Eduproxima: Jurnal Ilmiah Pendidikan IPA
http://jurnal.stkippgritulungagung.ac.id/index.php/eduproxima

PENGEMBANGAN *E-BOOK* LISTRIK DINAMIS BERMODEL *PjBL-STEM* BERBANTUAN *PhET* UNTUK MENINGKATKAN KETERAMPILAN BERPIKIR KRITIS DAN KOLABORASI PESERTA DIDIK SMP KELAS IX

Dwi Siti Nur Hayati [*1)], Tien Aminatun [2)], Umi Shalihah Putri Purwati [3)]
[1), 3)] Pendidikan Sains, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia
[2)] Pendidikan Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia
[*]*Penulis korespondensi*
e-mail: dwisitigd@gmail.com [*1)], tien_aminatun@uny.ac.id [2)], umishalihahputripurwati@gmail.com [3)]

Article history:
Submitted: Jan. 02nd, 2026; Revised: Feb. 05th, 2026; Accepted: March 09th, 2026; Published: July 12th, 2026

ABSTRAK

Keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi merupakan kompetensi penting abad ke-21 yang masih tergolong rendah pada peserta didik SMP. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *e-book* listrik dinamis bermodel *Project-based Learning* terintegrasi *STEM* (*PjBL-STEM*) berbantuan *PhET* untuk melatih kedua keterampilan tersebut. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian dan pengembangan (*R&D*) dengan model ADDIE. Validasi produk dilakukan oleh dua dosen ahli menggunakan *Content Validity Ratio* (*CVR*) dan *Content Validity Index (CVI*). Uji coba terbatas meliputi uji keterbacaan yang dilakukan oleh 15 peserta didik SMP kelas IX dan uji kepraktisan oleh 2 guru IPA. Hasil validasi kelayakan menunjukkan *e-book* memiliki nilai *CVI* sebesar 1,00 yang menandakan produk berada dalam kategori esensial dan layak digunakan. Uji keterbacaan memperoleh persentase rata-rata 86% berada dalam kategori sangat baik dan uji kepraktisan oleh guru mencapai 97,9% berada dalam kategori sangat baik. Dengan demikian, *e-book* yang dikembangkan layak dan praktis digunakan dalam pembelajaran IPA untuk melatih keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik SMP.

Kata Kunci: *e-book*; listrik; *PjBL-STEM*; *PhET*

PENDAHULUAN

Globalisasi menghadirkan pengaruh yang signifikan di berbagai lini kehidupan, termasuk mengubah paradigma pendidikan. Adaptasi kurikulum dan metode pengajaran dengan standar global menjadi alternatif dalam membekali peserta didik untuk siap mengambil bagian menjadi masyarakat dunia (Karim *et al.*, 2024). Berpikir kritis merupakan salah satu keterampilan yang perlu dikuasai peserta didik sebagai tuntutan pendidikan abad ke-21 (Febrianti & Rahayu, 2022). Seperti halnya berpikir kritis, keterampilan kolaborasi sama pentingnya untuk dibekalkan kepada peserta didik. Hal ini selaras dengan esensi Kurikulum Merdeka yang diterjemahkan dalam Profil Pelajar Pancasila, salah satu konteksnya adalah dimensi bernalar kritis dan gotong royong (BSKAP, 2022).

Fakta dilapangan menunjukkan bahwa keterampilan berpikir kritis peserta didik, terutama dalam mata pelajaran IPA masih berada pada kategori rendah hingga sedang (Putri *et al.*, 2024). Senada dengan hasil penelitian Maryani *et al*. (2021) yang melakukan analisis keterampilan berpikir kritis di salah satu SMP di Bogor, yaitu 88,64% berada pada kategori kurang kritis dan 9,66% berada pada kategori sangat kurang kritis. Penelitian Priandini *et al*. (2022) dan Najaah (2021) menunjukkan

bahwa keterampilan kolaborasi peserta didik juga masih berada pada kategori rendah dan perlu untuk dioptimalkan.

Keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi menjadi urgensi untuk dibekalkan melalui pendidikan karena memberikan implikasi pada peserta didik. Ghazlane *et al*. (2022) menyatakan bahwa individu dengan keterampilan berpikir kritis yang tinggi akan cenderung mencapai kesuksesan akademik dalam banyak domain, seperti menganalisis, menafsirkan, mengevaluasi bukti dan membuat keputusan yang tepat. Keterampilan kolaborasi yang tinggi akan membantu peserta didik bekerja dalam kelompok untuk menemukan solusi dari permasalahan, sehingga akan menghasilkan lebih banyak pengetahuan dalam mencapai tujuan belajar. Selain dunia pendidikan, keterampilan kolaborasi juga dibutuhkan dalam dunia kerja (Saenab *et al.,* 2019).

