

PENGEMBANGAN E-LKPD BERBASIS *PROBLEM-BASED LEARNING* BERBANTUAN PHET SIMULATIONS UNTUK MENINGKATKAN KEMAMPUAN LITERASI DIGITAL PESERTA DIDIK PADA MATERI PERUBAHAN IKLIM KELAS X

Development of a Problem-Based Learning E-LKPD Assisted by PhET Simulations to Enhance Grade X Students' Digital Literacy on Climate Change

Atika Ramadhani Nur Amalia

Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: atika.22073@mhs.unesa.ac.id

Sunu Kuntjoro

Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: sunukuntjoro@unesa.ac.id

Corresponding author: sunukuntjoro@unesa.ac.id

Abstrak

Literasi digital merupakan keterampilan esensial yang dibutuhkan peserta didik dalam menghadapi tantangan pembelajaran abad ke-21, khususnya pada materi perubahan iklim yang bersifat abstrak dan kompleks. Pengembangan literasi digital dapat dilakukan melalui penggunaan E-LKPD sebagai media pembelajaran yang terintegrasi dengan model *Problem-Based Learning* (PBL) berbantuan PhET Simulation sebagai respons terhadap perkembangan teknologi pendidikan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan E-LKPD berbasis PBL berbantuan PhET Simulation pada materi perubahan iklim untuk meningkatkan kemampuan literasi digital peserta didik serta menilai kelayakannya ditinjau dari aspek validitas, kepraktisan, dan efektivitas. Penelitian ini menggunakan model pengembangan 4D yang diadaptasi dari Thiagarajan dkk. (1974). E-LKPD yang dikembangkan diujicobakan secara terbatas kepada 36 peserta didik Kelas X SMA Negeri 6 Surabaya. Teknik pengumpulan data meliputi wawancara, lembar validasi, observasi, angket respons, dan tes literasi digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa E-LKPD memiliki tingkat validitas sebesar 96,01% pada E-LKPD 1 dan 98,01% pada E-LKPD 2 dengan kategori sangat valid. Kepraktisan ditunjukkan melalui keterlaksanaan aktivitas peserta didik sebesar 100% dan respons positif peserta didik sebesar 98,29% dengan kategori sangat praktis. Efektivitas E-LKPD ditunjukkan oleh peningkatan kemampuan literasi digital pada seluruh indikator dengan kategori tinggi, dengan nilai *N-gain* masing-masing sebesar 0,86 pada literasi teknologi dan keterampilan digital, 0,80 pada literasi informasi dan evaluasi konten, 0,72 pada literasi komunikasi dan kolaborasi, 0,77 pada literasi keamanan dan privasi, serta 0,74 pada literasi etika dan kewargaan digital. Secara keseluruhan, peningkatan kemampuan literasi digital berada pada kategori tinggi dengan nilai *N-gain* rata-rata sebesar 0,77 serta ketercapaian hasil belajar sebesar 90,83% dengan kategori tuntas. Berdasarkan hasil tersebut, E-LKPD berbasis PBL berbantuan PhET Simulation dinyatakan valid, praktis, dan efektif serta layak digunakan sebagai bahan ajar untuk meningkatkan kemampuan literasi digital peserta didik.

Kata Kunci: E-LKPD, *Problem-Based Learning*, PhET Simulation, Literasi digital, Perubahan iklim.

Abstract

Digital literacy was an essential skill required by students to face the challenges of 21st-century learning, particularly in climate change topics that were abstract and complex. The development of digital literacy could be facilitated through the use of Electronic Student Worksheets (E-LKPD) as learning media integrated with the *Problem-Based Learning* (PBL) model assisted by PhET Simulations in response to advances in educational technology. This study aimed to develop a PBL-based E-LKPD assisted by PhET Simulations on climate change topics to improve students' digital literacy skills and to examine its feasibility in terms of validity, practicality, and effectiveness. The study employed the 4D development model adapted from Thiagarajan et al. (1974). The developed E-LKPD was subjected to a limited trial involving 36 Grade X students at SMA Negeri 6 Surabaya. Data collection methods included interviews, validation sheets, observations, response questionnaires, and digital literacy tests. The results showed that the E-LKPD achieved validity levels of 96.01% for E-LKPD 1 and 98.01% for E-LKPD 2, both categorized as very valid. Practicality was indicated by 100% implementation of student activities and a positive student response rate of 98.29%, categorized as very practical. The effectiveness of the E-LKPD was demonstrated by high improvements in students' digital literacy skills across all indicators, with *N-gain* scores of 0.86 for technological and digital skills literacy, 0.80 for information literacy and content evaluation, 0.72 for

communication and collaboration literacy, 0.77 for security and privacy literacy, and 0.74 for digital ethics and digital citizenship literacy, all categorized as high. Overall, the improvement in digital literacy skills was classified as high, with an average N-gain score of 0.77 and a learning mastery level of 90.83%, categorized as complete. Based on these results, the PBL-based E-LKPD assisted by PhET Simulations was declared valid, practical, and effective, and was feasible for use as instructional material to improve students' digital literacy skills.

Keywords: E-LKPD, Problem-Based Learning, PhET Simulation, Digital Literacy, Climate Change.

PENDAHULUAN

Perkembangan pendidikan abad ke-21 tidak dapat dilepaskan dari kemajuan teknologi yang menyebabkan arus informasi berlangsung semakin cepat dan kompleks (Putrayasa, 2024). Dalam praktik pembelajaran, teknologi memungkinkan materi disajikan melalui berbagai bentuk penyampaian, seperti teks, visual, dan audio, sehingga kegiatan belajar tidak lagi bergantung pada pemahaman berbasis teks semata (Sudarwati & Indhiarti, 2023). Kondisi ini menuntut peserta didik memiliki literasi digital sebagai kompetensi penting agar mampu memilah informasi, mengembangkan pemikiran kritis, serta berpartisipasi secara aktif dalam proses pembelajaran di era digital (Safitri dkk., 2025).

Literasi digital merujuk pada kumpulan kompetensi yang bersifat multidimensional, meliputi kemampuan memahami penggunaan teknologi, menelusuri serta menilai informasi digital secara kritis, serta memanfaatkan teknologi secara bertanggung jawab sesuai dengan prinsip etika (Rullah dkk., 2025). Kompetensi ini berperan penting dalam membantu individu beradaptasi terhadap perkembangan teknologi yang berlangsung cepat, sekaligus mendukung pengambilan keputusan yang rasional dan berlandaskan pertimbangan etis di tengah kompleksitas informasi digital (Putrayasa, 2024). Dalam ranah pendidikan, literasi digital tidak hanya merujuk pada kecakapan teknis dalam menggunakan perangkat dan aplikasi digital, tetapi juga mencakup kemampuan memahami konsep secara mendalam, mengembangkan proses berpikir tingkat tinggi, serta meningkatkan hasil belajar peserta didik. Dimensi tersebut menjadi semakin relevan ketika peserta didik dihadapkan pada aktivitas pembelajaran yang menuntut kemampuan menganalisis dan mengevaluasi informasi berbasis digital secara kritis (Ng, 2012).

