

PERAN LABORATORIUM VIRTUAL DALAM MENINGKATKAN KETERAMPILAN ABAD KE-21 (4C) PADA PEMBELAJARAN IPA : STUDI LITERATUR

Tyse Ramadhona¹, Mutiah Lestari², Trista Meilanie³, Hamdi Akhsan^{4*},
Iful Amri⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia

*Corresponding Author: hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

DOI: 10.24929/lensa.v16i1.876

Received: 28 Mei 2025

Revised: 7 November 2025

Accepted: 3 Maret 2026

ABSTRAK

Peran Laboratorium Virtual Dalam Meningkatkan Keterampilan Abad Ke-21 (4C) Pada Pembelajaran IPA : Studi Literatur. Pendidikan abad ke-21 menuntut penguasaan keterampilan berpikir kritis, kreativitas, komunikasi, dan kolaborasi (4C). Dalam pembelajaran IPA, praktikum berperan penting untuk memfasilitasi pemahaman konsep sekaligus melatih keterampilan tersebut. Namun, keterbatasan laboratorium fisik di banyak sekolah menghambat pelaksanaan praktikum secara optimal. Laboratorium virtual menjadi alternatif yang memungkinkan peserta didik melakukan eksperimen interaktif tanpa bergantung pada fasilitas fisik. Kajian ini bertujuan menganalisis peran laboratorium virtual dalam mendukung pengembangan keterampilan abad ke-21 melalui telaah literatur artikel ilmiah terbitan 2018–2025. Hasil menunjukkan bahwa laboratorium virtual efektif meningkatkan keterampilan berpikir kritis, kreativitas, komunikasi, dan kolaborasi pada berbagai jenjang pendidikan. Selain itu, media ini mampu memperkuat pemahaman konseptual, meningkatkan motivasi belajar, serta menyediakan pengalaman eksperimen yang aman dan fleksibel. Dengan demikian, laboratorium virtual berkontribusi signifikan dalam peningkatan kualitas pembelajaran IPA. Dampaknya bagi pendidikan sains mencakup perluasan akses belajar, penguatan kemampuan berpikir tingkat tinggi, dan pengembangan inovasi praktikum digital.

Kata kunci: Laboratorium virtual, keterampilan abad 21, berpikir kritis, pembelajaran IPA

ABSTRACT

The Role of Virtual Laboratory in Enhancing 21st Century Skills (4C) in Science Learning: A Literature Study. 21st century education requires mastery of critical thinking, creativity, communication, and collaboration (4C) skills. In science learning, practical work plays an important role in facilitating conceptual understanding while training these skills. However, the limitations of physical laboratories in many schools hinder the optimal implementation of practical work. Virtual laboratories are an alternative that allows students to conduct interactive experiments without relying on physical facilities. This study aims to analyze the role of virtual laboratories in supporting the development of 21st-century skills through a review of scientific articles published between 2018 and 2025. The results show that virtual laboratories are effective in improving critical thinking, creativity, communication, and collaboration skills at various levels of education. In addition, this medium is able to strengthen conceptual understanding, increase learning motivation, and provide a safe and flexible experimental experience. Thus, virtual laboratories contribute significantly to improving the quality of science learning. The impact on science education includes expanding access to learning, strengthening higher-order thinking skills, and developing digital practicum innovations.

Keywords: Virtual laboratory, 21st century skills, critical thinking, science learning

PENDAHULUAN

Pada abad ke-21, kemajuan teknologi informasi dan komunikasi telah memengaruhi gaya hidup manusia dalam bekerja, bersosialisasi serta menyentuh berbagai aspek kehidupan termasuk pendidikan (Jayadi *et al.*, 2020). Pendidikan memiliki peran krusial dalam mempersiapkan generasi muda untuk menghadapi masa depan yang semakin kompleks, dinamis dan tidak terduga di abad ke-21 ini (Thana & Hanipah, 2023). Oleh karena itu, sistem pendidikan harus mampu menanamkan keterampilan abad ke-21, agar peserta didik siap menghadapi tantangan (Astutik & Hariyati, 2021). Keterampilan abad ke-21 mencakup keterampilan berpikir kritis, berpikir kreatif, komunikasi dan kolaborasi atau sering dikenal dengan istilah 4C (Silber-Varod *et al.*, 2019; Wrahatnolo & Munoto, 2018). Pendidikan yang adaptif terhadap perkembangan teknologi menjadi kunci untuk menumbuhkan keterampilan-keterampilan tersebut (Astutik & Hariyati, 2021).

Salah satu mata pelajaran yang berperan penting dalam membentuk keterampilan abad ke-21 sebagai bekal dalam menghadapi berbagai tantangan global yang kompleks adalah pembelajaran IPA (Hamzan, 2022). IPA mempelajari gejala alam yang tersusun secara sistematis melalui suatu pengamatan (Yanti *et al.*, 2024). Pembelajaran IPA menuntut pemahaman konseptual dan keterampilan berpikir tingkat tinggi sehingga siswa dituntut untuk benar-benar memahami materi dengan baik (Anjani *et al.*, 2020; Suharyat *et al.*, 2022). Untuk mendukung proses tersebut, kegiatan praktikum menjadi bagian yang sangat penting dan tidak dapat dipisahkan dari pembelajaran IPA, karena dapat membantu peserta didik untuk membuktikan atau menemukan suatu konsep-konsep penting melalui pengalaman secara langsung (Darwis & Hardiansyah, 2021). Misalnya, beberapa konsep IPA seperti perpindahan kalor dalam zat, perubahan wujud zat dan reaksi kimia sulit dipahami secara abstrak tanpa pengalaman praktikum. Pengalaman praktikum ini juga berkontribusi dalam melatih keterampilan abad 21.

Namun, masih banyak sekolah di Indonesia menghadapi kendala dalam menyediakan laboratorium fisik yang memadai. Menurut Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan pada tahun 2019, sekitar 40% sekolah di Indonesia belum memiliki laboratorium IPA atau sains yang layak. Hambatan utama meliputi keterbatasan anggaran, minimnya peralatan laboratorium, serta minimnya guru yang kompeten dalam mengelola praktikum (Muhajarah & Sulthon, 2020). Selain itu, pelaksanaan praktikum sering terhambat oleh isu keselamatan kerja, biaya tinggi, keterbatasan waktu, serta keterbatasan ruang dan bahan eksperimen (Bazie *et al.*, 2024). Penelitian juga menunjukkan bahwa peserta didik yang kurang mendapatkan pengalaman praktikum cenderung kesulitan memahami konsep-konsep sains secara mendalam (Asshalihin *et al.*, 2021), seperti gaya dan gerak, struktur atom atau sistem pernapasan manusia.

