SEARCH: Science Education Research Journal
Volume 5, Issue 1, 2026
E-ISSN: 3032-6435
https://doi.org/10.47945/search.v5i1.3543

Developing a Problem Based Interactive E-Module Integrating Zero Waste Principles for Learning About Environmental Change

Nasywa Faya Azzahra*[a], Putu Budi Adnyana[b], Ni Putu Sri Ratna Dewi[b], I Wayan Sukra Warpala[b], Ajeng Purnama Heny[b]

[a]Program Sarjana Pendidikan Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha, Indonesia
[b]Pendidikan Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha, Indonesia;

Email: azzahrafaya@gmail.com

Abstract

Environmental change learning benefits from contextual digital resources. This study developed an interactive e-module integrating Problem Based Learning and zero waste principles, oriented toward environmental literacy, and evaluated its validity and practicality. Development followed the ADDIE model, using local waste problems within problem based learning activities and the 5R principles to guide solution formulation. Instrument content validity coefficients were calculated using Gregory's method, whereas product validity percentages were derived from assessments by two media experts and two subject matter experts. After revisions, practicality was assessed through responses from three biology teachers and 15 Grade 10 students, including three participants in individual trials and 12 in a small group trial. Media and subject matter validity reached 98.53% and 85.14%, respectively, both categorized as highly valid. Subject matter validation comprised five highly valid aspects and two valid aspects, namely curriculum alignment and assessment tasks. Practicality reached 91.67% for teachers, 92.78% for individual trials, and 92.01% for the small group trial, all categorized as highly practical. These findings support consideration of the e-module as a supplementary digital learning resource based on expert assessments and limited user responses. Its effectiveness in improving learning outcomes, problem solving skills, or environmental literacy remains untested.

Article History:
Received: 24/09/2026
Accepted: 28/10/2026

Keyword:
Interactive E-Module, Problem Based Learning, Environmental Literacy, Zero Waste, Environmental Change

PE© 2026 The Authors. This open access article is distributed under a (CC-BY License)

How to Cite:
Faya, N., Adnyana, P. B., Dewi, N. P. S. R., Warpala, I. W. S., & Heny, A. P. (2026). Developing a Problem Based Interactive E-Module Integrating Zero Waste Principles for Learning About Environmental Change . SEARCH: Science Education Research Journal, 5(1), 211–225. https://doi.org/10.47945/search.v5i1.3543

PENDAHULUAN

Data indikatif Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2025 mencatat timbulan sampah sekitar 34,17 juta ton per tahun berdasarkan laporan dari 319 kabupaten/kota di Indonesia. Sementara itu, Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup Provinsi Bali pada tahun 2025 melaporkan bahwa timbulan sampah harian di Bali mencapai sekitar 3,4 ribu ton per hari. Besarnya timbulan sampah tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan sampah merupakan persoalan lingkungan yang perlu mendapat perhatian, termasuk dalam pendidikan. Pada pembelajaran biologi kelas X, persoalan sampah berkaitan dengan materi perubahan lingkungan karena melibatkan aktivitas manusia, pencemaran, dampak terhadap ekosistem, dan upaya penanggulangannya. Oleh karena itu, permasalahan sampah dapat digunakan sebagai konteks untuk menghubungkan konsep biologi dengan fenomena lingkungan nyata.

Pembelajaran perubahan lingkungan tidak hanya menuntut penguasaan konsep, tetapi juga perlu memberi kesempatan kepada peserta didik untuk menganalisis masalah dan mempertimbangkan tindakan yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Kebutuhan tersebut berkaitan dengan literasi lingkungan, yang melibatkan pengetahuan, keterampilan kognitif, sikap,

dan perilaku bertanggung jawab terhadap lingkungan (Spínola, 2020; Anggraini & Nazip, 2022). Khairani *et al*. (2023) menunjukkan bahwa pemanfaatan potensi lokal pada materi perubahan lingkungan dapat mendukung literasi lingkungan melalui pengamatan dan analisis persoalan sekitar. Sementara itu, Maghfiroh dan Kartijono (2024) menemukan bahwa pengetahuan, keterampilan kognitif, dan sikap terkait literasi lingkungan peserta didik di SMA Adiwiyata yang diteliti berada pada kategori sedang. Temuan tersebut menunjukkan relevansi pembelajaran kontekstual sekaligus perlunya aktivitas yang memberi ruang bagi peserta didik untuk mengidentifikasi, menyelidiki, dan merumuskan respons terhadap permasalahan lingkungan.

Salah satu model yang menyediakan struktur aktivitas pemecahan masalah adalah *Problem Based Learning* (PBL), yang menggunakan masalah autentik sebagai titik awal pembelajaran melalui penyelidikan (Savery, 2006). Tahapan PBL meliputi orientasi masalah, pengorganisasian kegiatan belajar, penyelidikan, pengembangan dan penyajian hasil, serta analisis dan evaluasi proses pemecahan masalah (Arends, 2012). Bidahyani *et al*. (2024) melaporkan bahwa penerapan PBL berorientasi kearifan lokal berpengaruh terhadap literasi lingkungan pada materi keanekaragaman hayati. Dalam konteks permasalahan sampah, penyelidikan dapat diarahkan pada prinsip *zero waste* yang menekankan pencegahan timbulan sampah, pengurangan penggunaan sumber daya, pemanfaatan kembali material, dan pengelolaan limbah secara berkelanjutan (Kalle *et al*., 2022). Purwaningsih *et al*. (2023) juga melaporkan pengaruh proyek *zero waste school* terhadap kesadaran keberlanjutan dan keterampilan berpikir kritis. Berbeda dari pendekatan proyek tersebut, penelitian ini menempatkan tahapan PBL sebagai struktur aktivitas pembelajaran, sedangkan prinsip 5R (*refuse*, *reduce*, *reuse*, *recycle*, dan *rot*) digunakan sebagai kerangka pertimbangan untuk mengevaluasi dan merumuskan alternatif solusi berdasarkan hasil penyelidikan, bukan sebagai tahapan pembelajaran tersendiri.

Pengintegrasian aktivitas tersebut ke dalam bahan ajar digital memerlukan kesesuaian antara karakteristik media, pendekatan pembelajaran, dan konteks penggunaannya (Xu, 2024). Pramana *et al*. (2020) mengembangkan e-modul berbasis PBL pada pembelajaran biologi dengan hasil validasi dan uji coba berkualifikasi sangat baik. Anggyani *et al*. (2023) mengembangkan e-modul berbasis literasi lingkungan pada materi ekosistem untuk peserta didik SMP, sedangkan Zahrani *et al*. (2024) melaporkan peningkatan literasi lingkungan melalui penggunaan e-modul berbasis *socio-scientific issues* pada materi perubahan lingkungan. Kajian tersebut memperlihatkan bahwa e-modul telah dikembangkan melalui berbagai model dan orientasi. Namun, fokus studi yang dikaji berbeda dalam pendekatan, materi, jenjang pendidikan, dan aspek penilaian, sehingga keterpaduan fungsi PBL, konteks pengelolaan sampah, dan orientasi literasi lingkungan dalam rancangan aktivitas e-modul masih perlu dikaji secara khusus.