Meskipun literasi digital diakui sebagai kompetensi esensial dalam pendidikan abad ke-21, capaian literasi digital di Indonesia masih tergolong pada level menengah. Berdasarkan data Indeks Masyarakat Digital Indonesia (IMDI) tahun 2024, skor nasional tercatat sebesar 43,34, yang menunjukkan bahwa kemampuan masyarakat dalam menguasai dan memanfaatkan teknologi digital belum sepenuhnya berkembang secara optimal (BPSDM Komdigi, 2024). Kondisi tersebut konsisten dengan hasil Indeks Literasi Digital Nasional tahun 2022 yang mencatat skor 3,54 pada skala 1–5, menandakan bahwa kemampuan literasi digital nasional masih memerlukan penguatan (Katadata Insight Center, 2022). Pada tingkat regional, posisi Indonesia juga belum menunjukkan daya saing yang kuat dibandingkan sejumlah negara ASEAN, khususnya dalam hal kesiapan infrastruktur digital dan pemanfaatan teknologi pada sektor pendidikan (ASEANstats, 2024; Dutta & Lanvin, 2021; ERIA, 2024).

Kondisi tersebut menegaskan bahwa penguatan literasi digital masih menjadi tantangan substansial dalam upaya peningkatan kualitas sumber daya manusia melalui jalur pendidikan. Menyikapi tantangan ini, pemerintah Indonesia merumuskan berbagai kebijakan strategis dengan menempatkan literasi digital sebagai bagian dari penguatan kompetensi abad ke-21 dalam sistem pendidikan formal (Situmorang & Nugroho, 2024). Salah satu langkah awal yang diambil adalah peluncuran Gerakan Literasi Sekolah (GLS) pada tahun 2015, yang bertujuan mendorong terbentuknya budaya literasi serta pemanfaatan teknologi secara lebih kreatif di lingkungan sekolah (Permendikbud No. 23 Tahun 2015). Selanjutnya, proses transformasi digital dalam pendidikan mengalami akselerasi yang signifikan pada masa pandemi COVID-19, ketika pembelajaran daring dan *e-learning* menjadi sarana utama dalam penyelenggaraan kegiatan belajar mengajar (Pusat Kajian Anggaran – Badan Keahlian DPR RI, 2021).

Berbagai kebijakan dan percepatan transformasi digital dalam pendidikan tersebut berkontribusi terhadap penerapan Kurikulum Merdeka, yang memperkuat literasi digital sebagai kompetensi inti dalam pembelajaran berbasis teknologi (Kemendikbudristek, 2022). Kurikulum ini menekankan pembelajaran yang berorientasi pada pemahaman konsep, penguatan kompetensi, serta pencapaian hasil belajar yang bermakna, yang tercermin dalam kemampuan peserta didik untuk memahami materi secara mendalam dan menerapkan pengetahuan dalam konteks pembelajaran yang relevan. Dalam konteks tersebut, pembelajaran di era digital relevan dipahami melalui perspektif teori belajar konektivisme yang memandang pengetahuan sebagai bagian dari jejaring informasi digital, sehingga proses belajar menuntut kemampuan peserta didik untuk membangun, mengelola, dan memanfaatkan keterhubungan dengan beragam sumber informasi berbasis teknologi (Siemens, 2005).

Dalam penelitian ini, literasi digital diposisikan sebagai konstruk multidimensional yang dirumuskan melalui sintesis berbagai kerangka literasi digital pada tingkat nasional dan internasional, termasuk yang dikembangkan oleh Kemendikbudristek, Kementerian Komunikasi dan Informatika, UNESCO, dan DigComp. Hasil sintesis tersebut menegaskan bahwa literasi digital tidak terbatas pada keterampilan teknis penggunaan teknologi, melainkan mencakup kemampuan mengakses dan mengevaluasi informasi digital secara kritis, berkomunikasi dan berkolaborasi secara etis, menjaga keamanan serta privasi data, dan menunjukkan tanggung jawab sebagai warga digital. Berdasarkan kerangka tersebut, penelitian ini menetapkan lima indikator literasi digital meliputi literasi teknologi dan keterampilan digital, literasi informasi dan evaluasi konten, literasi komunikasi dan kolaborasi, literasi keamanan dan privasi, serta literasi etika dan kewargaan digital sebagai dasar pengukuran peningkatan kemampuan literasi digital peserta didik.

Meskipun berbagai kebijakan dan kerangka konseptual literasi digital telah dikembangkan, implementasinya di tingkat sekolah masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama dalam pembelajaran yang secara langsung menuntut keterlibatan peserta didik dengan sumber dan aktivitas digital. Hasil observasi dan wawancara dengan guru Biologi di SMA Negeri 6 Surabaya menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis digital telah mulai diterapkan, namun belum berjalan secara optimal. Praktik pembelajaran masih didominasi oleh penggunaan LKS cetak, sementara pemanfaatan perangkat digital umumnya terbatas pada platform seperti Google Form, Google Classroom, dan YouTube. Penggunaan bahan ajar digital interaktif, khususnya E-LKPD yang dirancang secara sistematis untuk mendukung pengembangan berbagai aspek literasi digital peserta didik, belum ditemukan secara optimal dalam pembelajaran Biologi.

Kondisi tersebut menjadi semakin krusial ketika dikaitkan dengan pembelajaran materi perubahan iklim yang memiliki karakteristik kompleks dan bersifat abstrak. Materi ini menuntut pemahaman konseptual yang mendalam serta kemampuan peserta didik dalam mengelola informasi ilmiah yang berbasis data dan teknologi (Moa, 2024). Dalam pembelajaran perubahan iklim, literasi digital berperan penting karena mendukung kemampuan peserta didik untuk mengakses, menafsirkan, dan menganalisis informasi ilmiah secara kritis dalam memahami fenomena perubahan iklim (Hermanto dkk., 2025). Selain itu, penguatan literasi digital dalam pembelajaran perubahan iklim selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) nomor 13 tentang aksi iklim, yang menekankan peran pendidikan dalam meningkatkan kapasitas adaptasi terhadap risiko perubahan iklim (United Nations, 2015; Tasliyah dkk., 2024).

Pembelajaran perubahan iklim menuntut pendekatan yang menempatkan permasalahan kontekstual sebagai sarana utama untuk membangun pemahaman konsep secara bermakna. Dalam hal ini, model *Problem-Based Learning* (PBL) dipandang sesuai karena mengorganisasikan proses pembelajaran melalui penyelesaian masalah autentik yang mendorong peserta didik mengembangkan kemampuan analisis dan pemecahan masalah secara sistematis (Salsabila & Muqowim, 2024). Implementasi PBL secara langsung melibatkan aktivitas pencarian, evaluasi, dan pengolahan informasi dari berbagai sumber digital, sehingga penguasaan literasi digital menjadi prasyarat penting dalam mendukung efektivitas proses pembelajaran berbasis masalah tersebut (Lee & Jo, 2023).

Pemanfaatan media simulasi interaktif, seperti PhET Simulations, berpotensi memperkuat pemahaman konsep perubahan iklim yang bersifat abstrak melalui penyajian visual dan manipulasi variabel secara dinamis (Clark, 2024; Rouinfar, 2023). Melalui aktivitas eksplorasi berbasis simulasi, peserta didik tidak hanya mengamati fenomena, tetapi juga menguji hubungan sebab akibat antarvariabel, sehingga proses konstruksi konsep berlangsung secara aktif dan reflektif. Integrasi PhET Simulations dalam pembelajaran mendukung penerapan pembelajaran berbasis masalah sekaligus memperkuat pengembangan literasi digital melalui keterampilan eksplorasi, analisis, dan interpretasi informasi berbasis teknologi (Warneri dkk., 2024).

E-LKPD sebagai media pembelajaran digital berperan dalam mengorganisasikan penerapan model *Problem-Based Learning* dan pemanfaatan PhET Simulations ke dalam satu rangkaian aktivitas belajar yang sistematis. Melalui E-LKPD, tahapan pemecahan masalah dapat diarahkan sesuai dengan sintaks PBL, sekaligus memfasilitasi peserta didik dalam melakukan pencatatan data, pengolahan informasi, dan analisis hasil simulasi secara terstruktur (Ginns & Ellis, 2007; Jong dkk., 2013). Temuan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karakteristik E-LKPD yang interaktif dan terstruktur berpotensi mendukung pengembangan literasi digital peserta didik, khususnya dalam aspek pengelolaan informasi dan pemanfaatan teknologi dalam pembelajaran (Simamora & Asri, 2024; Pratiwi & Indana, 2022).