Dalam menghadapi keterbatasan tersebut, laboratorium virtual hadir sebagai solusi alternatif yang inovatif. Laboratorium virtual merupakan media pembelajaran berbasis simulasi komputer yang memungkinkan siswa melakukan eksperimen tanpa menggunakan peralatan fisik (Mustapa *et al.*, 2023). Media ini memberikan kesempatan kepada siswa untuk memvisualisasikan dan memanipulasi variabel-variabel dalam percobaan secara interaktif dan mendalam (Napirah & Safiuddin, 2024). Dengan visualisasi 3D, simulasi dinamis, dan instruksi interaktif, teknologi ini membantu siswa memahami konsep abstrak dengan lebih baik (Sukenthi, 2021), seperti struktur molekul, listrik dan atom. Selain itu, laboratorium virtual juga memberikan fleksibilitas akses, tingkat keamanan yang lebih tinggi serta kesempatan untuk mengulang eksperimen tanpa adanya batasan bahan atau waktu (Wahyuni & Lesmono, 2021). Teknologi ini terbukti mampu meningkatkan motivasi belajar, melatih keterampilan berpikir kritis dan kemampuan pemecahan masalah melalui skenario eksperimen yang dapat disesuaikan (Fauziah *et al.*, 2024; Bazie *et al.*, 2024). Meskipun demikian, kajian yang secara komprehensif menelaah kontribusi laboratorium virtual terhadap keseluruhan keterampilan abad ke-21 (4C) dalam pembelajaran IPA masih terbatas, sehingga diperlukan studi yang lebih sistematis.

Di Indonesia, implementasi laboratorium virtual masih belum optimal meskipun memiliki banyak keunggulan. Tantangan yang dihadapi meliputi biaya pengembangan yang tinggi, keterbatasan perangkat teknologi di sekolah, serta minimnya pelatihan guru dalam pemanfaatan laboratorium virtual (Chan *et al.*, 2021). Selain itu, belum banyak tersedia panduan praktikum daring yang valid dan praktis untuk mendukung efektivitas pembelajaran (Boleng *et al.*, 2023). Ketimpangan infrastruktur teknologi di berbagai daerah juga turut memperburuk kesenjangan dalam akses pendidikan digital (Solikhin *et al.*, 2019). Padahal, laboratorium virtual memiliki

potensi besar untuk mendukung penguatan keterampilan abad ke-21 di seluruh wilayah Indonesia (Abdul & Ntobuo, 2019; Alfiah & Dwikoranto, 2022)

Kajian ini bertujuan untuk memetakan secara kritis peran laboratorium virtual dalam mendukung penguasaan keterampilan abad ke-21 melalui pembelajaran IPA, dengan melakukan telaah sistematis terhadap hasil studi literatur dari tahun 2018 hingga 2025 dengan pendekatan metode PRISMA. Berbeda dari kajian sebelumnya yang umumnya berfokus pada peningkatan kemampuan berpikir kritis, penelitian ini menyajikan telaah sistematis yang mencakup keseluruhan keterampilan 4C melalui analisis literatur terkini tahun 2018–2025.

METODE

Pendekatan Penelitian

Kajian ini menggunakan metode studi literatur sebagai pendekatan utama. Studi literatur merupakan suatu pendekatan atau metode untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, mengumpulkan serta menganalisis secara kritis data dari penelitian yang relevan dengan topik yang dibahas (Snyder, 2019). Pendekatan ini dipilih untuk mengumpulkan berbagai temuan dan perspektif yang relevan dengan peran laboratorium virtual dalam pembelajaran IPA dan pengembangan keterampilan abad ke-21.

Sumber Data

Sumber data dalam kajian ini berupa artikel-artikel ilmiah yang diambil dari berbagai jurnal nasional terakreditasi maupun jurnal internasional yang bereputasi yang diakses melalui *Google Scholar*, *Semantic Scholar* dan *Eric*. Dalam kajian ini, artikel yang disertakan adalah artikel yang tersedia dalam teks lengkap (*full text*) dan dipublikasikan dalam rentang tahun 2018 hingga awal tahun 2025. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian yaitu :

- virtual laboratory AND 21st-century skills AND science education,
- virtual laboratory AND critical thinking AND science education,
- virtual laboratory AND creative thinking AND science education,
- virtual laboratory AND communication AND science education,
- virtual laboratory AND collaboration AND science education.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan relevansi dan kualitas literatur yang digunakan, kajian ini menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi yakni sebagai berikut :

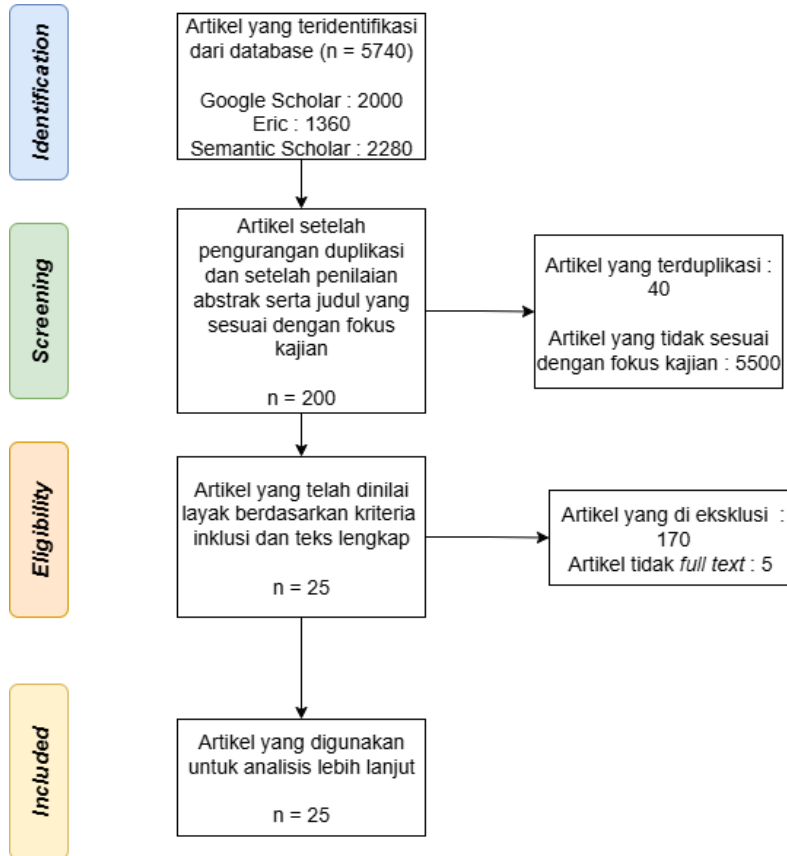
Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel dengan rentang tahun terbit 2018 hingga awal tahun 2025 (periode ini dipilih karena mencerminkan perkembangan teknologi laboratorium virtual yang semakin matang serta peningkatan pemanfaatannya dalam pendidikan IPA serta fokus utama kajian pada tahun 2018 hingga awal tahun 2025)	Diterbitkan sebelum 2018
Penelitian primer yang berfokus pada penggunaan laboratorium virtual dalam pembelajaran IPA	Tidak relevan dengan penggunaan laboratorium virtual dalam pembelajaran IPA
Penelitian yang mengukur keterampilan abad 21, terutama aspek berpikir kritis, berpikir kreatif, komunikasi dan kolaborasi	Tidak menyajikan hasil penelitian yang dapat dianalisis
Artikel berbahasa Inggris atau Indonesia dan tersedia dalam teks lengkap	Ditulis dalam bahasa selain Indonesia dan Inggris serta tidak tersedia dalam teks lengkap

