

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Penyajian hasil penelitian disusun secara terstruktur berdasarkan tahapan pengembangan yang digunakan dalam penelitian ini, yang meliputi tahap analisis, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Kelima tahapan tersebut dilaksanakan secara berurutan dan saling berkaitan, sehingga membentuk suatu proses pengembangan yang utuh. Tahap analisis berfokus pada identifikasi kebutuhan pembelajaran dan permasalahan yang dihadapi dalam proses pembelajaran. Tahap perancangan memuat penyusunan desain awal produk, baik dari segi konten maupun tampilan. Tahap pengembangan mencakup proses validasi ahli serta revisi produk. Tahap implementasi dilakukan melalui uji coba I dan uji coba II untuk melihat kepraktisan penggunaan produk. Sementara itu, tahap evaluasi bertujuan untuk menilai efektivitas produk dalam meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik.

Pada bagian ini, hasil penelitian dipaparkan secara deskriptif berdasarkan data yang diperoleh dari instrumen penelitian, meliputi hasil analisis kebutuhan, desain produk, hasil validasi ahli konten dan ahli media, hasil uji kepraktisan melalui angket respon guru, serta hasil uji efektivitas melalui perbandingan nilai pretest dan posttest. Penyajian data dilakukan secara objektif sesuai dengan temuan di lapangan, tanpa terlebih dahulu dikaitkan dengan teori atau penelitian terdahulu secara mendalam.

1. Tahap Analisis (*Analysis*)

Tahap analisis merupakan tahap awal dalam model pengembangan ADDIE yang bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran, karakteristik peserta didik, kesesuaian kurikulum, serta permasalahan yang terjadi dalam pembelajaran Biologi pada materi pencemaran lingkungan. Tahap ini memiliki peran strategis karena menjadi landasan utama dalam perancangan dan pengembangan E-Modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang relevan dengan kondisi nyata pembelajaran di sekolah menengah atas.

a. Analisis Kebutuhan

Hasil analisis kebutuhan menunjukkan bahwa pembelajaran materi pencemaran lingkungan masih cenderung berorientasi pada penyampaian konsep melalui metode ceramah dan diskusi terbatas. Sumber belajar utama berupa buku teks dan presentasi sederhana, sementara pemanfaatan media digital interaktif belum optimal. Kegiatan pembelajaran lebih banyak menekankan pada penguasaan konsep teoretis dibandingkan dengan penerapan konsep melalui kegiatan investigatif atau proyek nyata.

Peserta didik umumnya memahami definisi dan jenis-jenis pencemaran lingkungan, tetapi mengalami kesulitan ketika diminta menganalisis kasus kontekstual atau merancang solusi terhadap permasalahan lingkungan di sekitar mereka. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan berpikir kritis dan kreatif belum berkembang secara maksimal. Selain itu, integrasi unsur Science, Technology, Engineering,

dan Mathematics (STEM) dalam pembelajaran belum dilaksanakan secara sistematis.

Hasil wawancara dengan guru mengungkapkan bahwa pengembangan bahan ajar berbasis digital memerlukan waktu, kompetensi teknis, dan perencanaan yang matang. Guru juga menyampaikan perlunya bahan ajar yang mampu mengintegrasikan pendekatan STEM dengan proyek lingkungan agar peserta didik tidak hanya memahami konsep, tetapi juga mampu menerapkannya dalam bentuk solusi nyata terhadap masalah pencemaran di lingkungan sekitar.

Temuan ini menunjukkan adanya kebutuhan terhadap E-Modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang dirancang secara sistematis, interaktif, dan kontekstual untuk mendukung pembelajaran yang lebih bermakna serta mendorong keterlibatan aktif peserta didik.

b. Analisis Karakteristik Peserta Didik

Peserta didik SMA memiliki karakteristik berada pada tahap perkembangan kognitif operasional formal, sehingga telah mampu berpikir abstrak, logis, dan hipotetis. Namun demikian, hasil observasi menunjukkan bahwa peserta didik lebih antusias ketika pembelajaran dikaitkan dengan fenomena nyata yang terjadi di lingkungan sekitar, seperti permasalahan sampah, pencemaran air, dan polusi udara.

Sebagian besar peserta didik menunjukkan minat tinggi terhadap penggunaan media digital dan aktivitas berbasis proyek. Mereka cenderung lebih aktif ketika diberikan tugas yang menuntut kolaborasi, eksplorasi data, dan pemecahan masalah dibandingkan dengan

pembelajaran berbasis ceramah. Meskipun demikian, kemampuan merancang solusi secara sistematis dan mengintegrasikan berbagai konsep lintas disiplin masih memerlukan penguatan.

Dalam aspek regulasi diri, peserta didik belum sepenuhnya terbiasa mengelola proses belajarnya secara mandiri. Perencanaan proyek, pengelolaan waktu, dan evaluasi hasil kerja masih membutuhkan bimbingan guru. Oleh karena itu, pengembangan E-Modul perlu dirancang tidak hanya untuk menyajikan materi, tetapi juga memandu tahapan berpikir ilmiah, rekayasa sederhana, serta refleksi pembelajaran secara terstruktur.

c. Analisis Kurikulum dan Materi

Materi pencemaran lingkungan dipilih karena memiliki relevansi tinggi dengan kehidupan sehari-hari peserta didik serta mendukung pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Dalam Kurikulum Merdeka, materi ini menekankan pemahaman terhadap interaksi manusia dengan lingkungan, analisis dampak aktivitas manusia, serta upaya penanggulangan pencemaran secara berkelanjutan.

Materi ini sangat potensial untuk dikembangkan melalui pendekatan STEM, karena mencakup:

- 1) *Science*: konsep ilmiah tentang jenis, sumber, dan dampak pencemaran.
- 2) *Technology*: pemanfaatan teknologi dalam pengelolaan limbah dan pemantauan kualitas lingkungan.

- 3) *Engineering*: perancangan solusi atau produk sederhana untuk mengurangi dampak pencemaran.
- 4) *Mathematics*: analisis data kuantitatif terkait tingkat pencemaran dan perhitungan sederhana dalam proyek.

Integrasi proyek lingkungan memungkinkan peserta didik mengaitkan teori dengan praktik secara langsung, sehingga pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan bermakna.

Tabel 4.1
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.

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, karakteristik peserta didik, serta kurikulum dan materi, dapat disimpulkan bahwa pembelajaran Biologi

pada materi pencemaran lingkungan memerlukan pengembangan E-Modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang sistematis, interaktif, dan kontekstual. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam tahap perancangan (*design*) untuk menghasilkan produk yang valid, praktis, dan relevan dengan kebutuhan pembelajaran di sekolah.

2. Tahap Desain (*Design*)

Tahap desain merupakan tahapan perancangan produk yang dilakukan setelah proses analisis kebutuhan selesai dilaksanakan. Pada tahap ini, seluruh temuan empiris yang diperoleh dari analisis karakteristik peserta didik, kebutuhan pembelajaran, serta kondisi riil di lapangan diterjemahkan ke dalam bentuk rancangan awal E-Modul berbasis Eco-STEM. Tahap desain bertujuan untuk menghasilkan blueprint atau kerangka konseptual produk yang sistematis, terstruktur, dan selaras dengan tujuan pembelajaran.

Berdasarkan hasil analisis, modul yang dikembangkan dirancang untuk memfasilitasi pembelajaran berbasis pendekatan Eco-STEM (*Ecology–Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) yang terintegrasi dengan konteks lingkungan sekitar peserta didik. Desain modul disusun dengan mempertimbangkan prinsip keterpaduan antara konsep sains dan permasalahan ekologis nyata, sehingga peserta didik tidak hanya memahami konsep secara teoretis, tetapi juga mampu mengaplikasikannya dalam kehidupan sehari-hari.

a. Perumusan Tujuan Pembelajaran

Tujuan pembelajaran dalam e-modul ini dirumuskan berdasarkan Capaian Pembelajaran Biologi Fase E serta mengintegrasikan pendekatan eco-STEM pada materi pencemaran lingkungan. Setelah mengikuti rangkaian pembelajaran, peserta didik diharapkan mampu:

- 1) Menganalisis berbagai bentuk pencemaran lingkungan (udara, air, dan tanah), termasuk sumber, penyebab, serta dampaknya terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.
- 2) Menjelaskan keterkaitan antara aktivitas manusia dan kerusakan lingkungan melalui hubungan sebab-akibat yang logis dan berbasis data kontekstual di lingkungan sekitar.
- 3) Menginterpretasikan data dan fenomena lingkungan untuk menumbuhkan kemampuan berpikir kritis sesuai indikator interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, eksplanasi, dan regulasi diri.
- 4) Merancang dan merekayasa solusi sederhana berbasis eco-STEM, khususnya pengolahan limbah organik rumah tangga menjadi eco-enzyme sebagai alternatif ramah lingkungan.
- 5) Menggunakan pendekatan ilmiah dan matematis dalam menghitung rasio bahan, menganalisis proses fermentasi, serta mengevaluasi efektivitas eco-enzyme sebagai solusi berkelanjutan.

- 6) Menunjukkan sikap tanggung jawab dan kepedulian terhadap lingkungan melalui tindakan nyata dalam pengurangan sampah organik dan penerapan prinsip keberlanjutan.

Rumusan tujuan ini menjadi dasar dalam penyusunan materi, aktivitas pembelajaran, serta instrumen evaluasi dalam modul.

b. Perancangan Struktur E-Modul

Struktur E-Modul berbasis Eco-STEM yang dirancang dalam penelitian ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu:

- 1) Sampul yang memuat identitas modul dan ilustrasi kontekstual.
- 2) Kata pengantar.
- 3) Petunjuk penggunaan modul bagi guru dan peserta didik.
- 4) Peta konsep materi.
- 5) Kegiatan pembelajaran berbasis sintaks Eco-STEM.
- 6) Lembar aktivitas dan proyek.
- 7) Refleksi pembelajaran.
- 8) Evaluasi akhir.
- 9) Daftar pustaka.

Setiap kegiatan pembelajaran dirancang mengikuti alur pendekatan Eco-STEM, yaitu:

- (1) identifikasi masalah lingkungan,
- (2) eksplorasi konsep sains,
- (3) perancangan solusi sederhana (*engineering design*),
- (4) penerapan konsep matematika/teknologi, dan
- (5) refleksi hasil.

Tabel 4.2 *Storyboard* E-Modul Berbasis Eco-STEM pada Materi Penemaran Lingkungan

No	Komponen E-Modul	Keterangan
1	Halaman Sampul E-Modul	<ol style="list-style-type: none"> 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	<ol style="list-style-type: none"> 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	<ol style="list-style-type: none"> 1) Narasi kasus pencemaran di lingkungan sekitar 2) Ilustrasi/gambar pendukung 3) Pertanyaan pemantik analisis penyebab dan dampak
4	Kegiatan <i>Science</i> (Sains)	<ol style="list-style-type: none"> 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 Engineering	<ol style="list-style-type: none"> 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>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Penyajian data dalam table 2) Pembuatan grafik sederhana 3) Perhitungan persentase tingkat pencemaran 4) Analisis data secara kuantitatif
7	Lembar Aktivitas dan Diskusi	<ol style="list-style-type: none"> 1) Tugas analisis dampak pencemaran 2) Diskusi solusi berbasis Eco-STEM 3) Ruang jawaban terstruktur
8	Refleksi Pembelajaran	<ol style="list-style-type: none"> 1) Pertanyaan reflektif pemahaman konsep 2) Evaluasi sikap peduli lingkungan 3) Rencana aksi sederhana menjaga lingkungan
9	Evaluasi Akhir	<ol style="list-style-type: none"> 1) Soal pilihan ganda 2) Soal uraian berbasis studi kasus 3) Penilaian proyek dan keterampilan proses
10	Daftar Pustaka	<ol style="list-style-type: none"> 1) Referensi materi pencemaran lingkungan 2) Sumber teori dan pendekatan Eco-STEM terbaru

Prototype E-Modul berbasis Eco-STEM yang dikembangkan memuat beberapa halaman utama sebagaimana dirancang dalam *storyboard* di atas. Setiap komponen disusun secara sistematis untuk memastikan alur pembelajaran berjalan dari tahap identifikasi masalah, eksplorasi konsep, perancangan solusi, hingga refleksi dan evaluasi. Struktur ini dirancang untuk mendukung keterpaduan konsep sains dan kesadaran ekologis secara terpadu dan kontekstual.

