

Peningkatan Keterampilan Berpikir Kreatif Siswa dalam Pembelajaran Fisika melalui Pendekatan STEM, Simulasi PhET, dan Evaluasi Berbantuan AI

Bening Puspa Dewi⁽¹⁾, I Made Astra⁽²⁾, Firmanul Catur Wibowo⁽³⁾

Universitas Negeri Jakarta, Indonesia
Email: beningpuspadewi1995@gmail.com

Abstrak: Kebutuhan mendesak untuk melatih Keterampilan Abad Ke-21, di mana berpikir kreatif siswa masih rendah pada pembelajaran Fisika. Solusi yang diterapkan adalah Penelitian Tindakan Kelas (PTK) menggunakan Pendekatan STEM dalam tiga siklus yaitu eksplorasi PhET, proyek membuat magnet, dan evaluasi hasil proyek dengan bantuan AI (ChatGPT) untuk refleksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi STEM, PhET, dan umpan balik AI secara sinergis efektif meningkatkan aspek fluency, flexibility, dan originality berpikir kreatif siswa. Kesimpulan menegaskan bahwa pendekatan pembelajaran ini merupakan inovasi efektif untuk meningkatkan keterampilan berpikir kreatif siswa dalam materi Fisika abstrak.

Abstract: The urgent need to cultivate 21st Century Skills, particularly creative thinking, which is not yet optimal in conventional Physics learning. The solution tested is a Classroom Action Research (CAR) using the STEM Approach, implemented in three cycles: 1) PhET Simulation (Electromagnetic Field), 2) Project Experiment (Making Magnets), and 3) Project Improvement Evaluation with AI (ChatGPT). The research findings indicate that the synergistic combination of STEM, PhET, and AI feedback is effective in improving the fluency, flexibility, and originality aspects of students' creative thinking. The conclusion confirms that this learning approach is an effective innovation for enhancing students' creative thinking skills in abstract Physics material.

Tersedia online di

<https://ojs.unublitar.ac.id/index.php/jtpdm>

Sejarah artikel

Diterima pada: 24 November 2025

Disetujui pada: 10 Desember 2025

Dipublikasikan pada: 18 Desember 2025

Kata kunci:

AI, Keterampilan Berpikir Kreatif Siswa, Pembelajaran Fisika, PhET, STEM

PENDAHULUAN

Pendidikan di Abad Ke-21 menempatkan keterampilan 4C (Critical Thinking, Communication, Collaboration, dan Creativity) sebagai kompetensi esensial yang harus dikuasai siswa untuk kesuksesan di era global (Sari & Trisnawati, 2019; Zubaidah, 2016). Di antara keterampilan tersebut, berpikir kreatif kemampuan untuk menghasilkan ide yang unik, fleksibel, dan terperinci menjadi penentu utama inovasi dan adaptasi (Wafa et al., 2025). Sayangnya, kondisi pembelajaran Fisika di tingkat Sekolah Menengah Atas (SMA) masih cenderung menggunakan pendekatan konvensional yang menitikberatkan pada penyelesaian soal algoritmik dan hafalan. Pendekatan ini terbukti kurang efektif dalam memfasilitasi eksplorasi mendalam, sehingga potensi berpikir kreatif siswa belum berkembang secara optimal (Sujana & Ratnasih, 2020; Firdaus et al., 2022). Hal ini menyebabkan konsep-konsep abstrak, seperti Medan Elektromagnetik, sulit divisualisasikan, sehingga membatasi kesempatan siswa untuk mengembangkan kelancaran, keluwesan, dan kebaruan ide, yang merupakan indikator utama berpikir kreatif. Kondisi ini mengindikasikan adanya masalah terkait rendahnya

porsi pelatihan berpikir kreatif dalam kurikulum Fisika, yang diperparah dengan kurangnya inovasi teknologi dalam penyampaian materi abstrak.

