72/75	96%	Sangat Valid
Total	138/150	92%	Sangat Valid

2. Validasi Media

- a) Validator I menilai 95% (Sangat Valid), menyarankan penambahan video pembelajaran.
- b) Validator II menilai 100% (Sangat Valid), QR code kini bisa diklik langsung.
- c) Validator III menilai 98% (Sangat Valid), menambahkan pengisian jawaban digital.
- d) Rata-rata validasi media: 98% (Sangat Valid).
- e) Kesimpulan: media interaktif, sistematis, dan siap digunakan untuk pembelajaran.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Validasi Media

Validator	Skor	Persentase	Kategori
Validator I	57/60	95%	Sangat Valid
Validator II	60/60	100%	Sangat Valid
Validator III	59/60	98%	Sangat Valid
Total	176/180	98%	Sangat Valid

b. Uji Kepraktisan

1. Respon Peserta Didik

- a) Uji coba terbatas (36 siswa): 97% (Sangat Praktis).
- b) Uji lanjutan (104 siswa): 93% (Sangat Praktis).
- c) Kesimpulan: e-modul mudah digunakan, menarik, mendukung proyek, dan mendorong keterlibatan aktif.

2. Respon Guru

- a) Uji coba terbatas (2 guru): 96% (Sangat Praktis).
- b) Uji lanjutan (4 guru): 97% (Sangat Praktis).
- c) Kesimpulan: e-modul mudah diimplementasikan, relevan, dan mendukung pembelajaran berbasis proyek serta pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif.

Secara keseluruhan, E-Modul berbasis Eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan dinyatakan sangat valid, praktis, dan siap digunakan untuk pembelajaran di SMA.

4. Tahap Evaluasi

Tahap evaluasi merupakan fase akhir dalam penelitian pengembangan yang berfungsi untuk memverifikasi kualitas, kelayakan, dan efektivitas e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan. Evaluasi dilakukan secara komprehensif untuk menilai kevalidan, kepraktisan, dan keterlaksanaan penggunaan produk, sekaligus sebagai proses reflektif untuk memastikan relevansi serta kebermanfaatan praktis di lapangan. Aspek kevalidan diperoleh melalui validasi ahli konten dan media, yang menunjukkan bahwa e-modul termasuk kategori sangat valid, baik dari segi kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, integrasi pendekatan STEM, maupun tampilan dan sistematika penyajian. Aspek kepraktisan diukur melalui angket respons guru dan peserta didik setelah penggunaan e-modul, dengan hasil menunjukkan kategori sangat praktis; produk mudah digunakan, sistematis, menarik, dan efektif mendukung pembelajaran berbasis proyek.

Keterlaksanaan dan efektivitas ditinjau melalui observasi proses pembelajaran dan analisis hasil belajar, yang memperlihatkan bahwa pembelajaran menjadi lebih terstruktur, kontekstual, dan partisipatif. Peserta didik terlibat aktif dalam kegiatan investigatif, diskusi analitis, serta penyelesaian proyek lingkungan yang mengintegrasikan sains, teknologi, rekayasa, dan matematika. Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk menilai keunggulan, efektivitas, serta aspek yang perlu penyempurnaan, sementara saran dari validator dan pengguna digunakan sebagai dasar revisi akhir. Secara keseluruhan, evaluasi menunjukkan bahwa e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan sangat valid, sangat praktis, dan efektif dalam mendukung penguatan keterampilan berpikir kritis, kreatif, kolaboratif, dan komunikatif peserta didik. Dengan demikian, produk ini layak direkomendasikan sebagai bahan ajar inovatif di tingkat SMA, memiliki relevansi teoritis

dalam pembelajaran berbasis STEM, serta relevansi praktis dalam menjawab tantangan pembelajaran abad ke-21 yang berorientasi pada pemecahan masalah lingkungan secara berkelanjutan.