1) Halaman Sampul *E-Modul*



Gambar 1. Cover

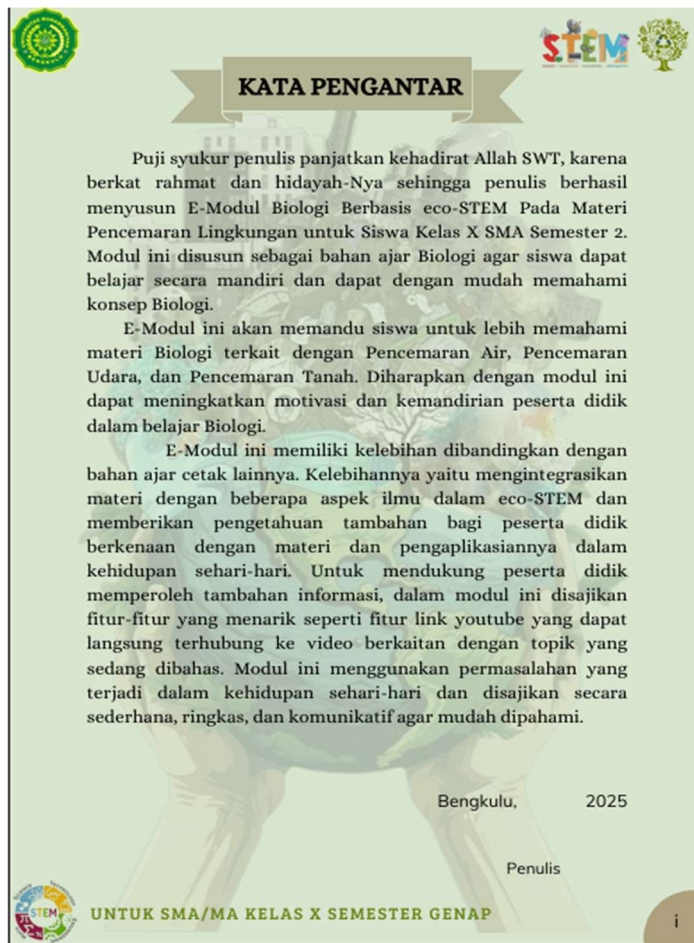
Halaman sampul E-Modul berbasis Eco-STEM pada materi Pencemaran Lingkungan didesain dengan dominasi warna hijau gradasi

yang merepresentasikan alam, keberlanjutan, dan kesadaran ekologis. Latar visual menampilkan ilustrasi kota, bumi, asap industri, serta limbah sebagai gambaran dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan.

Judul utama “E-Modul Berbasis Eco-STEM” ditulis dengan huruf Sans Serif berukuran besar sebagai identitas bahan ajar dan penegasan integrasi *Ecology, Science, Technology, Engineering*, dan *Mathematics*. Di bagian tengah dicantumkan judul materi secara kontras agar fokus pembelajaran mudah dikenali. Logo institusi ditempatkan di bagian atas sebagai identitas akademik.

Ilustrasi bumi yang dipegang tangan manusia dengan simbol pencemaran mempertegas pesan tanggung jawab ekologis. Pada bagian bawah tercantum jenjang “SMA/MA Kelas X Semester 2” serta identitas penulis dan institusi sebagai bentuk kejelasan sasaran dan pertanggungjawaban akademik. Secara keseluruhan, desain sampul mengedepankan estetika, keterbacaan, dan penguatan pesan lingkungan untuk menumbuhkan motivasi serta kesadaran kritis peserta didik sejak awal pembelajaran.

2) Kata Pengantar dan Identitas Modul



Gambar 2. Kata Pengantar

Halaman kata pengantar pada E-Modul berbasis Eco-STEM materi *Pencemaran Lingkungan* berfungsi sebagai pengantar akademik sekaligus penjelasan tujuan penyusunan modul. Judul “Kata Pengantar” ditampilkan di bagian atas dengan ukuran huruf lebih besar agar jelas dan menonjol.

Isi kata pengantar memuat latar belakang pengembangan modul, tujuan pembelajaran, serta harapan agar E-Modul dapat membantu peserta didik memahami konsep pencemaran air, udara, dan tanah secara terintegrasi melalui pendekatan Eco-STEM. Modul dirancang tidak

hanya menyajikan teori, tetapi juga mengaitkan materi dengan permasalahan lingkungan nyata sehingga pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan bermakna.

Secara visual, halaman ini menggunakan latar bernuansa hijau yang selaras dengan tema lingkungan. Pada bagian bawah dicantumkan tempat dan tahun penyusunan (Bengkulu, 2025) serta keterangan penulis sebagai bentuk pertanggungjawaban akademik.

Identitas Modul

Identitas E-Modul memuat informasi sebagai berikut:

- a. Judul: E-Modul Biologi Berbasis Eco-STEM
- b. Materi: Pencemaran Lingkungan
- c. Mata Pelajaran: Biologi
- d. Kelas/Semester: X / Genap
- e. Jenjang: SMA/MA
- f. Pengembang: Metia Vinliani
- g. Institusi: Universitas Muhammadiyah Bengkulu
- h. Tahun: 2025

Identitas ini bertujuan memberikan kejelasan peruntukan dan legitimasi akademik terhadap modul yang dikembangkan.

3) Penyajian Permasalahan Kontekstual

MATERI I

1. Definisi Pencemaran Lingkungan
2. Jenis-Jenis Pencemaran Lingkungan

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari e-modul ini, Siswa diharapkan mampu:

1. Menganalisis jenis-jenis pencemaran lingkungan (air, udara, dan tanah) serta dampaknya bagi ekosistem.
2. Mengidentifikasi penyebab dan sumber pencemaran di lingkungan sekitar.
3. Menganalisis hubungan sebab-akibat antara aktivitas manusia (industri, transportasi, konsumsi rumah tangga) dengan peningkatan beban pencemaran
4. Memahami konsep pengolahan limbah organik secara berkelanjutan

B. Uraian Materi

1. Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan adalah masuknya zat, energi, atau komponen asing ke dalam lingkungan alam dalam jumlah atau konsentrasi yang

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP

3

Gambar 3. Materi I

Halaman penyajian permasalahan kontekstual memuat kasus pencemaran yang dekat dengan kehidupan peserta didik, seperti pencemaran sungai akibat limbah rumah tangga dan pencemaran udara dari asap kendaraan. Narasi disusun secara ringkas dan komunikatif untuk membangun kesadaran awal terhadap masalah lingkungan.

Pada bagian atas halaman disertakan kode QR yang dapat dipindai untuk mengakses video tentang pencemaran lingkungan. Video tersebut bertujuan memperjelas materi melalui visualisasi nyata sehingga pemahaman peserta didik menjadi lebih konkret.

Bagian tengah halaman menampilkan ilustrasi kondisi lingkungan tercemar sebagai penguat visual, sedangkan di akhir narasi disajikan pertanyaan pemantik untuk menganalisis jenis, penyebab, dampak, serta alternatif solusi. Bagian ini menjadi awal penerapan pendekatan Eco-STEM berbasis masalah nyata.

3) Kegiatan *Science* (Sains)



Gambar 4. Materi II

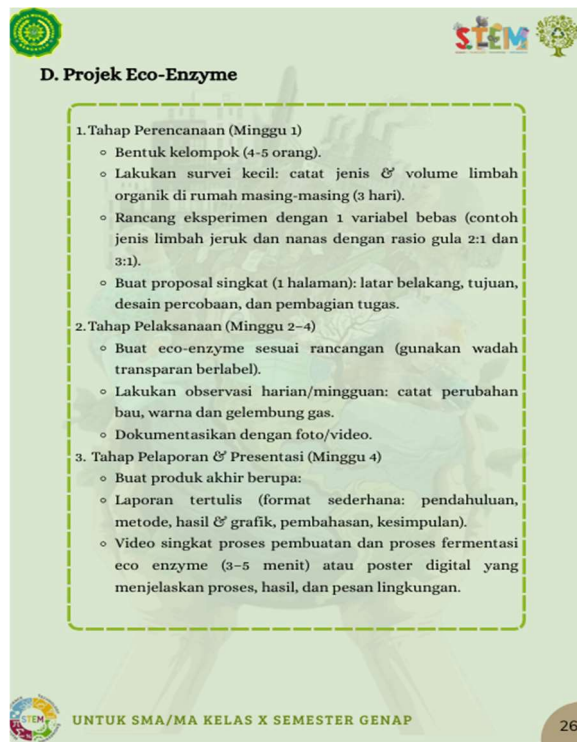
Halaman kegiatan sains berfokus pada eksplorasi konsep ilmiah tentang pencemaran lingkungan. Peserta didik diarahkan untuk mengidentifikasi jenis dan karakteristik pencemaran air, udara, dan tanah melalui pengamatan serta kajian konsep dasar.

Selain identifikasi, peserta didik diminta menganalisis zat pencemar dan dampaknya terhadap kesehatan manusia maupun

keseimbangan ekosistem. Penyajian materi didukung tabel klasifikasi dan ilustrasi sederhana agar memudahkan pemahaman.

Pada bagian eksperimen, modul memuat kegiatan simulasi penyaringan air menggunakan bahan sederhana seperti pasir, kerikil, arang, dan kapas. Peserta didik melakukan pengamatan sebelum dan sesudah proses penyaringan serta mencatat hasilnya pada lembar pengamatan. Kegiatan ini melatih keterampilan observasi, pengumpulan data, dan penarikan kesimpulan berbasis fakta.

4) Kegiatan *Technology* dan *Engineering*



D. Projek Eco-Enzyme

1. Tahap Perencanaan (Minggu 1)
 - Bentuk kelompok (4-5 orang).
 - Lakukan survei kecil: catat jenis & volume limbah organik di rumah masing-masing (3 hari).
 - Rancang eksperimen dengan 1 variabel bebas (contoh jenis limbah jeruk dan nanas dengan rasio gula 2:1 dan 3:1).
 - Buat proposal singkat (1 halaman): latar belakang, tujuan, desain percobaan, dan pembagian tugas.
2. Tahap Pelaksanaan (Minggu 2-4)
 - Buat eco-enzyme sesuai rancangan (gunakan wadah transparan berlabel).
 - Lakukan observasi harian/mingguan: catat perubahan bau, warna dan gelembung gas.
 - Dokumentasikan dengan foto/video.
3. Tahap Pelaporan & Presentasi (Minggu 4)
 - Buat produk akhir berupa:
 - Laporan tertulis (format sederhana: pendahuluan, metode, hasil & grafik, pembahasan, kesimpulan).
 - Video singkat proses pembuatan dan proses fermentasi eco enzyme (3-5 menit) atau poster digital yang menjelaskan proses, hasil, dan pesan lingkungan.

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP

26

Gambar 5. Proyek Eco-Enzyme

Halaman ini dirancang untuk membimbing peserta didik melaksanakan proyek eco-enzyme sebagai bentuk solusi pengelolaan limbah organik rumah tangga secara berkelanjutan. Kegiatan difokuskan pada tahap teknologi yang menekankan penggunaan alat,

bahan, dan prosedur kerja yang tepat dalam proses fermentasi. Peserta didik diarahkan untuk menggunakan wadah fermentasi yang tertutup rapat atau kedap udara guna mendukung proses pembentukan gas selama fermentasi serta mencegah kontaminasi dari luar.

Selain itu, peserta didik menerapkan teknik pencampuran bahan secara proporsional, yaitu gula merah, limbah organik (seperti kulit buah), dan air dengan rasio yang telah dirancang (misalnya 1:3:10). Setelah itu, peserta didik mendesain wadah eco-enzyme agar system fermentasi tidak meledak (melakukan modifikasi desain wadah atau prosedur agar hasil tetap optimal).

5) Kegiatan *Mathematics*



The infographic is titled "Siapkan Bahan" (Prepare Materials) and "Langkah Pembuatan" (Steps of Preparation). It includes a list of materials and a 7-step process for making Eco-Enzyme. The materials list includes a 1.6-liter plastic container, 300g of fresh fruit peels, 100g of brown sugar/molasses, and 1000ml of clean water. The steps include preparing the materials in a 1:3:10 ratio, adding water and sugar, mixing, adding fruit peels, sealing the container, and waiting for at least 3 months of fermentation.

Siapkan Bahan

- Wadah plastik (bukan kaca) 1,6 liter, bersih dan kering. Pastikan tutupnya tidak bocor.
- Kulit buah segar: 300 gram (seperti kulit jeruk, nanas, apel). hindari buah berminyak seperti alpukat atau durian.
- Gula merah: 100 gram/molase
- Air bersih (bukan air panas): 1000ml

Langkah Pembuatan

1. Siapkan bahan dengan rumus 1:3:10.
2. Siapkan air bersih 1000ml lalu masukkan gula merah/molase.
3. Jika memakai gula merah aduk sampai larut lalu tuangkan air yang sudah tercampur gula merah sedikit demi sedikit ke dalam wadah eco-enzyme.
4. Masukkan potongan kulit buah, hindari buah yang berminyak, sudah busuk atau yang sudah berjamur.
5. Tutup wadah eco-enzyme dengan rapat. lalu buka 1-2 kali sehari selama 1-2 minggu pertama untuk membuang gas CO₂.
6. Simpan di tempat teduh, jauh dari sinar matahari langsung.
7. Tunggu waktu fermentasi minimal 3 bulan.