Proses seleksi artikel

Seleksi artikel dilakukan melalui berbagai tahapan yang sesuai dengan alur PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), yang terdiri dari empat tahapan utama. Tahap pertama yakni identifikasi (*identification*), di mana artikel-artikel ditemukan melalui pencarian di *database* daring dengan menggunakan kata kunci yang telah ditentukan. Selanjutnya, tahap kedua yakni penyaringan awal (*screening*) yang dilakukan dengan penghapusan duplikasi serta penilaian terhadap judul dan abstrak untuk memastikan artikel-

artikel tersebut sesuai dengan topik yang diteliti. Pada tahap ketiga yakni kelayakan (*eligibility*), artikel yang sudah dipilih kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi serta dilakukan evaluasi terhadap teks lengkap artikel. Tahapan terakhir yakni inklusi akhir dan artikel yang telah dipilih kemudian dianalisis lebih lanjut. Berikut ini diagram alur PRISMA untuk proses seleksi artikel :



Gambar 1. Diagram PRISMA

Teknik Analisis Data

Artikel yang telah lulus seleksi kemudian dianalisis secara tematik dengan pendekatan analisis isi (*content analysis*). Dalam proses ini, peneliti mengidentifikasi tema-tema utama yang muncul terkait dengan kontribusi laboratorium virtual dalam pembelajaran IPA, pengembangan keterampilan abad ke-21 seperti berpikir kritis, kreatif, komunikasi dan kolaborasi, serta tantangan dan peluang implementasi laboratorium virtual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temuan Utama dari Literatur

Berdasarkan analisis terhadap 25 artikel yang telah diseleksi sesuai dengan pendekatan PRISMA, laboratorium virtual terbukti memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan keterampilan abad ke-21 khususnya dalam pembelajaran IPA. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan laboratorium virtual dapat meningkatkan keterampilan 4C (berpikir kritis; kreatif; komunikasi dan kolaborasi) siswa di berbagai jenjang pendidikan, mulai dari SMP hingga perguruan tinggi. Rangkuman hasil analisis setiap artikel ditunjukkan pada Tabel 2.

Table 2. Hasil Analisis Arikel

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Jenjang	Variabel yang diukur	Temuan Utama
1	Risdiyanto <i>et al.</i> , 2022	<i>Development of Interactive Multimedia Assisted by Virtual Laboratory for</i>	SMA	Berpikir kritis dan kreatif	Peningkatan keterampilan

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Jenjang	Variabel yang diukur	Temuan Utama
		<i>Critical and Creative Thinking Skills in Respiration and Excretion System Materials for Class XI High School Students</i>			berpikir kritis dan kreatif siswa.
2	Ambarita & Situmorang, 2023	<i>Development Of E-Module Integrated With Virtual Laboratory On Acid-Base Titration Material To Improve Critical Thinking Skills</i>	Perguruan tinggi	Berpikir kritis	Peningkatan keterampilan berpikir kritis siswa secara signifikan.
3	Sandi & Fatisa, 2023	Kemampuan Berpikir Kritis Siswa Pada Materi Larutan Penyangga Menggunakan Metode Praktikum Virtual	SMA	Berpikir kritis	Peningkatan keterampilan berpikir kritis siswa.
4	Musyailah et al., 2020	Pengaruh Integrasi Laboratorium Virtual dalam Model Pembelajaran Problem Solving Terhadap Kemampuan Berpikir Kritis Peserta Didik pada Materi Elektrolit dan Non elektrolit	SMA	Kemampuan berpikir kritis	Peningkatan kemampuan berpikir kritis siswa secara signifikan.
5	Ocvianti & Sulisworo, 2021	Pembelajaran Berbasis Laboratorium Virtual Melalui Google Classroom Pada Materi Hukum Ohm Untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis	SMA	Kemampuan berpikir kritis	Peningkatan keterampilan berpikir kritis siswa.
6	Satria et al., 2020	Pengembangan Perangkat Pembelajaran Fisika Model Inkuiri Terbimbing Berbantuan Laboratorium Virtual Untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kreatif Peserta Didik	SMA	Keterampilan berpikir kreatif siswa	Peningkatan keterampilan berpikir kreatif siswa.
7	Astuti et al., 2020	<i>Effect of 3D Visualization on Students' Critical Thinking Skills and Scientific Attitude in Chemistry</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis dan sikap ilmiah	Peningkatan keterampilan berpikir kritis dan sikap ilmiah siswa.
8	Firmansyah et al., 2022	<i>Evaluation of Virtual Workspace Laboratory: Cloud Communication and Collaborative Work on Project-Based Laboratory</i>	Perguruan tinggi	Seluruh aspek 4C	Mendorong keterampilan abad ke-21 terutama dalam hal komunikasi, kolaborasi, berpikir kritis, dan manajemen proyek (4C).
9	Lestari et al., 2021	<i>Virtual Classroom Critical Thinking as an Alternative Teaching Model to Improve Students' Critical Thinking Skills in Pandemic Era</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Efektif meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa.
10	Syam et al., 2024	<i>Improving Students' Critical Thinking Skills Using the Problem-Based Learning Model Assisted by Virtual Laboratories</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Peningkatan kemampuan berpikir kritis siswa.