Penyediaan bahan ajar berupa *e-book* menjadi salah satu upaya untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik. *E-book* dapat digunakan sebagai bahan ajar yang berpusat pada siswa. *E-book* berisikan konten materi dan LKPD yang menarik dan interaktif untuk menumbuhkan maupun melatih keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi. Keunggulan dari *e-book*, di antaranya bisa memfasilitasi peserta didik untuk membaca ulang materi pembelajaran dimana saja dan kapan saja (Rosmawati, 2023). Pengembangan *e-book* untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis dengan hasil valid dan sangat praktis telah dilakukan, di antaranya pengembangan *e-book* materi bangun datar (Andriani *et al.*, 2023), *e-book* interaktif materi keanekaragaman hayati (Syuryani & Rachmadiarti, 2020), dan *e-book* materi pertumbuhan dan perkembangan (Febriarti & Rahayu, 2022).

Project-based Learning terintegrasi *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (*PjBL-STEM*) diduga menjadi kombinasi model dan pendekatan pembelajaran yang bisa memfasilitasi pengembangan keterampilan berpikir kritis maupun kolaborasi peserta didik. Pendekatan *STEM* berdampak positif terhadap pengembangan keterampilan berpikir kritis peserta didik melalui proyek sederhana pada topik fluida dinamis (Ardianti *et al.,* 2020). *STEM* memberikan ruang untuk mengembangkan keterampilan berpikir kritis melalui identifikasi masalah, analisis, pemecahan masalah, hingga penarikan kesimpulan yang tepat dan relevan (Ritonga & Zulkarnaini, 2021; Capraro *et al.,* 2013). Pembelajaran berbasis proyek akan mendorong pengembangan keterampilan kolaborasi. Aktivitas *PjBL* akan mengorganisasi siswa dalam kelompok untuk melakukan persiapan dan perencanaan, ekplorasi topik secara mendalam, membuat produk, presentasi hasil, hingga evaluasi (Riak & Hananto, 2023).

Pembelajaran bermodel *PjBL-STEM* menurut Laboy-Rush terdiri atas 5 tahap, yaitu *reflection*, *research*, *discovery*, *application*, dan *communication*. Tahap *reflection* akan mengorientasi peserta didik pada permasalahan kontekstual yang bermuara pada pembuatan proyek sebagai alternatif pemecahan masalah. Tahap ini akan memfasilitasi dalam mengembangkan keterampilan interpretasi masalah, menjelaskan, tanggung jawab, serta aktif dalam kelompok untuk memberikan kontribusi ide dalam pemecahan masalah. Tahap *research* atau penelitian akan melatih peserta didik dalam

mengumpulkan informasi melalui eksplorasi. Informasi yang dikumpulkan mengacu pada kebutuhan pembuatan proyek. Pada tahap ini, peserta didik akan dilatih untuk menafsirkan, menjelaskan, dan menganalisis informasi yang diperoleh. Aktivitas *PhET* yang diintegrasikan pada tahap ini sangat kuat untuk mendukung observasi dan interpretasi fenomena (Khofifah *et al*., 2024; Sudirman *et al*., 2024)

Informasi yang didapat pada tahap sebelumnya akan dianalisis lebih lanjut pada tahap *discovery*. Tahap ini melibatkan proses berpikir yang kompleks, dimana peserta didik perlu memahami permasalahan, menganalisis, hingga mengevaluasi. Tahap ini juga akan melatih keterampilan peserta didik dalam bekerja secara aktif dalam kelompok, beradaptasi dalam berbagai peran, berkompromi, dan bertanggung jawab dalam kelompok.

Tahap *application* atau penerapan. Tahap ini melatih keterampilan peserta didik dalam menghasilkan produk sesuai dengan rancangan yang telah dibuat, melakukan uji coba, dan evaluasi. Tahap keempat dari *PjBL-STEM* akan Proses ini diduga akan melatih peserta didik memiliki keterampilan dalam melakukan evaluasi, inferensi, bertanggung jawab menyelesaikan tugas, berkompromi dengan orang lain, dan beradaptasi dengan berbagai peran.

Tahap terakhir dari model pembelajaran *PjBL-STEM* adalah *communication* atau mengkomunikasikan. Pada tahap ini, peserta didik menunjukkan hasil proyek dan memaparkan dalam kegiatan presentasi. Tahapan terakhir ini diyakini akan memfasilitasi peserta didik untuk menjelaskan produk yang telah dibuatnya. Selain itu, tahapan ini juga akan memberikan ruang bagi peserta didik untuk menjelaskan, inferensi, evaluasi, bertanggung jawab menyelesaikan tugas, dan beradaptasi dengan berbagai peran melalui pembagian materi presentasi.