Selain struktur aktivitas, penyajian e-modul perlu memperhatikan proses pengolahan informasi peserta didik. *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML) digunakan sebagai landasan pengorganisasian informasi verbal dan visual (Mayer, 2021). Prinsip *multimedia* diterapkan melalui teks dan gambar yang saling mendukung, sedangkan *coherence* melalui pembatasan elemen yang tidak relevan. Prinsip *signaling* diwujudkan melalui judul, penanda visual, dan petunjuk tahapan PBL. *Segmenting* diterapkan melalui pembagian materi dan aktivitas secara bertahap, serta *personalization* melalui bahasa instruksional yang komunikatif. Prinsip *temporal contiguity* diakomodasi melalui video yang menyajikan narasi lisan bersamaan dengan visual yang berkaitan. Penerapan prinsip-prinsip tersebut merupakan pertimbangan dalam perancangan multimedia, bukan bukti bahwa e-modul meningkatkan pemahaman peserta didik.

Kebutuhan pengembangan e-modul tersebut diperkuat oleh studi pendahuluan di SMA Negeri 4 Singaraja. Angket terhadap 75 peserta didik kelas X menunjukkan bahwa 90,7% responden menyebut *PowerPoint* sebagai media yang paling sering digunakan guru, sedangkan 98,7%

menyatakan membutuhkan bahan ajar digital dengan fitur interaktif. Selain itu, 70,7% peserta didik belum pernah mendengar istilah *zero waste* dan hanya 24% menyatakan secara konsisten melakukan kegiatan pengelolaan sampah. Wawancara dengan guru menunjukkan bahwa pembelajaran telah dikaitkan dengan persoalan lingkungan nyata dan menerapkan pendekatan berbasis masalah. Namun, pembelajaran tersebut belum didukung bahan ajar digital yang secara sistematis memandu keterkaitan antara permasalahan kontekstual, penyelidikan, perumusan solusi, dan refleksi. Kondisi ini menunjukkan kebutuhan terhadap bahan ajar interaktif yang mengorganisasikan aktivitas pemecahan masalah secara terstruktur.

Berdasarkan sintesis penelitian terdahulu dan kebutuhan lapangan, kesenjangan penelitian ini bukan semata-mata belum digabungkannya beberapa pendekatan dalam satu produk. Pada penelitian yang dikaji, belum tampak uraian terperinci mengenai rancangan e-modul interaktif pada materi perubahan lingkungan kelas X yang menghubungkan kasus sampah lokal sebagai pemantik PBL dan prinsip *zero waste* 5R sebagai dasar evaluasi serta perumusan alternatif solusi. Selain itu, orientasi literasi lingkungan perlu diterjemahkan ke dalam aktivitas yang dapat diidentifikasi secara jelas dalam produk. Oleh karena itu, diperlukan rancangan bahan ajar yang memperlihatkan keterkaitan fungsional antara tahapan pembelajaran, konteks permasalahan, kerangka solusi, dan orientasi literasi lingkungan.

Penelitian ini menawarkan kontribusi praktis berupa e-modul interaktif yang menyatukan komponen-komponen tersebut dalam satu alur pemecahan masalah. Kasus sampah lokal digunakan untuk mengawali penyelidikan, LKPD digital memandu analisis penyebab dan dampak, prinsip 5R mengarahkan evaluasi serta perumusan solusi, dan kegiatan penyajian hasil serta refleksi melengkapi tahapan PBL. Literasi lingkungan dioperasionalkan sebagai orientasi penyusunan materi dan aktivitas. Pada komponen pengetahuan difasilitasi melalui konsep perubahan lingkungan dan pengelolaan sampah, keterampilan kognitif melalui identifikasi masalah, penyelidikan, analisis, dan perumusan solusi. Sikap melalui refleksi tentang kepedulian dan tanggung jawab terhadap lingkungan. Komponen perilaku dibatasi pada pertimbangan alternatif tindakan pengelolaan sampah, tanpa pengamatan terhadap perilaku nyata. Dengan demikian, kekhasan produk terletak pada keterpaduan fungsi komponen pembelajaran, sedangkan tingkat maupun peningkatan literasi lingkungan peserta didik tidak diukur dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan e-modul interaktif berbasis *Problem Based Learning* berorientasi literasi lingkungan dengan konteks *zero waste* pada materi perubahan lingkungan kelas X melalui model ADDIE. Secara khusus, penelitian ini mendeskripsikan hasil analisis kebutuhan dan rancangan produk, menilai validitas berdasarkan penilaian ahli media dan ahli materi, menilai kepraktisan berdasarkan respons guru dan peserta didik melalui uji coba terbatas, serta mendeskripsikan evaluasi formatif pada setiap tahap pengembangan. Penelitian berfokus pada validitas dan kepraktisan produk, bukan pada pengujian efektivitas terhadap hasil belajar atau literasi lingkungan peserta didik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan (*Research and Development*) yang bertujuan menghasilkan e-modul interaktif berbasis *Problem Based Learning* (PBL) berorientasi literasi lingkungan dengan konteks *zero waste* pada materi perubahan lingkungan kelas X yang memenuhi kriteria validitas dan kepraktisan. Pengembangan produk menggunakan model ADDIE yang terdiri atas lima tahap, yaitu *Analysis*, *Design*, *Development*, *Implementation*, dan *Evaluation*. Model ADDIE dipilih karena menyediakan prosedur pengembangan pembelajaran yang sistematis, mulai dari analisis kebutuhan hingga evaluasi untuk penyempurnaan produk (Branch, 2009). Penelitian difokuskan pada pengembangan produk dan uji kepraktisan terbatas, bukan pengujian efektivitas

pembelajaran.

Penelitian dilaksanakan di SMA Negeri 4 Singaraja dengan melibatkan ahli dan pengguna produk. Studi pendahuluan melibatkan 75 peserta didik kelas X untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran. Penilaian rancangan melalui *storyboard* dilakukan oleh dua ahli di bidang media pembelajaran yang juga berperan sebagai validator ahli media pada produk e-modul, sedangkan validasi materi dilakukan oleh dua ahli di bidang Biologi. Uji kepraktisan melibatkan tiga guru Biologi yang dipilih berdasarkan keterlibatannya dalam pembelajaran Biologi kelas X. Uji perorangan melibatkan tiga peserta didik dengan kemampuan akademik tinggi, sedang, dan rendah. Uji kelompok kecil melibatkan dua belas peserta didik, terdapat empat orang pada setiap kategori kemampuan akademik. Pemilihan peserta didik untuk uji coba dilakukan secara purposif dengan mempertimbangkan nilai tugas dan ulangan harian Biologi serta pertimbangan guru mata pelajaran, untuk memperoleh tanggapan kepraktisan dari pengguna dengan karakteristik yang beragam.

Pengumpulan data dilakukan menggunakan pedoman wawancara, angket kebutuhan peserta didik, lembar penilaian *storyboard*, instrumen validasi ahli media, instrumen validasi ahli materi, serta angket respons guru dan peserta didik. Wawancara guru dan angket kebutuhan digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi serta kebutuhan pembelajaran. Lembar penilaian *storyboard* memuat 11 indikator yang mencakup spesifikasi produk, sistematika materi, alur pembelajaran, integrasi sintaks PBL, kesesuaian aktivitas, kelengkapan komponen, interaktivitas, dan evaluasi. Instrumen ahli media sebanyak 34 butir menilai aspek tampilan, navigasi dan interaktivitas, penerapan prinsip multimedia, kemudahan pemanfaatan, serta kelengkapan e-modul. Instrumen ahli materi versi akhir sebanyak 35 butir menilai kesesuaian kurikulum, kelayakan isi, integrasi PBL, keterpaduan konsep *zero waste*, orientasi literasi lingkungan, dan evaluasi pembelajaran. Angket respons guru sebanyak 28 butir dan peserta didik sebanyak 24 butir digunakan untuk memperoleh data kepraktisan berdasarkan pengalaman penggunaan produk.

