

REKONSTRUKSI PEMBELAJARAN PENCEMARAN TANAH BERBASIS STEM MELALUI INTEGRASI ARDUINO DALAM E-LKPD UNTUK MEMPERKUAT KETERAMPILAN BERPIKIR KRITIS PESERTA DIDIK

Wiwin Purnami¹, Rinie Pratiwi Puspitawati², Dwi Setyo Pratiwi³

^{1,2,3}Pendidikan Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya,

¹wiwinpurnami.22043@mhs.unesa.ac.id, ²riniepratiwi@unesa.ac.id,

³dwipartiwi@unesa.ac.id

ABSTRACT

The growing demand for twenty-first-century competencies requires biology learning to facilitate students in developing critical thinking skills through authentic, technology-enhanced learning experiences. Nevertheless, classroom instruction remains predominantly teacher-centered, limiting students' opportunities to engage in scientific inquiry and evidence-based problem solving. This study aimed to develop and evaluate a STEM-based Electronic Student Worksheet (E-LKPD) integrated with Arduino and a deep learning approach to strengthen students' critical thinking skills in soil pollution learning. The study employed a Research and Development (R&D) method using the Four-D model, encompassing the stages of Define, Design, Develop, and Disseminate. The research involved 30 tenth-grade students at SMAN 1 Tarik. The developed product was evaluated based on its validity, practicality, and effectiveness through expert validation sheets, classroom implementation observations, student response questionnaires, and critical thinking assessments. The findings revealed that the developed E-LKPD achieved a high level of validity, demonstrated excellent practicality during implementation, and effectively enhanced students' critical thinking skills. Students' average achievement increased from a pretest score of 80 to a posttest score of 92, with an average N-Gain of 0.63, indicating a moderate improvement. The integration of Arduino within a STEM-oriented E-LKPD, supported by a deep learning approach, provides meaningful inquiry-based learning experiences that promote scientific reasoning and critical thinking. This study contributes to advancing technology-integrated biology instruction by offering an innovative instructional framework for strengthening higher-order thinking skills in secondary education.

Keywords: *Arduino, critical thinking skills, deep learning approach, E-LKPD, STEM.*

ABSTRAK

Tuntutan kompetensi abad ke-21 menempatkan keterampilan berpikir kritis sebagai salah satu capaian utama pembelajaran biologi. Namun, praktik pembelajaran di sekolah masih didominasi pendekatan yang berpusat pada guru sehingga belum mampu memberikan pengalaman belajar yang mendorong penyelidikan ilmiah, penalaran berbasis bukti, dan pemecahan masalah secara autentik. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sekaligus mengevaluasi E-LKPD berbasis STEM terintegrasi Arduino dengan pendekatan pembelajaran mendalam untuk memperkuat keterampilan berpikir kritis peserta didik pada materi pencemaran tanah. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model *Four-D* yang meliputi tahap *Define*, *Design*, *Develop*, dan *Disseminate*.

Subjek penelitian terdiri atas 30 peserta didik kelas X SMAN 1 Tarik. Kelayakan produk ditinjau melalui aspek validitas, kepraktisan, dan keefektifan menggunakan lembar validasi ahli, observasi keterlaksanaan pembelajaran, angket respons peserta didik, serta tes keterampilan berpikir kritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa E-LKPD yang dikembangkan memiliki tingkat validitas tinggi, sangat praktis digunakan dalam pembelajaran, dan efektif meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik. Rata-rata nilai meningkat dari 80 pada pretest menjadi 92 pada posttest dengan rata-rata *N-Gain* sebesar 0,63 yang termasuk kategori sedang. Integrasi Arduino dalam E-LKPD berbasis STEM yang didukung pendekatan pembelajaran mendalam mampu menghadirkan pengalaman belajar yang lebih autentik, kontekstual, dan berbasis investigasi sehingga berkontribusi terhadap penguatan keterampilan berpikir kritis peserta didik. Temuan ini memperkaya inovasi pembelajaran biologi berbasis teknologi sekaligus menawarkan kerangka pembelajaran yang relevan untuk mendukung pengembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi pada pendidikan menengah.