B. Pembahasan

Pengembangan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan dilakukan sebagai respons terhadap kebutuhan pembelajaran Biologi yang lebih kontekstual, interaktif, dan berorientasi pada keterampilan abad ke-21. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan ajar yang digunakan sebelumnya masih didominasi oleh buku cetak dan LKS, sehingga belum sepenuhnya mampu mengarahkan peserta didik pada kegiatan analisis masalah nyata, pemecahan masalah, dan perancangan solusi lingkungan (Rindaryati, 2021). Kondisi ini sejalan dengan pandangan bahwa bahan ajar digital diperlukan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran karena mampu menghadirkan materi secara lebih fleksibel, visual, dan interaktif (Sriwahyuni et al., 2019). Dalam konteks ini, e-modul yang dikembangkan berperan sebagai media belajar sekaligus panduan aktivitas yang membantu peserta didik memahami konsep pencemaran lingkungan melalui pengalaman belajar berbasis proyek (Lawe et al., 2021). Temuan ini juga mendukung pendapat (Idayanti, 2024) dan (Wulandari et al. 2023) bahwa e-modul dapat menjadi media pembelajaran inovatif yang membantu peserta didik memahami materi secara lebih mandiri dan sistematis.

Integrasi STEM dalam e-modul menjadi unsur penting karena mampu menghubungkan konsep Biologi dengan teknologi, rekayasa, dan matematika. Pada aspek Science, peserta didik diarahkan memahami konsep pencemaran lingkungan, sumber pencemar, dampak pencemaran, dan hubungan antara aktivitas manusia dengan perubahan kualitas lingkungan. Pada aspek Technology, peserta didik diperkenalkan pada pemanfaatan media digital, tautan video, QR code, dan sumber belajar daring yang mendukung pemahaman materi. Pada aspek Engineering, peserta didik diarahkan merancang solusi sederhana terhadap masalah pencemaran, misalnya melalui proyek eco-enzyme atau rancangan pengelolaan limbah sederhana. Pada aspek Mathematics, peserta didik dilatih membaca data, membuat tabel, menafsirkan grafik, dan melakukan perhitungan sederhana terkait pencemaran lingkungan. Keterpaduan tersebut sesuai dengan karakteristik pembelajaran STEM yang menekankan integrasi sains, teknologi, rekayasa, dan matematika untuk menyelesaikan masalah nyata (Muttaqiin, 2023; Putra et al., 2024; Siddiq & Asrizal, 2023). Dengan demikian, e-modul berbasis STEM dapat memperkuat pembelajaran Biologi agar tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga aplikatif dan solutif.

Hasil validasi konten sebesar 92% menunjukkan bahwa e-modul termasuk kategori sangat valid. Hal ini berarti materi yang disajikan telah sesuai dengan capaian pembelajaran, tujuan pembelajaran, karakteristik peserta didik, serta kebutuhan pembelajaran Biologi SMA. Validasi konten juga menunjukkan bahwa e-modul telah memuat aktivitas yang relevan untuk menstimulasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Revisi yang dilakukan, seperti penambahan kisi-kisi soal dan penguatan indikator berpikir kritis serta kreatif, memperkuat kualitas e-modul sebagai bahan ajar yang tidak hanya menyajikan materi, tetapi juga mengarahkan proses berpikir peserta didik secara lebih sistematis. Proses validasi ini sejalan dengan prinsip pengembangan bahan ajar yang menekankan pentingnya kesesuaian isi, keakuratan konsep, kelayakan penyajian, dan relevansi dengan tujuan pembelajaran (Sugiyono, 2022; Suharsaputra, 2023). Temuan ini juga sejalan dengan Handayani, Kashardi, dan (Destania 2021), yang menegaskan bahwa perangkat pembelajaran yang memenuhi aspek kelayakan isi, kebahasaan, penyajian, dan kegrafikaan lebih mendukung proses pembelajaran yang bermakna.