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP

23

Gambar 6. Prosedur Eco-Enzyme

Pada kegiatan Mathematics, peserta didik menerapkan konsep perbandingan dalam pembuatan eco-enzyme dengan rasio 1:3:10, yaitu 1 bagian gula merah atau molase, 3 bagian sampah organik (kulit buah atau sayuran), dan 10 bagian air. Siswa menghitung kebutuhan bahan berdasarkan takaran tertentu, misalnya jika digunakan 100 gram gula merah, maka diperlukan 300 gram sampah organik dan 1.000 ml air. Kegiatan ini melatih kemampuan operasi hitung dan pemahaman perbandingan senilai secara kontekstual, sekaligus menunjukkan bahwa ketepatan perhitungan berpengaruh terhadap keberhasilan proses fermentasi.

6) Halaman Lembar Aktivitas dan Diskusi

D. Penugasan
Cermati berbagai gambar perubahan lingkungan di bawah ini:

 Gambar 1. Tanah Longsor Sumber: www.balipost.com	 Gambar 2. Banjir Sumber: www.dailymirror.lk
 Gambar 3. Limbah Sampah Sumber: envilife.co.id	 Gambar 4. Asap Kendaraan Sumber: aktual.com

1. Sebutkan faktor-faktor yang mengakibatkan perubahan lingkungan pada gambar 1, 2, 3 dan 4!
2. Jelaskan jenis pencemaran yang terjadi pada gambar 3 dan 4!
3. Jelaskan dampak perubahan lingkungan yang terjadi pada peristiwa di gambar 4 serta carilah alternatif penanggulangannya!
4. Dari keempat gambar, manakah yang menurutmu memiliki dampak paling serius terhadap kesehatan manusia dalam jangka panjang? Berikan alasanmu.

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP

13

Gambar 7. Lembar Aktivitas dan Diskusi

Siapkan Bahan

- Wadah plastik (bukan kaca) 1,6 liter, bersih dan kering. Pastikan tutupnya tidak bocor.
- Kulit buah segar: 300 gram (seperti kulit jeruk, nanas, apel). hindari buah berminyak seperti alpukat atau durian.
- Gula merah: 100 gram/molase
- Air bersih (bukan air panas): 1000ml

Langkah Pembuatan

1. Siapkan bahan dengan rumus 1:3:10.
2. Siapkan air bersih 1000ml lalu masukkan gula merah/molase.
3. Jika memakai gula merah aduk sampai larut lalu tuangkan air yang sudah tercampur gula merah sedikit demi sedikit ke dalam wadah eco-enzyme.
4. Masukkan potongan kulit buah, hindari buah yang berminyak, sudah busuk atau yang sudah berjamur.
5. Tutup wadah eco-enzyme dengan rapat. lalu buka 1-2 kali sehari selama 1-2 minggu pertama untuk membuang gas CO₂.
6. Simpan di tempat teduh, jauh dari sinar matahari langsung.
7. Tunggu waktu fermentasi minimal 3 bulan.

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP

Gambar 8. Lembar Aktivitas dan Diskusi

Halaman ini memuat tugas analisis dampak pencemaran serta diskusi solusi berbasis Eco-STEM. Pertanyaan disusun secara sistematis untuk mendorong peserta didik mengemukakan pendapat berdasarkan data hasil eksperimen dan pengamatan. Pada bagian atas halaman disertakan kode QR yang berfungsi untuk mengakses lembar jawaban penugasan secara digital, sehingga peserta didik dapat mengisi dan mengumpulkan hasil kerja secara lebih praktis dan terdokumentasi.

Tersedia pula ruang jawaban terstruktur pada halaman tersebut agar peserta didik dapat menuliskan hasil analisis, rancangan solusi, serta kesimpulan secara runtut dan logis. Kegiatan ini menekankan penguatan kemampuan argumentasi berbasis data, kolaborasi dalam diskusi kelompok, serta keterampilan pemecahan masalah secara sistematis dan kontekstual.

7) Halaman Refleksi Pembelajaran

Refleksi - Menumbuhkan Kesadaran Mendalam

“Di akhir proyek, luangkan waktu untuk merenung secara pribadi atau dalam diskusi kelompok.

Tanyakan pada dirimu:

1. Apa momen paling mengejutkan selama eksperimen ini?
2. Apakah persepsiku tentang “sampah” berubah? Jika ya, bagaimana?
3. Jika proyek ini dilakukan oleh 100 sekolah di kotaku, berapa ton sampah yang bisa dialihkan dari TPA dalam satu tahun? Berapa karbon yang bisa dikurangi?
4. Apa hambatan terbesar dalam mengajak orang lain bergabung? Bagaimana cara mengatasinya?

Refleksi bukan sekadar formalitas. Ia adalah jembatan antara pengetahuan dan tindakan antara “tahu” dan “peduli”.

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP 24

Gambar 9. Refleksi Pembelajaran

Refleksi Diri (Jawab dengan jujur dan Kritis)

1. Apa hal paling menarik atau mengejutkan yang kamu pelajari selama proyek ini?
.....
2. Apa satu hal yang ingin kamu perbaiki jika mengulang proyek ini?
.....
3. Bagaimana proyek ini mengubah cara pandangmu terhadap “sampah”?
.....
4. Apa manfaat nyata eco-enzyme menurutmu untuk keluarga, sekolah, atau lingkungan?
.....

Berikut link pengisian jawaban soal di atas



Scan Me

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP 31

Gambar 10. Refleksi Pembelajaran

Halaman refleksi dirancang sebagai ruang evaluatif yang sistematis untuk membantu peserta didik meninjau kembali pemahaman konsep, proses berpikir ilmiah, serta sikap peduli lingkungan yang berkembang selama pembelajaran berbasis Eco-STEM. Melalui pertanyaan reflektif yang terstruktur, peserta didik diarahkan untuk mengidentifikasi sejauh mana mereka memahami keterkaitan antara sains, teknologi, rekayasa, dan matematika dalam konteks permasalahan lingkungan. Pertanyaan tersebut tidak hanya menilai aspek kognitif, tetapi juga menggali kesadaran personal mengenai kontribusi nyata yang dapat dilakukan dalam menjaga dan memperbaiki kualitas lingkungan sekitar.

Pada bagian ini disertakan kode QR interaktif yang dapat dipindai atau diklik melalui perangkat digital untuk mengakses lembar refleksi diri secara daring. Sistem ini memungkinkan respons peserta didik terdokumentasi secara sistematis, tersip dengan rapi, serta dapat dianalisis untuk melihat perkembangan sikap dan pola pikir dari waktu ke waktu. Pendokumentasian digital tersebut juga mendukung transparansi proses pembelajaran serta memudahkan guru dalam melakukan tindak lanjut pembinaan. Selain itu, halaman refleksi memuat rencana aksi sederhana yang aplikatif dalam kehidupan sehari-hari, seperti memilah sampah organik dan anorganik, mengurangi penggunaan plastik sekali pakai, serta mengolah limbah dapur menjadi eco-enzyme.

Secara keseluruhan, refleksi ini bertujuan memperkuat dimensi afektif dalam pembelajaran, membangun kesadaran ekologis yang berkelanjutan, serta mendorong internalisasi nilai tanggung jawab terhadap lingkungan. Melalui proses reflektif yang terarah, diharapkan terjadi perubahan perilaku yang tidak bersifat sesaat, melainkan berkembang menjadi kebiasaan positif yang berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan.

8) Evaluasi Akhir

F. Penilaian Diri

Nama : _____
 Kelas : _____
 Kelompok : _____
 Tanggal : _____

Berilah tanda centang (✓) pada kolom yang paling sesuai dengan pengalaman dan usahamu selama proyek. Lalu, tuliskan penjelasan singkat atau contoh di kolom "Refleksi".

NO	PERNYATAAN	YA	TIDAK
1	Saya memahami konsep ilmiah di balik fermentasi eco-enzyme (misal: peran mikroba, gas yang dihasilkan).		
2	Saya terlibat aktif dalam perencanaan & pelaksanaan eksperimen (misal: menyiapkan bahan, mencatat data, mengamati perubahan).		
3	Saya berusaha memecahkan masalah secara kreatif saat menghadapi kendala (misal: bau menyengat, wadah bocor, fermentasi gagal).		
4	Saya melakukan pengukuran atau perhitungan dengan teliti (misal: rasio bahan, perubahan tinggi tanaman, persentase keberhasilan).		
5	Saya berkontribusi dalam diskusi kelompok & menghargai pendapat teman.		
6	Saya mampu menghubungkan proyek ini dengan isu lingkungan di sekitar (misal: pengurangan sampah, penggunaan bahan kimia).		
7	Saya berani menyampaikan hasil/menjawab pertanyaan saat presentasi (lisan/tertulis/video).		

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP 30

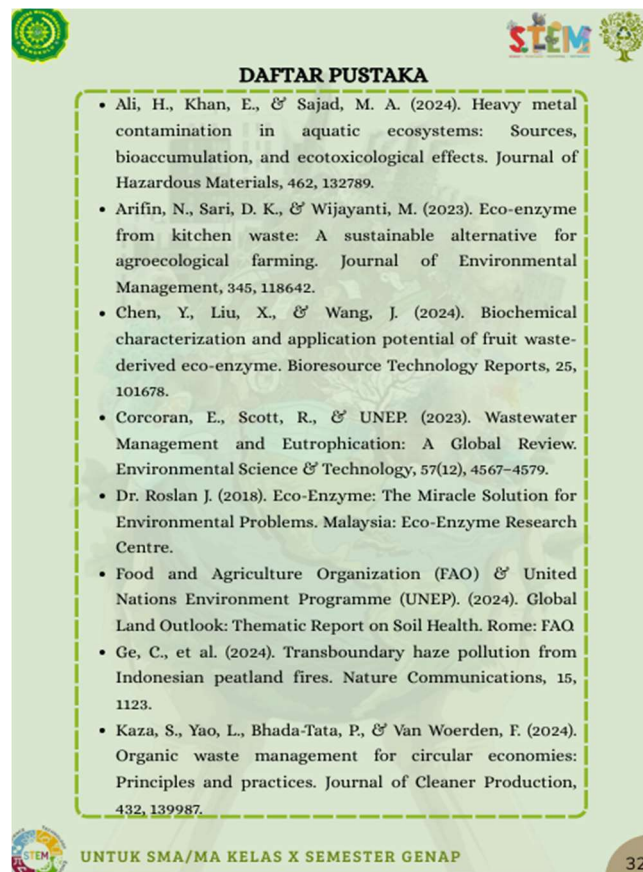
Gambar 11. Evaluasi Akhir

Halaman evaluasi akhir memuat soal pilihan ganda untuk mengukur pemahaman konsep dasar pencemaran, serta soal uraian berbasis studi kasus untuk menilai kemampuan analisis dan pemecahan

masalah. Pada bagian atas halaman disertakan kode QR yang berfungsi untuk mengakses lembar jawaban penilaian diri secara digital, sehingga peserta didik dapat melakukan refleksi terhadap hasil belajarnya secara mandiri dan terstruktur.

Selain itu, disertakan penilaian proyek yang mencakup kreativitas desain, ketepatan konsep, analisis data, dan keterampilan proses. Evaluasi disusun secara komprehensif untuk mengukur aspek kognitif, keterampilan, serta kemampuan berpikir kritis dan kreatif secara terpadu.

9) Halaman Daftar Pustaka



Gambar 12. Daftar Pustaka

Halaman daftar pustaka memuat referensi ilmiah terkait materi pencemaran lingkungan dan sumber teori pendekatan Eco-STEM. Pencantuman referensi bertujuan memperkuat landasan akademik modul serta memastikan kesesuaian materi dengan sumber ilmiah yang relevan dan mutakhir.

c. Desain Tampilan dan Media

Karena produk yang dikembangkan berbentuk E-Modul, desain visual menjadi bagian penting dalam tahap perancangan. Modul dirancang dengan:

- 1) Tata letak yang sistematis dan mudah dibaca.
- 2) Kombinasi warna yang mendukung kenyamanan visual.
- 3) Penyajian gambar kontekstual terkait lingkungan sekitar.
- 4) Integrasi ikon-ikon STEM untuk memperjelas keterpaduan konsep.