Kata Kunci: Arduino, E-LKPD, keterampilan berpikir kritis, pencemaran tanah, STEM.

A. Pendahuluan

Transformasi pendidikan abad ke-21 telah menggeser paradigma pembelajaran dari sekadar transfer pengetahuan menuju pengembangan kompetensi yang memungkinkan peserta didik beradaptasi terhadap kompleksitas tantangan global. Salah satu kompetensi yang memperoleh perhatian strategis adalah keterampilan berpikir kritis (*critical thinking skills*), karena kemampuan tersebut menjadi fondasi dalam menginterpretasikan informasi, mengevaluasi bukti, menyusun argumentasi ilmiah, serta menghasilkan keputusan yang rasional berdasarkan data yang valid (OECD, 2023). Oleh karena itu, pembelajaran tidak lagi cukup

berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi harus mampu memfasilitasi peserta didik untuk membangun pengetahuan melalui proses berpikir yang reflektif, analitis, dan berbasis pemecahan masalah.

Urgensi penguatan keterampilan berpikir kritis semakin nyata apabila dikaitkan dengan capaian literasi sains peserta didik Indonesia. Hasil *Programme for International Student Assessment* (PISA) 2022 menunjukkan bahwa kemampuan berpikir kritis peserta didik Indonesia masih berada di bawah rata-rata negara anggota OECD. Sebagian besar peserta didik belum mampu menggunakan pengetahuan ilmiah untuk menjelaskan fenomena, mengevaluasi bukti, maupun

menyelesaikan permasalahan kontekstual secara sistematis (OECD, 2023). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa tantangan pendidikan saat ini tidak hanya berkaitan dengan rendahnya penguasaan materi, tetapi juga belum optimalnya proses pembelajaran dalam mengembangkan kemampuan berpikir tingkat tinggi sebagai bagian dari kompetensi abad ke-21.

Dalam konteks pendidikan biologi, keterampilan berpikir kritis memiliki posisi yang sangat penting karena hakikat biologi tidak hanya menekankan penguasaan konsep, tetapi juga proses memperoleh pengetahuan melalui penyelidikan ilmiah. Pembelajaran biologi idealnya memberikan pengalaman kepada peserta didik untuk mengamati fenomena, merumuskan masalah, mengumpulkan data, menganalisis hasil, serta menarik kesimpulan berdasarkan bukti empiris. Namun, implementasi pembelajaran di sekolah masih didominasi pendekatan yang berpusat pada guru sehingga peserta didik lebih banyak menerima informasi dibandingkan membangun pengetahuan melalui aktivitas ilmiah. Kondisi tersebut berdampak pada rendahnya kemampuan peserta didik

dalam menghubungkan konsep dengan fenomena nyata maupun mengembangkan argumentasi ilmiah yang logis (Jariah *et al.*, 2024).

Materi pencemaran tanah merupakan salah satu materi biologi yang memiliki karakteristik kontekstual dan multidimensional sehingga sangat potensial digunakan untuk mengembangkan keterampilan berpikir kritis. Permasalahan pencemaran tanah tidak hanya berkaitan dengan aspek ekologis, tetapi juga memiliki implikasi terhadap kesehatan manusia, ketahanan pangan, dan keberlanjutan lingkungan. Kompleksitas persoalan tersebut menuntut peserta didik mampu mengidentifikasi sumber pencemar, menganalisis hubungan sebab-akibat, mengevaluasi alternatif penyelesaian, serta merumuskan solusi berdasarkan bukti ilmiah (UNEP, 2022). Dengan demikian, pembelajaran pencemaran tanah seharusnya tidak berhenti pada pemahaman konseptual, melainkan menjadi sarana untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis melalui penyelesaian masalah autentik.

Rekonstruksi pembelajaran diperlukan untuk menjawab tantangan

tersebut. Salah satu pendekatan yang dinilai relevan adalah pembelajaran berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) karena mampu mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu dalam penyelesaian permasalahan nyata. Pendekatan STEM memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk mengeksplorasi konsep melalui investigasi, perancangan solusi, pengujian, dan evaluasi sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna dan berorientasi pada pengembangan kemampuan berpikir tingkat tinggi (Darmastuti *et al.*, 2025). Agar implementasi STEM lebih efektif, diperlukan bahan ajar digital yang mampu mengakomodasi aktivitas pembelajaran secara sistematis, salah satunya melalui *Electronic Student Worksheet* (E-LKPD).