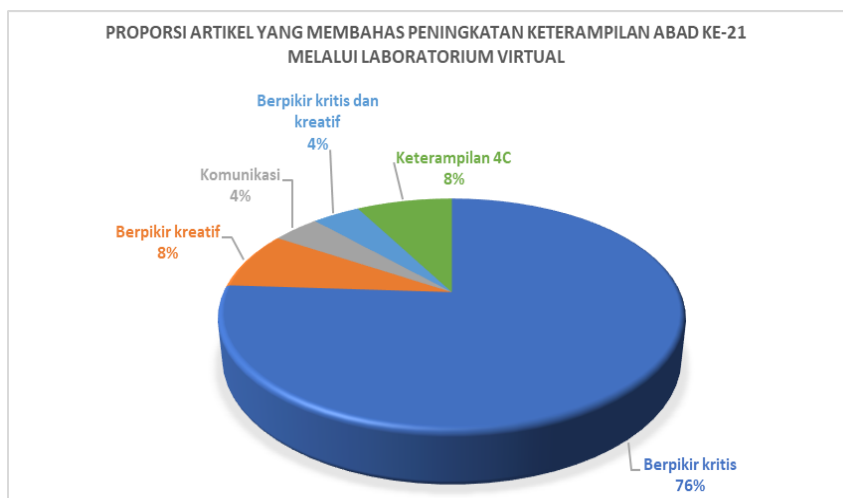
No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Jenjang	Variabel yang diukur	Temuan Utama
11	Julianti et al., 2023	<i>Development of Virtual Laboratory Electronic Student Worksheet Using PjBL to Improve Critical Thinking Ability</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Peningkatan kemampuan berpikir kritis dalam kategori sedang.
12	Ravista et al., 2021	<i>Validity and Practicality of Guided Inquiry-Based E-Modules Accompanied by Virtual Laboratory to Empower Critical Thinking Skills</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Efektif dalam memperkuat keterampilan berpikir kritis siswa.
13	Safarati & Lubis, 2022	<i>Students' Conceptual Understanding and Critical Thinking Skills Through Online Learning Using a Virtual Laboratory</i>	Perguruan Tinggi	Kemampuan berpikir kritis	Peningkatan pemahaman konsep dan keterampilan berpikir kritis siswa.
14	Setya et al., 2021	<i>Implementation of Higher Order Thinking Laboratory (HOTLAB) on Magnetic Field with Real Blended Virtual Laboratory to Improve Students' Critical Thinking Skills</i>	Perguruan Tinggi	Keterampilan berpikir kritis	Peningkatan keterampilan berpikir kritis mahasiswa.
15	Yolanda et al., 2025	<i>Enhancing Critical Thinking and Written Communication Skills through Problem-Based Learning Assisted by Virtual Labs</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Peningkatan keterampilan berpikir kritis (dari 50% ke 75%) dan komunikasi tertulis (dari 48% ke 76%).
16	Fadhilah et al., 2021	<i>Development of Virtual Lab Media to Improve Student's Critical Thinking Ability</i>	Perguruan Tinggi	Berpikir kritis	Peningkatkan berpikir kritis mahasiswa.
17	Lisma et al., 2021	Penerapan Lab Virtual dengan Model Inkuiri Terbimbing untuk Meningkatkan Keterampilan Abad 21 pada Siswa SMP	SMP	<i>Critical Thinking, Communication, Collaboration, Creativity</i>	Peningkatan keterampilan abad 21 siswa (<i>critical thinking, communication, collaboration, creativity</i>).
18	Elisa et al., 2020	Pengembangan Laboratorium Virtual Kimia Teknik untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis dan Proses Sains Mahasiswa	Perguruan Tinggi	Keterampilan berpikir kritis	Efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis mahasiswa
19	Widiarini et al., 2021	Pengaruh Model Pembelajaran Berbasis Proyek Berbantuan Lab Virtual terhadap Kreativitas Mahasiswa	Perguruan Tinggi	<i>Creative thinking skills</i>	Peningkatan kreativitas mahasiswa pada praktikum elektronika.
20	Anjani et al., 2023	Pengaruh Model Project Based Learning Berbantuan Laboratorium Virtual terhadap Keterampilan Berpikir Kritis	SMP	Keterampilan berpikir kritis	Efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis.
21	Sari et al., 2023	<i>Application of a Virtual Laboratory Containing Ethnoscience to Enhance</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Efektif dalam meningkatkan keterampilan

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Jenjang	Variabel yang diukur	Temuan Utama
		<i>Students' Critical Thinking Skills</i>			berpikir kritis siswa (dengan N-gain 47%),
22	Noris et al., 2022	<i>The Virtual Laboratory Based on Problem Based Learning to Improve Students' Critical Thinking Skills</i>	SMP	Keterampilan berpikir kritis	Sangat efektif meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa SMP.
23	Agustina et al., 2020	Pengaruh Model Pembelajaran Inkuiri Terbimbing Berbantuan Media PhET terhadap Kemampuan Pemecahan Masalah dan Berpikir Kritis Fisika Peserta Didik SMA	SMA	Keterampilan berpikir kritis	Peningkatan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah peserta didik.
24	Rasyidi et al., 2024	Penggunaan Media Laboratorium Virtual (PhET Simulation) terhadap <i>Scientific Communication Skills</i> Mahasiswa pada Praktikum Hukum Kekekalan Energi Mekanik	Perguruan Tinggi	Keterampilan komunikasi	Peningkatan <i>Scientific Communication Skills</i> mahasiswa pendidikan fisika.
25	Ahmad & Prasetyo, 2023	<i>Discovery learning model-based virtual lab on photoelectric effect material to improve critical thinking skills.</i>	SMA	Keterampilan berpikir kritis siswa	Efektif meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa.

Berdasarkan tabel 2, temuan kajian menunjukkan bahwa laboratorium virtual memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan keterampilan abad ke-21 pada pembelajaran IPA di antaranya peningkatan paling menonjol terjadi pada berpikir kritis, karena simulasi memungkinkan siswa menguji variabel, menganalisis data, dan menyusun kesimpulan secara mandiri; kreativitas turut terasah melalui kegiatan merancang dan memodifikasi eksperimen dalam konteks pemecahan masalah ilmiah; sementara komunikasi dan kolaborasi berkembang efektif ketika laboratorium virtual diintegrasikan dengan pendekatan berbasis proyek dan platform digital interaktif. Selain memperkuat pemahaman konseptual, laboratorium virtual juga meningkatkan motivasi, keterlibatan, serta akses eksperimen yang aman, fleksibel, dan efisien terlebih lagi ketika dikombinasikan dengan model pembelajaran inovatif seperti PBL, PjBL, atau inkuiri terbimbing.

Pengaruh Laboratorium terhadap Keterampilan Abad ke-21

Laboratorium virtual memberikan pengaruh yang besar terhadap keterampilan abad ke-21, khususnya pada keterampilan berpikir kritis. Hal tersebut ditunjukkan pada proporsi hasil analisis yang menunjukkan peningkatan yang signifikan terhadap keterampilan berpikir kritis siswa, seperti yang terlihat pada banyak penelitian yang telah mengintegrasikan laboratorium virtual dalam pembelajaran. Grafik proporsi hasil analisis yang menunjukkan bahwa sebagian besar artikel yang dianalisis mencatatkan peningkatan keterampilan berpikir kritis setelah siswa berinteraksi dengan laboratorium virtual ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proporsi artikel yang membahas peningkatan keterampilan abad ke-21 melalui laboratorium virtual

Gambar 2 menunjukkan grafik proporsi artikel yang membahas peningkatan keterampilan abad ke-21 melalui laboratorium virtual. Sebagian besar artikel menunjukkan peningkatan keterampilan abad ke-21 berfokus pada pengembangan keterampilan berpikir kritis (76%), kemudian berpikir kreatif (8%) dan keterampilan 4C yakni kombinasi seluruh keterampilan abad ke-21 : *critical thinking, creative thinking, communication and collaboration* (8%). Namun, hanya sedikit artikel yang membahas keterampilan komunikasi (4%) dan kombinasi antara berpikir kritis dan kreatif (4%). Ini menunjukkan bahwa dalam penggunaan laboratorium virtual, keterampilan berpikir kritis menunjukkan peningkatan yang signifikan dan menjadi prioritas utama.