Namun, kajian pengembangan E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* yang mengintegrasikan PhET Simulations secara eksplisit pada materi perubahan iklim masih relatif terbatas, khususnya yang menempatkan literasi digital sebagai capaian utama pembelajaran. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* berbantuan PhET Simulations pada materi perubahan iklim untuk meningkatkan literasi digital peserta didik, dengan penilaian kelayakan yang mencakup aspek validitas, kepraktisan, dan efektivitas.

METODE

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian pengembangan (*developmental research*) yang berorientasi pada perancangan dan penyempurnaan produk berupa E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* (PBL) yang terintegrasi dengan PhET Simulations pada materi perubahan iklim. Fokus penelitian diarahkan pada pencapaian kelayakan produk yang ditinjau melalui tiga indikator utama, yaitu validitas, kepraktisan, dan efektivitas dalam meningkatkan kemampuan literasi digital peserta didik.

Produk yang telah dirancang selanjutnya diimplementasikan melalui uji coba terbatas pada 36 peserta didik kelas X SMA Negeri 6 Surabaya pada semester ganjil tahun ajaran 2025/2026. Pelaksanaan uji coba ini bertujuan memperoleh bukti empiris mengenai mutu dan performa E-LKPD sebelum direkomendasikan untuk penggunaan pembelajaran yang lebih luas.

Proses pengembangan mengikuti kerangka model 4D yang mencakup tahap *define*, *design*, *develop*, dan *disseminate*. Tahap *define* dan *design* difokuskan pada identifikasi kebutuhan pembelajaran serta penyusunan rancangan E-LKPD yang memuat sintaks PBL dan integrasi simulasi PhET secara sistematis. Tahap *develop* meliputi kegiatan validasi oleh ahli, perbaikan produk berdasarkan masukan, serta pelaksanaan uji coba terbatas. Adapun tahap *disseminate* dibatasi pada publikasi hasil penelitian dalam bentuk artikel ilmiah tanpa implementasi skala luas di satuan pendidikan.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa instrumen, yaitu lembar validasi, lembar observasi keterlaksanaan aktivitas, angket respons peserta didik, serta tes literasi digital. Lembar validasi digunakan untuk menilai kelayakan produk dari aspek isi, bahasa, dan penyajian, dengan penilaian yang dilakukan oleh dua validator yang terdiri atas dosen ahli materi biologi dan dosen ahli media pembelajaran. Skor validitas dianalisis menggunakan perhitungan persentase dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Skor Validitas} = \frac{\sum \text{skor yang diperoleh}}{\sum \text{skor maksimal}} \times 100\%$$

Hasil validasi diinterpretasikan berdasarkan kriteria Riduwan (2012), di mana E-LKPD dinyatakan valid apabila memperoleh skor $\geq 71\%$.

Lembar observasi digunakan untuk menilai keterlaksanaan aktivitas peserta didik selama pembelajaran menggunakan E-LKPD. Observasi dilakukan oleh tiga observer dan dianalisis menggunakan skala Guttman dengan rumus:

$$\text{Presentase} = \frac{\sum \text{observer menjawab "Ya"}}{\sum \text{jumlah observer}} \times 100\%$$

Angket respons peserta didik digunakan untuk memperoleh data kepraktisan E-LKPD, ditinjau dari aspek tampilan dan kemudahan akses. Angket diberikan setelah pembelajaran selesai dan dianalisis menggunakan skala Guttman dengan rumus:

$$\text{Presentase} = \frac{\sum \text{peserta didik menjawab "Ya"}}{\sum \text{jumlah peserta didik}} \times 100\%$$

Kepraktisan E-LKPD diinterpretasikan berdasarkan kriteria Riduwan (2012), dengan batas minimal $\geq 71\%$.

Keefektifan E-LKPD diukur menggunakan tes literasi digital berbentuk *pretest* dan *posttest*. Instrumen tes terdiri atas lima butir soal uraian yang dirancang secara kontekstual dengan materi perubahan iklim dan mengacu pada lima indikator literasi digital, yaitu:

- (1) literasi teknologi dan keterampilan digital,
- (2) literasi informasi dan evaluasi konten digital,
- (3) literasi komunikasi dan kolaborasi digital,
- (4) literasi keamanan dan privasi digital, serta
- (5) literasi etika dan kewargaan digital.

Setiap butir soal merepresentasikan satu indikator literasi digital sehingga capaian literasi digital peserta didik dapat diukur secara spesifik dan terarah.

Pretest dan *posttest* dalam penelitian ini diposisikan sebagai *assessment of learning*, yang bertujuan untuk mengevaluasi capaian akhir kemampuan literasi digital peserta didik setelah mengikuti pembelajaran menggunakan E-LKPD. Instrumen ini tidak digunakan sebagai asesmen formatif, melainkan sebagai alat evaluatif untuk mengukur tingkat pencapaian literasi digital sebagai kompetensi keterampilan abad ke-21. Dengan demikian, hasil pengukuran merepresentasikan capaian keterampilan literasi digital, bukan sekadar hasil belajar kognitif mata pelajaran.

Data hasil tes dianalisis menggunakan *N-gain* dengan rumus:

$$(g) = \frac{(Sf) - (Si)}{Smaks - (Si)}$$

dengan keterangan:

g : nilai *gain*

Si : nilai *pretest*

Sf : nilai *posttest*

Smaks : nilai maksimal (100)

Nilai *N-gain* diinterpretasikan berdasarkan kriteria Sugiyono (2006) ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi. E-LKPD dinyatakan efektif apabila menunjukkan peningkatan kemampuan literasi digital peserta didik pada kategori sedang hingga tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN












E-LKPD yang dikembangkan merupakan bahan ajar digital interaktif berbasis *Problem-Based Learning* (PBL) yang diintegrasikan dengan PhET Simulations pada materi perubahan iklim untuk peserta didik kelas X SMA. Perangkat ini dirancang sebagai sarana pembelajaran yang tidak hanya mendukung pemahaman konsep, tetapi juga memfasilitasi pengembangan literasi digital peserta didik. Materi dalam E-LKPD mencakup dua topik utama, yaitu efek rumah kaca dan penyebab perubahan iklim, yang disusun secara sistematis ke dalam bagian pendahuluan, kegiatan inti, dan penutup sesuai dengan prinsip pengembangan bahan ajar digital yang efektif (Suryaningsih & Nurlita, 2022).

E-LKPD disajikan dalam format digital interaktif yang dapat diakses melalui berbagai perangkat, sehingga memungkinkan integrasi beragam sumber belajar digital, aktivitas kolaboratif daring, serta simulasi interaktif. Penggunaan kombinasi teks, visual, dan aktivitas interaktif mendukung pemahaman konsep yang bersifat abstrak melalui representasi multimodal, sejalan dengan prinsip *multimedia learning* yang menekankan pengolahan informasi secara verbal dan visual secara terpadu (Clark & Mayer, 2021; Fiorella & Mayer, 2022).