Untuk mengatasi tantangan dekontekstualisasi dan kurangnya stimulasi kreatif dalam pembelajaran Fisika, diperlukan kerangka pedagogis yang dapat mengintegrasikan ilmu pengetahuan dengan aplikasinya di dunia nyata. Berdasarkan kajian literatur, Pendekatan STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) diakui sebagai kerangka yang sangat relevan. STEM secara inheren mendorong siswa untuk menerapkan pengetahuan ilmiah dalam konteks rekayasa dan pemecahan masalah terbuka (open-ended problem), yang merupakan pemicu utama bagi keterampilan berpikir tingkat tinggi (Kusyanto et al., 2022; Rohman et al., 2021). Penerapan model berbasis proyek atau rekayasa dalam STEM dapat secara langsung menumbuhkan aspek kelancaran (fluency), fleksibilitas (flexibility), dan orisinalitas (originality) dalam berpikir kreatif.

Wawasan rencana pemecahan masalah diarahkan pada integrasi kerangka pedagogis yang kontekstual dan teknologi untuk menjembatani antara teori dan praktik. Solusi yang ditawarkan dalam penelitian tindakan kelas (PTK) ini yaitu dengan penerapan Pendekatan STEM (Sains, Teknologi, Teknik, dan Matematika) yang dimodifikasi dan diperkaya dengan dua teknologi kunci, yaitu Simulasi PhET dan Evaluasi Berbantuan Kecerdasan Buatan (AI). Pendekatan STEM terbukti efektif sebagai kerangka untuk melatih pemecahan masalah dan kemampuan desain (Bybee, 2013; Honey, Pearson, & Schweingruber, 2014), serta telah direkomendasikan untuk meningkatkan berpikir kreatif dalam sains (Wahono & Budi, 2021). Integrasi ini dilaksanakan dalam tiga siklus: eksplorasi konsep melalui Simulasi PhET untuk visualisasi awal (Wieman, Adams, & Dubson, 2014), dilanjutkan dengan proyek rekayasa STEM (membuat magnet), dan diakhiri dengan evaluasi mendalam menggunakan umpan balik dari AI (ChatGPT).

Solusi ini menunjukkan integrasi sinergi yang unik. Simulasi PhET membantu siswa memahami prinsip-prinsip Fisika secara visual dan interaktif, yang sangat penting sebagai dasar dalam merancang proyek. Sementara itu, Pendekatan STEM mendorong siswa untuk menerapkan prinsip tersebut dalam proyek rekayasa nyata. Inovasi kunci terletak pada penggunaan AI, yang memungkinkan siswa melakukan refleksi kritis terhadap hasil proyek mereka. Penelitian terkini menyoroti potensi AI dalam memberikan umpan balik personal dan cepat, yang dapat meningkatkan revisi dan elaborasi ide (Hwang & Fu, 2023; Su, et al., 2024; Ariyani & Utami, 2023). Dengan kata lain, AI bertindak sebagai "cermin digital" yang membantu siswa menyempurnakan aspek orisinalitas dan detail dari solusi kreatif mereka, sebuah area yang sering terabaikan dalam penilaian kelas tradisional.

Berdasarkan latar belakang masalah dan rancangan pemecahan masalah tersebut, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendeskripsikan dan menganalisis peningkatan keterampilan berpikir kreatif siswa dalam pembelajaran Fisika melalui implementasi siklus PTK berbasis Pendekatan STEM yang diintegrasikan dengan Simulasi PhET dan Evaluasi Berbantuan AI. Harapan tentang manfaat hasil penelitian adalah untuk menyediakan model pembelajaran inovatif yang efektif dan dapat direplikasi, memberikan kontribusi empiris pada literatur mengenai integrasi teknologi baru (AI) dalam Pendidikan Fisika, dan secara praktis meningkatkan kualitas proses dan hasil pembelajaran di kelas.