Media pembelajaran menjadi faktor yang tidak boleh diabaikan. Pemilihan media pembelajaran yang tepat bisa menunjang keberhasilan proses pembelajaran. *Physics Education Technology (PhET)* Simulation menjadi salah satu media pembelajaran yang diduga bisa meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik. Kelebihan dari *PhET* yaitu mampu memberikan gambaran fenomena abstak yang sulit diobservasi langsung oleh indera manusia, bisa diakses secara offline maupun online secara gratis, software tidak mudah terserang virus, berisi animasi interaktif layaknya permainan. *PhET* juga bertujuan untuk melihatkan peserta didik dalam eksplorasi ilmiah dan meningkatkan minatnya dalam belajar sains (Verdian *et al.,* 2021; Wisma, 2022).

Listik dinamis merupakan materi IPA yang dianggap sulit oleh sebagian peserta didik. Hal ini disebabkan sebagian materi yang dipelajari bersifat abstak, artinya sulit diamati secara fisis (Baptista & Martins, 2023). Persentase peserta didik yang menjawab benar dalam Ujian Nasional 2019 mata pelajaran IPA menunjukkan bahwa materi gelombang, listrik, dan magnet mendapatkan nilai terendah yaitu 32,19%. Pada topik listrik, terdapat 1 butir soal listrik statis (muatan listrik) dan 2 soal listrik dinamis (rangkaian hambatan seri dan paralel dan daya listrik). Persentase peserta didik yang menjawab benar pada subtopik muatan listrik sebesar 40,29%, subtopik rangkaian hambatan seri dan paralel sebesar 38,76%, dan daya listrik sebesar 26,50%. Capaian persentase ini mengindikasi bahwa hasil

belajar peserta didik tentang listrik dinamis masih sangat rendah.

Integrasi *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* pada materi listrik dinamis masih sangat terbatas. Hal ini senada dengan penelitian Martiani & Subali (2023) menunjukkan bahwa tren penelitian pengembangan *e-LKPD* berbasis *STEM* menggunakan model pembelajaran *PjBL* pada materi tekanan zat. Pembelajaran *PjBL-STEM* sering diintegrasikan pada materi suhu dan kalor, serta getaran dan gelombang (Yulianti *et al*., 2025) .

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraian, peneliti akan melakukan pengembangan e-book listrik dinamis bermodel *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik. Inovasi produk yang dikembangkan terletak pada integrasi sintaks *PjBL-STEM* dan *PhET*. Sintaks *PjBL-STEM* yang akan diintegrasikan dalam *e-book* yaitu menurut Laboy-Rush (2010) berupa *reflection*, *research*, *discovery*, *application*, dan *communication*. *PhET* digunakan untuk membantu peserta didik mengeksplorasi karakteristik rangkaian seri dan paralel guna mempermudah membuat proyek. *e-Book* yang dikembangkan memuat proyek membuat miniatur rumah dan instalasi listriknya. *e-book* yang dikembangkan memuat materi listrik dinamis yang terdapat pada kelas IX. Cakupan isi dibatasi pada konsep hantaran listrik, arus listrik, rangkaian hambatan seri dan paralel, dan daya listrik. *E-book* dibuat menggunakan *Canva* dan *Heyzine Flipbook*.

Tujuan dari pengembangan ini adalah untuk mengetahui kelayakan e-book yang dikembangkan menurut ahli materi dan media, serta menganalisis kepraktisannya menurut guru dan peserta didik.

METODE

Penelitian ini adalah penelitian pengembangan (*Research and Development/R&D)*. Penelitian pengembangan ini dilakukan untuk menghasilkan sebuah produk berupa *e-book* Listrik Dinamis Bermodel *PjBL-STEM* Berbantuan *PhET* untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik. Model pengembangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ADDIE. Model ADDIE memiliki 5 tahap, yaitu *Analysis* (analisis), *Design* (perancangan), *Development* (pengembangan), *Implementation* (implementasi), dan *Evaluation* (evaluasi) (Branch, 2009). Validasi *e-book* dilakukan oleh 2 dosen ahli. Uji coba terbatas berupa penilaian kepraktisan oleh 2 guru IPA dan keterbacaan oleh 15 peserta didik kelas IX yang hetetogen. Pemlihan peserta didik dilakukan dengan kriteria 5 peserta didik kategori berkemampuan tinggi, 5 peserta didik kategori berkemampuan sedang, dan 5 peserta didik kategori berkemampuan rendah. Peserta didik terdiri dari 7 perempuan dan 8 laki-laki, dapat mengoperasikan dan memiliki *smartphone* yang dapat tersambung internet. Uji kepraktisan dan keterbacaan ini dilakukan di sekolah dengan memanfaatkan akses internet yang dimiliki sekolah.