Pemilihan desain ini bertujuan untuk meningkatkan daya tarik dan memudahkan navigasi peserta didik saat menggunakan modul secara mandiri maupun terbimbing.

d. Perancangan Instrumen Penilaian

Pada tahap desain juga disusun instrumen penilaian yang meliputi:

- 1) Lembar validasi ahli konten dan ahli media.
- 2) Angket respon guru dan peserta didik untuk mengukur kepraktisan.
- 3) Instrumen evaluasi hasil belajar berupa soal pilihan ganda dan uraian.

Instrumen-instrumen tersebut dirancang menggunakan skala Likert 1–4 untuk mengukur tingkat kelayakan dan kepraktisan produk.

e. Rancangan Aktivitas Berbasis Proyek

Sebagai karakteristik utama Eco-STEM, modul memuat aktivitas berbasis proyek sederhana, seperti:

- 1) Observasi lingkungan sekitar sekolah.
- 2) Analisis permasalahan sampah atau pencemaran.
- 3) Perancangan solusi sederhana berbasis konsep sains.
- 4) Penyajian hasil dalam bentuk laporan atau presentasi.

Rancangan aktivitas ini disusun agar peserta didik terlibat aktif, berpikir sistematis, serta mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu dalam satu kesatuan pembelajaran.

3. Tahap *Develop* (Pengembangan)

Tahap pengembangan merupakan tahap lanjutan dari proses perancangan yang bertujuan untuk merealisasikan desain e-modul berbasis Eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan menjadi produk nyata yang siap untuk diuji. Pada tahap ini, e-modul yang telah dirancang dikembangkan secara utuh dalam bentuk digital interaktif, kemudian dilakukan proses validasi oleh para ahli untuk menilai kelayakan produk dari segi isi, tampilan, dan keterpaduannya dengan pendekatan Eco-STEM.

Proses validasi dilakukan untuk memastikan bahwa e-modul telah memenuhi standar kelayakan isi, konstruksi pembelajaran, serta aspek teknis media pembelajaran digital. Hasil validasi selanjutnya digunakan

sebagai dasar dalam melakukan revisi dan penyempurnaan produk sebelum diimplementasikan pada tahap uji coba I dan uji coba II.

a. Uji Kevalidan

1) Validasi Modul

a) Validasi Konten

Validasi konten dilakukan untuk menilai kesesuaian materi dalam E-Modul berbasis eco-STEM dengan Capaian Pembelajaran (CP), tujuan pembelajaran, kedalaman konsep, akurasi ilmiah, keterpaduan pendekatan eco-STEM, serta relevansi proyek lingkungan dalam menstimulasi kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik SMA.

Penilaian dilakukan oleh dua orang ahli konten menggunakan instrumen validasi yang terdiri atas 15 aspek penilaian dengan skala 1–5. Hasil validasi konten disajikan sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil Validasi I Konten

Nilai	Interval	Kategori
88%	81%–100%	Sangat Valid

Berdasarkan hasil penilaian Validator I, modul memperoleh skor 66 dari skor maksimal 75 dengan persentase kevalidan sebesar 88% dan berada pada kategori sangat valid. ”. Meskipun telah memenuhi kriteria sangat valid, validator memberikan beberapa saran perbaikan untuk penyempurnaan isi materi.

Berdasarkan hasil validasi oleh validator I memberikan saran perbaikan, terutama terkait belum adanya kisi-kisi soal sebagai

dasar penyusunan instrumen evaluasi. Menindaklanjuti masukan tersebut, peneliti menambahkan kisi-kisi soal untuk memperkuat dasar penyusunan instrumen evaluasi. Hasil penilaian validator I beserta rincian skor penilaian disajikan secara lengkap pada lampiran 5. Angket Validasi Konten.

The image shows a worksheet page with a light green background. At the top left is a circular logo with a globe. At the top right is a 'STEM' logo with a tree icon. The title 'E. Latihan Soal' is centered at the top. Below it, three numbered questions are listed, each followed by a 'Jawaban:' label and a set of dotted lines for writing. The questions are: 1. About changes in alcohol, gas, and liquid over 30 days in fermentation. 2. About designing an eco-enzyme mixture with different sugar and fruit ratios. 3. About evaluating a statement on the safety of using natural eco-enzymes for waste treatment. At the bottom, there is a footer with a 'STEM' logo, the text 'UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP', and the page number '27'.

E. Latihan Soal

1. Siswa mencatat perubahan selama 30 hari: hari ke-7: bau alkohol, hari ke-14: gelembung gas, hari ke-30: cairan bening berbau asam. Jelaskan makna perubahan tersebut dalam konteks proses fermentasi.
Jawaban:
.....
.....
2. Dua kelompok merancang campuran awal untuk pembuatan eco-enzyme dengan rasio bahan berbeda: Kelompok A menggunakan perbandingan 1:3:10 (gula : buah : air), sedangkan Kelompok B menggunakan perbandingan 1:1:10. Jelaskan secara ilmiah bagaimana perbedaan rasio gula dan buah dalam campuran awal dapat memengaruhi proses fermentasi yang akan terjadi nanti.
Jawaban:
.....
.....
3. Ada pernyataan yang beredar: "Karena eco-enzyme terbuat dari bahan alami, maka aman digunakan untuk mengolah semua jenis limbah." Evaluasilah pernyataan tersebut berdasarkan prinsip keamanan dan kelayakan penggunaan eco-enzyme.
Jawaban:
.....
.....

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP 27

Sebelum

Gambar 13. Sebelum di perbaiki dari validator I

Kisi-Kisi Tes Kemampuan Berpikir Kritis (Facione, 2023)

NO	Indikator Berpikir Kritis	PERNYATAAN	Bentuk Soal	No. Soal
1	Interpretasi	Memahami makna data pengamatan (gelembung gas, bau, kekeruhan) selama pembuatan eco-enzyme	Uraian	1
2	Analisis	Mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara komposisi bahan, waktu fermentasi, dan kualitas eco-enzyme	Uraian	2
3	Evaluasi	Menilai kredibilitas klaim "eco-enzyme bisa atasi pencemaran sungai" berdasarkan bukti ilmiah	Uraian	3
4	Inferensi	Menarik kesimpulan dari data eksperimen: apakah eco-enzyme efektif mengurangi BOD limbah cair?	Uraian	4
5	Eksplanasi	Menjelaskan proses fermentasi dan peran mikroba dalam eco-enzyme secara ilmiah & logis	Uraian	5
6	Regulasi Diri	Merefleksi kelemahan desain eksperimen & memperbaiki proses berpikir	Terintegrasi dalam penilaian diri	-

E. Latihan Soal

- Siswa mencatat perubahan selama 30 hari: hari ke-7: bau alkohol, hari ke-14: gelembung gas, hari ke-30: cairan bening berbau asam. Jelaskan makna perubahan tersebut dalam konteks proses fermentasi.
Jawaban: _____
- Dua kelompok merancang campuran awal untuk pembuatan eco-enzyme dengan rasio bahan berbeda: Kelompok A menggunakan perbandingan 1:3:10 (gula : buah : air), sedangkan Kelompok B menggunakan perbandingan 1:1:10. Jelaskan secara ilmiah bagaimana perbedaan rasio gula dan buah dalam campuran awal dapat memengaruhi proses fermentasi yang akan terjadi nanti.
Jawaban: _____
- Ada pernyataan yang beredar: "Karena eco-enzyme terbuat dari bahan alami, maka aman digunakan untuk mengolah semua jenis limbah." Evaluasilah pernyataan tersebut berdasarkan prinsip keamanan dan kelayakan penggunaan eco-enzyme.
Jawaban: _____

UNTUK SMA/MA KELAS X SEMESTER GENAP Sesudah KELAS X SEMESTER GENAP 28

Gambar 14. Setelah perbaikan dari validator I

Sebelum dilakukan revisi, versi awal e-modul belum dilengkapi dengan kisi-kisi kemampuan berpikir kritis sebagai dasar penyusunan instrumen evaluasi. Ketiadaan kisi-kisi tersebut menyebabkan indikator pembelajaran, level kognitif, dan bentuk soal belum terpetakan secara sistematis. Akibatnya, keterkaitan antara tujuan pembelajaran berbasis Eco-STEM dengan butir soal evaluasi belum sepenuhnya terjamin, khususnya dalam mengukur kemampuan berpikir kritis peserta didik. Setelah memperoleh masukan dari validator, dilakukan perbaikan dengan menambahkan kisi-kisi soal kemampuan berpikir kritis secara terstruktur. Kisi-kisi yang disusun memuat komponen indikator pembelajaran, materi pokok, level berpikir tingkat tinggi (HOTS), serta bentuk soal yang digunakan. Revisi ini bertujuan memastikan bahwa setiap butir soal

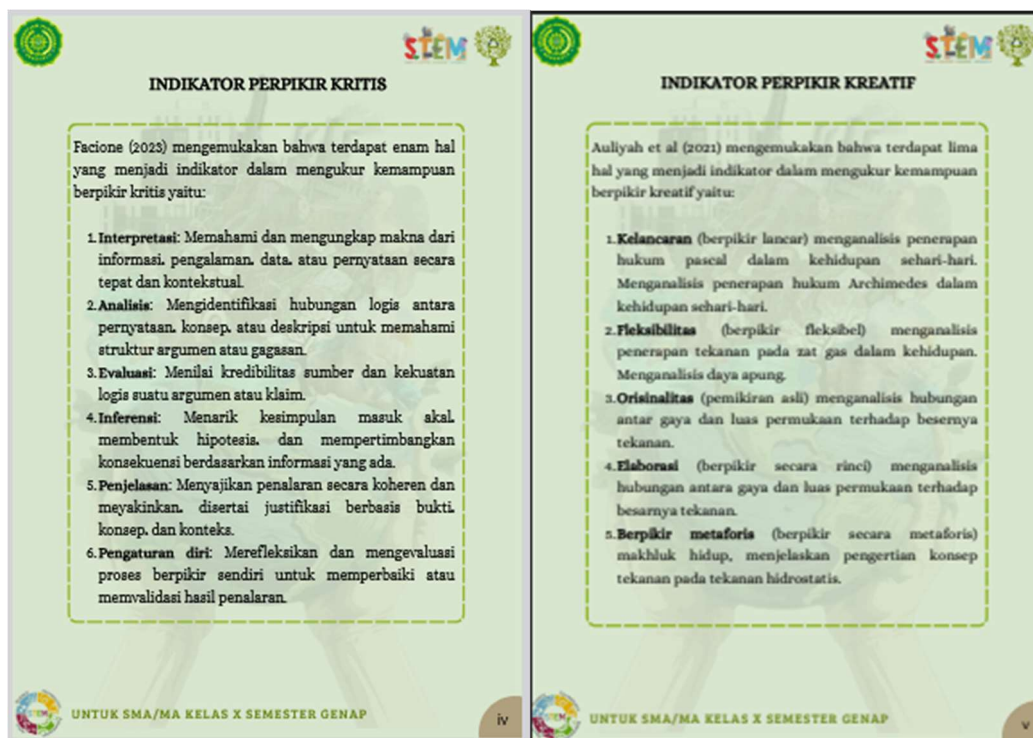
memiliki dasar pengembangan yang jelas dan selaras dengan capaian pembelajaran. Dengan adanya kisi-kisi tersebut, instrumen evaluasi menjadi lebih sistematis, terukur, dan mampu merepresentasikan aspek kognitif tingkat tinggi yang menjadi fokus dalam pembelajaran Eco-STEM.

Tabel 4.4 Validasi II Konten

Nilai	Interval	Kategori
96%	81%–100%	Sangat Valid

Hasil penilaian Validator II menunjukkan skor 72 dari skor maksimal 75 dengan persentase kevalidan sebesar 96% dan berada pada kategori sangat valid. Validasi ini dilakukan setelah e-modul direvisi berdasarkan masukan dari Validator I. Penilaian difokuskan pada kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, ketepatan konsep ilmiah, kedalaman pembahasan, keterpaduan unsur STEM dalam proyek lingkungan, kelengkapan kisi-kisi soal, serta keselarasan evaluasi dengan indikator berpikir kritis dan kreatif.

Pada tahap validasi sebelumnya, Validator II melihat bahwa indikator keterampilan berpikir kritis dan kreatif pada bagian evaluasi belum dirumuskan. Oleh karena itu, pada tahap revisi peneliti menambahkan indikator berpikir kritis dan kreatif yang terintegrasi dalam tujuan pembelajaran. Hasil penilaian validator II beserta rincian skor penilaian disajikan secara lengkap pada lampiran 5. Angket Validasi Konten.