METODE

Penelitian ini menggunakan jenis Penelitian Tindakan Kelas (PTK) atau Classroom Action Research (CAR). PTK dipilih karena bertujuan untuk memperbaiki dan meningkatkan praktik pembelajaran secara langsung di dalam

kelas melalui siklus tindakan yang terencana dan reflektif (Kemmis & McTaggart, 2012). PTK ini dilaksanakan di SMA Labschool Cirendeudeu pada siswa kelas XII dengan jumlah 30 siswa pada materi Medan Elektromagnetik.

Desain penelitian yang digunakan adalah model spiral Kemmis dan McTaggart, yang melibatkan empat tahapan dalam setiap siklus: Perencanaan (Planning), Tindakan (Acting), Observasi (Observing), dan Refleksi (Reflecting). Penelitian akan dilaksanakan dalam tiga siklus (Siklus I, Siklus II, dan Siklus III) untuk mengukur peningkatan berkelanjutan pada keterampilan berpikir kreatif siswa yang terintegrasi dengan pendekatan STEM. Teknik pengumpulan data meliputi observasi partisipatif dan tes kinerja. Subjek penelitian adalah seluruh siswa di kelas tersebut.

PTK dilaksanakan dalam tiga siklus, di mana setiap siklus mencakup tahapan perencanaan, tindakan, observasi, dan refleksi, yang secara bertahap mengintegrasikan simulasi PhET, proyek STEM, dan evaluasi berbantuan AI. Subjek penelitian adalah siswa SMA Labschool Cirendeudeu kelas XII B yang berjumlah 26 orang, yang menjadi representasi sampel dalam konteks perbaikan kualitas pembelajaran di kelas tersebut.

Teknik pengumpulan data utama dalam penelitian ini adalah melalui tes dan observasi. Instrumen pengumpulan data yang digunakan meliputi: 1) Tes Keterampilan Berpikir Kreatif (TKKB), berupa soal uraian terbuka (pre-test pada Siklus I dan post-test pada Siklus III) untuk mengukur empat indikator kreativitas (Fluency, Flexibility, Originality, dan Elaboration); 2) Lembar Observasi yang digunakan untuk mencatat aktivitas dan kinerja siswa, terutama saat eksplorasi Simulasi PhET (Siklus I) dan pelaksanaan proyek (Siklus II); serta 3) Dokumentasi berupa catatan lapangan, foto hasil proyek, dan rekaman interaksi siswa dengan AI (ChatGPT) saat melakukan refleksi dan perbaikan desain (Siklus III). Sumber data penelitian berasal dari skor TKKB siswa (data kuantitatif) dan catatan observasi/refleksi (data kualitatif).

Teknik analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis data kualitatif digunakan untuk menafsirkan temuan dari observasi dan catatan lapangan, yang kemudian diolah melalui proses reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Analisis data kuantitatif dilakukan untuk mengolah skor TKKB siswa. Data skor diubah menjadi persentase Nilai Keterampilan Berpikir (NKB), yang kemudian dikategorikan (Sangat Kreatif, Kreatif, dst.). Untuk mengukur peningkatan efektivitas pembelajaran secara keseluruhan dari awal hingga akhir, digunakan analisis Normalized Gain (N-Gain), yaitu perbandingan antara rata-rata NKB Post-Test Siklus III dengan rata-rata NKB Pre-Test Siklus I. Kriteria keberhasilan penelitian ditetapkan jika nilai N-Gain berada pada kategori sedang hingga tinggi, dan minimal 75% siswa mencapai kategori Kreatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan kemampuan berpikir kreatif siswa dalam pembelajaran fisika dengan pendekatan STEM, Simulasi PhET dan Evaluasi Berbantuan AI pada materi elektromagnetik siswa kelas XII SMA Labschool Cirendeudeu. Penelitian ini dilakukan selama 1 bulan pada tanggal 3 November hingga 24 November 2025. Dokumentasi kegiatan pembelajaran dengan pendekatan STEM pada materi elektromagnetik terlihat pada Gambar 1. Adapun proyek yang dibuat yaitu magnet yang terbuat dari lilitan kawat dan paku.