Penelitian ini menghasilkan dua kategori data, yaitu kuantitatif dan kualitatif. Nilai atau skor dari para ahli merupakan data kuantitatif. Sedangkan saran dan masukan dari para ahli pada lembar validasi menghasilkan data kualitatif. Uraian analisis data yang digunakan dijelaskan sebagai berikut.

1) Analisis Kelayakan Produk

Penilaian kelayakan *e-book* yang dikembangkan dilakukan oleh dua dosen ahli menggunakan *Content Validity Ratio* (*CVR*) dan *Content Validity Index* (*CVI*). Analisis data kuantitatif dengan skor 0 untuk jawaban "Tidak" dan skor 1 untuk jawaban "Ya". Pendekatan yang dijelaskan oleh Lawshe (1975) panel terdiri dari beberapa ahli dinamakan *Subject Matter Expert* (*SME*). Kualitas produk dipastikan dengan menganalisis data yang diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$CVR = \frac{ne - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} = 2\frac{ne}{N} - 1$$

Keterangan:
ne: jumlah *SME* yang menilai esensial pada butir
N: jumlah *SME* yang melakukan penilaian

Nilai *CVR* berada pada rentang -1,00 hingga +1,00 dengan *CVR* = 0,00, maka 50% dari SME menyebutkan bahwa item tergolong esensial atau valid. Setelah menghitung *CVR*, analisis dilanjutkan dengan melakukan perhitungan *CVI*. Perhitungan *CVI* dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$CVI = \frac{\sum CVR}{n}$$

Keterangan:
n : jumlah butir pernyataan/indikator

2) Analisis Kepraktisan Produk

Analisis kepraktisan didasarkan pada hasil uji terbatas, yaitu angket kepraktisan oleh guru dan keterbacaan oleh peserta didik. Skor rata-rata setiap aspek dan rata-rata secara keseluruhan dihitung menggunakan rumus:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Keterangan:
$\bar{x}$: skor rata-rata keterbacaan *e-book*
$\sum x$: jumlah sko r keseluruhan aspek/indikator
n : jumlah skor total

Skor rata-rata untuk seluruh penilaian angket dicari persentasenya, kemudian diubah menjadi data kualitatif dengan kategori penilaian sebagai berikut (Arikunto, 2009).

Tabel 1. Kategori Kepraktisan dan Keterbacaan

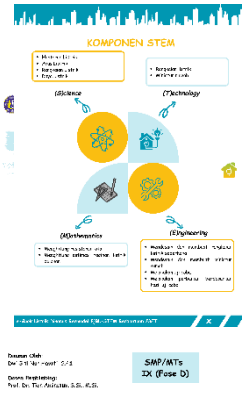
Persentase (%)	Kategori
80 – 100	Sangat baik
61 – 80	Baik
41 – 60	Cukup
21 – 40	Kurang
<21%	Sangat kurang

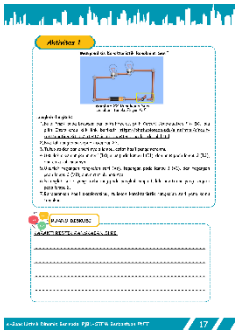
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tampilan *e-book* yang dikembangkan disajikan sebagai berikut.

Gambar 1. Tampilan c*over e-book*

Gambar 2. Komponen *STEM*





Gambar 3. Aktivitas *PhET*

Hasil validasi kelayakan dan kepraktisan *e-book* yang dikembangkan disajikan sebagai berikut.

1) Hasil Validasi Kelayakan *e-Book*

Hasil analisis validasi kelayakan menunjukkan bahwa *e-book* yang dikembangkan berada dalam kategori esensial dengan nilai *CVI* sebesar 1,00, sehingga *e-book* dapat dikatakan valid. Hasil penilaian setiap aspeknya disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Validasi Kelayakan *e-Book*

Aspek	*CVR*	*CVI*
Komponen *e-Book*	1	1
Isi	1	
Karakteristik *e-Book*	1	
Kebahasaan	1	
Penyajian	1	
Kegrafikan	1	

Perolehan *CVI* menyatakan bahwa produk layak digunakan dalam pembelajaran. *E-book* ini telah melalui perbaikan berdasarkan saran dan komentar dari dosen ahli hingga dinilai layak untuk diterapkan dalam uji coba lapangan. Nilai *CVR* maupun *CVI* yang diperoleh menunjukkan bahwa setiap aspek dalam *e-book* yang dikembangkan mendapatkan nilai maksimal. Hal ini menandakan bahwa *e-book* yang dikembangkan sangat sesuai dari segi isi maupun kelayakan penggunaan dalam pembelajaran.