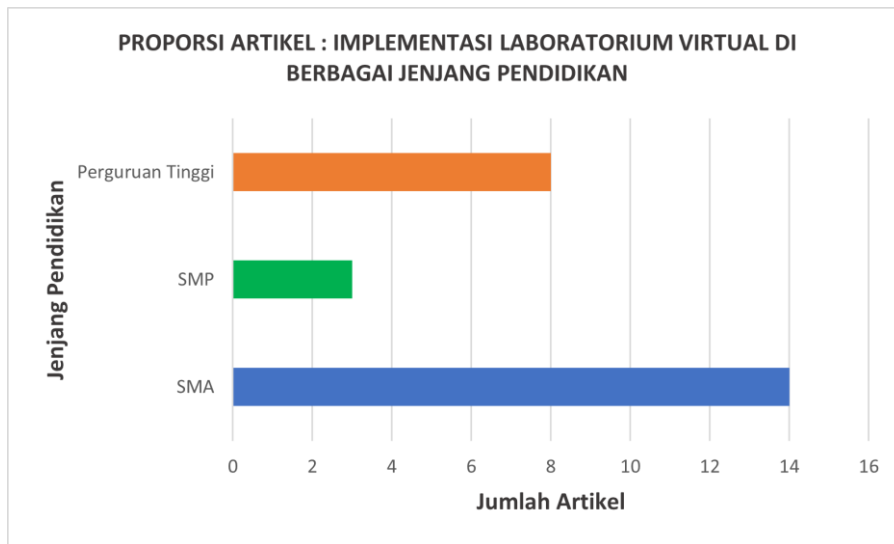
Laboratorium virtual memberikan kebebasan kepada siswa untuk melakukan eksperimen berulang kali tanpa dibatasi ruang ataupun peralatan fisik. Keleluasaan ini membantu siswa belajar dari berbagai kesalahan dan memahami hubungan sebab-akibat dalam eksperimen ilmiah. Eksperimen yang dilakukan di laboratorium juga dapat disesuaikan dengan kebutuhan pembelajaran, sehingga dapat meningkatkan kemampuan pemecahan masalah dan melatih keterampilan berpikir kritis siswa. Dalam pembelajaran IPA, berpikir kritis merupakan suatu keterampilan yang sangat penting dan diperlukan untuk mengembangkan kemampuan analisis dan evaluasi terhadap fenomena alam. Berdasarkan penelitian yang dilaksanakan oleh Musyailah *et al.*, 2020, dan Syam *et al.*, 2024, penggunaan laboratorium virtual yang diintegrasikan dalam model pembelajaran berbasis masalah (*Problem Based Learning*) terbukti dapat meningkatkan kemampuan siswa dalam menganalisis data, mengidentifikasi masalah dan menarik kesimpulan yang relevan dengan topik pembelajaran. Selain itu, integrasi laboratorium virtual dengan multimedia interaktif mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa yang menunjukkan bahwa media tersebut mampu mendorong pemikiran yang lebih mendalam mengenai konsep yang diajarkan (Risdiyanto *et al.*, 2022).

Selain berperan dalam pengembangan keterampilan berpikir kritis, laboratorium virtual juga berkontribusi pada peningkatan komunikasi ilmiah dan kreativitas siswa. Laboratorium virtual mampu mendorong siswa untuk berpikir kreatif dalam merancang dan menyelesaikan eksperimen yang diberikan. Penggunaan laboratorium virtual dengan berbantuan perangkat pembelajaran berbasis inkuiri terbimbing mampu meningkatkan keterampilan berpikir kreatif siswa, karena siswa diberikan kebebasan untuk mengeksplorasi dan mengembangkan ide-ide dalam konteks eksperimen ilmiah (Satria *et al.*, 2020). Laboratorium virtual juga berperan dalam meningkatkan keterampilan komunikasi ilmiah. Hal tersebut tercermin dalam penelitian yang dilakukan oleh Firmansyah *et al.*, 2022, yang mengkaji penggunaan *virtual workspace Slack* untuk mendukung kolaborasi dalam praktikum berbasis proyek. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa platform tersebut meningkatkan keterampilan komunikasi, kolaborasi serta keterampilan manajemen proyek mahasiswa. Dengan memberikan ruang bagi siswa untuk bekerja dalam tim

serta berbagi temuan, laboratorium virtual memungkinkan siswa untuk mengembangkan kemampuan komunikasi dan menulis dalam konteks ilmiah.

Implementasi Laboratorium Virtual dalam Berbagai Jenjang Pendidikan

Implementasi laboratorium virtual di berbagai jenjang pendidikan, mulai dari SMP hingga perguruan tinggi. Laboratorium virtual lebih banyak digunakan dalam jenjang pendidikan SMA. Hal tersebut terlihat dari grafik proporsi implementasi laboratorium virtual dalam berbagai jenjang pendidikan berikut.



Gambar 3. Proporsi artikel : implementasi laboratorium virtual di berbagai jenjang pendidikan

Gambar 3 menunjukkan grafik proporsi artikel yang membahas implementasi laboratorium virtual di berbagai jenjang pendidikan. Berdasarkan grafik, artikel terbanyak fokus pada SMA, dengan jumlah artikel yang jauh lebih tinggi yakni 14 artikel dibandingkan dengan Perguruan Tinggi yang berjumlah 8 dan SMP yang berjumlah 3. Artikel tentang implementasi laboratorium virtual di Perguruan Tinggi berada di posisi kedua, sementara SMP memiliki jumlah artikel paling sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan laboratorium virtual lebih banyak dibahas di jenjang pendidikan menengah atas (SMA), dengan perhatian yang lebih sedikit di jenjang pendidikan dasar hingga menengah pertama (SMP) dan Perguruan Tinggi.