Sebelum digunakan, instrumen validasi ahli media, ahli materi, respons guru, dan respons peserta didik diuji validitas isinya oleh ahli menggunakan teknik Gregory. Penilaian dilakukan terhadap 34 butir instrumen ahli media, 36 butir instrumen ahli materi pada versi awal, 28 butir angket respons guru, dan 24 butir angket respons peserta didik. Setiap validator menilai relevansi butir secara dikotomis berdasarkan dua kategori, yaitu relevan dan tidak relevan. Hasil penilaian ditabulasikan dalam matriks 2 × 2 yang terdiri atas A (jumlah butir yang dinilai tidak relevan oleh kedua validator), B (jumlah butir yang dinilai relevan oleh validator pertama dan tidak relevan oleh validator kedua), C (jumlah butir yang dinilai tidak relevan oleh validator pertama dan relevan oleh validator kedua), serta D (jumlah butir yang dinilai relevan oleh kedua validator). Koefisien validitas isi Gregory (KGV) dihitung menggunakan rumus KGV=D/(A+B+C+D).

Instrumen ahli materi yang awalnya terdiri atas 36 butir disempurnakan menjadi 35 butir berdasarkan masukan validator. Koefisien Gregory yang dilaporkan mengacu pada hasil penilaian instrumen awal sebanyak 36 butir, bukan hasil penilaian terhadap instrumen akhir. Hasil perhitungan diinterpretasikan berdasarkan kriteria Gregory (2013), yaitu 0,81–1,00 (sangat valid), 0,61–0,80 (valid), 0,41–0,60 (cukup valid), 0,21–0,40 (kurang valid), dan 0,00–0,20 (tidak valid). Koefisien tersebut memberikan bukti validitas isi berdasarkan kesepakatan relevansi butir oleh ahli, bukan bukti reliabilitas maupun validitas konstruk instrumen.

Prosedur pengembangan mengikuti lima tahap ADDIE. Tahap *Analysis* mencakup analisis kebutuhan, karakteristik peserta didik, kurikulum, serta sarana dan prasarana pembelajaran sebagai dasar pengembangan produk. Tahap *Design* meliputi penyusunan tujuan pembelajaran, struktur materi, aktivitas berdasarkan lima sintaks PBL, integrasi prinsip *zero waste* 5R (*refuse*, *reduce*, *reuse*, *recycle*, dan *rot*) sebagai kerangka perumusan alternatif solusi, serta perancangan fitur interaktif dan penyajian multimedia berdasarkan prinsip *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML).

Rancangan dituangkan dalam *storyboard* dan dinilai oleh dua ahli sebagai dasar penyempurnaan desain. Pada tahap *Development*, e-modul dikembangkan dengan memanfaatkan *Canva* untuk desain visual dan pengorganisasian materi, sedangkan *Heyzine* digunakan untuk penyajian digital interaktif. Produk selanjutnya divalidasi oleh dua ahli media dan dua ahli materi. Hasil penilaian dan saran validator digunakan sebagai dasar revisi produk, termasuk penyempurnaan aspek yang memperoleh masukan perbaikan sebelum pelaksanaan uji kepraktisan.

Tahap *Implementation* dilaksanakan melalui uji kepraktisan terbatas terhadap e-modul yang telah direvisi berdasarkan hasil validasi ahli. Uji coba melibatkan tiga guru Biologi serta peserta didik dalam uji perorangan dan kelompok kecil. Setelah menggunakan produk, responden memberikan penilaian melalui angket untuk memperoleh informasi mengenai kemudahan penggunaan, kejelasan petunjuk, keterbacaan, interaktivitas, dan kepraktisan e-modul. Implementasi ini bertujuan menilai kepraktisan penggunaan produk, bukan menguji efektivitasnya terhadap hasil belajar atau peningkatan literasi lingkungan. Tahap *Evaluation* dilakukan secara formatif dengan menelaah hasil analisis kebutuhan pada tahap *Analysis*, penilaian rancangan pada tahap *Design*, hasil validasi dan revisi pada tahap *Development*, serta tanggapan pengguna pada tahap *Implementation*. Hasil evaluasi pada setiap tahap digunakan sebagai dasar penyempurnaan hingga diperoleh produk akhir.

Data penelitian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif. Data angket kebutuhan peserta didik dianalisis melalui frekuensi dan persentase jawaban, sedangkan hasil wawancara dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran. Data penilaian *storyboard*, validitas produk, dan kepraktisan dianalisis menggunakan skala penilaian 1–5 yang mengacu pada Sugiyono (2025), yaitu 1 (sangat kurang), 2 (kurang), 3 (cukup), 4 (baik), dan 5 (sangat baik). Skor seluruh butir dari penilai pada masing-masing kelompok dijumlahkan, kemudian dibandingkan dengan skor maksimum ideal yang diperoleh dari perkalian jumlah butir, jumlah penilai, dan skor maksimum 5. Persentase pencapaian dihitung menggunakan rumus $P=\sum X/\sum X_{max}$, dengan P adalah presentase pencapaian (%), $\sum X$ merupakan jumlah skor yang diperoleh serta skor maksimum ideal.

Persentase validitas rancangan dan produk serta kepraktisan diinterpretasikan menggunakan interval yang diadaptasi dari Riduwan (2015), yaitu 81–100% (sangat valid atau sangat praktis), 61–80% (valid atau praktis), 41–60% (cukup valid atau cukup praktis), 21–40% (kurang valid atau kurang praktis), dan 0–20% (tidak valid atau tidak praktis). Data kualitatif berupa hasil wawancara, komentar, dan saran validator maupun pengguna dianalisis secara deskriptif sebagai dasar revisi dan penyempurnaan e-modul.

Penelitian dilaksanakan setelah memperoleh persetujuan pihak sekolah sebagai lokasi penelitian. Data responden digunakan untuk kepentingan penelitian dengan menjaga kerahasiaan informasi yang diperoleh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum penilaian produk, validitas isi instrumen diperiksa menggunakan teknik Gregory. Hasil penilaian menunjukkan bahwa instrumen ahli media (34 butir), angket respons guru (28 butir), dan angket respons peserta didik (24 butir) masing-masing memperoleh koefisien 1,00, dengan seluruh butir disepakati relevan oleh kedua ahli. Instrumen ahli materi memperoleh koefisien 0,94 berdasarkan penilaian awal terhadap 36 butir, yang terdiri atas 34 butir dengan kesepakatan relevan (D = 34) dan dua butir dengan perbedaan penilaian (B = 2; A = 0; C = 0). Seluruh koefisien termasuk kategori sangat valid berdasarkan kriteria yang digunakan. Masukan validator selanjutnya menjadi dasar penyempurnaan instrumen ahli materi menjadi 35 butir.

Rancang Bangun dan Karakteristik E-Modul Interaktif

Penelitian ini menghasilkan e-modul interaktif berbasis *Problem Based Learning* (PBL) berorientasi literasi lingkungan dengan konteks *zero waste* pada materi perubahan lingkungan kelas X melalui model ADDIE. Pada tahap *Analysis*, studi pendahuluan terhadap 75 peserta didik menunjukkan bahwa 80% responden masih mengalami kesulitan memahami materi Biologi, meskipun tidak selalu terjadi selama pembelajaran. Sebanyak 90,7% responden menyatakan *PowerPoint* sebagai media yang paling sering digunakan, sementara 98,7% mengharapkan bahan ajar digital dengan fitur interaktif. Sebanyak 70,7% responden juga belum mengenal istilah *zero waste*, sehingga prinsip 5R diperkenalkan melalui permasalahan sampah yang dekat dengan kehidupan mereka. Hasil wawancara guru menunjukkan bahwa media dan contoh permasalahan lingkungan nyata telah digunakan, tetapi belum tersedia bahan ajar digital yang secara sistematis mengorganisasikan aktivitas pemecahan masalah dalam konteks pengelolaan sampah. Ketersediaan perangkat digital peserta didik dan akses internet sekolah menjadi faktor pendukung pengembangan e-modul.