Struktur aktivitas pembelajaran dalam E-LKPD dirancang selaras dengan tahapan PBL serta indikator literasi digital. Setiap aktivitas diarahkan untuk melatih keterampilan pencarian dan evaluasi informasi digital, komunikasi dan kolaborasi daring, pemanfaatan teknologi digital, serta pemahaman etika dan keamanan digital sebagaimana direkomendasikan dalam kerangka literasi digital OECD (2021). Tampilan dan fitur E-LKPD disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tampilan dan Fitur E-LKPD

Elemen	Tampilan	Deskripsi
Cover		Sampul E-LKPD “Perubahan Iklim” Berbasis <i>Problem-Based Learning</i> Berbantuan PhET Simulations.
		Sampul E-LKPD “Perubahan Iklim” Sub Materi Efek Rumah Kaca.

Elemen	Tampilan	Deskripsi
		Sampul E-LKPD “Perubahan Iklim” Sub Materi Penyebab Perubahan Iklim.
Fitur		Fitur <i>Let's search!</i> berisi panduan membaca artikel melalui tautan untuk melatih literasi teknologi serta keamanan dan privasi digital.
		Fitur <i>Let's opinion!</i> berisi panduan diskusi virtual melalui Padlet untuk melatih literasi informasi, komunikasi dan kolaborasi, serta keamanan digital.
		Fitur <i>Find your group!</i> berisi panduan pembentukan kelompok untuk melatih literasi komunikasi dan kolaborasi.
		Fitur <i>Question time!</i> berisi panduan merumuskan pertanyaan berdasarkan permasalahan sebagai latihan literasi informasi dan komunikasi.
		Fitur <i>Let's discuss!</i> berisi panduan analisis dan simulasi digital untuk melatih literasi teknologi, informasi, komunikasi, dan keamanan digital.
		Fitur <i>Let's create!</i> berisi panduan penyusunan produk digital untuk melatih literasi teknologi, komunikasi, serta etika dan kewargaan digital.
		Fitur <i>Let's collect!</i> berisi panduan pengumpulan produk melalui Google Drive untuk melatih literasi teknologi digital.
		Fitur <i>Let's presentation!</i> berisi panduan presentasi produk untuk melatih literasi komunikasi dan kolaborasi.
		Fitur <i>Let's evaluate!</i> berisi panduan membaca artikel reflektif melalui tautan untuk melatih literasi etika dan kewargaan digital.
		Fitur <i>Did you know?</i> berisi informasi tambahan sebagai pemantik motivasi belajar peserta didik.

Secara umum, E-LKPD berbasis PBL berbantuan PhET Simulations menunjukkan karakteristik sebagai bahan ajar digital yang interaktif, kontekstual, dan berpotensi mendukung penguatan literasi digital peserta didik. Namun, deskripsi karakteristik dan fitur E-LKPD secara deskriptif belum cukup untuk memastikan bahwa perangkat yang dikembangkan telah memenuhi standar kelayakan pedagogis dan substansial sebagai perangkat pembelajaran formal. Oleh karena itu, diperlukan proses validasi ahli untuk menilai kesesuaian E-LKPD dari aspek isi, penyajian, dan kebahasaan berdasarkan standar kelayakan bahan ajar sebelum perangkat diimplementasikan pada tahap uji kepraktisan dan keefektifan.

Validitas E-LKPD

Validitas E-LKPD dilakukan untuk memastikan kelayakan teoritis dan struktural produk sebelum dilaksanakan uji coba kepada peserta didik. Proses validasi difokuskan pada tiga komponen utama, yaitu kelayakan penyajian, kebahasaan, dan isi, yang mengacu pada standar kelayakan buku ajar dan sumber belajar Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP, 2014). Validasi melibatkan dua orang ahli, masing-masing memiliki kompetensi di bidang materi Biologi dan media pembelajaran, serta disertai saran perbaikan sebagai dasar penyempurnaan produk. Ringkasan hasil validasi E-LKPD disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil validasi E-LKPD

Komponen Validasi	E-LKPD 1 (%)	E-LKPD 2 (%)	Kategori
Penyajian	97,02	98,21	Sangat valid
Kebahasaan	91,67	95,83	Sangat valid
Isi	99,34	100	Sangat valid
Rata-rata keseluruhan	96,01	98,01	Sangat valid

Interpretasi kategori validitas mengacu pada kriteria Riduwan (2012), dengan persentase $\geq 86\%$ termasuk kategori sangat valid.

Berdasarkan hasil validasi, E-LKPD 1 dan E-LKPD 2 masing-masing memperoleh skor rata-rata sebesar 96,01% dan 98,01% yang termasuk dalam kategori sangat valid menurut kriteria Riduwan (2012). Capaian tersebut menunjukkan bahwa E-LKPD telah memenuhi standar kelayakan sebagai perangkat pembelajaran digital dan layak digunakan dalam pembelajaran Biologi pada materi perubahan iklim setelah dilakukan revisi sesuai masukan validator.

Ditinjau dari aspek penyajian, E-LKPD memperoleh skor sangat valid yang menunjukkan bahwa perangkat telah disusun secara sistematis, memiliki tujuan pembelajaran yang jelas, dilengkapi petunjuk penggunaan yang memadai, serta didukung oleh navigasi dan tampilan yang mudah diakses. Penyajian bahan ajar yang terstruktur dan mudah digunakan berperan penting dalam membantu peserta didik mengikuti alur pembelajaran dan memahami keterkaitan antar aktivitas belajar (Djahuno dkk., 2024).

Pada aspek kebahasaan, hasil validasi menunjukkan bahwa bahasa yang digunakan telah sesuai dengan tingkat perkembangan kognitif peserta didik kelas X serta disusun dengan struktur kalimat yang jelas dan komunikatif. Kesesuaian bahasa dengan karakteristik peserta didik mendukung keterpahaman materi, sedangkan kejelasan struktur bahasa berkontribusi terhadap efektivitas penyampaian pesan pembelajaran (Brown & Lee, 2025; Rustan, 2024).

Validitas isi menunjukkan bahwa E-LKPD telah selaras dengan sintaks *Problem-Based Learning* dan indikator literasi digital yang ditargetkan. Aktivitas pembelajaran mencerminkan tahapan PBL secara utuh, mulai dari orientasi masalah hingga penyajian hasil, yang merupakan prasyarat penting agar implementasi model pembelajaran dapat berlangsung secara konsisten dan efektif (Ahyar dkk., 2023). Selain itu, keterpaduan aktivitas dengan indikator literasi digital menunjukkan bahwa E-LKPD dirancang secara sadar untuk melatih kompetensi literasi digital peserta didik, yang merupakan bagian penting dari keterampilan abad ke-21 (Kosasih, 2021). Temuan ini diperkuat oleh penelitian Mufrihah dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa pemanfaatan bahan ajar digital berkontribusi positif terhadap peningkatan literasi digital peserta didik.

Hasil validasi menunjukkan bahwa E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* yang terintegrasi dengan PhET Simulations memiliki tingkat validitas yang sangat tinggi dan dinyatakan layak digunakan pada pembelajaran materi perubahan iklim di kelas X setelah dilakukan perbaikan berdasarkan masukan validator. Evaluasi terhadap aspek penyajian, kebahasaan, dan kelayakan isi mengindikasikan bahwa seluruh komponen E-LKPD telah memenuhi kriteria yang ditetapkan serta selaras dengan indikator literasi digital. Berdasarkan temuan tersebut, E-LKPD yang telah memenuhi aspek validitas selanjutnya diuji dari sisi kepraktisan untuk menilai kemudahan penggunaan dan keterlaksanaannya dalam pembelajaran, guna memastikan bahwa perangkat yang dikembangkan tidak hanya valid secara konseptual, tetapi juga dapat diterapkan secara efektif dalam konteks pembelajaran nyata.