Hasil validasi media sebesar 98% menunjukkan bahwa e-modul sangat valid dari aspek tampilan, keterbacaan, navigasi, interaktivitas, dan kemudahan penggunaan. Penambahan video pembelajaran, perbaikan QR code agar dapat diklik langsung, serta penyediaan ruang jawaban digital menunjukkan bahwa revisi berdasarkan masukan validator mampu meningkatkan kualitas teknis produk. Kualitas media digital menjadi aspek penting karena peserta didik tidak hanya membutuhkan materi yang benar, tetapi juga tampilan yang jelas, navigasi yang mudah, dan fitur yang membantu mereka berinteraksi dengan isi pembelajaran. Hal ini sesuai dengan pendapat (Seruni et al. 2019) bahwa e-modul yang baik perlu mudah diakses, fleksibel, dan

mendukung aktivitas belajar mandiri. Selain itu, (Ismail, 2024) menegaskan bahwa pengembangan e-modul berbasis aplikasi digital seperti Canva dan Flipbook dapat menghasilkan bahan ajar yang lebih menarik, interaktif, dan mudah digunakan dalam pembelajaran.

Kepraktisan e-modul juga memperoleh hasil sangat tinggi, yaitu 97% pada uji coba terbatas dan 93% pada uji coba luas berdasarkan respons peserta didik. Hasil ini menunjukkan bahwa e-modul mudah digunakan, menarik, dan dapat membantu peserta didik mengikuti aktivitas pembelajaran. Pada uji coba terbatas, peserta didik mampu memahami petunjuk penggunaan, membaca materi, mengakses tautan, dan mengikuti aktivitas proyek dengan baik. Pada uji coba luas, persentase tetap berada pada kategori sangat praktis, meskipun terdapat sedikit penurunan dari 97% menjadi 93%. Penurunan ini wajar karena uji coba luas melibatkan peserta didik yang lebih beragam dari dua sekolah berbeda, sehingga variasi kemampuan digital, kemandirian belajar, dan kesiapan mengikuti pembelajaran proyek menjadi lebih terlihat. Temuan ini sejalan dengan Junita dan (Kashardi 2021) yang menunjukkan bahwa bahan ajar inovatif dan berbasis pemecahan masalah dapat meningkatkan keterlibatan peserta didik dalam proses pembelajaran. Selain itu, (Ilmi et al. 2023) menjelaskan bahwa pembelajaran STEM berbasis proyek dapat mendukung kemandirian belajar peserta didik karena memberikan kesempatan untuk mengeksplorasi, mencoba, dan merefleksikan hasil belajar.

Respons guru yang mencapai 96% pada uji coba terbatas dan 97% pada uji coba luas menunjukkan bahwa e-modul dinilai praktis dari sisi pengguna di kelas. Guru menilai bahwa e-modul membantu menyusun pembelajaran yang lebih terarah, menyediakan aktivitas yang sistematis, dan memudahkan peserta didik memahami materi pencemaran lingkungan melalui konteks nyata. Guru juga dapat menggunakan e-modul sebagai panduan untuk mengarahkan diskusi, membagi tugas proyek, dan memfasilitasi refleksi pembelajaran. Hal ini mendukung pendapat (Sunaryo, 2020) bahwa e-modul dapat menjadi alat bantu pendidik dalam menyampaikan materi secara lebih efektif. Selain itu, pembelajaran digital yang dirancang secara sistematis dapat meningkatkan keterlibatan peserta didik dan membantu guru mengelola pembelajaran yang lebih fleksibel (Khalid & Owusu-Boateng, 2024); (Melati et al., 2023). Dengan demikian, e-modul yang dikembangkan tidak hanya layak dari sisi produk, tetapi juga dapat diterapkan secara praktis dalam pembelajaran Biologi di kelas.