Pada tahap *Design*, disusun tujuan pembelajaran, struktur materi, aktivitas berdasarkan lima sintaks PBL, serta rancangan multimedia, lembar kerja, dan evaluasi yang dituangkan dalam *storyboard*. Permasalahan sampah kontekstual digunakan sebagai stimulus pembelajaran, sedangkan prinsip *zero waste* 5R (*refuse*, *reduce*, *reuse*, *recycle*, dan *rot*) diintegrasikan sebagai kerangka penyusunan alternatif solusi. Rancangan awal dinilai oleh dua ahli melalui sebelas indikator yang mencakup spesifikasi produk, sistematika materi dan alur pembelajaran, integrasi PBL, kesesuaian dengan capaian pembelajaran, tampilan, kelengkapan komponen, interaktivitas, serta evaluasi.

Penilaian *storyboard* memperoleh skor 108 dari skor maksimum 110 atau 98,18% dengan kategori sangat valid. Sembilan dari sebelas indikator memperoleh skor maksimum dari kedua ahli, sedangkan indikator kelogisan urutan materi dan alur pembelajaran serta kejelasan petunjuk penggunaan memperoleh satu penilaian dengan skor 4 dari 5. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rancangan memperoleh penilaian tinggi, tetapi sistematika penyajian dan petunjuk penggunaan masih memerlukan penyempurnaan.

Pada tahap *Development*, rancangan direalisasikan menjadi e-modul interaktif menggunakan *Canva* untuk desain dan pengorganisasian konten visual serta *Heyzine* untuk penyajian digital interaktif. E-modul terdiri atas tiga bagian utama, yaitu pendahuluan, kegiatan pembelajaran, dan penutup. Bagian pendahuluan memuat petunjuk penggunaan, tujuan pembelajaran, alur PBL, dan peta konsep. Bagian kegiatan pembelajaran menyajikan materi perubahan lingkungan, gambar, video, kasus kontekstual, serta Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) digital. Bagian penutup memuat evaluasi pemahaman, rangkuman, glosarium, dan daftar pustaka.

Penerapan lima sintaks PBL diwujudkan melalui orientasi pada kasus sampah lokal di Singaraja, pengorganisasian kegiatan kelompok, penyelidikan melalui LKPD digital, pengembangan dan penyajian alternatif solusi berdasarkan prinsip 5R, serta refleksi dan evaluasi pemecahan masalah. Orientasi literasi lingkungan difasilitasi melalui penyajian pengetahuan lingkungan, analisis penyebab dan dampak permasalahan, pertimbangan tindakan peduli lingkungan, serta refleksi mengenai tanggung jawab pengelolaan lingkungan.

Setelah penilaian ahli media dan materi, produk direvisi berdasarkan masukan validator sebelum digunakan dalam uji kepraktisan terbatas pada tahap *Implementation*. Evaluasi formatif dilakukan sepanjang pengembangan sebagai dasar penyempurnaan e-modul.

Validitas E-Modul Interaktif

Uji validitas produk E-modul interaktif dilakukan oleh dua ahli media dan ahli materi. Rekapitulasi hasil validasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Validasi E-Modul Interaktif Berdasarkan Aspek Penilaian

Komponene Aspek	Skor	Presentase (%)	Kategori
Ahli Media			
Tampilan/desain visual	96/100	96,00	Sangat Valid
Navigasi dan interaktivitas	50/50	100,00	Sangat Valid
Keterbacaan	39/40	97,50	Sangat Valid
Prinsip Multimedia	50/50	100,00	Sangat Valid
Kepraktisan dan pemanfaatan media	40/40	100,00	Sangat Valid
Kelengkapan E-modul	60/60	100,00	Sangat Valid
Total ahli media	335/340	98,53	Sangat Valid
Ahli Materi			
Kesesuaian kurikulum	31/40	77,50	Valid
Pembelajaran berbasis PBL	69/80	86,25	Sangat Valid
Keterpaduan konsep *zero waste*	46/50	92,00	Sangat Valid
Kelayakan isi/materi	53/60	88,33	Sangat Valid
Orientasi literasi lingkungan	33/40	82,50	Sangat Valid
Evaluasi/tugas	40/50	80,00	Valid
Rangkuman	26/30	86,67	Sangat Valid
Total ahli materi	298/350	85,14	Sangat Valid

Berdasarkan Tabel 1, validasi ahli media memperoleh persentase keseluruhan sebesar 98,53% dengan kategori sangat valid. Empat dari enam aspek memperoleh skor maksimum, sedangkan aspek tampilan/desain visual (96,00%) dan keterbacaan (97,50%) juga termasuk kategori sangat valid. Sementara itu, validasi ahli materi memperoleh persentase keseluruhan sebesar 85,14% dengan kategori sangat valid. Terdapat lima aspek memperoleh kategori sangat valid, dengan persentase tertinggi pada keterpaduan konsep *zero waste* sebesar 92,00%. Dua aspek lainnya memperoleh kategori valid, kesesuaian kurikulum sebesar 77,50% dan evaluasi/tugas 80,00%.

Selain penilaian kuantitatif, validator memberikan masukan mengenai penyajian media, kesesuaian materi, dan rancangan pembelajaran. Seluruh masukan tersebut telah ditindaklanjuti sebelum uji kepraktisan. Ringkasan masukan dan hasil revisi produk disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.Ringkasan Revisi E-Modul Berdasarkan Masukan Validator

Aspek/Bagian	Masukan validator	Tindakan revisi	Hasil revisi
Ahli Media			
Navigasi dan halaman awal	Sesuaikan bahasa tombol dan susunan halaman awal	Menyesuaikan tombol Mulai, menyesuaikan label navigasi, serta menata kembali tombol dan narasi	Tombol menggunakan bahasa Indonesia dengan susunan halaman awal yang diperbaiki
Alur *Problem Based Learning*	Perjelas urutan kegiatan pembelajaran berbasis PBL	Menambahkan halaman khusus alur sintaks PBL	Tersedia panduan urutan kegiatan pembelajaran
Gambar kontekstual	Lengkapi informasi yang menyertai gambar	Menambahkan penjelasan fenomena yang ditampilkan	Gambar dilengkapi informasi kontekstual
Rangkuman	Selaraskan isi rangkuman dengan tujuan dan materi pembelajaran	Menyusun ulang isi rangkuman	Rangkuman disesuaikan dengan tujuan dan cakupan materi
Glosarium	Susun istilah secara konsisten	Mengurutkan istilah berdasarkan alfabet	Glosarium tersusun secara alfabetis
Daftar pustaka e-modul	Perbaiki tata tulis dan jarak antar referensi	Menyesuaikan jarak dan format penulisan referensi	Daftar pustaka lebih konsisten
Ahli Materi			
Tujuan pembelajaran	Sesuaikan kata kerja operasional dengan tuntutan capaian pembelajaran	Memperbaiki rumusan kata kerja operasional pada tujuan pembelajaran	Tujuan pembelajaran diselaraskan dengan capaian pembelajaran
Kasus lingkungan	Gunakan kasus yang lebih dekat dengan lingkungan peserta didik	Mengganti kasus awal dengan permasalahan sampah lokal.	Kasus lokal disajikan melalui fitur 'Baca Kasus'

Berdasarkan Tabel 2, revisi produk mencakup penyempurnaan komponen pedagogis dan penyajian, terutama pada alur PBL, tujuan pembelajaran, penggunaan kasus lingkungan lokal, navigasi, serta komponen pendukung e-modul. Seluruh perbaikan diselesaikan sebelum pelaksanaan uji kepraktisan terbatas.