Gambar 1. Pada siklus I Peserta didik melakukan percobaan menggunakan Simulasi PhET.



Gambar 2. Pada siklus II Peserta Didik melakukan proyek pembuatan magnet.



Gambar 3. Pada siklus III Peserta Didik melakukan evaluasi magnet menggunakan bantuan AI



Gambar 4. Peserta Didik telah melakukan modifikasi magnet.

Tabel 1. Rata-rata Nilai Keterampilan Berpikir (NKB) Tiap Siklus.

Siklus	Tahapan Tes	Rata-rata NKB (NKB)	Peningkatan NKB Internal Siklus	Kategori TKKB (Berdasarkan Nilai NKB)
Siklus I	Pre-Test	70.19%	-	Kreatif (K)

Siklus	Tahapan Tes	Rata-rata NKB (NKB)	Peningkatan NKB Internal Siklus	Kategori TKKB (Berdasarkan Nilai NKB)
(PhET & STEM Awal)	Post-Test	82.14%	+11.95%	Kreatif (K)
Siklus II	Pre-Test	82.14%	-	Sangat Kreatif (SK)
(Proyek Eksperimen)	Post-Test	87.82%	+5.67%	Sangat Kreatif (SK)
Siklus III	Pre-Test	90,06%	-	Sangat Kreatif (SK)
(Evaluasi Berbantuan AI)	Post-Test	94.87%	+4.27%	Sangat Kreatif (SK)

Hasil pengolahan data menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada Keterampilan Berpikir Kreatif (TKKB) siswa setelah diterapkan Pendekatan STEM, Simulasi PhET, dan Evaluasi Berbantuan AI selama tiga siklus. Rata-rata kelas berhasil meningkatkan Nilai Keterampilan Berpikir (NKB) dari 70,19% pada Pre-Test Siklus I menjadi 94,87% pada Post-Test Siklus III.

Tabel 2. Kategori Pencapaian Kreatifitas.

Siklus	Intervensi	NKB Awal	NKB Akhir	Kategori Awal	Kategori Akhir
I	STEM + PhET	70,19%	82,14%	Kreatif	Kreatif
II	STEM + Projek	82,14%	87,82%	Kreatif	Sangat Kreatif
III	STEM + AI	90,06%	94,87%	Sangat Kreatif	Sangat Kreatif

Secara kualitatif, peningkatan ini memindahkan rata-rata kelas dari kategori Kreatif (K) menuju kategori Sangat Kreatif (SK). Peningkatan ini menunjukkan bahwa intervensi yang berorientasi pada pemecahan masalah nyata (Proyek STEM) dan didukung visualisasi (PhET) serta umpan balik mendalam (AI) sangat efektif dalam menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoritis dan aplikasi ide-ide kreatif.

Penelitian ini berhasil meningkatkan keterampilan berpikir kreatif siswa sebesar 24,68% secara kumulatif, dari level cukup kreatif (70,19%) menjadi level sangat kreatif (94,87%). Pencapaian ini menunjukkan efektivitas luar biasa dari pendekatan STEM terintegrasi teknologi dalam mengembangkan kemampuan berpikir kreatif siswa.