Hasil penilaian pada aspek komponen menunjukkan bahwa *e-book* telah disusun secara sistematis, menarik, dan konsisten. Hasil penilaian isi menandakan bahwa susbtansi materi dan urutan penyajiannya telah sesuai dengan kompetensi dasar, tujuan pembelajaran, maupun tingkat perkembangan peserta didik. Hal ini selaras dengan pendapat Reftiyana & Susantini (2025) yang menyatakan bahwa kesesuaian materi dengan kurikulum yang berlaku dan kedalaman konten yang relevan maupun akurat menjadi faktor penting dalam penentu kelayakan *e-book*. Penelitian pengembangan *e-book* listrik dinamis oleh Admojo *et al.* (2023) juga mencakup materi definisi listrik dinamis, arus listrik, rangkaian hambatan, hingga energi dan daya listrik. Hasil penilaian aspek isi yang valid menandakan bahwa bahan ajar yang dikembangkan telah memfasilitasi peserta didik dalam mempraktikkan pembelajaran berbasis keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi (Alkautsar *et al.*, 2023; Syaifullah & Prasetyo, 2025).

Hasil penilaian aspek karakteristik *e-book* menandakan bahwa *e-book* telah mengintegrasikan model *PjBL-STEM* dan media *PhET*. Sejalan dengan pengembangan *e-book* yang dilakukan oleh Astutik *et al*. (2024) yang menunjukkan bahwa *e-book PjBL-STEM* yang dikembangkan dinyatakan layak karena dilengkap model pembelajaran yang sesuai dengan sintaks *PjBL-STEM*, yaitu *reflection, research, discovery, application*, dan *communication*. Hasil penilaian aspek kebahasan menunjukkan bahwa *e-book* menggunaan bahasa yang sesuai dengan kaidah Pedoman Umum Ejaan Bahasa Indonesia (PUEBI). Hal ini selaras dengan penelitian Triando & Isnawati (2024) bahwa *e-book* yang dikembangkan layak digunakan dari segi bahasa karena menggunakan bahasa yang

sesuai dengan PUEBI dan tidak menimbulkan penafsiran ganda maupun keambiguan dalam pemaknaannya.

Penilaian aspek penyajian menunjukkan bahwa *e-book* telah menyajikan informasi secara menarik dan bervariasi. Materi tidak hanya berupa teks, tetapi dilengkapi gambar, tabel, dan video yang relevan. Hasil penilaian ini selaras dengan temuan penelitian Suroya *et al*. (2024) yang menunjukkan bahwa konsistensi dalam tipografi seperti jenis huruf, ukuran, dan warna yang berdampak pada pengalaman membaca digital.

2) Hasil Uji Terbatas

Hasil uji coba terbatas yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui kepraktisan dan keterbacaan produk yang telah dikembangkan dan dinyatakan layak digunakan dalam pembelajaran. Angket respon ini diberikan kepada 15 peserta didik. Tabel 3 menyajikan hasil analisis keterbacaan produk oleh peserta didik.

Tabel 3. Hasil Uji Keterbacaan oleh Peserta Didik

No	Aspek	Rerata	Ketegori
1	Isi	85%	Sangat Baik
2	Kebahasaan	87%	Sangat Baik
3	Tampilan	89%	Sangat Baik
4	Penyajian	83%	Sangat Baik
Rerata Keseluruhan		86%	Sangat Baik

Tabel 3 menyajikan hasil uji keterbacaan oleh peserta didik dengan rerata keseluruhan sebesar 86% yang termasuk dalam kategori sangat baik. Hal ini menunjukan bahwa *e-book* listrik dinamis bermodel *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* sudah sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan peserta didik. Hasil penilaian keterbacaan *e-book* oleh peserta didik menunjukkan bahwa materi yang disajikan dan bahasa yang digunaan cukup mudah dipahami oleh target kelas. Tampilan dan penyajian mendukung pemahaman peserta didik. Adanya integrasi simulasi *PhET* juga meningkatkan ketertarikan dan pemahaman peserta didik terhadap konsep listrik dinamis melalui kegiatan eksploratif yang interaktif. Hasil ini selaras dengan penelitian pengembangan *e-book* berbasis *STEM* yang dilakukan oleh A'yun *et al*. (2023) yang mendapatkan skor respon peserta didik dalam kategori sangat tinggi.