Sesudah

Gambar 15. Indikator berpikir kritis dan kreatif

Validasi oleh Validator II (ahli konten) dilakukan setelah e-modul direvisi berdasarkan masukan dari Validator I. Sebelum dilakukan perbaikan, e-modul belum memuat indikator kemampuan berpikir kritis dan kreatif secara eksplisit, sehingga pengukuran kemampuan berpikir tingkat tinggi belum terstruktur secara sistematis. Selain itu, keterkaitan antara capaian pembelajaran, aktivitas proyek, dan instrumen evaluasi masih perlu diperjelas.

Berdasarkan saran validator, dilakukan penambahan indikator berpikir kritis dan kreatif yang dirumuskan secara operasional serta disertai dengan kisi-kisi soal. Penilaian Validator II difokuskan pada kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, ketepatan konsep ilmiah, kedalaman pembahasan, serta keterpaduan

unsur STEM dalam proyek lingkungan. Validator II menilai bahwa penyederhanaan pada bagian proyek Eco-Enzyme sudah tepat karena membuat kegiatan lebih terarah dan relevan dengan kompetensi yang dituju.

Validasi konten ini bertujuan menilai kesesuaian materi dalam e-modul berbasis Eco-STEM dengan Capaian Pembelajaran (CP), tujuan pembelajaran, akurasi ilmiah, kedalaman konsep, keterpaduan unsur sains, teknologi, rekayasa, dan matematika, serta relevansi proyek lingkungan dalam menstimulasi kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik SMA. Penilaian dilakukan oleh dua orang ahli konten menggunakan instrumen validasi yang memuat 15 aspek dengan rentang skala 1–5.

Tabel 4.5 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

Berdasarkan tabel 4.5 diketahui bahwa total keseluruhan rekapitulasi validasi konten oleh dua ahli yaitu 92% yang berada pada kategori sangat valid. Secara keseluruhan, hasil validasi dua ahli konten menunjukkan adanya peningkatan kualitas substansi materi setelah proses revisi. E-Modul dinyatakan sangat layak dari aspek isi dan dapat dilanjutkan ke tahap uji coba untuk mengukur kepraktisan serta efektivitasnya dalam menstimulasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif peserta didik SMA. Hasil rekapitulasi

validasi konten oleh para ahli tersebut disajikan secara lengkap pada lampiran 7. Analisis Data Validasi penelitian.

b) Validasi Media

Validasi media dilakukan untuk menilai kelayakan e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan dari aspek desain tampilan, kualitas teknis dan visual, konsistensi tata letak, navigasi, keterbacaan, interaktivitas, serta keterpaduan unsur STEM dalam format digital.

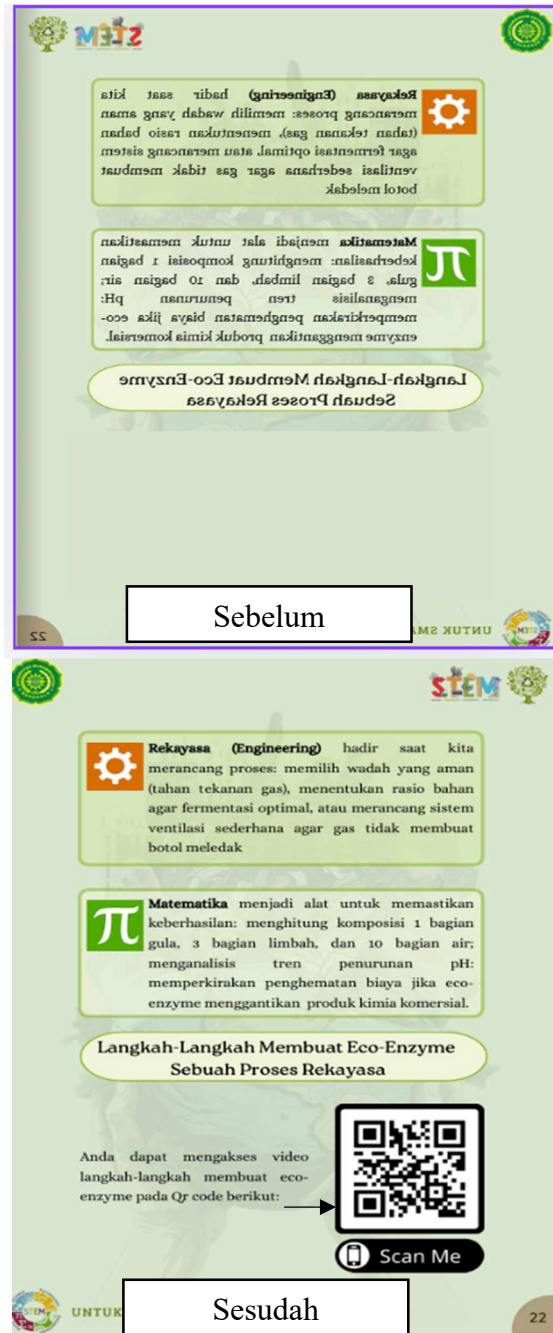
Penilaian dilakukan oleh tiga orang ahli media menggunakan instrumen validasi yang terdiri atas 12 aspek penilaian dengan skala 1–5. Hasil validasi media disajikan sebagai berikut.

Tabel 4.6 Hasil Validasi I Media

Nilai	Interval	Kategori
95%	81%–100%	Sangat Valid

Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan oleh Validator I sebagai ahli media, e-modul memperoleh skor total sebesar 57 dengan persentase validitas 95% dan termasuk dalam kategori sangat valid. Penilaian difokuskan pada aspek desain tampilan, kualitas teknis dan visual, konsistensi tata letak, navigasi, serta keterpaduan unsur STEM dalam e-modul terintegrasi proyek lingkungan. Meskipun telah memenuhi kriteria sangat valid, validator memberikan beberapa saran perbaikan untuk meningkatkan kualitas interaktivitas dan kekayaan media pembelajaran. Salah satu masukan utama adalah belum tersedianya video pembelajaran yang ditampilkan secara langsung dalam e-

modul. Pada versi awal, materi hanya disajikan dalam bentuk teks, gambar, dan penugasan proyek tanpa dukungan media audiovisual. Hasil penilaian validator media I beserta rincian skor dan saran perbaikan disajikan secara lengkap pada lampiran 6. Angket Validasi Media.



Gambar 16. Perbaikan dari validator media I

Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan oleh Validator I sebagai ahli media, penilaian difokuskan pada aspek desain tampilan, kualitas teknis dan visual, konsistensi tata letak, navigasi, serta keterpaduan unsur STEM dalam e-modul terintegrasi proyek lingkungan. Validasi ini dilakukan pada versi awal produk sebelum dilakukan penyempurnaan fitur multimedia. Pada tahap ini, kode QR yang disertakan dalam modul berfungsi untuk mengakses langkah-langkah atau proses pembuatan eco-enzyme sebagai panduan visual dalam pelaksanaan proyek.


Menindaklanjuti saran tersebut, peneliti menambahkan video pembelajaran yang relevan dengan materi dan proyek lingkungan. Video disematkan dalam e-modul atau dihubungkan melalui tautan aktif agar mudah diakses siswa. Penambahan ini bertujuan memperjelas konsep, meningkatkan daya tarik pembelajaran, serta memperkuat integrasi aspek sains dan teknologi dalam pendekatan eco-STEM.

Tabel 4.7 Hasil Validasi II Media

Nilai	Interval	Kategori
100%	81%–100%	Sangat Valid

Berdasarkan hasil validasi oleh Validator II sebagai ahli media, e-modul memperoleh skor total sebesar 60 dengan persentase validitas 100% dan termasuk kategori sangat valid. Validasi ini dilakukan setelah e-modul mengalami revisi berdasarkan masukan sebelumnya.

Meskipun memenuhi kriteria yang sangat valid, validator menyarankan beberapa perbaikan untuk meningkatkan kualitas interaktivitas e-modul. Salah satu masukan utama adalah bahwa sebelum perbaikan, e-modul hanya dapat berupa QR yang hanya dapat discan, tetapi setelah perbaikan, QR dapat diklik langsung dan dapat mengakses semua QR yang ada. Hasil penilaian validator II beserta rincian skor penilaian disajikan secara lengkap pada lampiran 6. Angket Validasi Media.




E. Penilaian Diri


Nama : _____

Kelas : _____

Materi : Pencemaran Lingkungan (Dampak & Solusi)

Tanggal : _____




SCAN ME


Berilah tanda centang (✓) pada pernyataan yang paling sesuai dengan dirimu, lalu jawab pertanyaan refleksi di akhir.

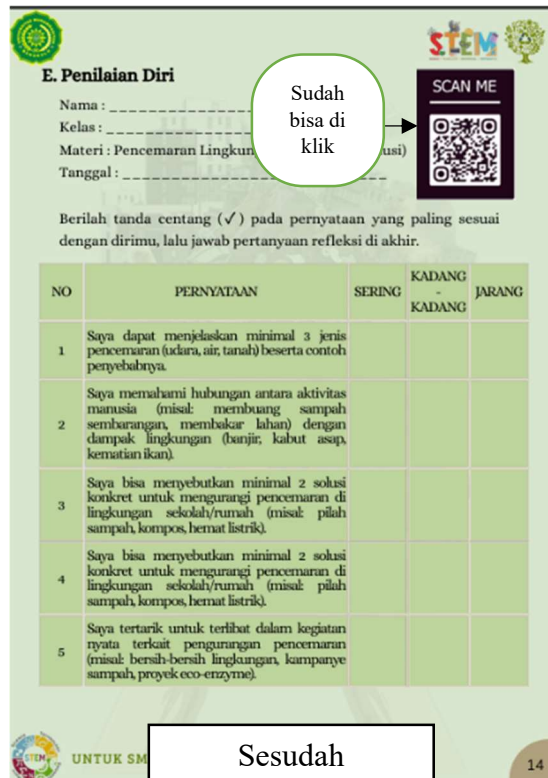
NO	PERNYATAAN	SERING	KADANG - KADANG	JARANG
1	Saya dapat menjelaskan minimal 3 jenis pencemaran (udara, air, tanah) beserta contoh penyebabnya.			
2	Saya memahami hubungan antara aktivitas manusia (misal: membuang sampah sembarangan, membakar lahan) dengan dampak lingkungan (banjir, kabut asap, kematian ikan).			
3	Saya bisa menyebutkan minimal 2 solusi konkret untuk mengurangi pencemaran di lingkungan sekolah/rumah (misal: pilah sampah, kompos, hemat listrik).			
4	Saya bisa menyebutkan minimal 2 solusi konkret untuk mengurangi pencemaran di lingkungan sekolah/rumah (misal: pilah sampah, kompos, hemat listrik).			
5	Saya tertarik untuk terlibat dalam kegiatan nyata terkait pengurangan pencemaran (misal: bersih-bersih lingkungan, kampanye sampah, proyek eco-enzyme).			

Sebelum



UNTUK

14



Gambar 17. Perbaikan dari validator media II

Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan oleh Validator II sebagai ahli media, penilaian difokuskan pada aspek desain tampilan, kualitas teknis dan visual, konsistensi tata letak, navigasi, keterbacaan, serta keterpaduan e-modul dengan pendekatan STEM terintegrasi proyek lingkungan. Validasi ini dilakukan setelah e-modul mengalami revisi berdasarkan masukan pada tahap sebelumnya, terutama terkait peningkatan interaktivitas dan kemudahan akses fitur digital.

Validator II memberikan apresiasi terhadap perbaikan aspek interaktivitas, terutama pada perubahan kode QR yang sebelumnya harus dipindai menjadi tautan aktif yang dapat langsung diakses. Perubahan ini dinilai meningkatkan efisiensi penggunaan e-modul serta memperkuat karakteristik bahan ajar digital yang responsif dan ramah pengguna. Selain itu, konsistensi desain, kombinasi warna,

serta sistematika penyajian materi dinilai telah selaras dengan prinsip pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi.

Tabel 4.8 Hasil Validasi III Media

Nilai	Interval	Kategori
98%	81%–100%	Sangat Valid

Berdasarkan hasil validasi oleh Validator III sebagai ahli media, e-modul memperoleh skor total sebesar 59 dengan persentase validitas 98% dan termasuk dalam kategori sangat valid.

Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan oleh Validator III sebagai ahli media, diperoleh beberapa masukan terkait aspek interaktivitas dan kelengkapan fasilitas respons pada e-modul berbasis Eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan. Salah satu temuan pada tahap validasi adalah bahwa pada versi awal e-modul belum tersedia ruang pengisian jawaban secara digital yang terintegrasi langsung dalam modul. Kondisi ini dinilai kurang optimal dalam mendukung karakteristik e-modul sebagai bahan ajar berbasis teknologi yang seharusnya memfasilitasi respons siswa secara langsung dan sistematis. Hasil penilaian validator III beserta rincian skor dan saran perbaikan disajikan secara lengkap pada lampiran 6. Angket Validasi Media.

STEM

D. Penugasan
Cermati berbagai gambar perubahan lingkungan di bawah ini:



Gambar 1. Tanah Longsor
Sumber. www.balipost.com



Gambar 2. Banjir
Sumber. www.dailymirror.lk



Gambar 3. Limbah Sampah
Sumber. enivilife.co.id



Gambar 4. Asap Kendaraan
Sumber. aktual.com

1. Sebutkan faktor-faktor yang mengakibatkan perubahan lingkungan pada gambar 1, 2, 3 dan 4!
2. Jelaskan jenis pencemaran yang terjadi pada gambar 3 dan 4!
3. Jelaskan dampak perubahan lingkungan yang terjadi pada peristiwa di gambar 4 serta carilah alternatif penanggulangannya!
4. Dari keempat gambar, manakah yang menurutmu memiliki dampak paling serius terhadap kesehatan manusia dalam jangka panjang? Berikan alasanmu dengan membandingkan dampak langsung dan tidak langsung dari masing-masing gambar. Sertakan juga urutan prioritas penanganannya dan alasannya.



UNTUK SMA

Sebelum

13



D. Penugasan
Cermati berbagai gambar perubahan lingkungan di bawah ini:



Gambar 1. Tanah Longsor
Sumber. www.balipost.com



Gambar 2. Banjir
Sumber. www.dailymirror.lk



Gambar 3. Limbah Sampah
Sumber. enivilife.co.id



Gambar 4. Asap Kendaraan
Sumber. aktual.com

1. Sebutkan faktor-faktor yang mengakibatkan perubahan lingkungan pada gambar 1, 2, 3 dan 4!
2. Jelaskan jenis pencemaran yang terjadi pada gambar 3 dan 4!
3. Jelaskan dampak perubahan lingkungan yang terjadi pada peristiwa di gambar 4 serta carilah alternatif penanggulangannya!
4. Dari keempat gambar, manakah yang menurutmu memiliki dampak paling serius terhadap kesehatan manusia dalam jangka panjang? Berikan alasanmu.



UNTUK SMA

Sesudah

13





Gambar 18. Perbaikan dari validator media III

Menindaklanjuti saran dari validator ahli media, peneliti melakukan perbaikan dengan menambahkan fitur pengisian jawaban

berbasis kode QR pada bagian penugasan. Kode QR tersebut terhubung dengan lembar respons digital sehingga siswa dapat langsung memindai dan mengunggah jawaban mereka secara daring. Penambahan fitur ini tidak hanya meningkatkan aspek teknis dan visual e-modul, tetapi juga memperkuat integrasi unsur teknologi dalam pendekatan Eco-STEM.

Dengan adanya perbaikan tersebut, e-modul dinilai lebih interaktif, sistematis, dan sesuai dengan karakteristik pembelajaran abad ke-21. Produk yang dikembangkan dinyatakan layak untuk digunakan pada tahap uji coba pembelajaran guna menstimulasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa SMA.

Validasi media dilakukan untuk menilai kelayakan e-modul berbasis Eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan dari aspek desain tampilan, kualitas teknis dan visual, konsistensi tata letak, navigasi, keterbacaan, interaktivitas, serta keterpaduan unsur STEM dalam format digital. Penilaian dilakukan oleh tiga orang ahli media menggunakan instrumen yang memuat 12 aspek dengan skala 1–5.

Tabel 4.9 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

Secara keseluruhan, persentase total validasi media sebesar 98% menunjukkan bahwa e-modul sangat layak dari aspek media dan siap digunakan pada tahap uji coba pembelajaran untuk

menstimulasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa SMA. Hasil rekapitulasi validasi konten oleh para ahli tersebut disajikan secara lengkap pada lampiran 7. Analisis Data Validasi penelitian.

2) Uji Kepraktisan

Uji kepraktisan dilakukan untuk mengetahui tingkat kemudahan penggunaan, kejelasan petunjuk, kemenarikan tampilan, keterpaduan kegiatan proyek, serta kebermanfaatan e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan dalam pembelajaran. Uji kepraktisan diukur melalui angket respons peserta didik yang diberikan setelah penggunaan e-modul dalam proses pembelajaran.

a) Respon Peserta didik

1) Uji Coba I/Uji Coba Terbatas

Uji coba I dilakukan dengan melibatkan 36 peserta didik pada satu kelas uji coba yaitu SMA Negeri 2 Kota Bengkulu. Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kepraktisan awal e-modul sebelum diterapkan pada skala yang lebih luas. Setiap item pada angket respons diberi skor minimum 1 dan maksimum 4.

Tabel 4.10 Hasil Penilaian Angket Respons Peserta Didik Uji Coba I

Jumlah Peserta Didik	Skor Total	Skor Maksimal	Persentase (%)	Kategori
36	2782	2880	97%	Sangat Praktis

Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh skor total sebesar 2782 dari skor maksimal 2880 dengan persentase kepraktisan sebesar 97%. Nilai tersebut berada pada interval 81%–100% dengan

kategori Sangat Praktis. Hasil ini menunjukkan bahwa e-modul berbasis eco-STEM yang dikembangkan mudah digunakan, menarik, serta membantu peserta didik dalam memahami materi dan melaksanakan proyek lingkungan secara sistematis. Berdasarkan tanggapan peserta didik, e-modul dinilai memiliki tampilan yang menarik, navigasi yang mudah diakses, petunjuk kegiatan yang jelas, serta fitur interaktif seperti tautan aktif dan QR code yang mendukung pembelajaran berbasis teknologi. Proyek lingkungan yang terintegrasi dengan permasalahan nyata juga membuat peserta didik lebih aktif, kreatif, dan terlibat dalam proses pembelajaran. Dengan demikian, berdasarkan uji coba I, e-modul memenuhi kriteria sangat praktis dan layak dilanjutkan pada tahap uji coba II. Rekapitulasi hasil angket respons peserta didik pada uji coba I disajikan secara lengkap pada lampiran 10. Rekapitulasi Respon Siswa.

2) Uji Coba 2

Uji coba ini dilakukan untuk melihat uji kepraktisan dengan skala yang lebih besar yang dilakukan pada dua kelas di SMA Negeri 4 dan SMA Negeri 7 Kota Bengkulu. Secara keseluruhan, jumlah subjek pada tahap uji coba II sebanyak 104 peserta didik. Angket respons terdiri atas 20 butir pernyataan dengan rentang skor 1–4.

Tabel 4.11 Hasil Penilaian Angket Respons Peserta Didik Uji coba II

Jumlah Responden	Skor Total	Skor Maksimal	Persentase (%)	Kategori
68	5.055	5.440	93%	Sangat Praktis

Nilai persentase sebesar 93% berada pada interval 81%–100% dengan kategori Sangat Praktis. Secara umum, sebagian besar peserta didik memberikan penilaian pada skor tinggi (3 dan 4) di hampir seluruh aspek yang dinilai, meliputi kemudahan penggunaan, kejelasan petunjuk, keterpaduan kegiatan proyek, kemenarikan tampilan, serta kebermanfaatan e-modul dalam membantu pemahaman materi.

Hasil ini menunjukkan bahwa e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan dapat digunakan secara efektif pada skala yang lebih luas. Peserta didik menilai e-modul mudah diakses, sistematis, dan mendorong keterlibatan aktif dalam pembelajaran berbasis proyek. Dengan demikian, berdasarkan hasil uji coba II, e-modul yang dikembangkan memenuhi kriteria sangat praktis dan layak diimplementasikan secara lebih luas dalam pembelajaran di SMA Negeri Kota Bengkulu. Rekapitulasi hasil angket respons peserta didik pada uji coba II disajikan secara lengkap pada lampiran 10. Rekapitulasi Respon Siswa.

b) Respon Guru

Uji kepraktisan tidak hanya melibatkan peserta didik, tetapi juga melibatkan guru sebagai praktisi pembelajaran untuk menilai

kelayakan dan kemudahan penggunaan e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan. Penilaian dilakukan melalui angket respons guru yang terdiri atas 20 aspek dengan rentang skor 1–4.

Aspek yang dinilai meliputi kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, kemudahan implementasi di kelas, kejelasan petunjuk, keterpaduan pendekatan STEM dengan proyek lingkungan, dukungan terhadap pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif, serta kemenarikan dan kebermanfaatan e-modul dalam pembelajaran.

1) Uji Coba I/Uji Coba Terbatas

Uji coba I melibatkan dua orang guru dari SMA Negeri 2 Kota Bengkulu sebagai responden. Hasil rekapitulasi angket respons guru dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.12 Hasil Penilaian Angket Respons Guru Uji Coba I

Jumlah Responden	Skor Total	Skor Maksimal	Persentase (%)	Kategori
2 Guru	153	160	96%	Sangat Praktis

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh skor total sebesar 153 dari skor maksimal 160 dengan persentase rata-rata sebesar 96%. Nilai tersebut berada pada interval 81%–100% dengan kategori Sangat Praktis. Secara rinci, guru pertama memberikan persentase sebesar 96%, sedangkan guru kedua memberikan persentase sebesar 95%.

Hasil ini menunjukkan bahwa e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan telah sesuai dengan kebutuhan

pembelajaran, mudah diimplementasikan dalam proses pembelajaran, serta mendukung pelaksanaan proyek secara sistematis dan kontekstual. Guru juga menilai bahwa e-modul membantu memfasilitasi pembelajaran yang lebih aktif serta mendorong pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif peserta didik. Dengan demikian, berdasarkan respons guru pada uji coba I, e-modul dinyatakan sangat praktis dan layak untuk dilanjutkan pada tahap uji coba II. Rincian hasil angket respons guru pada uji coba I disajikan secara lengkap pada lampiran 11. Rekapitulasi Respon Guru.

2) Uji Coba II

Uji coba II melibatkan empat orang guru dengan masing-masing 2 guru dari SMA Negeri 4 Kota Bengkulu dan dari 2 guru dari SMA 7 Kota Bengkulu. Penilaian dilakukan menggunakan angket dengan 20 butir pernyataan dan rentang skor 1–4.

Tabel 4.13 Hasil Penilaian Angket Respons Guru Uji Coba II

Jumlah Responden	Skor Total	Skor Maksimal	Persentase (%)	Kategori
4 Guru	309	320	97%	Sangat Praktis

Nilai 97% berada pada interval 81%–100% dengan kategori Sangat Praktis. Secara rinci, guru pertama memperoleh persentase 100%, guru kedua 95%, guru ketiga 96%, dan guru keempat 95%. Seluruh responden memberikan penilaian pada kategori sangat praktis. Hasil ini menunjukkan bahwa e-modul berbasis eco-STEM terintegrasi proyek lingkungan sangat mudah digunakan, sistematis,

serta relevan dengan kebutuhan pembelajaran di SMA. Guru menilai e-modul mampu mendukung implementasi pembelajaran berbasis proyek, mempermudah pengelolaan kegiatan kelas, serta meningkatkan keterlibatan aktif peserta didik dalam proses pembelajaran. Dengan demikian, berdasarkan hasil uji coba II dari respons guru, e-modul yang dikembangkan dinyatakan sangat praktis dan layak digunakan secara lebih luas dalam pembelajaran. Rincian hasil angket respons guru pada uji coba II disajikan secara lengkap pada lampiran 11. Rekapitulasi Respon Guru.

5. Tahap Evaluasi (*Evaluation*)

Tahap evaluasi merupakan fase akhir dalam penelitian pengembangan yang berfungsi sebagai mekanisme verifikasi terhadap kualitas, kelayakan, dan efektivitas e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan. Penilaian dilakukan berdasarkan tiga indikator utama pengembangan yaitu:

- 1) Aspek kevalidan diperoleh melalui validasi ahli konten dan ahli media. Validasi ini bertujuan untuk memastikan kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, ketepatan konsep ilmiah, integrasi pendekatan STEM, serta kelayakan tampilan dan sistematika penyajian. Hasil validasi menunjukkan bahwa e-modul berada pada kategori sangat valid, yang berarti secara substansi dan desain telah memenuhi standar kelayakan bahan ajar.
- 2) Aspek kepraktisan diukur melalui angket respons guru dan peserta didik setelah penggunaan e-modul dalam pembelajaran. Hasil

respons menunjukkan kategori sangat praktis, yang mengindikasikan bahwa produk mudah digunakan, sistematis, menarik, serta mendukung aktivitas pembelajaran berbasis proyek secara efektif.