Pemanfaatan E-LKPD memungkinkan pembelajaran berlangsung lebih interaktif melalui integrasi teks, gambar, video, simulasi, maupun aktivitas evaluasi yang dapat diakses secara fleksibel. Selain meningkatkan kualitas interaksi belajar, E-LKPD memberikan ruang kepada peserta didik untuk belajar secara mandiri, melakukan eksplorasi

konsep, dan membangun pemahaman melalui aktivitas yang terstruktur. Penggunaan bahan ajar digital juga sejalan dengan kebijakan transformasi pendidikan yang mendorong optimalisasi teknologi dalam menciptakan pembelajaran yang lebih adaptif dan berpusat pada peserta didik (Kemendikdasmen, 2025).

Potensi E-LKPD berbasis STEM akan semakin optimal apabila dipadukan dengan teknologi berbasis mikrokontroler, seperti Arduino. Integrasi Arduino memungkinkan peserta didik melakukan observasi dan memperoleh data hasil pengukuran secara langsung sehingga proses pembelajaran tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga menghadirkan pengalaman saintifik yang autentik. Aktivitas tersebut mendorong peserta didik untuk menginterpretasikan data, mengevaluasi hasil pengamatan, serta menyusun kesimpulan berdasarkan bukti empiris sehingga berkontribusi terhadap penguatan keterampilan berpikir kritis (Widodo *et al.*, 2024). Integrasi ini juga mendukung implementasi pendekatan pembelajaran mendalam (*deep learning approach*) yang menekankan

pembelajaran bermakna melalui eksplorasi, refleksi, dan penerapan pengetahuan dalam konteks nyata (Kemendikdasmen, 2025).

Berbagai penelitian telah melaporkan bahwa E-LKPD berbasis STEM mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan hasil belajar peserta didik (Jariah *et al.*, 2024), sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pengembangan bahan ajar digital tanpa mengintegrasikan teknologi Arduino sebagai media investigasi ilmiah. Di sisi lain, pemanfaatan Arduino dalam pembelajaran sains lebih banyak dikembangkan sebagai media praktikum atau alat bantu eksperimen sehingga belum dipadukan secara utuh dengan perangkat pembelajaran digital berbasis STEM (Widodo *et al.*, 2024). Selain itu, kajian literatur mengenai implementasi pendekatan pembelajaran mendalam menunjukkan bahwa penerapannya dalam pembelajaran biologi masih berada pada tahap awal dan memerlukan inovasi perangkat pembelajaran yang mampu mengintegrasikan teknologi, konteks autentik, dan aktivitas investigatif (Aziz *et al.*, 2026). Kondisi tersebut

menunjukkan masih adanya kesenjangan penelitian dalam pengembangan pembelajaran yang mengintegrasikan STEM, Arduino, pendekatan pembelajaran mendalam, dan materi pencemaran tanah ke dalam satu desain pembelajaran yang utuh. Oleh karena itu, diperlukan inovasi pembelajaran yang mampu menyinergikan aspek pedagogik, teknologi, dan konteks lingkungan untuk menghasilkan pengalaman belajar yang lebih komprehensif sekaligus memperkuat keterampilan berpikir kritis peserta didik (Indrati & Masing, 2025).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan rekonstruksi pembelajaran pencemaran tanah melalui pengembangan E-LKPD berbasis STEM yang terintegrasi Arduino dengan pendekatan pembelajaran mendalam untuk memperkuat keterampilan berpikir kritis peserta didik. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi aktivitas investigasi berbasis Arduino ke dalam sintaks STEM yang dikembangkan dalam E-LKPD sehingga peserta didik tidak hanya membangun pemahaman konseptual, tetapi juga memperoleh pengalaman ilmiah secara langsung