Secara pedagogis, e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan mendukung pengembangan keterampilan berpikir kritis melalui beberapa aktivitas utama. Peserta didik diminta membaca kasus pencemaran, mengidentifikasi masalah, menganalisis penyebab, menafsirkan data, membandingkan alternatif solusi, dan menarik kesimpulan. Aktivitas tersebut berkaitan dengan indikator berpikir kritis seperti interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, penjelasan, dan refleksi diri. Dalam pembelajaran pencemaran lingkungan, keterampilan ini penting karena peserta didik perlu memahami masalah secara komprehensif sebelum menyusun solusi. Hal ini sejalan dengan (Facione 2023) yang menjelaskan bahwa berpikir kritis mencakup kemampuan interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, eksplanasi, dan regulasi diri. Temuan ini juga diperkuat oleh (Davidi et al. 2021), (Susanti et al. 2022), dan (Apriyanti et al. 2024), yang menekankan bahwa berpikir kritis diperlukan untuk memecahkan masalah, membuat keputusan, membedakan fakta dan opini, serta menyusun argumentasi logis.

Selain berpikir kritis, e-modul juga menstimulasi keterampilan berpikir kreatif. Hal ini terlihat dari aktivitas yang meminta peserta didik menghasilkan ide solusi, memilih bahan, merancang proyek, menampilkan hasil, dan merefleksikan kelebihan serta kekurangan rancangan mereka. Keterampilan kreatif tampak melalui kemampuan peserta didik menghasilkan beberapa alternatif solusi, menggunakan pendekatan berbeda, mengembangkan rancangan yang orisinal, dan menjelaskan ide secara rinci. Indikator tersebut sejalan dengan konsep berpikir kreatif yang mencakup fluency, flexibility, originality, dan elaboration dalam proses pemecahan masalah (Soeviatulfitri & Kashardi, 2020). Selain itu, (Kwangmuang et al. 2021), (Sahrul et al. 2022), dan (Lassig 2021) menjelaskan bahwa kreativitas dapat dikembangkan melalui pengalaman belajar yang bermakna, kontekstual, dan memberi ruang bagi peserta didik untuk menghasilkan gagasan baru. Oleh karena itu, proyek lingkungan dalam e-modul menjadi ruang belajar yang tepat untuk melatih kreativitas peserta didik secara nyata.

Temuan penelitian ini juga sejalan dengan prinsip pembelajaran berbasis proyek yang menempatkan peserta didik sebagai subjek aktif dalam proses belajar. Pembelajaran berbasis proyek mendorong peserta didik untuk terlibat dalam penyelidikan, kerja kelompok, pengambilan keputusan, perancangan produk, dan presentasi hasil. Integrasi proyek lingkungan dalam e-modul membuat peserta didik tidak hanya membaca materi, tetapi juga melakukan aktivitas yang menuntut penerapan konsep. Hal ini memperkuat keterkaitan antara pengetahuan konseptual dan keterampilan aplikatif. Penelitian Sugianto et al. (2023) menunjukkan bahwa pengembangan STEM berbasis proyek memerlukan perangkat pembelajaran yang mampu menghubungkan konsep dengan masalah nyata. Selain itu, Adipan dan Asrizal (2024) menjelaskan bahwa integrasi STEM dalam modul pembelajaran efektif dalam melatih kemampuan pemecahan masalah dan penalaran peserta didik. Dengan demikian, e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan dapat menjadi jembatan antara pembelajaran Biologi di kelas dan persoalan lingkungan yang nyata di sekitar peserta didik.