Kepraktisan E-Modul Interaktif

Uji kepraktisan dilaksanakan setelah produk direvisi berdasarkan hasil validasi ahli. Responden terdiri atas tiga guru Biologi SMA Negeri 4 Singaraja yang seluruhnya mengajar kelas X, tiga peserta didik pada uji perorangan, dan dua belas peserta didik pada uji kelompok kecil. Ketiga guru melakukan eksplorasi langsung terhadap e-modul sebelum mengisi angket respons. Hasil penilaian kepraktisan secara keseluruhan beserta aspek dengan persentase tertinggi dan terendah disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Kepraktisan E-Modul Interaktif

Responden	Jumlah	Skor	Presentase (%)	Aspek tertinggi (%)	Aspek terendah (%)
Guru	3	385/420	91,67%	Daya tarik dan interaktivitas (94,67%)	Alokasi waktu, aksesibilitas, dan fleksibilitas (88,89%)
Peserta Didik Uji Perorangan	3	334/360	92,78%	Daya tarik dan interaktivitas (98,33%)	Kejelasan petunjuk (86,67%)
Peserta Didik Uji Kelompok Kecil	12	1.325/1.440	92,01%	Daya tarik dan interaktivitas (95,42%)	Keterbacaan dan kejelasan materi (90,83%)

Berdasarkan Tabel 3, seluruh kelompok responden memberikan penilaian dalam kategori sangat praktis, dengan persentase keseluruhan sebesar 91,67% pada guru, 92,78% pada uji perorangan, dan 92,01% pada uji kelompok kecil. Meskipun instrumen respons guru dan peserta didik memiliki indikator yang berbeda, keduanya memuat aspek daya tarik dan interaktivitas yang memperoleh persentase tertinggi pada masing-masing kelompok. Sementara itu, aspek dengan persentase terendah menunjukkan variasi penilaian, yaitu alokasi waktu, aksesibilitas, dan fleksibilitas pada guru. Sedangkan uji perorangan terdapat pada aspek kejelasan petunjuk, serta keterbacaan dan kejelasan materi pada uji kelompok kecil. Penilaian guru terhadap alokasi waktu didasarkan pada eksplorasi produk, bukan pengamatan keterlaksanaan pembelajaran di kelas.

Selain hasil angket, peserta didik memberikan masukan mengenai ukuran tombol navigasi yang terlalu kecil. Masukan tersebut ditindaklanjuti melalui perbaikan tampilan setelah uji coba sebagai bagian dari evaluasi formatif, berbeda dari revisi berdasarkan masukan validator yang telah dilakukan sebelum uji kepraktisan.

Evaluasi formatif dilaksanakan pada setiap tahap ADDIE. Pada tahap *Analysis*, hasil identifikasi kebutuhan menjadi dasar penentuan karakteristik produk, sedangkan pada tahap *Design*, penilaian *storyboard* digunakan untuk menyempurnakan rancangan. Pada tahap *Development*, masukan ahli menjadi dasar revisi e-modul sebelum uji kepraktisan. Selanjutnya, pada tahap *Implementation*, respons pengguna digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan perbaikan terkait alokasi waktu, petunjuk penggunaan, keterbacaan, dan navigasi. Hasil peninjauan tersebut digunakan pada tahap *Evaluation* sebagai dasar penyempurnaan produk akhir.

Hasil pengembangan melalui ADDIE menunjukkan keterkaitan antara analisis kebutuhan, perancangan pembelajaran, pengembangan multimedia, validasi ahli, dan penyempurnaan berdasarkan respons pengguna. Kebutuhan bahan ajar digital interaktif tidak hanya ditindaklanjuti dengan perubahan format materi, tetapi juga melalui aktivitas identifikasi masalah, penyelidikan, perumusan solusi, dan refleksi. Proses tersebut mencerminkan ADDIE sebagai kerangka pengembangan sistematis (Branch, 2009). Lastri (2023) membahas pemanfaatan e-modul sebagai bahan ajar digital, sedangkan Nurhikmah *et al*. (2021) mengembangkan e-modul interaktif berbasis multimedia. Perbedaan konteks kajian tersebut menunjukkan bahwa bentuk interaktivitas perlu

disesuaikan dengan tujuan pembelajaran. Dalam e-modul yang dikembangkan, interaktivitas tidak hanya berfungsi memfasilitasi akses materi, tetapi juga menuntun peserta didik melalui kegiatan yang saling terhubung, mulai dari identifikasi masalah hingga refleksi atas alternatif solusi.

Pramana *et al*. (2020) mengembangkan e-modul berbasis PBL pada pembelajaran Biologi menggunakan model ADDIE, dengan melibatkan ahli mata pelajaran, ahli desain pembelajaran, dan ahli media, serta uji perorangan dan kelompok kecil. Kesamaan dengan penelitian ini terletak pada model pengembangan dan pelibatan ahli serta pengguna dalam evaluasi produk. Namun, e-modul pada penelitian ini secara khusus mengintegrasikan kasus sampah lokal sebagai alur PBL, prinsip 5R pada *zero waste*, dengan validasi produk yang dilakukan oleh ahli media dan ahli materi. Perbedaan cakupan penilaian tersebut menyebabkan persentase validitas kedua penelitian tidak dapat dibandingkan secara langsung sebagai ukuran keunggulan atau kesetaraan kualitas produk.

Struktur PBL dalam e-modul ini menempatkan masalah sampah lokal sebagai stimulus untuk mengidentifikasi persoalan, menganalisis penyebab dan dampaknya, serta mengembangkan solusi. Rancangan ini sesuai dengan prinsip masalah autentik dan penyelidikan dalam PBL (Savery, 2006). Sarrofah *et al*. (2024) menerapkan PBL kontekstual pada materi pencemaran lingkungan dengan fokus literasi sains. Siddiq *et al*. (2020) mengkaji PBL dalam kaitannya dengan literasi lingkungan, sedangkan Hanida dan Rachmadiarti (2022) mengembangkan e-modul PBL ekosistem untuk melatih keterampilan berpikir kritis melalui penilaian validitas, keterbacaan, dan kepraktisan. Perbandingan ini menunjukkan bahwa penggunaan PBL dapat memiliki sasaran dan cakupan pengujian berbeda. Pada produk yang dikembangkan, tahapan PBL juga dihubungkan dengan lembar kerja yang mengarahkan peserta didik menyusun dan menyajikan alternatif solusi. Akan tetapi, keterpaduan aktivitas tersebut masih merupakan karakteristik rancangan, bukan bukti peningkatan kemampuan peserta didik.