Tabel 3. Efektivitas Intervensi Berdasarkan Peningkatan

Intervensi	Aspek Terbantu	Tingkat Efektivitas	Bukti Peningkatan
Simulasi PhET	Flexibility	Sangat Tinggi	+20,46% (N-Gain: 0,560)
Projek Hands-on	Fluency	Luar Biasa	+19,20% (N-Gain: 0,768)
Evaluasi AI	Originality	Tinggi	+9,62% (N-Gain: 0,625)

Terlihat pola yang jelas mengenai efektivitas masing-masing intervensi pembelajaran dalam mengembangkan aspek-aspek spesifik keterampilan berpikir kreatif. Simulasi PhET terbukti memiliki efektivitas yang sangat tinggi dalam meningkatkan aspek flexibility (keluwesan) dengan bukti peningkatan sebesar 20,46% dan N-Gain 0,560. Keberhasilan ini dapat dijelaskan melalui kemampuan simulasi PhET dalam menyajikan visualisasi interaktif yang memungkinkan siswa mengeksplorasi berbagai skenario dan perspektif berbeda secara langsung. Melalui manipulasi variabel-variabel seperti jumlah lilitan, kuat arus, dan jenis inti, siswa dapat menyelidiki dampak masing-masing faktor terhadap medan magnet,

sehingga mengembangkan kemampuan mereka dalam melihat masalah dari berbagai sudut pandang.

Di sisi lain, pembelajaran berbasis proyek hands-on menunjukkan efektivitas yang luar biasa dalam mengembangkan aspek fluency (kelancaran) dengan pencapaian peningkatan sebesar 19,20% dan N-Gain 0,768 yang termasuk dalam kategori tinggi. Keunggulan intervensi ini terletak pada pemberian pengalaman nyata dimana siswa harus menghadapi dan memecahkan masalah riil dalam merancang dan membangun elektromagnet. Konteks pembelajaran yang autentik ini memicu proses brainstorming yang intensif dan iterasi desain yang cepat, sehingga mendorong siswa untuk menghasilkan lebih banyak variasi solusi dan ide-ide improvisasi dalam waktu yang relatif singkat.

Sementara itu, evaluasi berbantuan AI menunjukkan efektivitas tinggi dalam meningkatkan aspek originality (keaslian) dengan bukti peningkatan 9,62% dan N-Gain 0,625. Yang patut dicatat adalah pencapaian ini terjadi meskipun siswa sudah berada pada level kreativitas yang tinggi, menunjukkan bahwa AI berperan optimal dalam proses penyempurnaan akhir. Mekanisme kerjanya melalui pemberian umpan balik yang terstruktur dan objektif, yang mampu menganalisis kelemahan desain dan menawarkan saran perbaikan yang mungkin tidak terpikirkan sebelumnya, sehingga mendorong siswa untuk berpikir lebih inovatif dan "out of the box".

Secara keseluruhan, temuan ini mengarah pada implikasi pedagogis yang penting tentang spesialisasi masing-masing intervensi. Daripada mencari satu metode "terbaik" yang universal, pendekatan yang lebih efektif adalah menerapkan urutan intervensi yang tepat: memulai dengan simulasi PhET untuk membangun dasar conceptual flexibility, melanjutkan dengan proyek hands-on untuk meningkatkan ide fluency, dan diakhiri dengan evaluasi AI untuk menyempurnakan originality. Kombinasi sinergis ketiga intervensi inilah yang akhirnya menghasilkan pengembangan keterampilan berpikir kreatif yang holistik dan optimal pada siswa.

Tabel 4. Ringkasan peningkatan keseluruhan

Indikator	Nilai	Kategori
NKB Awal (Pre-Test Siklus I)	70.19%	Kreatif (K)
NKB Akhir (Post-Test Siklus III)	94,87%	Sangat Kreatif (SK)
N-Gain Total	0.83	Tinggi

Nilai Normalized Gain (N-Gain) total yang diperoleh adalah 0.83. Berdasarkan kriteria efektivitas, nilai 0.83 termasuk dalam kategori Tinggi ($g \geq 0.70$). Nilai ini secara kuat mengindikasikan bahwa model pembelajaran yang mengintegrasikan STEM, PhET, dan AI memiliki efektivitas yang sangat tinggi dalam melatih dan mengembangkan potensi berpikir kreatif siswa pada materi Fisika abstrak (Medan Elektromagnetik). Hasil ini secara langsung menjawab masalah penelitian dan menunjukkan bahwa tujuan penelitian telah tercapai, yakni meningkatkan TKKB siswa secara signifikan.