Implementasi laboratorium virtual di berbagai jenjang pendidikan ini menunjukkan hasil yang positif. Di tingkat SMA, penggunaan laboratorium virtual mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan komunikasi siswa dalam pembelajaran IPA (Lisma *et al.*, 2021; Sandi & Fatisa, 2023). Selain itu, di tingkat perguruan tinggi penggunaan laboratorium virtual juga mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis (Setya *et al.*, 2021). Penggunaan laboratorium virtual memungkinkan siswa dan mahasiswa untuk mengakses eksperimen yang mungkin tidak tersedia di laboratorium fisik, sehingga meningkatkan aksesibilitas pendidikan dan memperkaya pengalaman belajar siswa.

Selain meningkatkan keterampilan berpikir kritis, pada tingkat perguruan tinggi laboratorium virtual juga memberikan kesempatan bagi mahasiswa untuk berkolaborasi dalam lingkungan yang lebih fleksibel. Penelitian oleh Rasyidi *et al.*, 2024, menyoroti penggunaan simulasi laboratorium virtual yakni simulasi PhET dalam praktikum hukum kekekalan energi mekanik yang memungkinkan mahasiswa lebih fokus pada pemahaman konsep-konsep fisika secara mendalam tanpa terhalang oleh keterbatasan praktikum konvensional. Di samping itu, integrasi laboratorium virtual dalam pembelajaran di perguruan tinggi juga mendorong mahasiswa untuk mengembangkan keterampilan manajerial dan kolaboratif, yang sangat penting untuk kesiapan di dunia kerja.

Tantangan dan Rekomendasi

Namun, meskipun integrasi laboratorium virtual dalam pembelajaran memberikan banyak manfaat, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah keterbatasan infrastruktur teknologi di sekolah-sekolah, terutama sekolah di daerah terpencil yang belum memiliki akses yang memadai ke teknologi digital (Solikhin *et al.*, 2019). Keterbatasan ini sering kali menghambat integrasi laboratorium virtual yang dapat memperkaya pengalaman belajar siswa. Selain itu, keterbatasan guru dalam memanfaatkan teknologi juga menjadi tantangan. Masih banyak guru yang kurang terlatih dalam memanfaatkan berbagai teknologi salah satunya laboratorium virtual ini, sehingga pembelajaran berbasis laboratorium virtual belum dapat dilaksanakan secara optimal (Chan *et al.*, 2021).

Untuk itu, sangat penting bagi pemerintah untuk menyediakan dukungan yang lebih besar dalam pengembangan infrastruktur teknologi pendidikan terutama di daerah-daerah yang terpencil. Program pelatihan guru yang berkelanjutan dan lebih sistematis juga diperlukan untuk memastikan bahwa para pengajar mampu memanfaatkan teknologi dengan baik. Pengembangan panduan praktikum daring yang valid dan mudah diakses oleh seluruh siswa juga sangat diperlukan agar siswa dapat menggunakan laboratorium virtual secara efektif. Dengan demikian, kebijakan yang mendukung pengembangan teknologi pendidikan serta pelatihan guru secara intensif akan sangat membantu dalam mengoptimalkan penggunaan laboratorium virtual dalam mendukung keterampilan abad ke-21.

KESIMPULAN

Berdasarkan telaah terhadap 25 artikel, laboratorium virtual terbukti berkontribusi signifikan dalam pengembangan keterampilan abad ke-21 pada pembelajaran IPA, terutama keterampilan berpikir kritis. Integrasinya dengan berbagai model pembelajaran interaktif, seperti *Problem Based Learning* dan inkuiri terbimbing, menunjukkan peningkatan kemampuan peserta didik dalam menganalisis data, menalar, dan menarik kesimpulan. Selain itu, penggunaan laboratorium virtual turut mendorong kreativitas, komunikasi ilmiah, dan kolaborasi melalui kegiatan eksplorasi variabel percobaan, diskusi, serta pelaporan hasil secara kelompok. Temuan ini menegaskan bahwa laboratorium virtual tidak hanya menjadi alternatif praktikum, tetapi juga sarana efektif untuk memperkuat penguasaan konsep dan keterampilan 4C. Meskipun demikian, implementasinya masih menghadapi kendala, seperti keterbatasan infrastruktur teknologi, kompetensi guru, dan ketimpangan akses, sehingga diperlukan dukungan kebijakan, peningkatan kapasitas pendidik, dan penyediaan panduan praktikum digital yang mudah diakses guna mengoptimalkan penerapannya.

SARAN

Peneliti berikutnya disarankan untuk memperluas kajian dengan mencakup artikel yang diterbitkan setelah 2025 serta mengeksplorasi teknologi laboratorium virtual lainnya seperti *augmented reality* (AR) atau *virtual reality* (VR). Selain itu, penelitian lebih lanjut perlu mengkaji dampak laboratorium virtual terhadap keterampilan abad ke-21 selain berpikir kritis, seperti kolaborasi dan kreativitas, di berbagai jenjang pendidikan. Untuk mengoptimalkan implementasi, diperlukan kebijakan yang mendukung infrastruktur teknologi dan akses pendidikan yang merata, serta program pelatihan berkelanjutan bagi guru. Pengembangan modul praktikum daring yang dapat diakses secara mudah juga penting untuk memastikan laboratorium virtual dapat digunakan secara efektif di sekolah dengan berbagai fasilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdjul, T., & Ntobuo, N.E. (2019). Penerapan media pembelajaran virtual laboratory berbasis phet terhadap hasil belajar siswa pada materi gelombang. *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online (JPFT)*, 7(3), 26–31.
- Agustina, K., Sahidu, H., & Gunada, I. W. (2020). Pengaruh model pembelajaran inkuiri terbimbing berbantuan media phet terhadap kemampuan pemecahan masalah dan berpikir kritis fisika peserta didik SMA. *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi*, 6(1), 17–24. <http://dx.doi.org/10.29303/jpft.v6i1.1514>
- Ahmad, L.S., & Prasetyo, Z.K. (2023). Discovery learning model-based virtual lab on photoelectric effect material to improve critical thinking skills. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 12(2), 153–165. <https://dx.doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v12i2.17553>