Prinsip *zero waste* 5R digunakan sebagai kerangka pertimbangan tindakan setelah peserta didik menyelidiki masalah, berbeda dari sintaks PBL yang mengatur tahapan pembelajaran. Handayana *et al*. (2020) membahas pendidikan lingkungan melalui gerakan zero waste dengan prinsip 3R, sedangkan Kalle *et al*. (2022) menekankan pengelolaan sumber daya dan pengurangan sampah. Penggunaan lima prinsip 5R dalam e-modul ini memperluas alternatif solusi yang dapat dipertimbangkan sesuai karakteristik kasus. Dengan demikian, kekhasan produk terletak pada keterhubungan kasus sampah lokal, penyelidikan PBL, dan penyusunan solusi 5R dalam satu rangkaian kegiatan. Peserta didik diarahkan mempertimbangkan pilihan tindakan berdasarkan karakteristik permasalahan, sehingga 5R tidak hanya disajikan sebagai konsep yang perlu dihafalkan. Namun, aktivitas merumuskan solusi belum membuktikan penerapan perilaku *zero waste* dalam kehidupan sehari-hari.

Dari sisi prosedur pengembangan, Maulida *et al*. (2022) mengembangkan *e-book* PBL perubahan lingkungan dan daur ulang limbah menggunakan model 4-D yang dimodifikasi menjadi tiga tahap, dengan validasi ahli materi dan media serta uji perorangan pada tiga peserta didik dan kelompok kecil pada sembilan peserta didik. Rohmah *et al*. (2025) menggunakan tujuh tahap pengembangan Sugiyono, melibatkan 21 peserta didik dan satu guru Biologi, serta menilai kelayakan materi, bahasa, dan pembelajaran. Penelitian ini menggunakan lima tahap ADDIE, validasi ahli media dan materi, serta uji kepraktisan pada tiga guru Biologi dan lima belas peserta didik. Kesamaan materi dan pendekatan PBL tidak berarti bahwa prosedur pengembangan maupun instrumen evaluasi yang digunakan identik. Perbedaan prosedur, karakteristik responden, dan aspek penilaian menyebabkan persentase hasil ketiga penelitian tidak dapat dibandingkan langsung sebagai ukuran keunggulan produk.

Penelitian berbasis konteks lokal juga menjadi pembanding penting. Akbar dan Suhartini (2026) mengembangkan e-modul PBL dengan isu Sungai Batanghari serta menguji validitas,

kepraktisan, dan efektivitas terhadap literasi lingkungan dan berpikir kritis. Siahaan dan Paidi (2026) menggunakan ADDIE dan potensi lokal Yogyakarta dengan melibatkan 72 peserta didik serta menguji efektivitas literasi lingkungan dan kemandirian belajar. Kedua penelitian menunjukkan bahwa integrasi PBL dan konteks lokal telah dikembangkan sebelumnya. Sedangkan pada penelitian ini, e-modul yang dikembangkan memiliki penekanan berbeda, yakni penggunaan prinsip 5R sebagai kerangka penyusunan solusi melalui LKPD digital, dengan pengujian terbatas pada validitas dan kepraktisan. Perbedaan ini penting untuk menempatkan kontribusi penelitian secara proporsional. Kontribusi penelitian ini terletak pada karakteristik rancangan dan evaluasi pengembangan produk, bukan pada klaim efektivitas yang dapat disejajarkan dengan kedua penelitian tersebut.

Orientasi literasi lingkungan dalam e-modul ini mencakup pengetahuan, keterampilan menganalisis masalah, refleksi sikap, dan pertimbangan tindakan. Komponen ini berkaitan dengan kajian Spínola (2020) mengenai hubungan pengetahuan, sikap, dan perilaku lingkungan. Anggyani *et al*. (2023) mengembangkan e-modul literasi lingkungan pada materi ekosistem dengan pengujian validitas, kepraktisan, dan efektivitas. Berbeda dari penelitian sebelumnya, produk yang dikembangkan menjadikan literasi lingkungan sebagai orientasi penyusunan aktivitas, yaitu pengetahuan difasilitasi melalui materi, keterampilan kognitif melalui analisis kasus, sikap melalui refleksi, serta pertimbangan tindakan melalui solusi 5R. Dengan demikian, orientasi literasi lingkungan diterapkan pada pemilihan materi dan kegiatan, bukan sebagai variabel hasil yang diuji.

Dari aspek multimedia, desain e-modul mengacu pada *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML) melalui penerapan beberapa prinsip pembelajaran multimedia (Mayer, 2021). Prinsip *multimedia* diwujudkan melalui penggunaan teks dan gambar yang saling melengkapi, prinsip *signaling* melalui penanda visual untuk menekankan informasi penting, serta prinsip *segmenting* melalui penyajian materi secara bertahap. Selain itu, penggunaan video yang memadukan narasi lisan dengan visual yang relevan mencerminkan upaya penerapan prinsip *temporal contiguity* apabila keduanya disajikan secara bersamaan. Nahar *et al*. (2025) melaporkan bahwa peserta didik dalam penelitian mereka cenderung menilai perpaduan video dan gambar lebih membantu pemahaman dibandingkan bentuk visual tunggal. Temuan tersebut mendukung relevansi penggunaan variasi representasi visual, meskipun tidak membuktikan efektivitas penerapan CTML pada e-modul yang dikembangkan. Penilaian ahli media yang tinggi menunjukkan bahwa rancangan penyajian dinilai layak oleh validator, sedangkan pengaruhnya terhadap proses kognitif dan pemahaman peserta didik masih memerlukan pengujian tersendiri.

Validasi ahli media mencapai 98,53% dengan kategori sangat valid. Meskipun empat dari enam aspek memperoleh skor maksimum, tampilan/desain visual (96,00%) dan keterbacaan (97,50%) masih memiliki ruang penyempurnaan. Masukan validator mengenai penataan halaman awal dan penambahan keterangan gambar menunjukkan pentingnya kejelasan informasi serta konsistensi penyajian. Selain itu, meskipun aspek navigasi dan interaktivitas memperoleh skor maksimum, validator tetap merekomendasikan penyesuaian bahasa tombol navigasi. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian kuantitatif perlu dilengkapi dengan masukan kualitatif untuk mengidentifikasi kebutuhan penyempurnaan produk secara lebih spesifik. Rekomendasi penambahan panduan sintaks PBL juga menegaskan fungsi e-modul sebagai pembimbing kegiatan belajar, bukan hanya penyaji materi. Dengan demikian, hasil validasi tidak hanya menunjukkan kelayakan penyajian digital, tetapi juga memberikan dasar perbaikan fungsi instruksional dan kemudahan penggunaan e-modul.

Validasi ahli materi mencapai 85,14% dengan kategori sangat valid, dengan persentase tertinggi pada keterpaduan *zero waste* (92,00%). Lima dari tujuh aspek termasuk sangat valid, sedangkan kesesuaian kurikulum (77,50%) dan evaluasi/tugas (80,00%) berada pada kategori valid.

Kesesuaian kurikulum perlu mendapat perhatian karena menjadi dasar penyelarasan capaian pembelajaran, tujuan, materi, aktivitas, dan evaluasi. Masukan validator mengenai penyesuaian kata kerja operasional pada tujuan pembelajaran menunjukkan salah satu bagian yang memerlukan perbaikan. Sementara itu, aspek evaluasi/tugas memperoleh persentase sebesar 80,00% dengan kategori valid. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komponen evaluasi telah memenuhi kriteria validitas, tetapi masih memiliki ruang penyempurnaan, terutama dalam memastikan keselarasan antara tugas, evaluasi, dan tujuan pembelajaran. Temuan ini memperlihatkan bahwa kualitas e-modul tidak hanya bergantung pada desain digital yang menarik, tetapi juga ketepatan isi dan keterpaduan komponen pedagogis. Tingginya penilaian integrasi *zero waste* tidak dengan sendirinya menghilangkan kebutuhan penyelarasan komponen kurikulum. Selisih 13,39 poin persentase antara media dan materi tidak menunjukkan keunggulan mutlak salah satu komponen karena indikator penilaiannya berbeda. Seluruh masukan validator tersebut telah ditindaklanjuti melalui revisi produk sebelum pelaksanaan uji kepraktisan.