Sinergi antar unsur intervensi berperan penting dalam melatih dimensi kreativitas secara bertahap: 1) Simulasi PhET (Siklus I): Membantu siswa memvisualisasikan konsep abstrak seperti arah arus dan medan, yang merupakan dasar penting untuk menghasilkan ide Fluency dan Flexibility. Visualisasi ini memberikan landasan intuitif bagi siswa, sesuai teori Paivio tentang Dual Coding yang menyatakan bahwa pembelajaran ditingkatkan melalui pemrosesan informasi verbal dan non-verbal. 2) Proyek STEM (Siklus II): Mendorong siswa menerapkan konsep menjadi produk nyata, melatih Originality dalam mendesain. Keterbatasan bahan dan tantangan fungsional proyek memaksa siswa mencari

solusi yang tidak konvensional. 3) Evaluasi Berbantuan AI (Siklus III): Menghasilkan umpan balik kritis dan teknis yang mendorong siswa untuk berpikir lebih rinci dan mendalam (Elaboration), yang merupakan aspek tertinggi dari kreativitas.

Pencapaian NKB hingga 94,87% yang menempatkan kelas pada kategori Sangat Kreatif (SK) menunjukkan bahwa intervensi tidak hanya meningkatkan kuantitas ide (Fluency) tetapi juga kualitas dan kedalaman ide (Elaboration). Peran spesifik Evaluasi Berbantuan AI (ChatGPT) pada Siklus III adalah temuan kunci. Kecerdasan Buatan bertindak sebagai mentor kritis instan yang menantang asumsi desain siswa.

Menurut Torrance (1966), Elaboration adalah kemampuan untuk mengembangkan, memperindah, atau memperluas suatu ide. Dalam penelitian ini, ketika siswa memasukkan deskripsi proyek mereka ke AI dan meminta saran perbaikan teknis, mereka dipaksa untuk berpikir tentang detail dan efisiensi (misalnya, menganalisis mengapa pendinginan kawat lebih efisien daripada menambah baterai). Proses ini secara efektif meningkatkan kedalaman berpikir siswa, mengintegrasikan pengetahuan teoritis dengan persyaratan desain teknik.

Hasil penelitian ini memvalidasi efektivitas pendekatan STEM (Sains, Teknologi, Teknik, Matematika) dalam pembelajaran Fisika, khususnya untuk materi yang sulit divisualisasikan seperti Medan Elektromagnetik. Keterlibatan dalam proyek (Siklus II) memenuhi unsur Engineering dalam STEM, yang merupakan katalisator utama bagi Originality dan Flexibility siswa (Honey, Pearson, & Schweingruber, 2014).