Hasil penelitian ini juga memperkuat temuan beberapa penelitian sebelumnya mengenai penggunaan e-modul dan bahan ajar digital dalam pembelajaran sains. (Syahfitri, 2024) menunjukkan bahwa modul digital interaktif berbasis kearifan lokal mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik. Penelitian (Herlina et al. 2020) juga menunjukkan bahwa penggunaan model pembelajaran inovatif berbantuan media audio visual memberikan perbedaan terhadap kemampuan berpikir kritis dan hasil belajar kognitif. Selain itu, (Saputri et al. 2024), (Nurwahidah, 2023), serta (Bormayanti dan Rafianti 2024) menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis masalah dan penggunaan media pembelajaran dapat meningkatkan aktivitas belajar serta keterampilan berpikir kritis peserta didik. Jika dibandingkan dengan penelitian tersebut, kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan e-modul yang secara eksplisit mengintegrasikan STEM, proyek lingkungan, dan penguatan berpikir kritis serta kreatif dalam satu desain bahan ajar digital.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan kategori sangat valid dan sangat praktis, terdapat beberapa tantangan selama pengembangan dan uji coba. Pertama, tidak semua peserta didik memiliki tingkat kemandirian belajar dan kemampuan digital yang sama. Sebagian peserta didik masih memerlukan arahan guru ketika mengakses fitur tertentu atau mengerjakan aktivitas analisis data. Kedua, kegiatan proyek membutuhkan waktu yang lebih panjang dibandingkan pembelajaran konvensional, sehingga guru perlu mengatur alokasi waktu secara cermat. Ketiga, kualitas akses perangkat dan jaringan internet dapat memengaruhi kelancaran penggunaan e-modul. Kendala seperti ini sejalan dengan pandangan (Chania et al. 2020) serta (Tobing et al. 2024), yang menyatakan bahwa implementasi STEM di sekolah masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan bahan ajar, kesiapan guru, pemahaman integrasi lintas disiplin, dan dukungan fasilitas. Oleh karena itu, implementasi e-modul perlu disertai panduan guru, alternatif aktivitas luring, dan penyesuaian dengan kondisi sarana sekolah.

Keterbatasan penelitian ini adalah bahwa pengujian produk difokuskan pada kevalidan dan kepraktisan, sedangkan efektivitas terhadap peningkatan keterampilan berpikir kritis dan kreatif belum diuji melalui desain eksperimen yang ketat. Oleh karena itu, klaim penelitian ini lebih tepat ditempatkan pada kemampuan e-modul untuk menstimulasi, memfasilitasi, dan mendukung pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif, bukan membuktikan peningkatan secara kausal. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan desain kuasi eksperimen dengan pretest dan posttest, kelompok kontrol, serta instrumen tes berpikir kritis dan kreatif yang tervalidasi. Hal ini penting agar pengaruh e-modul terhadap kemampuan berpikir kritis dan kreatif dapat diuji secara lebih kuat. Dengan demikian, hasil pengembangan ini dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang lebih komprehensif mengenai efektivitas e-modul berbasis STEM dalam pembelajaran Biologi.

E-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kelayakan tinggi dari aspek konten, media, dan kepraktisan penggunaan. Produk ini dapat membantu guru menghadirkan pembelajaran Biologi yang lebih kontekstual, interaktif, dan berbasis masalah nyata. Bagi peserta didik, e-modul memberikan pengalaman belajar yang lebih terarah melalui aktivitas analisis, eksplorasi, perancangan solusi, refleksi, dan evaluasi. Temuan ini mendukung gagasan bahwa pembelajaran digital berbasis STEM dapat