Hasil uji kepraktisan menunjukkan bahwa ketiga kelompok responden memberikan penilaian dalam kategori sangat praktis, dengan aspek daya tarik dan interaktivitas memperoleh persentase tertinggi. Meskipun demikian, variasi penilaian antaraspek menunjukkan bahwa daya tarik produk perlu diimbangi dengan kemudahan pelaksanaan aktivitas pembelajaran. Pada penilaian guru, aspek alokasi waktu, aksesibilitas, dan fleksibilitas memperoleh persentase relatif terendah. Temuan ini dapat berkaitan dengan karakteristik pembelajaran PBL yang melibatkan beberapa tahapan kegiatan, mulai dari orientasi masalah, penyelidikan, hingga pengembangan dan penyajian solusi, sehingga memerlukan pengelolaan waktu dan akses terhadap fitur pembelajaran yang terencana. Mengingat penilaian guru diperoleh melalui eksplorasi langsung terhadap e-modul tanpa penerapan di kelas, kesesuaian alokasi waktu tersebut masih merupakan pertimbangan pengguna dan belum mencerminkan keterlaksanaan pembelajaran yang sesungguhnya.

Pada uji perorangan, aspek kejelasan petunjuk memperoleh persentase relatif terendah, yang menunjukkan perlunya arahan penggunaan agar aktivitas dapat diikuti secara mandiri. Pada uji kelompok kecil, keterbacaan dan kejelasan materi relatif terendah sehingga penyajian informasi melalui perangkat digital perlu diperhatikan. Masukan mengenai tombol navigasi yang terlalu kecil memperkuat pentingnya kenyamanan antarmuka dan telah ditindaklanjuti melalui perbaikan tampilan. Hendriko *et al*. (2024) juga menempatkan kepraktisan sebagai komponen evaluasi e-modul PBL dalam konteks matematika. Perbedaan konteks membatasi perbandingan langsung, tetapi menguatkan pentingnya membaca penilaian berdasarkan aspek, bukan sekadar persentase keseluruhan. Variasi penilaian antarkelompok juga menunjukkan bahwa pengalaman menggunakan produk dapat menonjolkan kebutuhan yang berbeda. Dengan demikian, hasil uji kepraktisan tidak hanya menunjukkan respons positif pengguna, tetapi juga memberikan informasi untuk penyempurnaan produk sebelum diterapkan dalam pembelajaran yang lebih luas.

Secara praktis, BIOZERO dapat dipertimbangkan sebagai bahan ajar digital pelengkap pada materi perubahan lingkungan kelas X, terutama untuk mengorganisasikan aktivitas pemecahan masalah sampah melalui konteks lokal dan kerangka solusi 5R. Evaluasi formatif memperlihatkan keterkaitan antara hasil analisis kebutuhan, penilaian rancangan, masukan ahli, dan respons pengguna dalam penyempurnaan produk. Penambahan panduan alur PBL, penyesuaian tujuan pembelajaran, penguatan kasus lokal, serta perbaikan komponen navigasi menunjukkan bahwa pengembangan produk tidak hanya diarahkan untuk memperoleh skor kelayakan, tetapi juga untuk menindaklanjuti kelemahan yang teridentifikasi.

Penelitian ini terbatas pada satu sekolah dengan tiga guru Biologi, tiga peserta didik uji perorangan, dan dua belas peserta didik uji kelompok kecil yang dipilih secara purposif. Data kepraktisan berupa respons pengguna, sedangkan ketiga guru belum menerapkan e-modul dalam

pembelajaran di kelas. Karena itu, keterlaksanaan aktivitas PBL dan kecukupan alokasi waktu belum diamati langsung. Penelitian juga tidak mengukur hasil belajar maupun literasi lingkungan sebelum dan sesudah penggunaan produk. Pemilihan responden secara purposif dan jumlah pengguna yang terbatas juga membatasi penerapan temuan pada konteks sekolah lain. Penelitian lanjutan perlu melibatkan penerapan langsung di kelas, pengguna dari konteks lebih beragam, observasi keterlaksanaan, serta pengukuran hasil belajar dan literasi lingkungan untuk menguji efektivitas e-modul yang dikembangkan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan e-modul interaktif berbasis *Problem Based Learning* (PBL) dengan konteks *zero waste* pada materi perubahan lingkungan kelas X yang memenuhi kriteria sangat valid berdasarkan penilaian ahli media dan materi serta sangat praktis berdasarkan respons guru dan peserta didik melalui uji coba terbatas. Kontribusi utama pengembangan terletak pada keterpaduan tahapan PBL sebagai struktur aktivitas pemecahan masalah, permasalahan sampah lokal sebagai konteks penyelidikan, dan prinsip *zero waste* 5R sebagai dasar perumusan alternatif solusi yang berorientasi pada literasi lingkungan.

Meskipun memenuhi kriteria validitas dan kepraktisan, hasil penilaian menunjukkan bahwa keselarasan kurikulum dan evaluasi pembelajaran merupakan aspek yang perlu diperhatikan dalam penyempurnaan produk dan telah menjadi pertimbangan dalam proses revisi berdasarkan masukan validator. Selain itu, penggunaan e-modul perlu memperhatikan alokasi waktu pembelajaran, kejelasan petunjuk, keterbacaan materi, dan kenyamanan navigasi. Berdasarkan temuan tersebut, e-modul dapat dipertimbangkan oleh guru sebagai sumber belajar digital pelengkap untuk mendukung pengorganisasian pembelajaran perubahan lingkungan berbasis masalah dengan penyesuaian terhadap kebutuhan dan kondisi kelas.

Penelitian ini masih terbatas pada pengujian validitas dan kepraktisan sehingga belum dapat menyimpulkan efektivitas e-modul terhadap hasil belajar, kemampuan pemecahan masalah, maupun literasi lingkungan peserta didik. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menguji efektivitas e-modul melalui pengukuran hasil pembelajaran sebelum dan sesudah penggunaan produk dengan melibatkan peserta didik serta konteks sekolah yang lebih beragam.

DAFTAR PUSTAKA

Akbar, M., & Suhartini, S. (2026). Pengembangan e-modul perubahan lingkungan berbasis Problem Based Learning pada isu Sungai Batanghari untuk meningkatkan literasi lingkungan dan kemampuan berpikir kritis siswa. *Cetta: Jurnal Ilmu Pendidikan*, 9(3), 283–299. https://doi.org/10.37329/cetta.v9i3.5597

Anggraini, N., & Nazip, K. (2022). Kemampuan literasi lingkungan mahasiswa pendidikan biologi menggunakan skor NELA. *Journal of Education Action Research*, 6(4), 552–557. https://doi.org/10.23887/jear.v6i4.46975

Anggyani, T., Ilhami, A., Ilahi, P. R., Marlisa, W., Hayati, I., & Sari, W. K. (2023). E-modul berbasis literasi lingkungan pada materi ekosistem untuk meningkatkan literasi lingkungan siswa. *Journal of Natural Science Learning*, 2(2), 1–7. https://jom.uin-suska.ac.id/index.php/JNSL

Arends, R. I. (2012). *Learning to teach* (9th ed.). McGraw-Hill.