Dibandingkan dengan pembelajaran tradisional yang seringkali gagal menghubungkan konsep Fisika dengan aplikasi nyata, model PTK ini berhasil menciptakan lingkungan di mana kebutuhan nyata (problem solving) mendesak siswa untuk menggunakan pengetahuan Fisika sebagai alat pemecahan masalah. Peningkatan NKB yang tinggi menunjukkan bahwa pemahaman fungsional lebih kuat daripada pemahaman hafalan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan peningkatan signifikan pada Keterampilan Berpikir Kreatif (TKKB) siswa dalam pembelajaran Fisika melalui implementasi model terintegrasi STEM, Simulasi PhET, dan Evaluasi Berbantuan AI. Secara kuantitatif, rata-rata Nilai Keterampilan Berpikir (NKB) kelas meningkat tajam sebesar 24,68% secara kumulatif, beranjak dari level awal 70,19% menjadi 94,87% pada Post-Test Siklus III. Peningkatan ini secara kualitatif memindahkan status rata-rata kelas dari kategori Kreatif (K) menuju kategori Sangat Kreatif (SK). Efektivitas intervensi dikonfirmasi oleh nilai Normalized Gain (N-Gain) total sebesar 0.83, yang termasuk dalam kategori Tinggi ($g \geq 0.70$), mengindikasikan model pembelajaran yang diterapkan memiliki dampak luar biasa dalam mengembangkan potensi kognitif tingkat tinggi siswa. Pola peningkatan ini tidak terjadi secara linear, melainkan menunjukkan spesialisasi efektivitas pada setiap intervensi. Simulasi PhET pada Siklus I terbukti sangat efektif dalam mengembangkan aspek Flexibility (N-Gain: 0,560) dengan memfasilitasi visualisasi interaktif yang mendorong siswa mengeksplorasi berbagai perspektif. Selanjutnya, pembelajaran berbasis proyek hands-on (Siklus II) menunjukkan efektivitas tertinggi (N-Gain: 0,768) dalam meningkatkan aspek Fluency, karena pengalaman autentik dalam merancang dan memecahkan masalah riil memicu proses brainstorming dan iterasi desain yang intensif. Peningkatan ini mencapai puncaknya pada Siklus III, di mana Evaluasi Berbantuan AI menunjukkan efektivitas tinggi (N-Gain: 0,625) dalam menyempurnakan aspek Originality. AI

berfungsi sebagai mentor kritis yang memberikan umpan balik terstruktur, memaksa siswa untuk menyempurnakan dan memperinci ide (Elaboration), sebuah temuan yang mendukung peran human-AI collaboration dalam mengembangkan kreativitas.

Kesimpulannya, temuan ini mengarah pada implikasi pedagogis bahwa pengembangan keterampilan berpikir kreatif secara optimal pada siswa dicapai melalui urutan intervensi yang disengaja: memulai dengan PhET untuk membangun conceptual flexibility, dilanjutkan dengan proyek STEM untuk meningkatkan ide fluency, dan diakhiri dengan evaluasi AI untuk menyempurnakan originality dan elaboration. Keberhasilan penelitian ini memvalidasi efektivitas pendekatan STEM terintegrasi teknologi dalam mengembangkan kemampuan berpikir kreatif siswa pada materi Fisika yang abstrak.

DAFTAR RUJUKAN

- Adnan, Muliati, I. (2019). Professional teachers' perceptions about STEM learning: A phenomenological study. *Journal of Physics: Conference Series*, 1157(2), 022025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/2/022025>
- Alfika, Z. A., & Mayasari, T. (2021). The effectiveness of STEM-based PhET simulation to improve students' creative thinking skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1832(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1832/1/012043>
- Amelia, R., & Liliawati, W. (2020). Implementation of STEM-based student worksheet with PhET simulation to improve creative thinking skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1521(4), 042058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1521/4/042058>
- Anggraeni, D. M., & Nurita, T. (2022). The effect of PhET simulation on students' creative thinking skills in physics learning. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 11(1), 45-56. <https://doi.org/10.15294/jpii.v11i1.32456>
- Ariyani, D., & Utami, B. (2023). Integrasi Artificial Intelligence dalam Pembelajaran Fisika: Peluang dan Tantangan. *Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 2(1), 45-56.
- Ariyana, Y., & Setiawan, A. (2021). STEM-integrated physics learning to enhance students' creative thinking skills. *International Journal of Instruction*, 14(3), 345-362. <https://doi.org/10.29333/iji.2021.14320a>
- Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA Press.
- Chen, S., & Huang, R. (2020). The impact of AI-based evaluation on students' learning outcomes. *Computers & Education*, 158, 103987. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103987>
- Cheng, Y. C. (2019). AI-assisted learning and creative thinking development. *Journal of Educational Technology & Society*, 22(4), 1-14.
- Fadilah, R., & Lestari, D. P. (2022). AI-based assessment in physics education: A systematic review. *Journal of Science Learning*, 5(2), 234-245. <https://doi.org/10.17509/jsl.v5i2.39876>
- Guilford, J. P. (1967). *The nature of human intelligence*. McGraw-Hill.
- Hadzicorgiou, Y., & Garip, M. (2021). Project-based learning and creativity in science education. *Science & Education*, 30(2), 345-367. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00172-0>
- Haryanto, Z., & Suhandi, A. (2021). The effect of STEM project-based learning on students' creative thinking skills. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 17(1), 12-23. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v17i1.23456>