- 3) Aspek keterlaksanaan dan efektivitas ditinjau melalui observasi proses pembelajaran dan analisis hasil belajar. Implementasi e-modul menunjukkan bahwa pembelajaran menjadi lebih terstruktur, kontekstual, dan partisipatif. Peserta didik terlibat aktif dalam kegiatan investigatif, diskusi analitis, serta penyelesaian proyek lingkungan yang menuntut integrasi konsep sains, teknologi, rekayasa, dan matematika.

Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan menghitung persentase skor berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan. Interpretasi dilakukan secara sistematis untuk mengidentifikasi keunggulan, efektivitas penggunaan, serta aspek yang memerlukan penyempurnaan. Saran dari validator dan pengguna dijadikan dasar dalam melakukan revisi akhir produk, sehingga e-modul yang dihasilkan benar-benar siap untuk diimplementasikan secara lebih luas.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan telah memenuhi kriteria sangat valid dan sangat praktis, serta efektif dalam mendukung penguatan keterampilan berpikir kritis, kreatif, kolaboratif, dan komunikatif peserta didik. Temuan ini menegaskan bahwa

pengembangan produk tidak hanya berhasil secara teknis, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kualitas proses pembelajaran.

Dengan demikian, secara akademik dan empiris, e-modul yang dikembangkan layak direkomendasikan sebagai bahan ajar inovatif di tingkat SMA. Produk ini memiliki relevansi teoritis dalam mendukung pembelajaran berbasis STEM dan relevansi praktis dalam menjawab tantangan pembelajaran abad ke-21 yang berorientasi pada pemecahan masalah lingkungan secara berkelanjutan.

B. Pembahasan Hasil Penelitian

1. Proses dan Hasil Pengembangan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan

Proses pengembangan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan dilakukan secara sistematis melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Tahapan tersebut bertujuan menghasilkan bahan ajar yang tidak hanya layak secara isi dan media, tetapi juga mampu memfasilitasi pengembangan kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik secara terstruktur. Integrasi pendekatan STEM terbukti mampu meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi karena pembelajaran menekankan penyelesaian masalah nyata dan penerapan konsep secara kontekstual (Komalasari *et al.*, 2024).

Pada tahap analisis kebutuhan, pembelajaran diarahkan untuk membantu peserta didik memahami fenomena lingkungan secara komprehensif (Novitasari, 2023). Aktivitas dalam e-modul mendorong

siswa melakukan interpretasi terhadap data pencemaran, mengidentifikasi permasalahan, serta memahami makna dari fenomena yang terjadi di lingkungan sekitar. Kemampuan interpretasi merupakan komponen penting dalam berpikir kritis karena berkaitan dengan pemaknaan informasi, pengalaman, dan situasi yang dihadapi (Facione, 2023).

Tahap desain e-modul mengintegrasikan aktivitas STEM dalam bentuk proyek lingkungan yang menuntut keterlibatan aktif peserta didik dalam menganalisis masalah, mengkaji hubungan sebab akibat, serta mengidentifikasi solusi berbasis konsep sains dan teknologi. Aktivitas ini melatih kemampuan analisis peserta didik dalam memahami keterkaitan antara konsep ilmiah, data empiris, serta fenomena nyata. Pembelajaran berbasis proyek diketahui efektif meningkatkan keterampilan analitis dan kemampuan berpikir kritis karena peserta didik terlibat langsung dalam proses pemecahan masalah (Thio *et al.*, 2025).

Selain itu, e-modul dirancang untuk mengembangkan kemampuan evaluasi melalui kegiatan diskusi, pengamatan, dan penilaian terhadap solusi yang diajukan. Peserta didik dilatih menilai kredibilitas informasi, mempertimbangkan bukti, serta menentukan keputusan yang logis. Evaluasi merupakan inti dari berpikir kritis karena berkaitan dengan kemampuan menilai kekuatan argumen dan validitas informasi (Facione, 2023).

Kemampuan inferensi juga dikembangkan melalui aktivitas merumuskan hipotesis, menarik kesimpulan, dan memprediksi dampak dari solusi yang dirancang. Pembelajaran STEM berbasis proyek terbukti

mampu meningkatkan kemampuan siswa dalam menyusun penalaran dan menarik kesimpulan berdasarkan bukti empiris (Komalasari *et al.*, 2024).

Selanjutnya, kemampuan penjelasan difasilitasi melalui kegiatan presentasi hasil proyek dan penyusunan laporan. Peserta didik diminta menjelaskan proses penalaran serta mempertahankan solusi yang dihasilkan secara argumentatif. Kegiatan ini penting karena kemampuan menjelaskan merupakan bentuk konkret dari berpikir kritis yang menuntut penyajian argumen secara logis dan sistematis (Facione, 2023).

Pada aspek pengaturan diri, e-modul menyediakan refleksi pembelajaran yang mendorong peserta didik mengevaluasi proses berpikir, kesalahan, serta strategi yang digunakan dalam menyelesaikan masalah. Kemampuan ini berperan dalam membangun kesadaran metakognitif sehingga siswa mampu mengontrol proses belajar secara mandiri (Facione, 2023).

Selain berpikir kritis, pengembangan e-modul juga diarahkan untuk meningkatkan kemampuan berpikir kreatif. Aktivitas pembelajaran dirancang agar siswa mampu menghasilkan berbagai ide solusi terhadap permasalahan lingkungan. Kemampuan kelancaran dan fleksibilitas dikembangkan melalui kegiatan analisis fenomena lingkungan dari berbagai sudut pandang. Pembelajaran berbasis STEM-project terbukti efektif meningkatkan kreativitas karena memberikan ruang eksplorasi dan eksperimen kepada peserta didik (Widiyono & Ghufon, 2024).

Kemampuan orisinalitas muncul ketika siswa diminta merancang solusi berbasis konsep ilmiah secara mandiri, sedangkan elaborasi

dikembangkan melalui kegiatan pengembangan ide menjadi rencana tindakan yang rinci. Kreativitas siswa meningkat ketika pembelajaran menempatkan mereka sebagai pemecah masalah yang aktif dalam konteks nyata (Purmana *et al.*, 2024).

Secara keseluruhan, hasil pengembangan menunjukkan bahwa e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan mampu menjadi sarana pembelajaran yang relevan dengan tuntutan abad ke-21. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep, tetapi juga mendorong keterampilan berpikir kritis dan kreatif melalui pengalaman belajar yang kontekstual, kolaboratif, dan berbasis pemecahan masalah. Integrasi STEM dan proyek lingkungan menjadikan pembelajaran lebih bermakna karena peserta didik terlibat langsung dalam mengkaji fenomena nyata serta merancang solusi yang aplikatif (Thio *et al.*, 2025).

2. Tingkat Kevalidan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan

Tingkat kevalidan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan pada penelitian ini dianalisis berdasarkan temuan empiris hasil validasi instrumen, validasi desain, validasi ahli media, dan validasi ahli konten. Pembahasan ini menekankan keterkaitan antara data penelitian dengan landasan teoretis pengembangan bahan ajar digital serta prinsip validitas dalam penelitian pengembangan.

Berdasarkan hasil penelitian, seluruh instrumen yang digunakan dalam pengembangan e-modul memperoleh persentase validitas di atas 90%, yaitu lembar validasi ahli media sebesar 98%, lembar validasi ahli

konten sebesar 92%, angket respon peserta didik sebesar 90%, serta angket respon guru sebesar 96%. Temuan ini menunjukkan bahwa instrumen yang digunakan telah memenuhi kriteria sangat valid dan layak digunakan untuk mengukur kualitas produk pengembangan. Validitas instrumen menjadi langkah awal yang penting karena menentukan ketepatan data yang diperoleh dalam proses pengembangan produk pembelajaran (Sugiyono, 2022).

Hasil validasi desain oleh ahli media menunjukkan persentase sebesar 88% dengan kategori sangat valid. Nilai tersebut menunjukkan bahwa e-modul telah memenuhi aspek desain tampilan, kualitas teknis, keterpaduan media dengan pendekatan Eco-STEM, serta kemenarikan visual. Desain visual yang baik menjadi komponen penting dalam bahan ajar digital karena memengaruhi keterbacaan, kenyamanan belajar, serta keterlibatan peserta didik dalam proses pembelajaran berbasis teknologi (Branch, 2020).

Validasi ahli media yang dilakukan secara bertahap oleh tiga validator menunjukkan peningkatan kualitas e-modul setelah dilakukan revisi. Validator pertama memberikan persentase validitas sebesar 95% dengan saran penambahan video pembelajaran untuk memperkuat visualisasi konsep. Setelah revisi dilakukan, validator kedua memberikan penilaian sebesar 100% dengan kategori sangat valid, terutama pada aspek interaktivitas, navigasi, dan kemudahan akses. Validator ketiga memberikan persentase sebesar 98% dengan saran penambahan fitur respons digital melalui kode QR agar siswa dapat mengunggah jawaban secara langsung.

Hasil ini menunjukkan bahwa proses revisi berbasis masukan ahli berperan penting dalam meningkatkan kualitas produk pengembangan (Tessmer, 2019).

Secara keseluruhan, analisis akhir validasi ahli media menunjukkan persentase rata-rata sebesar 98% dengan kategori sangat valid. Hal ini mengindikasikan bahwa e-modul telah memenuhi standar media pembelajaran digital dari aspek tampilan, navigasi, interaktivitas, serta integrasi unsur STEM dalam proyek lingkungan. Media pembelajaran yang valid secara teknis dan visual mampu meningkatkan keterlibatan peserta didik serta mendukung pembelajaran yang lebih efektif dan bermakna (Mayer, 2023).

Pada aspek materi, hasil validasi menunjukkan persentase rata-rata sebesar 92% dengan kategori sangat valid. Validator pertama memberikan nilai 88% dan menyarankan penambahan kisi-kisi soal agar kesesuaian antara indikator pembelajaran, materi, dan evaluasi lebih sistematis. Setelah dilakukan revisi, validator kedua memberikan penilaian sebesar 96% dan menyatakan bahwa materi telah sesuai dengan capaian pembelajaran, ketepatan konsep ilmiah, kedalaman pembahasan, serta keterpaduan pendekatan STEM.

Tingkat validitas materi yang tinggi menunjukkan bahwa e-modul telah memenuhi kriteria kelayakan isi, yaitu kesesuaian materi dengan kurikulum, ketepatan konsep ilmiah, serta keterpaduan dengan tujuan pembelajaran. Validitas isi merupakan indikator utama dalam

pengembangan bahan ajar karena berkaitan langsung dengan kualitas pembelajaran dan pemahaman konsep peserta didik (Nieveen, 2023).

Selain itu, keselarasan materi dengan indikator kemampuan berpikir kritis dan kreatif juga menjadi bagian penting dalam validasi. Soal evaluasi, aktivitas proyek, serta lembar diskusi dirancang untuk melatih kemampuan interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, penjelasan, dan pengaturan diri sebagaimana indikator berpikir kritis, serta kelancaran ide, fleksibilitas, orisinalitas, elaborasi, dan berpikir metaforis pada indikator kreativitas. Keterpaduan ini menunjukkan bahwa e-modul tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi juga pada pengembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Facione, 2023).

Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa proses validasi yang dilakukan secara bertahap memberikan kontribusi nyata terhadap penyempurnaan produk. Revisi yang dilakukan berdasarkan saran validator, seperti perbaikan tata letak, penambahan video, penyempurnaan instruksi proyek, serta penyusunan kisi-kisi evaluasi, memperkuat kualitas e-modul baik dari aspek media maupun materi. Hal ini sejalan dengan prinsip penelitian pengembangan yang menekankan bahwa produk yang valid diperoleh melalui proses evaluasi dan revisi berkelanjutan (Branch, 2020)

Dengan demikian, berdasarkan hasil validasi instrumen, validasi desain, validasi ahli media, dan validasi ahli konten, e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan yang dikembangkan dalam penelitian ini dinyatakan memiliki tingkat kevalidan sangat tinggi. Produk telah memenuhi standar kelayakan isi, konstruk pembelajaran, serta media digital

sehingga layak digunakan dalam pembelajaran untuk menstimulasi kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik SMA.

3. Tingkat Kepraktisan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan

Kepraktisan merupakan indikator penting dalam penelitian pengembangan karena menunjukkan sejauh mana produk mudah digunakan, dipahami, dan diterapkan dalam situasi pembelajaran nyata. E-modul yang praktis tidak hanya mudah dioperasikan, tetapi juga mampu mendukung proses pembelajaran secara efektif, efisien, serta sesuai dengan karakteristik pengguna, baik peserta didik maupun guru.