Kepraktisan E-LKPD

Kepraktisan E-LKPD dianalisis melalui keterlaksanaan aktivitas peserta didik dan respons peserta didik selama pembelajaran, sebagaimana direkomendasikan dalam kajian pengembangan desain pembelajaran (McKenney & Reeves, 2019). Keterlaksanaan aktivitas peserta didik selama penggunaan E-LKPD diamati menggunakan lembar observasi yang mencakup tahap pendahuluan, kegiatan inti, dan penutup. Observasi difokuskan pada kesesuaian implementasi pembelajaran dengan sintaks *Problem-Based Learning* serta pencapaian indikator literasi digital yang diintegrasikan dalam fitur-fitur E-LKPD. Penilaian keterlaksanaan aktivitas peserta didik merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk menilai kepraktisan perangkat pembelajaran dalam konteks pembelajaran nyata di kelas (Reinking, 2021).

Ringkasan hasil observasi keterlaksanaan aktivitas peserta didik disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Pengamatan Keterlaksanaan E-LKPD

Aktivitas Peserta Didik	Presentase Keterlaksanaan (%)	
	E-LKPD 1	E-LKPD 2
Pendahuluan	100	100
Inti	100	100
Penutup	100	100
Rata-rata	100	100
Kategori	Sangat praktis	Sangat praktis

Berdasarkan tabel tersebut, keterlaksanaan aktivitas peserta didik pada penggunaan E-LKPD 1 dan E-LKPD 2 masing-masing mencapai persentase 100%. Capaian ini menunjukkan bahwa seluruh aktivitas pembelajaran yang dirancang dalam E-LKPD dapat dilaksanakan sesuai dengan perencanaan pembelajaran tanpa hambatan berarti. Tingginya tingkat keterlaksanaan tersebut mengindikasikan bahwa E-LKPD memiliki tingkat kepraktisan yang sangat tinggi dan mudah diimplementasikan dalam proses pembelajaran. Temuan ini sejalan dengan kriteria kepraktisan perangkat pembelajaran yang menekankan kelancaran implementasi serta keterlibatan aktif pengguna selama proses pembelajaran berlangsung (McKenney & Reeves, 2019).

Pada tahap pendahuluan, keterlaksanaan aktivitas peserta didik juga mencapai 100%. Pada tahap ini, peserta didik mempelajari petunjuk penggunaan E-LKPD dan tujuan pembelajaran sebagai bentuk orientasi awal sebelum memasuki kegiatan inti. Keterlaksanaan tahap pendahuluan secara penuh menunjukkan bahwa E-LKPD mampu memberikan arahan awal yang jelas dan sistematis, sehingga mendukung kesiapan belajar peserta didik. Orientasi awal yang efektif merupakan komponen penting dalam pembelajaran berbasis *Problem-Based Learning* karena membantu peserta didik memahami konteks permasalahan dan tujuan pembelajaran sejak awal (Hmelo-Silver dkk., 2007).

Kegiatan inti dilaksanakan melalui empat fase utama PBL, yaitu orientasi masalah, pengorganisasian peserta didik, pembimbingan penyelidikan, serta pengembangan dan penyajian hasil. Hasil observasi menunjukkan bahwa seluruh fase kegiatan inti terlaksana secara berurutan dan konsisten dengan sintaks PBL yang dirancang dalam E-LKPD. Pada fase orientasi masalah, peserta didik melakukan pencarian informasi dan diskusi awal melalui fitur *Let's Search!* dan *Let's Opinion!* untuk mengkaji isu perubahan iklim secara kontekstual. Keterlaksanaan penuh pada fase ini mengindikasikan bahwa penyajian masalah autentik dalam E-LKPD berfungsi efektif sebagai pemicu keterlibatan awal peserta didik dalam pembelajaran berbasis masalah (Muhartini dkk., 2023).

Pada fase pengorganisasian peserta didik untuk belajar, peserta didik membentuk kelompok, merumuskan permasalahan, serta mengkaji informasi pemantik melalui fitur *Find Your Group!*, *Question Time!*, dan *Did You Know?!*. Seluruh aktivitas pada fase ini terlaksana sesuai dengan perencanaan dengan tingkat keterlaksanaan sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa struktur pembelajaran kolaboratif dalam E-LKPD dapat diikuti secara konsisten oleh peserta didik. Pembelajaran kolaboratif dalam PBL diketahui berkontribusi terhadap peningkatan partisipasi aktif serta tanggung jawab belajar peserta didik (Johnson & Johnson, 2017).

Pada fase pembimbingan penyelidikan individu maupun kelompok, peserta didik melakukan eksplorasi konsep melalui PhET Simulations dan menganalisis data hasil simulasi menggunakan fitur *Let's Discuss!*. Keterlaksanaan fase ini menunjukkan bahwa integrasi simulasi digital dalam E-LKPD dapat dioperasikan secara efektif selama proses pembelajaran. Pemanfaatan simulasi digital mendukung proses inkuiri dengan membantu peserta didik merepresentasikan konsep ilmiah yang bersifat abstrak secara lebih konkret dan bermakna (Kefalis dkk., 2025).

Fase pengembangan dan penyajian hasil karya dilaksanakan melalui aktivitas pembuatan dan presentasi produk pembelajaran, seperti poster, infografis, video edukatif, atau presentasi digital melalui fitur *Let's Create!*, *Let's Collect!*, dan *Let's Presentation!*. Seluruh aktivitas pada fase ini terlaksana sesuai dengan rancangan pembelajaran. Keterlaksanaan fase penyajian hasil karya menunjukkan bahwa E-LKPD mampu memfasilitasi aktivitas produksi pengetahuan dan komunikasi hasil belajar, yang merupakan karakteristik utama pembelajaran berbasis PBL (Muhartini dkk., 2023).

Pada tahap penutup, peserta didik melaksanakan evaluasi pembelajaran melalui fitur *Let's Evaluate!* yang menekankan kejujuran dan tanggung jawab dalam pembelajaran daring. Tahap penutup terlaksana dengan baik dan menjadi bagian reflektif dari keseluruhan rangkaian pembelajaran. Refleksi dan evaluasi merupakan komponen penting dalam PBL untuk meninjau proses dan hasil pembelajaran yang telah dilakukan (Muhartini dkk., 2023).

Secara keseluruhan, keterlaksanaan aktivitas peserta didik dalam pembelajaran menggunakan E-LKPD menunjukkan bahwa seluruh tahapan pembelajaran dapat dilaksanakan secara optimal dengan tingkat keterlibatan peserta didik yang

tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa E-LKPD memiliki tingkat kepraktisan yang sangat tinggi dan layak digunakan sebagai perangkat pembelajaran yang mendukung pembelajaran aktif sekaligus penguatan literasi digital peserta didik.

Kepraktisan E-LKPD juga ditinjau melalui respons peserta didik yang diperoleh menggunakan angket, dengan fokus pada aspek tampilan dan kemudahan akses. Ringkasan hasil respon peserta didik disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil respon peserta didik

Aspek Kepraktisan	Indikator yang Dicapai	Rerata Respon Positif (%)	Kategori
Tampilan dan Desain	Cover, layout, warna, keterbacaan teks dan gambar	96,9	Sangat praktis
Kemudahan Operasional	Pengoperasian, kejelasan petunjuk, kemudahan navigasi fitur	98,6	Sangat praktis
Aksesibilitas	Kemudahan akses halaman dan tautan eksternal	98,6	Sangat praktis
Kualitas Konten	Kejelasan materi, video pendukung, dan fungsi fitur pembelajaran	100	Sangat praktis
Rata-rata keseluruhan	—	98,29	Sangat praktis

Hasil analisis angket respons peserta didik menunjukkan bahwa E-LKPD memperoleh rata-rata respon positif sebesar 98,29% dan termasuk dalam kategori sangat praktis, yang mengindikasikan tingkat penerimaan pengguna yang sangat tinggi terhadap perangkat pembelajaran yang dikembangkan (McKenney & Reeves, 2019).