menjadi strategi penting untuk mengembangkan keterampilan abad ke-21, terutama berpikir kritis dan kreatif (Le et al., 2022); (Muttaqiin, 2023); (Siddiq & Asrizal, 2023). Dengan demikian, e-modul ini layak digunakan sebagai alternatif bahan ajar digital untuk mendukung pembelajaran pencemaran lingkungan di SMA.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan dikembangkan melalui tahapan ADDIE, meliputi analisis, desain, pengembangan, implementasi, dan evaluasi, menghasilkan produk yang memuat materi kontekstual, aktivitas proyek, eksperimen sederhana, lembar diskusi, refleksi, serta evaluasi berpikir kritis dan kreatif. Hasil validasi oleh ahli media (98%) dan ahli konten (92%) menunjukkan e-modul sangat valid, memenuhi kriteria kelayakan isi, ketepatan konsep, kualitas visual, navigasi, interaktivitas, serta keterpaduan pendekatan STEM dalam proyek lingkungan, sehingga layak digunakan sebagai bahan ajar digital. Tingkat kepraktisan e-modul juga sangat tinggi, dibuktikan dari respons peserta didik 93%–97% dan guru 96%–97%, menandakan e-modul mudah digunakan, instruksi jelas, tampilan menarik, dan mendukung pelaksanaan pembelajaran berbasis proyek secara sistematis. Dengan demikian, e-modul ini efektif dan aplikatif dalam menstimulasi kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik, relevan dengan kebutuhan pembelajaran Biologi di SMA serta tuntutan keterampilan abad ke-21.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah, M. (2025). *Pengembangan keterampilan berpikir kritis dalam pembelajaran sains abad ke-21*. PT Edukasi Nusantara.
- Adipan, R., & Asrizal. (2024). Efektivitas integrasi STEM dalam modul e-learning biologi. *Jurnal Pendidikan Sains*, 12(2), 45–59.
- Apriyanti, D., Putri, L., & Rahmawati, S. (2024). *Pengembangan kemampuan berpikir kritis siswa melalui pembelajaran kontekstual*. Alfabeta.
- Bormayanti, H., & Rafianti, W. R. (2024). Upaya Meningkatkan Aktivitas dan Keterampilan Berpikir Kritis Siswa Kelas V terhadap Muatan IPS Menggunakan Kombinasi Model Pembelajaran PBL, Talking Stick dan Scramble. *Ainara Journal (Jurnal Penelitian Dan PKM Bidang Ilmu Pendidikan)*, 5(4), 443–449. <https://doi.org/10.54371/ainj.v5i4.616>
- Chania, A., Susanti, N., & Pranoto, H. (2020). Kendala guru dalam implementasi pembelajaran STEM di sekolah menengah. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi*, 8(1), 23–32.
- Davidi, R., Hartono, T., & Wijaya, A. (2021). *Berpikir kritis sebagai kompetensi inti abad ke-21*. Pustaka Belajar.
- Facione, P. A. (2023). *Critical thinking: What it is and why it counts* (2nd ed.). Insight Assessment.
- Handayani, R., Kashardi, & Destania, Y. (2021). Soal essay materi aritmatika sosial untuk kemampuan berpikir kritis matematis siswa kelas VII. *Indiktika: Jurnal Inovasi Pendidikan Matematika*, 4(1), 92–102.
- Herlina, M., Syahfitri, J., & Ilista. (2020). Perbedaan kemampuan berpikir kritis dan hasil belajar kognitif dengan model pembelajaran problem based learning berbantuan media audio visual. *Edubiotik: Jurnal Pendidikan, Biologi dan Terapan*, 5(1), 42–54. <https://doi.org/10.33503/ebio.v5i01.666>
- Idayanti, R. (2024). Pengembangan e-modul interaktif untuk meningkatkan hasil belajar IPA. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 10(1), 12–25.
- Ilmi, F., Ramadhan, T., & Lestari, D. (2023). Pembelajaran STEM berbasis proyek untuk meningkatkan kemandirian belajar siswa. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 11(3), 101–115.