Berdasarkan hasil uji coba I dan uji coba II, e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan menunjukkan tingkat kepraktisan yang sangat tinggi. Hasil angket respons peserta didik pada uji coba I memperoleh persentase sebesar 97% dengan kategori sangat praktis. Sementara itu, respons guru pada tahap yang sama memperoleh persentase sebesar 96% dengan kategori sangat praktis. Pada uji coba II, tingkat kepraktisan e-modul tetap konsisten tinggi, yaitu 93% berdasarkan respons peserta didik dan 97% berdasarkan respons guru. Temuan ini menunjukkan bahwa e-modul tidak hanya praktis pada skala kecil, tetapi juga stabil digunakan pada skala yang lebih luas.

Tingginya tingkat kepraktisan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor utama. Pertama, e-modul dirancang dengan tata letak yang sistematis dan navigasi yang jelas sehingga memudahkan peserta didik mengikuti alur pembelajaran. Struktur kegiatan yang dimulai dari identifikasi masalah,

eksplorasi konsep, perancangan solusi, hingga refleksi menjadikan proses belajar lebih terarah dan mudah dipahami. Prinsip desain pembelajaran yang terstruktur diketahui mampu meningkatkan keterlibatan peserta didik dan memudahkan proses belajar mandiri (Mayer, 2021).

Kedua, integrasi proyek lingkungan yang kontekstual membuat peserta didik lebih mudah memahami materi karena berkaitan langsung dengan kehidupan sehari-hari. Pembelajaran yang kontekstual terbukti meningkatkan motivasi belajar serta keterlibatan aktif peserta didik dalam proses pembelajaran (Hadi & Nurhayati, 2022). Melalui proyek yang berbasis permasalahan nyata, peserta didik tidak hanya memahami konsep, tetapi juga mengaplikasikan pengetahuan secara langsung dalam bentuk solusi sederhana.

Ketiga, penggunaan media digital interaktif dalam e-modul mendukung fleksibilitas belajar. Fitur navigasi, visualisasi materi, dan integrasi tautan atau kode respons digital memungkinkan peserta didik belajar secara mandiri maupun kolaboratif. Bahan ajar digital yang interaktif terbukti meningkatkan kemudahan penggunaan serta efektivitas pembelajaran karena memberikan pengalaman belajar yang lebih dinamis (Prasetyo & Sari, 2023).

Keempat, e-modul dirancang sesuai dengan karakteristik pembelajaran berbasis STEM yang menekankan eksplorasi, pemecahan masalah, dan rekayasa sederhana. Model pembelajaran STEM secara umum memfasilitasi pengalaman belajar yang aktif dan aplikatif sehingga lebih mudah diterapkan dalam kegiatan kelas (Bybee, 2020). Integrasi unsur

sains, teknologi, rekayasa, dan matematika dalam satu kegiatan proyek membuat pembelajaran lebih terpadu dan mudah dipahami oleh peserta didik.

Respons positif guru juga menunjukkan bahwa e-modul praktis digunakan dalam pembelajaran. Guru menilai bahwa e-modul membantu dalam merancang kegiatan proyek, menyampaikan materi secara sistematis, serta memfasilitasi keterampilan berpikir kritis dan kreatif peserta didik. Ketersediaan panduan penggunaan dan instruksi yang jelas memudahkan guru dalam mengimplementasikan e-modul tanpa memerlukan penyesuaian yang kompleks. Bahan ajar yang praktis umumnya memiliki karakteristik mudah diadaptasi, fleksibel, dan mendukung kegiatan pembelajaran berbasis aktivitas (Arsyad, 2020).

Kepraktisan e-modul juga terlihat dari kemampuan peserta didik mengikuti seluruh tahapan pembelajaran secara mandiri maupun kolaboratif. Peserta didik mampu memahami instruksi, mengerjakan tugas proyek, serta melakukan analisis data tanpa mengalami kesulitan berarti. Hal ini menunjukkan bahwa desain e-modul telah sesuai dengan tingkat perkembangan kognitif peserta didik SMA yang berada pada tahap operasional formal, sehingga mampu berpikir logis dan sistematis (Slavin, 2021).

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa pembelajaran menggunakan e-modul mendorong interaksi aktif antara peserta didik, guru, dan lingkungan belajar. Keterlibatan aktif tersebut menjadi indikator bahwa bahan ajar tidak hanya praktis digunakan, tetapi juga mampu mendukung

pembelajaran yang bermakna. Pembelajaran bermakna terjadi ketika peserta didik terlibat langsung dalam proses eksplorasi, refleksi, dan pemecahan masalah (Novak, 2020).

Secara keseluruhan, tingkat kepraktisan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan berada pada kategori sangat praktis baik pada uji terbatas maupun uji coba II. Hal ini menunjukkan bahwa e-modul mudah digunakan, menarik, sistematis, serta relevan dengan kebutuhan pembelajaran Biologi di SMA. Kepraktisan tersebut juga memperlihatkan bahwa produk yang dikembangkan tidak hanya layak secara teoritis, tetapi juga aplikatif dalam situasi pembelajaran nyata.

Dengan demikian, e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan memiliki potensi tinggi untuk digunakan sebagai bahan ajar digital yang mendukung pembelajaran kontekstual, aktif, dan berorientasi pada pengembangan keterampilan abad ke-21, khususnya kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik. Temuan ini memperkuat bahwa bahan ajar yang dirancang berbasis kebutuhan, kontekstual, serta didukung teknologi digital cenderung memiliki tingkat kepraktisan yang tinggi dan mudah diimplementasikan dalam berbagai konteks pembelajaran.

4. Kepraktisan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan terhadap Kemampuan Berpikir Kritis dan Kreatif Peserta Didik

Kepraktisan e-modul yang ditunjukkan melalui kemudahan penggunaan, kejelasan instruksi, serta kemenarikan tampilan terbukti mendukung proses pengembangan kemampuan berpikir kritis peserta didik.

Berdasarkan indikator berpikir kritis yang dikemukakan oleh (Facione, 2023), aktivitas pembelajaran dalam e-modul telah memfasilitasi proses interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, penjelasan, dan pengaturan diri secara sistematis.

Pada aspek interpretasi, peserta didik mampu memahami makna permasalahan pencemaran lingkungan melalui penyajian kasus kontekstual, gambar, serta data yang disediakan dalam e-modul. Proses ini membantu peserta didik menafsirkan informasi berdasarkan pengalaman dan fenomena nyata di lingkungan sekitar. Selanjutnya, pada aspek analisis, peserta didik dilatih mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara aktivitas manusia dan dampak pencemaran melalui kegiatan observasi, diskusi, dan eksplorasi konsep sains.

Indikator evaluasi terlihat ketika peserta didik menilai efektivitas solusi yang dirancang dalam proyek, seperti pembuatan alat penyaring air atau pengelolaan sampah sederhana. Peserta didik membandingkan hasil percobaan dan mempertimbangkan kelebihan serta keterbatasan solusi yang dikembangkan. Pada tahap inferensi, peserta didik mampu menarik kesimpulan dari data hasil eksperimen serta merumuskan dugaan atau alternatif solusi terhadap permasalahan lingkungan yang dikaji.

Kemampuan penjelasan tercermin dari aktivitas presentasi hasil proyek dan diskusi kelompok, di mana peserta didik menyampaikan alasan pemilihan solusi serta menjelaskan hubungan antara konsep sains dan penerapannya secara logis dan sistematis. Sementara itu, indikator pengaturan diri terlihat pada kegiatan refleksi pembelajaran yang

memungkinkan peserta didik mengevaluasi proses berpikir, menilai hasil kerja, serta memperbaiki strategi penyelesaian masalah yang dilakukan.

Selain kemampuan berpikir kritis, kepraktisan e-modul juga berdampak terhadap berkembangnya kemampuan berpikir kreatif peserta didik. Berdasarkan indikator berpikir kreatif menurut (Auliyah *et al*, 2021), kegiatan proyek dalam e-modul memberikan ruang bagi peserta didik untuk menghasilkan berbagai ide solusi terhadap masalah pencemaran lingkungan. Pada aspek kelancaran, peserta didik mampu mengemukakan banyak gagasan alternatif dalam mengatasi permasalahan lingkungan yang disajikan.

Pada aspek fleksibilitas, peserta didik menunjukkan kemampuan menggunakan berbagai pendekatan dalam menyelesaikan proyek, baik melalui eksperimen, diskusi, maupun analisis data. Indikator orisinalitas tampak pada variasi rancangan solusi yang dihasilkan setiap kelompok, yang menunjukkan adanya ide-ide baru dan berbeda. Selanjutnya, pada aspek elaborasi, peserta didik mampu mengembangkan ide secara rinci melalui perencanaan proyek, pengolahan data, dan penyusunan laporan kegiatan.

Adapun indikator berpikir metaforis terlihat ketika peserta didik mengaitkan konsep ilmiah dengan fenomena kehidupan sehari-hari, misalnya menjelaskan proses pencemaran melalui analogi sederhana yang mudah dipahami. Hal ini menunjukkan kemampuan peserta didik dalam mengonstruksi pemahaman secara kreatif dan kontekstual.

Dengan demikian, kepraktisan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan tidak hanya ditunjukkan oleh kemudahan penggunaan dan respons positif dari peserta didik serta guru, tetapi juga oleh kontribusinya dalam memfasilitasi perkembangan indikator berpikir kritis dan kreatif. Temuan ini menegaskan bahwa e-modul yang dikembangkan tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga efektif secara pedagogis dalam mendukung pembelajaran yang berorientasi pada pengembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi peserta didik.

5. Keunggulan Dan Kelemahan E-Modul Berbasis STEM Terintegrasi Proyek Lingkungan

Kepraktisan e-modul berbasis STEM terintegrasi proyek lingkungan tidak hanya tercermin dari kemudahan penggunaan dan kemenarikan tampilan, tetapi juga dari efektivitasnya dalam meningkatkan kemampuan berpikir peserta didik. Hasil uji paired sample t-test menunjukkan adanya peningkatan signifikan antara nilai pretest dan posttest pada kedua kelas, yang menegaskan efektivitas produk secara empiris (Creswell & Creswell, 2023). Temuan ini memperlihatkan bahwa desain pembelajaran yang sistematis dan berbasis evaluasi mampu memberikan dampak nyata terhadap hasil belajar.

E-modul ini memfasilitasi indikator berpikir kritis meliputi interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, penjelasan, dan pengaturan diri sebagaimana ditegaskan oleh Facione (2023). Melalui penyajian kasus pencemaran lingkungan yang kontekstual dan kegiatan proyek eco enzyme, peserta didik dilatih menganalisis hubungan sebab-akibat, mengevaluasi

efektivitas solusi, menarik kesimpulan berbasis data, serta melakukan refleksi terhadap proses berpikirnya. Proses tersebut sejalan dengan pandangan bahwa pembelajaran berbasis masalah dan kontekstual mampu memperkuat kualitas penalaran dan kesadaran metakognitif peserta didik (Bailin *et al.*, 2021).

Selain itu, e-modul juga berkontribusi terhadap pengembangan kemampuan berpikir kreatif yang mencakup kelancaran, fleksibilitas, orisinalitas, dan elaborasi gagasan. Aktivitas proyek berbasis STEM mendorong peserta didik menghasilkan solusi inovatif melalui eksplorasi bahan, modifikasi desain, dan pengembangan laporan secara sistematis. Hal ini sejalan dengan teori kreativitas kontemporer yang menegaskan bahwa pembelajaran autentik dan kolaboratif mampu menstimulasi kapasitas inovatif peserta didik (Plucker *et al.*, 2022). Integrasi pendekatan STEM dalam konteks lingkungan juga memperkuat keterkaitan multidisipliner yang relevan dengan tantangan abad ke-21.

Keunggulan e-modul ini terletak pada integrasi STEM yang kontekstual, keselarasan antara indikator berpikir tingkat tinggi dan instrumen evaluasi, desain interaktif yang mendukung pembelajaran mandiri, serta efektivitas pedagogis yang terbukti secara statistik. Namun, terdapat beberapa kelemahan, antara lain ketergantungan pada kesiapan perangkat digital dan akses internet, kebutuhan pendampingan guru dalam pengelolaan proyek, serta keterbatasan waktu pembelajaran yang dapat memengaruhi kedalaman eksplorasi materi (Hew *et al.*, 2022). Secara keseluruhan, kepraktisan e-modul ini tidak hanya memenuhi aspek teknis

penggunaan, tetapi juga memiliki landasan teoretis mutakhir dan kontribusi empiris dalam meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik secara signifikan.