- Alfiah, S., & Dwikoranto, D. (2022). Penerapan Model Problem Based Learning Berbantuan Laboratorium Virtual PhET Untuk Meningkatkan HOTS Siswa SMA. *Jurnal Penelitian Pembelajaran Fisika*, 13(1), 9–18. <https://doi.org/10.26877/jp2f.v13i1.11494>
- Ambarita, T. O., & Situmorang, M. (2023). Development Of E-Module Integrated With Virtual Laboratory On Acid-Base Titration Material To Improve Critical Thinking Skills. *Chimica Didactica Acta*, 11(2), 48–54. <https://doi.org/10.24815/jcd.v11i2.33185>
- Anjani, F., Supeno, S., & Subiki, S. (2020). Kemampuan penalaran ilmiah siswa SMA dalam pembelajaran fisika menggunakan model inkuiri terbimbing disertai diagram berpikir multidimensi. *Lantanida Journal*, 8(1), 13–28. <https://doi.org/10.22373/lj.v8i1.6306>
- Anjani, S., Syarif, M. I., Susanti, H., & Sulaimon, J. T. (2023). Pengaruh Model Project Based Learning Berbantuan Laboratorium Virtual Terhadap Keterampilan Berpikir Kritis Pada Materi Listrik Dinamis. *Journal of Natural Sciences Learning*, 2(2), 30–37. <https://jom.uin-suska.ac.id/index.php/JNSL/article/view/466>
- Risdiyanto, T. A., Syamsurizal, S., Razak, A., dan Violita, V. (2022). Development of Interactive Multimedia Assisted by Virtual Laboratory for Critical and Creative Thinking Skills in Respiration and Excretion System Materials for Class XI High School Students. *International Journal of Current Science Research and Review*, 05(10), 4043–4053. <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/V5-i10-30>
- Asshalihin, A., Sahala, S., & Mursyid, S. (2021). Penggunaan Media Virtual Lab Terhadap Minat Belajar Fisika Peserta Didik SMA Negeri 10 Pontianak. *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran Khatulistiwa (JPPK)*, 10(10), 1–11. <https://doi.org/10.26418/jppk.v10i10.49712>
- Astuti, T. N., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2020). Effect of 3D visualization on students' critical thinking skills and scientific attitude in chemistry. *International Journal of Instruction*, 13(1), 151–164. <https://doi.org/10.29333/iji.2020.13110a>
- Astutik, P., & Hariyati, N. (2021). Peran Guru Dan Strategi Pembelajaran Dalam Penerapan Keterampilan Abad 21 Pada Pendidikan Dasar Dan Menengah. *Jurnal Inspirasi Manajemen Pendidikan*, 9(3), 619–638.
- Bazie, H., Lemma, B., Workneh, A., & Estifanos, A. (2024). The Effect of Virtual Laboratories on the Academic Achievement of Undergraduate Chemistry Students: Quasi-Experimental Study. *JMIR Formative Research*, 8(1), e64476. <https://doi.org/10.2196/64476>
- Boleng, D. T., Daru, T. P. K., & Sinaga, Y. R. A. (2023). Development of protist practical guides based on online learning to improve learning outcomes. *Global Journal of Guidance and Counseling in Schools: Current Perspectives*, 13(2), 81–96. <https://doi.org/10.18844/gjgc.v13i2.9126>
- Chan, P., Van Gerven, T., Dubois, J.-L., & Bernaerts, K. (2021). Virtual chemical laboratories: A systematic literature review of research, technologies and instructional design. *Computers and Education Open*, 2, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100053>
- Darwis, R., & Hardiansyah, M. R. (2021). Pengaruh penerapan laboratorium virtual PhET terhadap motivasi belajar IPA siswa pada materi gerak lurus. *ORBITA: Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*, 7(2), 271–277. <https://doi.org/10.31764/orbita.v7i2.5514>
- Elisa, E., Wiratmaja, I. G., Nugraha, I. N. P., & Dantes, K. R. (2020). Pengembangan Laboratorium Virtual Kimia Teknik untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis dan Proses Sains Mahasiswa. *Journal of The Indonesian Society of Integrated Chemistry*, 12(2), 55–61. <https://doi.org/10.22437/jisic.v12i2.11243>
- Fadhilah, N., Derlina, D., & Rahmatsyah, R. (2021). Development of Virtual Lab Media to Improve Student's Critical Thinking Ability. *6th Annual International Seminar on Transformative Education and Educational Leadership (AISTEEL 2021)*, 66–71. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.211110.062>
- Fauziah, E. L., Nais, M. K., Kusrijadi, A., & Chaerunisa, H. N. (2024). Pengaruh Penggunaan Media Pembelajaran berbasis Laboratorium Virtual terhadap Motivasi Belajar Peserta Didik pada Materi Kesetimbangan. *Jurnal Riset Dan Praktik Pendidikan Kimia*, 1(12), 27–33. <https://doi.org/10.17509/jrppk.v12i1.69418>
- Firmansyah, J., Suhandi, A., Setiawan, A., & Permanasari, A. (2022). Evaluation Of Virtual Workspace Laboratory: Cloud Communication And Collaborative Work On Project based Laboratory. *Journal on Efficiency and Responsibility in Education and Science*, 15(3), 131–141. <https://doi.org/10.7160/eriesj.2022.150301>