- Ismail, A. (2024). Inovasi digital dalam pengembangan modul pembelajaran interaktif menggunakan Canva dan Flipbook. *Jurnal Pendidikan Digital*, 5(2), 33–48.
- Junita, S., & Kashardi. (2021). Pengembangan soal open-ended berorientasi pada kemampuan berpikir kreatif siswa materi operasi pecahan untuk siswa SMP kelas VII. *Jurnal Math-UMB.EDU*, 9(1), 43–xx.
- Khalid, A., & Owusu-Boateng, F. (2024). Digital education and interactive learning materials in 21st century classrooms. *International Journal of Education*, 15(1), 77–91.
- Komalasari, K. (2024). *Pengembangan bahan ajar berbasis STEM untuk pembelajaran biologi SMA*. Refika Aditama.
- Kwangmuang, W., Sari, P., & Nugroho, H. (2021). Strategi pengembangan kreativitas siswa melalui pembelajaran berbasis proyek. *Jurnal Pendidikan Kreatif*, 7(2), 55–68.
- Lawe, A., Putra, B., & Hidayat, F. (2021). Pemanfaatan bahan ajar digital dalam meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi. *Jurnal Pendidikan IPA*, 9(1), 15–27.
- Laila, N., Arifin, S., & Fadilah, R. (2019). *Bahan ajar cetak dan digital: Konsep dan implementasi*. Kencana.
- Laili, R. (2019). Pengembangan e-modul berbasis multimedia untuk pembelajaran sains. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 6(2), 45–56.
- Lassig, C. (2021). *Fostering creativity in education: Theory and practice*. Routledge.
- Melati, N., Hartono, B., & Widodo, P. (2023). Transformasi digital dalam pendidikan sains di era industri 4.0. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 9(3), 101–115.
- Muttaqiin, F. (2023). *Integrasi STEM dalam pembelajaran sains untuk meningkatkan keterampilan abad ke-21*. Unesa Press.
- Novitasari, D. (2023). Analisis kebutuhan pengembangan bahan ajar STEM berbasis proyek lingkungan. *Jurnal Pendidikan Biologi*, 14(2), 78–92.
- Nurwahidah, N. (2023). Upaya Meningkatkan Aktivitas Belajar, Keterampilan Berpikir Kritis, dan Pemahaman Konsep Biologi Siswa melalui Penerapan Model Pembelajaran Berbasis Masalah. *Ainara Journal (Jurnal Penelitian Dan PKM Bidang Ilmu Pendidikan)*, 4(1), 11–21. <https://doi.org/10.54371/ainj.v4i1.232>
- Fina, N. (2025). Pengembangan e-modul interaktif berbasis project based learning gamifikasi classpoint. Io pada pembelajaran biologi untuk memberdayakan kreativitas peserta didik (doctoral dissertation, uin raden intan lampung).
- Putra, A., Sari, T., & Nugroho, R. (2024). Sejarah dan implementasi pendidikan STEM dalam kurikulum global. *Jurnal Pendidikan Sains*, 13(1), 12–25.
- Putri, Y. C., Sandra, C., & Pamela, I. S. (2025). Upaya meningkatkan Keaktifan Belajar Peserta Didik dalam Pembelajaran Matematika dengan menggunakan Media Ular Tangga di Sekolah Dasar. *Ainara Journal (Jurnal Penelitian Dan PKM Bidang Ilmu Pendidikan)*, 6(1), 122–128. <https://doi.org/10.54371/ainj.v6i1.791>
- Pradarta, I. (2025). Pengembangan e-modul interaktif berbasis problem based learning berdiferensiasi untuk meningkatkan kemampuan berpikir kritis siswa pada pecahan di kelas IV SD (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA).
- Rabbani, M., & Muftianti, R. (2020). *Bahan ajar digital dalam pembelajaran inovatif*. Alfabeta.