melalui proses observasi, analisis data, pemecahan masalah, dan refleksi. Integrasi pembelajaran berbasis STEM dengan aktivitas investigatif berbantuan teknologi diketahui mampu meningkatkan keterlibatan peserta didik dalam proses ilmiah serta memperkuat keterampilan berpikir kritis melalui pengalaman belajar yang autentik (Jariah *et al.*, 2024). Selain itu, penggunaan Arduino dalam pembelajaran sains memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk memperoleh data empiris secara langsung sehingga mendukung proses penalaran ilmiah dan pengambilan keputusan berbasis bukti (Widodo *et al.*, 2024). Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi empiris terhadap pengembangan inovasi pembelajaran biologi sekaligus memperkaya implementasi pembelajaran berbasis STEM dalam membangun keterampilan berpikir kritis peserta didik.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian *Research and Development* (R&D) yang bertujuan mengembangkan *Electronic Student*

Worksheet (E-LKPD) berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) terintegrasi Arduino dengan pendekatan pembelajaran mendalam pada materi pencemaran tanah untuk memperkuat keterampilan berpikir kritis peserta didik. Penelitian pengembangan dipilih karena berorientasi pada proses menghasilkan produk pendidikan yang valid, praktis, dan efektif melalui tahapan pengembangan yang sistematis (Plomp, 2021).

Model pengembangan yang digunakan adalah *Four-D* (4D) yang dikembangkan oleh Thiagarajan *et al.* (1974). Model ini terdiri atas empat tahapan, yaitu *Define*, *Design*, *Develop*, dan *Disseminate*, serta banyak digunakan dalam pengembangan perangkat pembelajaran karena mampu menghasilkan produk yang layak digunakan melalui proses validasi dan uji coba secara bertahap (Thiagarajan *et al.*, 1974).

Tahap *Define* bertujuan mengidentifikasi kebutuhan pengembangan melalui analisis kurikulum, karakteristik peserta didik, analisis materi pencemaran tanah, analisis tugas, serta perumusan

tujuan pembelajaran. Tahap *Design* dilakukan dengan menyusun rancangan awal E-LKPD, memilih media pembelajaran, menyusun instrumen penelitian, mengembangkan aktivitas pembelajaran berbasis STEM, mengintegrasikan Arduino dalam kegiatan investigasi, serta merancang tampilan E-LKPD menggunakan platform *Liveworksheets*. Tahap *Develop* meliputi validasi ahli, revisi produk berdasarkan masukan validator, serta uji coba terbatas kepada peserta didik. Selanjutnya, tahap *Disseminate* dilakukan melalui implementasi E-LKPD pada pembelajaran biologi untuk mengetahui kualitas produk berdasarkan aspek validitas, kepraktisan, dan keefektifan (Thiagarajan *et al.*, 1974).

Penelitian dilaksanakan di SMAN 1 Tarik, Kabupaten Sidoarjo, pada semester genap Tahun Ajaran 2025/2026. Subjek penelitian terdiri atas 30 peserta didik kelas X-1 yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu pemilihan sampel berdasarkan pertimbangan karakteristik yang sesuai dengan tujuan penelitian (Sugiyono, 2022).

Instrumen penelitian meliputi lembar validasi ahli, lembar observasi keterlaksanaan pembelajaran, angket respons peserta didik, dan tes keterampilan berpikir kritis. Lembar validasi digunakan untuk menilai kelayakan isi, penyajian, kebahasaan, karakteristik STEM, integrasi Arduino, dan kesesuaian dengan pendekatan pembelajaran mendalam. Lembar observasi dan angket digunakan untuk memperoleh data kepraktisan produk, sedangkan tes *pretest* dan *posttest* digunakan untuk mengukur peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik.

Analisis validitas dilakukan menggunakan Indeks Aiken (Aiken's V) untuk mengetahui tingkat kesepakatan antarvalidator terhadap setiap indikator penilaian. Nilai Aiken's V dihitung menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Aiken (1985), kemudian diinterpretasikan berdasarkan kategori validitas sehingga dapat diketahui tingkat kelayakan produk sebelum diimplementasikan.