Selain uji keterbacaan, dilakukan uji kepraktisan oleh 2 guru IPA. Hasil analisis kepraktisan *e-book* disajikan pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Analisis Kepraktisan *e-Book* oleh Guru IPA

No	Aspek	Rerata	Ketegori
1	Isi	97,7 %	Sangat Baik
2	Karakteristik *e-book*	100 %	Sangat Baik
3	Kebahasaan	97,9 %	Sangat Baik
4	Penyajian	95 %	Sangat Baik
5	Kegrafisan	96,8 %	Sangat Baik
Rerata Keseluruhan		97,9 %	Sangat Baik

Tabel 4 menyajikan ringkasan hasil uji kepraktisan oleh guru IPA dengan rerata keseluruhan sebesar 97,9% yang termasuk dalam kategori sangat baik. Hal ini menunjukan bahwa *e-book* listrik dinamis bermodel *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* praktis untuk digunakan dalam pembelajaran IPA.

Hasil kepraktisan yang diperoleh sejalan dengan Nieveen (1999) yang menyatakan bahwa suatu produk pembelajaran dikatakan praktis apabila dapat digunakan dengan mudah oleh pengguna, baik itu guru maupun peserta didik, serta sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Dengan demikian, baik menurut guru maupun peserta didik, *e-book* yang dikembangkan praktis, diantaranya tidak hanya membantu guru dalam

melaksanakan pembelajaran, tetapi juga membantu peserta didik dalam memahami materi listrik dinamis.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan internal yang perlu diperhatikan dalam penafsiran hasil. Ukuran sampel yang relatif kecil serta penggunaan teknik *purposive sampling* menyebabkan hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan secara luas. Selain itu, penilaian kepraktisan dan keterbacaan masih didasarkan pada persepsi guru dan peserta didik, sehingga berpotensi mengandung bias subjektif. Keterbatasan lain adalah belum digunakannya kelompok pembanding, sehingga dampak *e-book* terhadap peningkatan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi belum dapat disimpulkan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini perlu ditafsirkan secara hati-hati dan menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dengan desain eksperimen yang lebih kuat dan jumlah sampel yang lebih besar.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan *e-book* listrik dinamis bermodel *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* yang dikembangkan layak berdasarkan validasi ahli materi dan media dengan nilai 1,00 (valid) atau berada pada kategori esensial. produk *e-book* yang dikembangkan mendapatkan nilai persentase rata-rata kepraktisan dari guru IPA sebesar 97,9% yang berada dalam kategori sangat baik dan persentase rata-rata keterbacaan oleh peserta didik sebesar 86%, yang juga berada pada kategori sangat baik. Hal ini dapat diartikan bahwa *e-book* listrik dinami bermodel *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* layak dan sangat baik untuk dimanfaatkan dalam pembelajaran untuk melatih kemampuan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik SMP.

Berdasarkan hasil penelitian, direkomendasikan beberapa langkah praktis bagi sekolah maupun pembuat kebijakan untuk optimalisasi keterampilan berpikir kritis maupun kolaborasi pada pembelajaran IPA, khususnya materi listrik dinamis. Pertama, sekolah perlu menyelenggarakan pelatihan guru terkait penggunakan simulasi *PhET*, penerapan model *PjBL-STEM*, termasuk perancangan proyek, fasilitasi diskusi, serta penilaian proses dan produk. Kedua, sekolah perlu menyediakan perangkat untuk mendukung pembelajaran berbasis digital. Selanjutnya, bagi pembuat kebijakan baik di tingkat satuan pendidikan maupun daerah perlu menyusun pedoman penilaian keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi melalui rubrik yang operasional dan terukur. Integrasi *PjBL-STEM* berbantuan *PhET* perlu dimasukkan dalam kebijakan pengembangan perangkat ajar dan supervisi akademik secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada kepala SMP Negeri 2 Bangorejo yang memberikan izin penelitian, guru IPA dan peserta didik kelas IX yang telah bersedia menjadi partisipan dalam penelitian ini.

REFERENSI

Admojo, M. R. F., Atiqoh, A., Walujo, D. A. (2023). Development of an epub format e-book on dynamic electricity material. Practice of the Science of Teaching Journal: Jurnal Praktisi Pendidikan, 2(2), 75-83. https://doi .org/10.58362/hafecspost.v2i2.36

Alkautsar, S., Nuryady, M. M., Husamah, Wahyono, P., & Miharja, F. J. (2023). STEM-PjBL worksheet:

Ways to improve students' collaboration, creativity, and computational thinking. Jurnal Kependidikan: Jurnal Hasil Penelitian dan Kajian Kepustakaan di Bidang Pendidikan, Pengajaran, dan Pembelajaran. 9(2): 681-695. https://doi.org/10.33394/jk.v9i2.7587

Andriani, W., Siswono, T. Y. E., & Prastiti, T. D. (2023). Pengembangan *e-book* materi bangun datar untuk meningkatkan kemampuan berpikir kritis kelas III sekolah dasar. *Majamath: Jurnal Matematika dan Pendidikan* Matematika, 6(1), 33 – 47. https://doi.org/10.36815/majamath.v6i1.2544

Ardianti, S., Suliswoeo, D., Pramudya, Y., & Raharjo, W. (2020). The impact of the use o STEM education approach on blended learning to improve student's critical thinking skills. *Universal Journal of Education* Research, 8(3B), 24 – 32. https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081503

Arikunto, Suharsimi. (2009). Dasar-dasar Evaluasi Pendidikan Edisi Revisi. Jakarta: PT. Bumi Aksara.