Bidahyani, R. Y., Utami, S. D., & Dewi, I. N. (2024). Efektivitas model problem based learning (PBL) berorientasi kearifan lokal pada materi keanekaragaman hayati terhadap literasi lingkungan siswa. *Empiricism Journal*, 5(2), 509–518. https://doi.org/10.36312/ej.v5i2.2316

Branch, R. M. (2009). *Instructional design: The ADDIE approach*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6

Daniyarti, W. D. (2022). Pendidikan literasi lingkungan sebagai penunjang pendidikan akhlak lingkungan. *Tamaddun Journal of Islamic Studies*, 1(2), 89–101. https://doi.org/10.55657/tajis.v1i2.43

Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup Provinsi Bali. (2025, August 27). *Pemprov Bali genjot percepatan pengelolaan sampah, terapkan strategi hulu-hilir*. https://dklh.baliprov.go.id/pemprov-bali-genjot-percepatan-pengelolaan-sampah-terapkan-strategi-hulu-hilir/

Gregory, R, J. (2013). *Tes Psikologi: Sejarah Prinsip, dan Aplikasi Edisi Keenam Jilid 1* . Jakarta: Penerbit Erlangga.

Handayana, I. G. N. Y., Angraini, L. M., Sudiarta, I. W., Qomariyah, N., & Alaa', S. (2020). Gerakan zero waste sebagai pendidikan lingkungan bersih. *Jurnal Warta Desa*, 1(3), 279–288. https://doi.org/10.29303/jwd.v1i3.70

Hanida, J. R., & Rachmadiarti, F. (2022). The ecosystem problem-based learning e-module to train critical thinking skills during COVID-19 pandemic. *Journal of Biology Education*, 11(2), 138–150. https://doi.org/10.15294/jbe.v11i2.55257

Hendriko, N., Syafriandi, S., Armiati, A., & Jamaan, E. Z. (2024). Praktikalitas e-modul berbasis problem based learning untuk meningkatkan kemampuan pemecahan masalah matematis siswa. *AKSIOMA: Jurnal Program Studi Pendidikan Matematika*, 13(3), 870–884. https://doi.org/10.24127/ajpm.v13i3.8921

Kalle, K., Arro, G., Kripsalu, M., McQuibban, J., Kranjc, J., Žnajder, Ž., & Kenk, K. (2022). *Zero waste training handbook*. The BEZWA Project: Building a European Zero Waste Academy.

Kementerian Lingkungan Hidup. (n.d.). *Timbulan sampah*. Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. Retrieved February 3, 2026, from https://sampahnasional.kemenlh.go.id/portal-indikatif/data/timbulan-sampah

Khairani, I., Saefudin, S., & Amprasto, A. (2023). Implementation of biology learning by utilizing the local potential of the Citarum River to increase students' environmental literacy on environmental change material. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(8), 6157–6165. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i8.3638

Lastri, Y. (2023). Pengembangan dan pemanfaatan bahan ajar e-modul dalam proses pembelajaran. *Jurnal Citra Pendidikan (JCP)*, 3(3), 1139–1146. https://doi.org/10.38048/jcp.v3i3.1914

Maghfiroh, Z., & Kartijono, N. E. (2024). Analysis of students' environmental literacy skill in Adiwiyata high schools in Semarang. *Journal of Biology Education*, 13(1), 91–104. https://journal.unnes.ac.id/journals/ujbe/article/view/4106.

Maulida, S. I., Adnyana, P. B., & Bestari, I. A. P. (2022). Pengembangan e-book berbasis Problem Based Learning pada materi perubahan lingkungan dan daur ulang limbah untuk siswa di MAN Karangasem. *Jurnal Pendidikan Biologi Undiksha*, 9(2), 116–129. https://doi.org/10.23887/jjpb.v9i2.49582

Mayer, R. E. (2021). *Multimedia learning* (3rd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316941355

Nahar, W. N., Rahmadaniati, W., Indah, I., Hanisyah, R., Cahyani, H., Aina, S., Aina, M., Natalia, D., Yusuf, M., & Putri, H. M. (2025). Analisis kesulitan siswa SMA dalam memanfaatkan media pembelajaran visual pada konsep biologi. *JUTECH (Journal Education and Technology)*, 6(2), 465–475. https://doi.org/10.31932/jutech.v6i2.5830

Nurhikmah, H., Hakim, A., & Wahid, M. S. (2021). Interactive e-module development in multimedia learning. *Al-Ishlah: Jurnal Pendidikan*, 13(3), 2293–2300. https://doi.org/10.35445/alishlah.v13i3.863

Pramana, M. W., Jampel, I. N., & Pudjawan, K. (2020). Meningkatkan hasil belajar biologi melalui e-modul berbasis problem based learning. *Jurnal Edutech Undiksha*, 8(2), 17–32. https://doi.org/10.23887/jeu.v8i2.28921

Purwaningsih, W., Arrifa, F. H., & Riandi, R. (2023). Efforts to enhance sustainable consciousness and critical thinking in high school students through learning projects. *Indonesian Journal of Teaching in Science*, 3(1), 33–44. https://doi.org/10.17509/ijotis.v3i1.55447

Putri, N. K. I. J., & Winangun, M. M. (2026). Optimalisasi keaktifan siswa melalui implementasi teori konstruktivisme dalam pembelajaran. *Educational Journal*, 1(4), 1661–1667. https://doi.org/10.63822/wc4ds610

Riduwan. (2015). *Skala pengukuran variabel-variabel penelitian*. Alfabeta.

Rohmah, M., Sholihah, M., & Malahayati, E. N. (2025). Pengembangan e-modul perubahan lingkungan berbasis Problem Based Learning sebagai bahan ajar siswa kelas X SMA. *BIOEDUKASI: Jurnal Pendidikan Biologi*, 16(1), 64–76. https://doi.org/10.24127/bioedukasi.v16i1.11703

Sarrofah, S., Rosidi, I., Hadi, W. P., Sidik, R. F., & Yasir, M. (2024). Penerapan problem based learning dengan pendekatan kontekstual terhadap literasi sains siswa pada materi pencemaran lingkungan. *Jurnal Natural Science Educational Research*, 7(1), 55–66. https://doi.org/10.21107/nser.v7i1.16371

Savery, J. R. (2006). Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 1(1), 9–20. https://doi.org/10.7771/1541-5015.1002

Siahaan, D. T. A., & Paidi. (2026). Pengembangan e-module pendukung PBL terintegrasi potensi lokal Yogyakarta pada materi perubahan lingkungan untuk meningkatkan literasi lingkungan dan kemandirian belajar siswa. *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains*, 9(2), 579–594. https://doi.org/10.31539/w9m43p85

Siddiq, M. N., Supriatno, B., & Saefudin. (2020). Pengaruh penerapan problem based learning terhadap literasi lingkungan siswa SMP pada materi pencemaran lingkungan. *Assimilation: Indonesian Journal of Biology Education*, 3(1), 18–24. https://doi.org/10.17509/aijbe.v3i1.23369

Spínola, H. (2020). Correlations between environmental literacy components (knowledge, attitude and behavior) in Madeira Island (Portugal) 9th grade students. *The Online Journal of New Horizons in Education*, 10(1), 28–36. http://hdl.handle.net/10400.13/2743

Sugiyono. (2025). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.

Xu, X. (2024). A literature review of the current status of digital teaching material research in China. *International Journal of Education and Humanities*, 12(3), 143–147. https://doi.org/10.54097/tmtdat94

Zahrani, U., Hadiansah, H., & Yuliawati, A. (2024). Peningkatan literasi lingkungan siswa melalui penggunaan e-modul berbasis socio-scientific issues pada materi perubahan lingkungan. *Semantik: Jurnal Riset Ilmu Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, 2(4), 38–44. https://doi.org/10.61132/semantik.v2i4.992