Kepraktisan E-LKPD dianalisis menggunakan persentase keterlaksanaan pembelajaran dan respons peserta didik yang selanjutnya diinterpretasikan ke dalam

kategori sangat praktis, praktis, cukup praktis, kurang praktis, dan tidak praktis mengacu pada kriteria yang dikemukakan oleh Riduwan (2019).

Keefektifan produk dianalisis melalui peningkatan keterampilan berpikir kritis berdasarkan hasil *pretest* dan *posttest* menggunakan skor *Normalized Gain* (*N-Gain*). Interpretasi nilai *N-Gain* mengacu pada klasifikasi yang dikemukakan oleh Hake (1999), yaitu tinggi ($g \geq 0,70$), sedang ($0,30 \leq g < 0,70$), dan rendah ($g < 0,30$). Selain itu, data *pretest* dan *posttest* dianalisis secara deskriptif menggunakan nilai minimum, maksimum, dan rata-rata untuk menggambarkan peningkatan kemampuan berpikir kritis peserta didik setelah menggunakan E-LKPD.

Kualitas E-LKPD ditentukan berdasarkan terpenuhinya tiga kriteria utama, yaitu valid, praktis, dan efektif. Produk dinyatakan layak apabila memperoleh kategori valid berdasarkan hasil penilaian ahli, memperoleh kategori sangat praktis berdasarkan keterlaksanaan pembelajaran dan respons peserta didik, serta menunjukkan peningkatan keterampilan berpikir kritis berdasarkan hasil analisis *N-Gain*. Ketiga aspek tersebut merupakan

indikator kualitas produk yang umum digunakan dalam penelitian pengembangan perangkat pembelajaran (Nieveen, 1999).

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan produk berupa *Electronic Student Worksheet* (E-LKPD) berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) terintegrasi Arduino dengan pendekatan pembelajaran mendalam pada materi pencemaran tanah untuk peserta didik kelas X SMA. Produk yang dikembangkan dievaluasi berdasarkan tiga kriteria kualitas, yaitu validitas, kepraktisan, dan keefektifan, sehingga dapat diketahui kelayakan E-LKPD sebagai bahan ajar inovatif yang mendukung penguatan keterampilan berpikir kritis peserta didik. Berikut hasil evaluasi berdasarkan tiga kriteria sebagai berikut:

1. Validitas E-LKPD

Validitas produk dinilai oleh tiga validator yang terdiri atas dosen ahli materi, dosen ahli pendidikan, dan guru biologi. Penilaian dilakukan terhadap aspek kelayakan isi, penyajian, kebahasaan, karakteristik STEM, integrasi Arduino, dan

kesesuaian dengan pendekatan pembelajaran mendalam menggunakan Indeks Aiken (Aiken's V).

Tabel 1 Hasil Validasi E-LKPD 3 validator

Aspek	Indeks Aiken (V)	Kategori
Isi	0,92	Sangat valid
Penyajian	0,89	Sangat valid
Bahasa	0,94	Sangat valid
STEM	0,93	Sangat valid
Integrasi Arduino	0,91	Sangat valid
Rata-rata	0,92	Sangat valid

Hasil validasi menunjukkan bahwa seluruh aspek memperoleh nilai Aiken's V > 0,80 sehingga E-LKPD dinyatakan sangat valid dan layak digunakan dalam pembelajaran setelah dilakukan revisi sesuai masukan validator.

2. Kepraktisan E-LKPD

Kepraktisan produk dianalisis berdasarkan hasil observasi keterlaksanaan pembelajaran dan angket respons peserta didik.

Tabel 2 Hasil Kepraktisan E-LKPD

Indikator	Presentase	Kategori
Keterlaksanaan pembelajaran	98,50 %	Sangat praktis
Respons Peserta didik	99,16 %	Sangat praktis
Rata-rata	98,83 %	Sangat praktis

Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh tahapan pembelajaran

dapat dilaksanakan sesuai rancangan dan peserta didik memberikan respons yang sangat positif terhadap penggunaan E-LKPD selama proses pembelajaran.

3. Keefektifan E-LKPD

Keefektifan produk ditentukan berdasarkan hasil tes keterampilan berpikir kritis yang diperoleh melalui *pretest*, *posttest*, *t-test*, dan analisis *N-Gain*.