Astutik, I. D., Pramasdyahsari, A. S., & Setyawati, R. D. (2024). Development of PJBL-STEM based e-books assisted by geometry calculator to foster students' critical thinking ability. *Kreano Jurnal Matematika Kreatif-Inovatif*, 15(1), 69 – 82. https://doi.org/10.15294/eddrkj25

A'yun, Q., Rusilowati, A. & Lisdiana, L. (2020). Improving students' critical thinking skills through the STEM digital book. *Journal of Innovative Science Education*, 9(2), 237 - 243. https://doi.org/10.15294/jise.v8i3.35260

Baptista, M., & Martins, I. (2023). Effect of a STEM approach on students' cognitive structures about electrical circuits. *International Journal of STEM Education*, 10(15), 1 – 21. https://doi.org/10.1186/s40594-022-00393-5

Branch, R. M. (2009). Intructional Design. Springer. https://doi.org.10.1007/978-3-319-15347-6_300893

BSKAP. (2022). Dimensi, Elemen, dan Subelemen Profil Pelajar Pancasila pada Kurikulum Merdeka. https://kurikulum.kemdikbud.go.id/wp-content/uploads/2022/07/V.2-Dimensi-elemen-subelemen-Profil-Pelajar-Pancasila-pada-Kurikulum-Merdeka.pdf

Capraro, R. M., Capraro, M. M., & Morgan, J. R. (Eds), (2013). STEM Project-Based Learning: An Integrated Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Approach (2nd Edition). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publisher.

Febriarti, F. D. & Rahayu, Y. S. (2022). Pengembangan *e-book* interaktif pada materi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan untuk melatihkan keterampilan berpikir kritis siswa kelas XII SMA. *Bioedu: Berkala Ilmiah Pendidikan Biologi*, 11(3), 775 – 784. https://doi.org/10.26740/bioedu.v11n3.p775-784

Ghazlane, I., Marnoufi, K., Daaif, J., Touri, B. (2022). The relationship between critical thinking skills, portfolio models and academic achievement of moroccan midwifery students. *Journal of Educational and Social Research*, 12(5), 20 – 32.

https://doi.org/10.36941/jesr-2022-0119

Karim, A., Anawar, U. S., & Suherman. (2024). Transformasi pendidikan di era globalisasi: Integrasi dan tantangan terhadap sistem pendidikan Indonesia. *ALIGNMENT*: *Journal of Administration and Educational Management*, 7(2), 602 – 609. https://doi.org/10.31539/alignment.v7i2.10149

Khofifah, K., Yuliani, H., & Santiani, S. (2024). Meta-analysis: The effect of PhET simulation media on enhancing conceptual understanding in physics learning. Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika, 7(3), 532 – 543. https://doi.org/10.20527/jipf.v7i3.9046

Laboy-Rush, D. (2010). *Integrated STEM education through project-based learning*.

Lawshe, C. H. (1975). A Quantitative Approach to Content Validity. Journal of Personnel Psychology: Purdue University.

Martiani, N. P. & Subali, B. (2024). Kajian literatur trend penelitian e-LKPD berbasis STEM pada bidang fisika tahun 2019-2024 di Indonesia. Unnes Physics Education Journal, 13(2), 107-116. https://doi.org/10.15294/upej.v13i2.9299

Maryani, Y., Prasetyorini, P., & Permana, I. (2021). Critical thinking skills of junior high school students in science learning. *Scientiae Educatia: Jurnal Pendidikan Sains*, 10(1), 20 – 28. http://dx.doi.org/ 10.24235/sc.educatia.v10i1.8034

Najaah, L. S. (2021). Analisis keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi peserta didik sekolah menengah pertama (SMP). *Jarlitbang: Jurnal Jaringan Penelitian Pengembangan Penerapan Inovasi*. *7*(2), 115–122. DOI: https://doi.org/ 10.59344/jarlitbang.v7i2.64

Nieveen, N. (1999). Prototyping to Reach Product Quality. Design Approaches and Tools in Education and Training, 125–135. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4255-7_10