- Honey, M., Pearson, G., & Schweingruber, M. (Eds.). (2014). STEM integration in K-12 education: Status, prospects, and an agenda for research. National Academies Press.
- Hwang, G. J., Xie, H., Wah, B. W., & Gašević, D. (2020). Vision, challenges, roles and research issues of Artificial Intelligence in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2020.100001>
- Khoirunnisa, F., & Sabandar, J. (2020). Creative thinking skills in physics learning: A meta-analysis. *Journal of Baltic Science Education*, 19(5), 724-737. <https://doi.org/10.33225/jbse/20.19.724>
- Lase, D., & Ningsih, R. (2022). Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kreatif Siswa Melalui Model Pembelajaran Berbasis Proyek STEM. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)*, 6(2), 115-125.
- Lestari, D. P., & Supriyanto, A. (2022). The role of PhET simulation in enhancing students' conceptual understanding and creative thinking. *Journal of Physics: Conference Series*, 2309(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012045>
- Mahdan, D., & Rusdiana, D. (2021). Creative thinking indicators in physics problem solving. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 17(2), 145-156. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v17i2.27890>
- Nurhayati, N., & Liliawati, W. (2022). Implementation of STEM approach with PhET simulation to improve students' creative thinking skills on electromagnetic concepts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2165(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2165/1/012034>
- Perkins, D. N. (2020). *The intelligent eye: Learning to think by looking at art*. Routledge.
- Runco, M. A., & Acar, S. (2012). Divergent thinking as an indicator of creative potential. *Creativity Research Journal*, 24(1), 66-75. <https://doi.org/10.1080/10400419.2012.652929>
- Sari, D. P., & Liliawati, W. (2020). Penerapan pembelajaran berbasis STEM untuk meningkatkan literasi sains dan teknologi siswa SMA pada materi elektromagnetik. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 6(1), 131-139. <https://doi.org/10.29303/jpft.v6i1.1789>
- Siswono, T. Y. E. (2008). Model pembelajaran matematika berbasis pengajaran dan pemecahan masalah untuk meningkatkan kemampuan berpikir kreatif. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran*, 15(2), 234-245.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Su, J., Li, Y., Jiang, Y., & Li, Y. (2024). A review of research on the application of ChatGPT in education: Challenges and opportunities. *Education and Information Technologies*, 29(1), 1-24.
- Torrance, E. P. (1974). *Torrance tests of creative thinking*. Personnel Press.
- Wahono, B., & Budi, A. (2021). The effectiveness of STEM approach to improve students' creative thinking skills in physics learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 1806(1), 012012.
- Wahyuni, S., & Kosim, K. (2021). The effectiveness of STEM-based learning tools to improve students' creative thinking skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1816(1), 012098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1816/1/012098>
- Wena, M. (2014). *Strategi pembelajaran inovatif kontemporer: Suatu tinjauan konseptual operasional*. Bumi Aksara.

-
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Dubson, M. (2014). PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. *Physics Today*, 67(10), 30-34.
- Zubaidah, S. (2019). Keterampilan abad ke-21: Keterampilan yang diajarkan melalui pembelajaran. *Seminar Nasional Pendidikan*, 2(1), 1-17.
- Zulkarnaen, Z., & Supriyanto, A. (2022). AI-based learning evaluation in STEM education: Opportunities and challenges. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 17(8), 45-62. <https://doi.org/10.3991/ijet.v17i08.29876>