Tabel 3 Hasil Pretest, Posttest, dan N-Gain

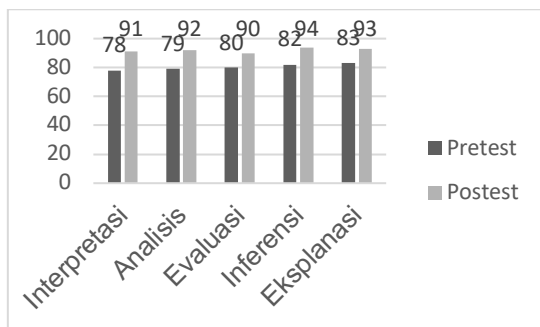
	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>Sig. (2-tailed)</i>
<i>Pretest-Posttest</i>	70	90	80

Hasil *paired sample t-test* menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai *pretest* dan *posttest* keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah menggunakan E-LKPD berbasis STEM terintegrasi Arduino. Nilai signifikansi (*Sig. (2-tailed)* < 0,05) menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima, sehingga E-LKPD yang dikembangkan berpengaruh signifikan terhadap peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik (Kim, 2022).

Tabel 4 Hasil Pretest, Posttest, dan N-Gain

Variabel	Minim um	Maksim um	Rata -rata
Pretest	70	90	80
Posttest	82	98	92
N-Gain	0,40	0,83	0,63

Hasil tersebut didukung oleh peningkatan rata-rata nilai dari 70 pada *pretest* menjadi 92 pada *posttest* dengan nilai *N-Gain* rata-rata sebesar 0,63 berkategori sedang. Dari hasil tersebut juga diperoleh ketercapaian indikator berpikir kritis



Grafik 1 Hasil Ketercapaian Indikator Berpikir Kritis

Berdasarkan Grafik 1 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan secara signifikan pada indikator berpikir kritis yang ditandai dengan naiknya nilai *posttest*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Jariah *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa pembelajaran berbasis STEM mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis melalui aktivitas investigasi dan pemecahan masalah berbasis konteks. Hal ini mengindikasikan bahwa produk efektif meningkatkan

keterampilan berpikir kritis peserta didik.

D. Kesimpulan

Kesimpulan Penelitian ini berhasil mengembangkan *Electronic Student Worksheet* (E-LKPD) berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) terintegrasi Arduino dengan pendekatan pembelajaran mendalam pada materi pencemaran tanah sebagai inovasi pembelajaran biologi yang berorientasi pada penguatan keterampilan berpikir kritis peserta didik. Berdasarkan hasil validasi oleh para ahli, E-LKPD yang dikembangkan memenuhi kategori sangat valid, sehingga layak digunakan sebagai bahan ajar dalam pembelajaran biologi. Hasil implementasi menunjukkan bahwa E-LKPD memiliki tingkat kepraktisan yang sangat tinggi, ditunjukkan oleh keterlaksanaan pembelajaran yang optimal dan respons positif peserta didik terhadap penggunaan produk selama proses pembelajaran.

Keefektifan E-LKPD ditunjukkan oleh peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah mengikuti pembelajaran. Rata-rata nilai meningkat dari 80 pada *pretest*

menjadi 92 pada *posttest* dengan nilai *N-Gain* sebesar 0,63 yang termasuk kategori sedang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi STEM, Arduino, dan pendekatan pembelajaran mendalam mampu menciptakan pengalaman belajar yang lebih kontekstual, investigatif, dan bermakna sehingga mendorong peserta didik mengembangkan kemampuan menginterpretasikan informasi, menganalisis data, mengevaluasi bukti, serta merumuskan solusi berdasarkan proses berpikir ilmiah.