Capaian tersebut menunjukkan bahwa peserta didik secara umum menilai E-LKPD memiliki tampilan yang menarik, mudah dioperasikan, mudah diakses, serta mendukung proses pembelajaran secara efektif (Almaiah dkk., 2022). Berdasarkan analisis per kriteria, variasi skor kepraktisan terutama terdapat pada aspek tampilan visual, yang meliputi tampilan sampul, desain dan tata letak, kombinasi warna, tipografi, kejelasan gambar, serta kemudahan akses halaman website, dengan rentang persentase respon positif antara 94,44% hingga 97,22% (Nielsen & Norman, 2020).

Meskipun tidak seluruh indikator pada aspek visual memperoleh skor maksimal, seluruh kriteria tersebut tetap berada pada kategori sangat praktis, sehingga tidak mengurangi tingkat kepraktisan E-LKPD secara keseluruhan (Palmer dkk., 2013). Variasi respons peserta didik terhadap aspek visual menunjukkan adanya perbedaan preferensi individu dan karakteristik perangkat yang digunakan, yang merupakan fenomena umum dalam evaluasi media pembelajaran digital (OECD, 2021).

Pada aspek kemudahan operasional dan aksesibilitas, E-LKPD memperoleh respon positif yang sangat tinggi, yang menunjukkan bahwa navigasi, stabilitas halaman, dan interaksi pengguna telah dirancang secara fungsional (Almaiah dkk., 2022). Selain itu, aspek kualitas konten dan fitur pembelajaran juga memperoleh respon maksimal, yang mengindikasikan bahwa materi, video pendukung, serta fitur-fitur E-LKPD dinilai membantu peserta didik dalam memahami alur dan langkah pembelajaran (Clark & Mayer, 2021).

Secara keseluruhan, tanggapan peserta didik terhadap penggunaan E-LKPD berada pada kategori sangat positif. Proporsi respons positif yang tinggi pada aspek tampilan, kemudahan operasional, aksesibilitas, serta kualitas isi menunjukkan bahwa E-LKPD tergolong praktis dan layak diimplementasikan sebagai media pembelajaran yang mendorong partisipasi aktif sekaligus memperkuat keterampilan literasi digital peserta didik (McKenney & Reeves, 2019).

Dengan demikian, hasil keterlaksanaan pembelajaran dan respons peserta didik menunjukkan bahwa E-LKPD berbasis PBL berbantuan PhET Simulations memiliki tingkat kepraktisan yang sangat tinggi dan dapat digunakan dengan baik dalam pembelajaran di kelas (McKenney & Reeves, 2019). Keterlaksanaan seluruh aktivitas pembelajaran tanpa kendala serta tingginya respons positif peserta didik mengindikasikan bahwa E-LKPD mudah digunakan, diterima dengan baik, dan mendukung keterlibatan aktif peserta didik selama proses pembelajaran (Reinking, 2021).

Keefektifan E-LKPD

Keefektifan E-LKPD dianalisis untuk menilai kemampuan perangkat yang dikembangkan dalam meningkatkan hasil belajar sebagai representasi ketercapaian keterampilan literasi digital peserta didik. Penilaian keefektifan dilakukan melalui perbandingan skor pretest dan posttest yang diberikan sebelum dan setelah penerapan E-LKPD berbasis *Problem-*

Based Learning berbantuan PhET Simulations. Instrumen penilaian berupa lima soal uraian yang dirancang secara spesifik berdasarkan indikator literasi digital, sehingga capaian hasil belajar yang diperoleh mencerminkan penguasaan materi perubahan iklim sekaligus kemampuan peserta didik dalam menerapkan keterampilan literasi digital. Ringkasan hasil belajar peserta didik disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Belajar Peserta Didik

Tahap Tes	Rata-rata Nilai (%)	Ketuntasan Belajar (%)	<i>N-gain</i>
<i>Pretest</i>	58,89	25	0,78
<i>Posttest</i>	90,93	100	

Hasil *pretest* menunjukkan bahwa rata-rata nilai peserta didik berada pada angka 58,89% dengan tingkat ketuntasan belajar sebesar 25%. Capaian tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan awal peserta didik dalam memahami materi perubahan iklim serta menerapkan keterampilan literasi digital dalam pembelajaran masih terbatas. Sebelum intervensi pembelajaran, peserta didik belum menunjukkan kemampuan yang memadai dalam mengakses, mengolah, dan memanfaatkan informasi digital untuk mendukung pemahaman konsep secara efektif.

Setelah penerapan E-LKPD, rata-rata nilai *posttest* meningkat menjadi 90,93% dengan persentase ketuntasan belajar mencapai 100%, di mana seluruh peserta didik memperoleh skor di atas Kriteria Ketercapaian Tujuan Pembelajaran (KKTP) yang ditetapkan sekolah. Peningkatan capaian ini menunjukkan efektivitas E-LKPD dalam mendukung hasil belajar yang diukur melalui indikator literasi digital. Temuan tersebut diperkuat oleh nilai *N-gain* sebesar 0,77 yang termasuk dalam kategori tinggi, yang menunjukkan adanya peningkatan kemampuan peserta didik setelah penggunaan E-LKPD (Hake, 2022).

Dalam penelitian ini, hasil belajar diposisikan sebagai representasi ketercapaian literasi digital karena instrumen tes dirancang untuk mengukur kemampuan peserta didik dalam memahami permasalahan, menganalisis informasi berbasis digital, serta mengomunikasikan solusi dengan dukungan teknologi. Efektivitas tersebut berkaitan dengan integrasi model *Problem-Based Learning* dan PhET Simulations dalam E-LKPD, yang memfasilitasi pembentukan pemahaman konsep perubahan iklim melalui aktivitas pemecahan masalah dan eksplorasi berbasis simulasi digital (Perkins dkk., 2014). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa bahan ajar digital terintegrasi berkontribusi terhadap peningkatan hasil belajar dan literasi digital peserta didik (Mufrihah dkk., 2024).

Keefektifan E-LKPD selanjutnya ditinjau secara lebih spesifik melalui ketercapaian indikator literasi digital peserta didik. Keefektifan E-LKPD dalam penelitian ini ditinjau berdasarkan ketercapaian indikator literasi digital peserta didik yang disusun mengacu pada kerangka Kemendikbudristek (2022), Kemenkominfo (2020), UNESCO (2018), dan DigComp 2.2 (2022). Lima indikator utama yang digunakan meliputi literasi teknologi dan keterampilan digital, literasi informasi dan evaluasi konten, literasi komunikasi dan kolaborasi, literasi keamanan dan privasi, serta literasi etika dan kewargaan digital. Masing-masing indikator dioperasionalkan ke dalam satu butir soal *pretest* dan *posttest* yang secara spesifik merepresentasikan keterampilan literasi digital tertentu. Ringkasan ketercapaian indikator literasi digital disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Ketercapaian Indikator Literasi Digital

Indikator Literasi Digital	Rata-rata (%)		<i>N-gain</i>	Kategori
	<i>Pre-test</i>	<i>Post-test</i>		
Literasi teknologi dan keterampilan digital	55,56	93,75	0,86	Tinggi
Literasi informasi dan evaluasi konten	65,97	93,06	0,80	Tinggi
Literasi komunikasi dan kolaborasi	67,36	90,97	0,72	Tinggi
Literasi keamanan dan privasi	50,69	88,89	0,77	Tinggi
Literasi etika dan kewargaan digital	54,86	88,19	0,74	Tinggi
Rata-rata keseluruhan	58,89	90,97	0,78	Tinggi

Hasil analisis menunjukkan peningkatan rata-rata ketercapaian literasi digital peserta didik dari 58,89% pada *pretest* menjadi 90,97% pada *posttest*, dengan nilai *N-gain* sebesar 0,78 yang berada pada kategori tinggi. Peningkatan tersebut berkaitan dengan keterampilan literasi digital peserta didik, mengingat seluruh butir tes disusun berdasarkan indikator literasi digital yang digunakan dalam penelitian ini.