Priandini, A. B., Fadly, W., Zubaidi, A. and Ju'subaidi, J. (2022). Analisis Kemampuan Kolaborasi Peserta Didik Kelas VIII MTs N 6 Ponorogo. In PISCES: Proceeding of Integrative Science Education Seminar, [online] 2, pp.181–189. https://prosiding.iainponorogo.ac.id/index.php/pisces/article/view/767

Putri, A, N, L., Sutarto, S., & Wahyuni, D. (2024). Meta analisis kemampuan berpikir kritis siswa SMP dalam pembelajaran IPA. *Jurnal Penelitian Pembelajaran Fisika*, 15(1), 43 – 48. https://doi.org/10.26877/jp2f.v15i1.15580

Reftiyana, D. & Susantini, E. (2025). The Validity of interactive e-book on human heredity material to improve critical thinking skills of 12th grade high school students. Bioedu, 14(1), 149 - 156. https://doi.org/10.26740/bioedu.v14n1.p149-156

Riak, S. & Hananto. (2023). Penerapan model pembelajaran project-based learning dalam meningkatkan keterampilan kolaborasi, kemampuan regulasi diri, dan keterampilan berpikir kreatifpada pembelajaran biologi topik pembelahan selpada siswa sma kelas XII IPA. *AoEJ: Academy of Education Journal*, 14(2), 890 – 905.

https://doi.org/10.47200/aoej.v14i2.1942

Ritonga, S. & Z. Zulkarnaini. (2021). Penerapan pendekatan STEM untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik. *Jurnal Guru dan Pembelajaran*, 4(1), 75 – 81. https://doi.org/10.30605/jspg.4.12021.519

Rosmawati, Wiwin. (2023). Efektivitas penggunaan *e-book* untuk melatih kemampuan berpiikir kritis peserta didik. *Jurnal Didaktika Pendidikan Dasar*, 7(3), 979 – 1002. https:// doi. org/10.26811/didaktika.v7i3.1172

Saenab, S., Yunus, S. R., & H. Husain. (2019). Pengaruh penggunaan model project based learning terhadap keterampilan kolaborasi mahasiswa pendidikan IPA. *Biosel: Biology Science and Education*, 8(1), 29 – 41. https://doi.org/10.33477/bs.v8i1.844

Sudirman, S., Marwoto, P., & Nugroho, S. E. (2024). Analysis of energy concepts through PhET simulation: a case study on Skate Park. EduFisika: Jurnal Pendidikan Fisika, 9(3), 322 – 331. https://doi.org/10.59052/edufisika.v9i3.40039

Suroya, H. S., Torrens, G. E. & Downs, S. T. (2024). Font matters: Investigating the typographical components of legibility. IJRIS: International Journal of Research and Innovation in Social, 8(9), 3368 - 3379. https://dx.doi.org/10.47772/IJRISS.2024.8090283

Syaifullah, R. & Prasetyo, Z. K. (2025). Development of an integrated discovery learning e-book on a Tabuik to improve students' critical thinking abilities and collaborative attitudes. Al-Ishlah: Jurnal Pendidikan, 17(3), 4044-4058. https://doi.org/10.35445/alishlah.v17i3.6824

Syuryani, I., D., dan Rachmadiarti, F. (2020). Validitas e-book interaktif pada materi keanekaragaman hayati untuk melatihkan keterampilan berpikir kritis siswa kelas x SMA. *Bioedu: Berkala Ilmiah Pendidikan Biologi*, 9(20), 140 – 149. https://doi.org/10.26740/bioedu.v9n2.p140-149

Triando, A. Z. & Isnawati, I. (2024). Pengembangan e-book berbasis project based learning materi inovasi teknologi biologi untuk melatih kemampuan berpikir kreatif pada peserta didik SMA. *Bioedu: Berkala Ilmiah Pendidikan Biologi*, 13(3): 550 - 561. https://doi.org/10.26740/bioedu.v13n3.p550-661

Verdian, F., Jadid, M. A., & Rahmani, M. N. (2021). Studi penggunaan media simulasi PhET dalam pembelajaran fisika. Jurnal *Pendidikan dan Ilmu Fisika*, 1(2), 39–44. https:// doi.org/10.52434/jpif.v1i2.1448

Wisma. (2022). *Aplikasi PhET, pilihan simulasi pembelajaran IPA*. Lombok Tengah, NTB: Penerbit P4I.

Yulianti, D., Shafira, F. F., Marwoto, P., & Noviyatun, S. (2025). A systematic review of trend STEM education research on physics learning in Indonesia. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia, 21(2), 192-208. https:// doi.org/10.15294/jpfi.v21i2.23548