Penelitian ini memberikan kontribusi teoretis berupa penguatan konsep integrasi STEM, teknologi Arduino, dan pendekatan pembelajaran mendalam dalam pengembangan bahan ajar digital yang berorientasi pada keterampilan berpikir tingkat tinggi. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi praktis melalui penyediaan E-LKPD yang dapat digunakan sebagai alternatif perangkat pembelajaran inovatif pada materi pencemaran tanah maupun materi biologi lain yang memerlukan aktivitas investigasi ilmiah. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan produk pembelajaran

yang memenuhi aspek validitas, kepraktisan, dan keefektifan, tetapi juga menawarkan model pembelajaran berbasis teknologi yang berpotensi mendukung transformasi pembelajaran biologi menuju pembelajaran abad ke-21.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengimplementasikan E-LKPD berbasis STEM terintegrasi Arduino pada berbagai jenjang pendidikan dan materi biologi yang berbeda guna menguji konsistensi efektivitas produk. Penelitian berikutnya juga dapat mengintegrasikan teknologi *Internet of Things (IoT)*, *Artificial Intelligence (AI)*, atau sistem pemantauan berbasis sensor digital untuk memperkaya pengalaman investigasi ilmiah peserta didik. Selain itu, diperlukan penelitian eksperimental dengan cakupan sampel yang lebih luas agar diperoleh bukti empiris yang lebih kuat mengenai pengaruh model pembelajaran ini terhadap berbagai keterampilan abad ke-21.

DAFTAR PUSTAKA

Buku :

- Biggs, J., & Tang, C. (2022). *Teaching for quality learning at university (5th ed.)*. Open University Press.
- Facione, P. A. (2020). *Critical thinking: What it is and why it counts. Insight Assessment*.
- Nieveen, N. (1999). *Prototyping to reach product quality*. Dalam J. van den Akker, R. Branch, K. Gustafson, N. Nieveen, & T. Plomp (Eds.), *Design Approaches and Tools in Education and Training* (pp. 125–135). Kluwer Academic Publishers.
- Plomp, T. (2021). *Educational design research: An introduction*. Netherlands Institute for Curriculum Development.
- Riduwan. (2019). *Skala Pengukuran Variabel-Variabel Penelitian*. Alfabeta.
- Sugiyono. (2022). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D* (Edisi ke-2). Alfabeta.
- Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional development for training teachers of exceptional children*. Leadership Training Institute.

Artikel in Press :

- Hake, R. R. (1999). *Analyzing change/gain scores*. Indiana University.
- Kemendikbudristek. (2022). *Panduan pengembangan bahan ajar Kurikulum Merdeka*. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

- Kemendikdasmen. (2025). *Naskah akademik pembelajaran mendalam*. Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah.
- OECD. (2023). *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. OECD Publishing.
- UNEP. (2022). *Global Environment Outlook 6: Healthy Planet, Healthy People*. United Nations Environment Programme.

Jurnal :

- Aiken, L. R. (1985). *Three coefficients for analyzing the reliability and validity of ratings*. *Educational and Psychological Measurement*, 45(1), 131–142
- Aziz, N. Z., Nafsiana, G., Kurniyati, I., Nurhasanah, Nurfadilah, S., Amdah, A., Marpaung, D. V., & Marthaliakirana, A. (2026). *Potensi Kurikulum Merdeka pada Pembelajaran Biologi melalui Pendekatan Deep Learning: Systematic Literature Review*. *Jurnal Riset dan Inovasi Pendidikan Sains (JRIPS)*, 5(2), 122–136.
- Darmastuti, A., Nurhayati, S., & Hidayat, T. (2025). *Implementation of STEM learning to improve students' critical thinking skills in biology education*. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia*, 11(1), 15–28.
- Indrati, D. A., & Masing, F. A. (2025). *Research trends of augmented reality in biology learning: A systematic literature review from 2020–2024*. *Biosfer: Jurnal*

- Pendidikan Biologi*, 18(2), 145–159.
- Jariah, S., Ibrahim, M., & Raharjo. (2024). *STEM-based biology learning assisted by virtual laboratory to improve students' critical thinking skills*. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 13(1), 78–91.
- Kim, T. K. (2022). *Understanding paired t-test*. *Korean Journal of Anesthesiology*, 75(5), 393–394.
- Nieveen, N. (1999). *Prototyping to reach product quality*. *Dalam Design Approaches and Tools in Education and Training*
- Widodo, W., Nur, M., & Ibrahim, M. (2024). *Arduino-assisted STEM learning to enhance students' engagement and scientific inquiry*. *Journal of Technology and Science Education*, 14(2), 245–260.