Pada indikator literasi teknologi dan keterampilan digital, peserta didik menunjukkan peningkatan tertinggi dengan nilai *posttest* sebesar 93,75% dan *N-gain* sebesar 0,86. Capaian ini menunjukkan bahwa peserta didik semakin terampil

dalam mengoperasikan perangkat digital, memanfaatkan simulasi PhET, serta menggunakan teknologi digital sebagai sarana belajar, sebagaimana ditekankan dalam kerangka literasi digital OECD (2021).

Indikator literasi informasi dan evaluasi konten mengalami peningkatan dari 65,97% menjadi 93,06% dengan *N-gain* sebesar 0,80. Peningkatan ini menunjukkan kemampuan peserta didik dalam menyeleksi, menganalisis, dan mengevaluasi informasi digital secara kritis, yang merupakan kompetensi esensial literasi informasi abad ke-21 (UNESCO, 2021).

Pada indikator literasi komunikasi dan kolaborasi, ketercapaian meningkat dari 67,36% menjadi 90,97% dengan *N-gain* sebesar 0,72. Peningkatan ini selaras dengan karakteristik PBL yang menekankan kerja kelompok dan diskusi berbasis teknologi, sehingga peserta didik terlatih berkomunikasi dan berkolaborasi secara efektif melalui media digital (Johnson & Johnson, 2017).

Indikator literasi keamanan dan privasi juga menunjukkan peningkatan signifikan dari 50,69% menjadi 88,89% dengan *N-gain* sebesar 0,77, yang mencerminkan meningkatnya kesadaran peserta didik terhadap perlindungan data pribadi dan keamanan dalam penggunaan media digital (Livingstone dkk., 2019). Sementara itu, indikator literasi etika dan kewargaan digital meningkat dengan *N-gain* sebesar 0,74, yang menunjukkan pemahaman peserta didik terhadap etika berinteraksi dan tanggung jawab sebagai warga digital (Ribble, 2015).

Secara keseluruhan, peningkatan yang terjadi pada setiap indikator literasi digital menunjukkan bahwa E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* berbantuan PhET Simulations efektif dalam memfasilitasi pengembangan keterampilan literasi digital yang terintegrasi dengan capaian pembelajaran. Perpaduan antara aktivitas pemecahan masalah, eksplorasi melalui simulasi digital, dan kerja kolaboratif mendorong keterlibatan aktif peserta didik dalam proses belajar yang relevan dengan kompetensi abad ke-21. Dengan demikian, E-LKPD yang dikembangkan dinyatakan efektif untuk digunakan pada pembelajaran materi perubahan iklim.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, E-LKPD berbasis *Problem-Based Learning* berbantuan PhET Simulations pada materi perubahan iklim kelas X memenuhi kriteria valid, praktis, dan efektif sebagai perangkat pembelajaran untuk meningkatkan literasi digital peserta didik. Validitas E-LKPD berada pada kategori sangat valid ditinjau dari aspek penyajian, kebahasaan, dan isi, sementara kepraktisan tergolong sangat baik berdasarkan keterlaksanaan pembelajaran dan respons peserta didik. Efektivitas E-LKPD ditunjukkan oleh peningkatan signifikan hasil belajar dan literasi digital peserta didik dengan nilai *N-gain* pada kategori tinggi. Dengan demikian, E-LKPD yang dikembangkan layak digunakan sebagai alternatif perangkat pembelajaran pada materi perubahan iklim untuk mendukung penguatan literasi digital peserta didik.

Saran

Berdasarkan keterbatasan penelitian, disarankan agar pengembangan dan implementasi E-LKPD selanjutnya dilakukan pada skala yang lebih luas dengan melibatkan variasi satuan pendidikan, menggunakan desain penelitian yang lebih komparatif untuk memperkuat analisis efektivitas, serta mengembangkan aktivitas pembelajaran dengan integrasi sumber bacaan yang lebih mutakhir dan pemanfaatan simulasi digital atau *virtual laboratory* lain selain PhET Simulations guna memperkaya pengalaman belajar peserta didik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Negeri Surabaya atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian. Apresiasi disampaikan kepada guru Biologi dan peserta didik kelas X-7 SMAN 6 Surabaya atas partisipasi dalam uji coba E-LKPD. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para validator ahli atas masukan dan saran dalam penyempurnaan perangkat pembelajaran. Penghargaan disampaikan kepada University of Colorado Boulder atas pengembangan PhET Interactive Simulations yang digunakan sebagai pendukung pembelajaran dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahyar, D. B., Tuerah, P. R., Irani, U., Subroto, D. E., Masita, E., Gultom, E., Asmara, A., Akbar, M. N., Evitasari, A. D., Ariyani, D., Rahman, M. A., Larekeng, S. H., Yumelking, M., Purnomo, D., Wediyanthi, L. M. D., Aghata, F., & Adika, D. (2023). *Desain Sistem Pembelajaran*. Sumatera Utara: PT. Mifandi Mandiri Digital.