- Riduwan. (2010). *Skala pengukuran dan analisis data penelitian*. Alfabeta.
- Riduwan, & Sunarto. (2013). *Metode penelitian pendidikan: Praktik dan aplikasinya*. Alfabeta.
- Rinaryati, Y. (2021). Pemanfaatan bahan ajar digital untuk pembelajaran IPA di sekolah dasar. *Jurnal Pendidikan Dasar*, 12(1), 23–35.
- Sahrul, H., Fitri, N., & Wibowo, A. (2022). Pengembangan kreativitas siswa melalui pembelajaran kontekstual. *Jurnal Pendidikan Kreatif*, 8(1), 45–60.
- Selvina, D. (2024). Pengaruh Model Project Based Learning Berbasis STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematic) terhadap Kemampuan Berpikir Kritis Peserta Didik Kelas X Mata Pelajaran Biologi (Doctoral dissertation, UIN RADEN INTAN LAMPUNG).
- Soeviatulfitri, & Kashardi. (2020). Kemampuan berpikir kreatif matematis siswa melalui model problem based learning (PBL) dan model pembelajaran Osborn di SMP. *Jurnal Pendidikan Matematika Raflesia*, 5(3), 35–xx.
- Saputri, M. G., Prasetyowati, D., Reffiane, F., & Rizki, L. M. (2024). Pengaruh Model PBL Berbantuan Video Pembelajaran terhadap Kemampuan Berpikir Kritis Siswa pada Pelajaran IPAS. *Ainara Journal (Jurnal Penelitian Dan PKM Bidang Ilmu Pendidikan)*, 5(4), 533–538. <https://doi.org/10.54371/ainj.v5i4.659>
- Sriwahyuni, D., Hidayat, F., & Kurniawan, A. (2019). Inovasi bahan ajar digital interaktif di era pembelajaran daring. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 7(2), 55–68.
- Sriyanti, T. (2021). *Perkembangan pendidikan digital di Indonesia*. PT Gramedia.
- Sugianto, R., Putri, N., & Handayani, S. (2023). Kompetensi guru dalam pengembangan STEM berbasis proyek. *Jurnal Pendidikan IPA*, 11(1), 33–45.
- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kombinasi (mixed methods)*. Alfabeta.
- Sugiyono. (2022). *Metode penelitian pendidikan: Pendekatan kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Sunaryo, B. (2020). E-modul sebagai media pembelajaran inovatif. *Jurnal Pendidikan Sains*, 8(2), 67–78.
- Suharsaputra, D. (2023). *Model ADDIE dalam pengembangan bahan ajar digital*. Rajawali Pers.
- Susanti, R., Hidayat, T., & Wijaya, P. (2022). *Berpikir kritis dalam pembelajaran abad ke-21*. PT Remaja Rosdakarya.
- Syahfitri, J. (2024). The utilization of local wisdom-based interactive digital module to improve students' critical thinking skills. *International Journal of STEM Education for Sustainability*, 4(1), 110–119. <https://doi.org/10.53889/ijses.v4i1.305>
- Syahfitri, J., Firman, H., Redjeki, S., & Sriyati, S. (2021). Profil disposisi berpikir kritis mahasiswa pendidikan biologi di perguruan tinggi. *Jurnal Program Studi Pendidikan Biologi*, 9(1), 23–xx.
- Tasruddin, T. (2020). Bahan ajar digital dan implementasinya dalam pembelajaran sains. *Jurnal Pendidikan IPA*, 7(1), 12–25.
- Thio, R. (2025). *Penerapan e-modul berbasis STEM dalam pembelajaran biologi SMA*. PT Prenada Media.
- Verdinandus, R., & Taufik, H. (2019). Pemanfaatan multimedia dalam pembelajaran sains berbasis digital. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 6(1), 12–24.

- Winanda, E. A., & Rafianti, W. R. (2024). Upaya Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis dan Hasil Belajar Muatan IPAS Menggunakan Kombinasi Model PBL, TPS, dan TGT . *Ainara Journal (Jurnal Penelitian Dan PKM Bidang Ilmu Pendidikan)*, 5(4), 431-436. <https://doi.org/10.54371/ainj.v5i4.609>
- Widiyono, A. (2024). Pengembangan kreativitas melalui modul interaktif berbasis proyek lingkungan. *Jurnal Pendidikan Biologi*, 15(2), 101-115.
- Wulandari, R., Kurnia, D., & Hartono, P. (2023). Inovasi e-modul berbasis multimedia untuk pembelajaran IPA SMA. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 12(3), 45-58.
- Yuliati, F., & Saputra, A. (2019). Tantangan pendidikan sains di era revolusi industri 4.0. *Jurnal Pendidikan Modern*, 10(2), 33-47.