- Hamzan. (2022). *Buku Pembelajaran IPA Berbasis Kecakapan Abad 21 Di Sekolah Dasar* (S. Rukoippyah, Ed.; 1st ed.). CV. Pustaka Indonesia (Penerbit PI - Anggota IKAPI).
- Jayadi, A., Putri, D. H., & Johan, H. (2020). Identifikasi Pembekalan Keterampilan Abad 21 Pada Aspek Keterampilan Pemecahan Masalah Siswa SMA Kota Bengkulu Dalam Mata Pelajaran Fisika. *Jurnal Kumparan Fisika*, 3(1), 25–32. <https://doi.org/10.33369/jkf.3.1.25-32>
- Julianti, B., Haryadi, R., & Oktarisa, Y. (2023). Development of Virtual Laboratory Electronic Student Worksheet Using PjBL to Improve Critical Thinking Ability. *Islamic Journal of Integrated Science Education (IJISE)*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.30762/ijise.v2i1.885>
- Lestari, T., Supardi, Z. A. I., & Jatmiko, B. (2021). Virtual classroom critical thinking as an alternative teaching model to improve students' critical thinking skills in pandemic Coronavirus disease era. *European Journal of Educational Research*, 10(4), 2003–2015. <https://doi.org/10.12973/EU-JER.10.4.2003>
- Lisma, R. H., Aswirna, P., & Hurriyah, H. (2021). Penerapan Lab Virtual Dengan Model Inkuiri Terbimbing Untuk Meningkatkan Keterampilan Abad 21 Pada Siswa SMP. *Jurnal Cerdas Mahasiswa*, 3(2), 225–239. <https://doi.org/10.15548/jcm.v3i2.3517>
- Muhajarah, K., & Sulthon, M. (2020). Pengembangan laboratorium virtual sebagai media pembelajaran: Peluang dan tantangan. *Justek: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 3(2), 77–83. <https://doi.org/10.31764/justek.v3i2.3553>
- Mustapa, M., Kuendo, W.A.C., Utami, A.R.P., Jannah, M., & Maanari, C.P. (2023). Virtual Laboratories For Science Learning In The Digital Era. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran (JRPP)*, 6(4), 3219–3228. <https://doi.org/10.31004/jrpp.v6i4.20815>
- Musyaillah, D. A., Muhab, S., & Yusmaniar, Y. (2020). Pengaruh Integrasi Laboratorium Virtual dalam Model Pembelajaran Problem Solving Terhadap Kemampuan Berpikir Kritis Peserta Didik pada Materi Elektrolit dan Non elektrolit. *JRPK: Jurnal Riset Pendidikan Kimia*, 10(1), 46–52. <https://doi.org/10.21009/jrpk.101.07>
- Napirah, M., Abdim, A., Syarifuddin, S., Kasman, K., & Safiuddin, A. (2024). Studi Literatur Penggunaan Laboratorium Virtual dalam Pembelajaran Fisika. *Jurnal Penelitian Pendidikan Fisika*, 9(3), 108–116. <https://doi.org/10.36709/jipfi.v9i3.126>
- Noris, M., Saputro, S., & Muzazzinah, M. (2022). The Virtual Laboratory Based on Problem Based Learning to Improve Students' Critical Thinking Skills. *European Journal of Mathematics and Science Education*, 3(1), 35–47. <http://dx.doi.org/10.12973/ejmse.3.1.35>
- Ocvianti, M. A., & Sulisworo, D. (2021). Pembelajaran Berbasis Laboratorium Virtual Melalui Google Classroom Pada Materi Hukum Ohm Untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis. *Jurnal Kumparan Fisika*, 4(1), 67–76. <https://doi.org/10.33369/jkf.4.1.67-76>
- Rasyidi, R. D. G., Latifah, S., & Kurniawati, D. (2024). Penggunaan Media Laboratorium Virtual (PhET Simulation) Terhadap Scientific Communication Skills Mahasiswa Pada Praktikum Hukum Kekal Energi Mekanik. *BIOCHEPHY: Journal of Science Education*, 4(1), 289–297. <https://doi.org/10.52562/biochephy.v4i1.1135>
- Ravista, N., Sutarno, S., & Harlita, H. (2021). Validity and Practicality of Guided Inquiry-Based E-Modules accompanied by Virtual Laboratory to Empower Critical Thinking Skills. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(Special Issue), 331–339. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v7ispecialissue.1083>
- Safarati, N., & Lubis, R. H. (2022). Students' Conceptual Understanding and Critical Thinking Skills Through Online Learning Using a Virtual Laboratory. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*, 7(1), 42. <https://doi.org/10.26737/jipf.v7i1.2221>
- Sandi, K., & Fatisa, Y. (2023). Kemampuan Berpikir Kritis Siswa Pada Materi Larutan Penyangga Menggunakan Metode Praktikum Virtual. *Journal of Chemistry Education and Integration*, 2(1), 50. <https://doi.org/10.24014/jcei.v2i1.21650>
- Sari, N. P., Yusuf, M., & Yamtinah, S. (2024). Application of a Virtual Laboratory Containing Ethnoscience to Enhance Students' Critical Thinking Skills. *Journal of Education Technology*, 7(4), 590–598. <https://doi.org/10.23887/jet.v7i4.68713>
- Satria, R.P., Sahidu, H., & Susilawati, S. (2020). Pengembangan Perangkat Pembelajaran Fisika Model Inkuiri Terbimbing Berbantuan Laboratorium Virtual Untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kreatif Peserta Didik. *Orbita : Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*, 6(2). <https://doi.org/10.31764/orbita.v6i2.3046>
- Setya, W., Agustina, R. D., Putra, R. P., Prihatini, S., Hidayatulloh, R., Isnaeni, P. S., & Malik, A. (2021). Implementation of higher order thinking laboratory (HOTLAB) on magnetic field

- with real blended virtual laboratory to improve students critical thinking skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 2098(1), 012019. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2098/1/012019>
- Silber-Varod, V., Eshet-Alkalai, Y., & Geri, N. (2019). Tracing research trends of 21st-century learning skills. *British Journal of Educational Technology*, 50(6), 3099–3118. <https://doi.org/10.1111/bjet.12753>
- 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>
- Solikhin, F., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2019). The impact of virtual laboratory integrated into hybrid learning use on students' achievement. *Jurnal Ilmiah Peuradeun*, 7(1), 81–94. <https://doi.org/10.26811/peuradeun.v7i1.268>
- Suharyat, Y., Ichsan, I., Satria, E., Santosa, T. A., & Amalia, K. N. (2022). Meta-Analisis penerapan model pembelajaran problem based learning untuk meningkatkan ketrampilan abad-21 siswa dalam pembelajaran IPA. *Jurnal Pendidikan Dan Konseling (JPDK)*, 4(5), 5081–5088. <https://doi.org/10.31004/jpdk.v4i5.7455>
- Sukenthi, E. (2021). Pengembangan Laboratorium Virtual Untuk Meningkatkan Penguasaan Konsep Pada Materi Sistem Sirkulasi. *Pedagonal: Jurnal Ilmiah Pendidikan*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.33751/pedagonal.v5i1.2572>
- Syam, Y. R., Kurniasih, S., & Retnowati, R. (2024). Improving Students' Critical Thinking Skills Using the Problem-Based Learning Model Assisted by Virtual Laboratories. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Dan Pembelajaran*, 8(1), 27–33. <https://doi.org/10.23887/jipp.v8i1.67851>
- Thana, P. M., & Hanipah, S. (2023). Kurikulum Merdeka: Transformasi Pendidikan SD Untuk Menghadapi Tantangan Abad ke-21. *Prosiding Konferensi Ilmiah Dasar*, 4, 281–288. <https://prosiding.unipma.ac.id/index.php/KID/article/download/4331/3315>
- Wahyuni, S., & Lesmono, A. D. (2021). Pengembangan petunjuk praktikum fisika berbasis laboratorium virtual (virtual laboratory) pada pembelajaran fisika di SMP/MTs. *Jurnal Pembelajaran Fisika*
- Widiarini, P., Pramadi, I. P. W. Y., & Mardana, I. B. P. (2021). Pengaruh Model Pembelajaran Berbasis Proyek Berbantuan Lab Virtual Terhadap Kreativitas Mahasiswa. *ORBITA: Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*, 7(1), 212–218. <https://doi.org/10.31764/orbita.v7i1.4649>
- Wrahatnolo, T., & Munoto, M. (2018). 21st centuries skill implication on educational system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 296(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/296/1/012036>
- Yanti, E., Utari, M., & Putra, S. (2024). Media Digital Dalam Memberdayakan Kemampuan Berpikir Kritis Abad 21 Pada Pembelajaran IPA Di Sekolah Dasar. *Jurnal Tarbiyah Al-Awlad*, 14(1), 91-101. <https://doi.org/10.15548/alawlad.v14i1.8831>
- Yolanda, V., Nasir, M., & Fakhruddin, F. (2025). Enhancing Critical Thinking and Written Communication Skills through Problem-Based Learning Assisted by Virtual Labs. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(2), 1001–1005. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i2.10287>