- Almaiah, M.A., Al-Khasawneh, A. and Althunibat, A. (2020). Exploring the Critical Challenges and Factors Influencing the E-Learning System Usage during COVID-19 Pandemic. *Education and Information Technologies*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10219-y>
- Arends, R. I. (2012). *Learning to teach (9th ed.)*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- ASEANstats. (2024). *Statistik akses internet ASEAN 2024*. Jakarta.
- Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Komunikasi dan Digital (BPSDM Komdigi). (2024). *Hasil pengukuran Indeks Masyarakat Digital Indonesia 2024*. Jakarta: Kementerian Komunikasi dan Informatika.
- Badan Standar Nasional Pendidikan. (2014). *Standar Kelayakan Buku Ajar dan Sumber Belajar*. Badan Standar Nasional Pendidikan.
- Barrows, H. S. (1980). *Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education*. Springer.
- Branch, R. M. (2009). *Instructional Design: The ADDIE Approach*. Springer.
- Brown, H. D., & Lee, H. (2025). *Principles of language learning and teaching: A course in second language acquisition (7th ed.)*. Routledge.
- Clark, R. C., & Mayer, R. E. (2021). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning (5th ed.)*. Wiley.
- Clark, T. M. (2024). Using multiple PhET sims to investigate greenhouse gases within a real-world context. *Journal of Chemical Education*, 101(10), 4242–4250. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00551>
- Djahuno, R., Pakaya, I. I., & Zakarina, U. (2024). Instructional System Design Dan Aplikasinya Dalam Penyusunan Bahan Ajar. *Damhil Education Journal*, 4(2), 103–110.
- Dutta, S., & Lanvin, B. (2021). *The network readiness index 2021*. Portulans Institute.
- Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA). (2024). *Digital readiness index 2024–2025*. Jakarta.
- Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2022). *Learning as a generative activity: Eight learning strategies that promote understanding*. Cambridge University Press.
- Ginns, P., & Ellis, R. A. (2007). Quality in e-learning: Checklist for instructional design. *Higher Education Research & Development*, 26(3), 353–369.
- Hake, R. R. (2022). Interactive engagement methods in science education: Revisiting normalized gain. *Journal of Science Education and Technology*, 31(4), 475–487.
- Hermanto, B., Yuliani, S., & Nugroho, A. (2025). Peningkatan kompetensi digital dalam pembelajaran biologi. *Jurnal Pendidikan Biologi*, 10(2), 120–130.
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-Based Learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235–266.
- Hmelo-Silver, C. E., Duncan, R. G., & Chinn, C. A. (2007). Scaffolding and achievement in Problem Based and inquiry learning. *Educational Psychologist*, 42(2), 99–107.
- Johnson, D. W., & Johnson, R. T. (2017). *Joining together: Group theory and group skills (12th ed.)*. Pearson.
- Jong, T. D., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science Education*, 95(6), 877–914.
- Katadata Insight Center. (2022). *Indeks literasi digital nasional 2022*. Jakarta.
- Kefalis, C., Skordoulis, C., & Drigas, A. (2025). Digital simulations in STEM education: Insights from recent empirical studies, a systematic review. *Encyclopedia*, 5(1), 10.
- Kemendikbudristek. (2022). *Pedoman pengembangan bahan ajar Kurikulum Merdeka*. Jakarta.
- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Nomor 23 Tahun 2015 tentang Gerakan Literasi Sekolah*. Jakarta.
- Kosasih, E. (2021). *Pengembangan Bahan Ajar*. Bumi Aksara.
- Lee, N., & Jo, M. (2023). Exploring Problem-Based Learning curricula in the metaverse: The hospitality students' perspective. *Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education*, 32, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.jhlste.2023.100427>
- Livingstone, S., Stoilova, M., & Nandagiri, R. (2019). *Children's data and privacy online: Growing up in a digital age*. London School of Economics and Political Science.
- McKenney, S., & Reeves, T. (2019). *Conducting educational design research (2nd ed.)*. Routledge.
- Moa, L. (2024). Pembelajaran perubahan iklim dan tantangan literasi sains di abad ke-21. *Jurnal Pendidikan Lingkungan*, 8(1), 45–54.
- Mufrihah, F., Ellianawati, E., & Rusilowati, A. (2024). Effectiveness of digital teaching materials in increasing digital literacy. *Unnes Science Education Journal*, 13(3).
- Muhartini, M., Mansur, A., & Bakar, A. (2023). Pembelajaran kontekstual dan pembelajaran Problem-Based Learning. *Lencana: Jurnal Inovasi Ilmu Pendidikan*, 1(1), 66–77.
- Ng, W. (2012). Can we teach digital natives digital literacy? *Computers & Education*, 59(3), 1065–1078. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.04.016>
- Nielsen, J., & Norman, D. A. (2020). *The definition of user experience (UX)*. Nielsen Norman Group.
- Nirmayani, I. (2022). Fungsi lembar kerja peserta didik dalam pembelajaran abad ke-21. *Jurnal Pendidikan Modern*, 4(2), 55–63.

- OECD. (2021). *21st-century readers: Developing literacy skills in a digital world*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a83d84cb-en>
- Palmer, S. E., Schloss, K. B., & Sammartino, J. (2013). Visual aesthetics and human preference. *Annual Review of Psychology*, *64*, 77–107.
- Perkins, K. K., Adams, W. K., Dubson, M., Finkelstein, N. D., Reid, S., & Wieman, C. E. (2014). PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. *The Physics Teacher*, *52*(1), 6–11. <https://doi.org/10.1119/1.4862641>
- Pratiwi, M. K., & Indana, S. (2022). Pengembangan E-Modul Berbasis QR-Code untuk Melatihkankemampuan Literasi Digital Siswa pada Materi Perubahan lingkungan. *Berkala Ilmiah Pendidikan Biologi (BioEdu)*, *11*(2), 457-468.
- Pusat Kajian Anggaran – Badan Keahlian DPR RI. (2021). *Transformasi Digital Pendidikan selama Pandemi COVID-19*. Jakarta.
- Putrayasa, I. M. (2024). Transformasi literasi di era digital. *Educational Science and Social Review*, *3*(1), 159–161.
- Redecker, C. (2017). *European framework for the digital competence of educators (DigCompEdu)*. Publications Office of the European Union.
- Reinking, D. (2021). *Design-Based Research in Education*. Guilford Press.
- Ribble, M. (2015). *Digital citizenship in education (3rd ed.)*. ISTE.
- Riduwan. (2012). *Skala Pengukuran Variabel-Variabel Penelitian*. Alfabeta.
- Rouinfar, A. (2023). *Greenhouse Effect Teaching Guidance [Teaching guidance for PhET simulation]*. Education Nature Park.
- Rullah, A. D., Silva, F. R., Pratama, E. T. H., & Purwanto, E. (2025). Strategi komunikasi untuk meningkatkan literasi digital di kalangan pemuda. *Jurnal Pemberdayaan Ekonomi dan Masyarakat*, *2*(1), 16.
- Rustan, E. (2024). *Desain Instruksional dan Pengembangan Pembelajaran Bahasa*. Selat Media Parners.
- Safitri, F., Ramlah, R., Sandy, W., & Siregar, A. C. (2025). *Literasi digital dalam dunia pendidikan*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Salsabila, Y. R., & Muqowim, M. (2024). Korelasi teori konstruktivisme Vygotsky dengan PBL. *LEARNING: Jurnal Inovasi Penelitian Pendidikan dan Pembelajaran*, *4*(3), 813–827.
- Schmidt, H. G. (1983). Problem-Based Learning: Rationale and description. *Medical Education*, *17*(1), 11–16.
- Siemens, G. (2005). Connectivism: Learning as network-creation. *ASTD Learning News*, *10*(1), 1-28.
- Simamora, A. A., & Asri, M. T. (2024). Pengembangan E-LKPD Interaktif untuk Melatihkan Kemampuan Literasi Digital Peserta Didik Kelas X SMA pada Materi Virus. *Berkala Ilmiah Pendidikan Biologi (BioEdu)*, *13*(2), 339-355.
- Situmorang, F., & Nugroho, A. (2024). Integrasi literasi digital dalam Kurikulum Merdeka. *Jurnal Pendidikan Indonesia*, *9*(1), 45–59.
- Sudarwati, E., & Indhiarti, T. R. (2023). *Literasi Multimodal: Teori, Desain, dan Aplikasi*. Universitas Brawijaya Press.
- Sugiyono. (2006). *Statistika untuk penelitian*. Alfabeta.
- Suryaningsih, S., & Nurlita, R. (2021). Pentingnya Lembar Kerja Peserta Didik Elektronik (E-LKPD) Inovatif dalam Proses Pembelajaran Abad 21. *Jurnal Pendidikan Indonesia (Japendi)*, *2*(07), 1256–1268. <https://doi.org/10.59141/japendi.v2i07.233>
- Tasliyah, A. L., Nuraeni, A., & Rachman, I. F. (2024). Literasi digital dalam perspektif SDGs 2030. *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik*, *1*(3), 154–165.
- Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional Development for Training Teachers of Exceptional Children: A Sourcebook*. Indiana University, Center for Innovation in Teaching the Handicapped (CITH).
- UNESCO. (2021). *Media and information literacy: Curriculum and competency framework*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2023). *Global Framework on Digital Literacy Skills*. UNESCO Publishing.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations.
- Warneri, W., Salam, U., Putri, W. A., Imandari, R. Z., Pratiwi, R. D., & Chairunnisa, T. (2024). Utilization, simulation and learning: The virtual laboratory learning media PhET for outcomes learning. *JTP-Jurnal Teknologi Pendidikan*, *26*(3), 960-970.