VOL 3 NO 4 2026 E-ISSN:3064-2361

SAKALIMA
PILAR PEMBERDAYAAN MASYARAKAT PENDIDIKAN
VOL 3. NO. 4 (2026)

ISSN: 3064-2361

Laboratorium Virtual dan Keterampilan Proses Sains dalam Pembelajaran IPA SMP dan SMA: Systematic Literature Review

Putri Nurjannah✉, Akbar Handoko✉, dan Andri Jaya Kesuma✉

To cite this article Nurjannah, P., Handoko, A., Kesuma, A. J. Laboratorium Virtual dan Keterampilan Proses Sains dalam Pembelajaran IPA SMP dan SMA: *Systematic Literature Review*. *SAKALIMA Pilar Pemberdaya. Masy. Pendidik.*, vol. 3, no. 4, pp. 75–90, 2026. https://doi.org/10.70211/sakalima.v3i4.712

To link to this article:

Published online: Nov. 18, 2026

Submit your article to this journal

View crossmark data

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://journal.wiseedu.co.id/index.php/sakalima/about

OPEN ACCESS

https://doi.org/10.70211/sakalima.v3i4.712

SAKALIMA: Pilar Pemberdayaan Masyarakat Pendidikan Vol. 3 No. 4 (2026)

Check for updates

Research Article

Laboratorium Virtual dan Keterampilan Proses Sains dalam Pembelajaran IPA SMP dan SMA: *Systematic Literature Review*

Putri Nurjannah, Akbar Handoko, Andri Jaya Kesuma

Received: 21 Juli 2026	Revised: 10 Agustus 2026	Accepted: 15 September 2026	Online: 18 November 2026

Abstract

Science process skills (SPS) are a core competence of science learning, yet empirical evidence on how virtual laboratories contribute to students' SPS remains scattered and varied in design. This study synthesizes empirical studies on virtual laboratories and SPS in junior and senior high school physics, chemistry, and biology learning published in 2021–2025. Virtual laboratories were defined as interactive computer-based environments in which students run experimental procedures and change variables; remote laboratories, immersive virtual reality, demonstration videos, and non-interactive multimedia were excluded. The review followed PRISMA 2020 and PRISMA-S; searches covered Google Scholar, Scopus, SINTA, and DOAJ (last search 5 June 2026). Fifteen articles met the criteria and were synthesized narratively; no meta-analysis or formal risk-of-bias assessment was performed. Nine studies used a one-group pretest–posttest design, two were development studies, and four were quasi-experimental studies with an explicitly identified comparison group. All studies reported SPS results in a positive direction, but their inferential strength is limited and publication bias cannot be ruled out. Formulating hypotheses (8 of 12 studies reporting indicator-level results), drawing conclusions, and inferring/predicting (7 of 12 each) were the indicators most frequently reported, followed by observing, interpreting data, and classifying/applying concepts (6 of 12 each). Because no study compared virtual laboratories with and without an inquiry or discovery framework, the contribution of the virtual laboratory cannot be separated from the accompanying pedagogy. Virtual laboratories are therefore best positioned as a complement to physical practicum, and this finding needs to be tested in designs with comparison groups.

Keywords: PRISMA; Science Learning; Science Process Skills; Systematic Literature Review; Virtual Laboratory

Publisher's Note:

WISE Pendidikan Indonesia stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright:
©
2026 by the author(s).
License WISE Pendidikan Indonesia, Bandar Lampung, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0//).



PENDAHULUAN

Pembelajaran IPA tidak hanya diarahkan pada penguasaan konsep, tetapi juga pada kemampuan melakukan proses ilmiah melalui kegiatan mengamati, merumuskan pertanyaan, menyusun dugaan, mengumpulkan dan menafsirkan data, serta menyimpulkan berdasarkan bukti [1]. Rangkaian kemampuan tersebut dikenal sebagai keterampilan proses sains (KPS), yang menghubungkan pengetahuan konseptual dengan praktik penyelidikan ilmiah [2]. Literasi sains dan KPS bukan konstruk yang identik: literasi sains mencakup kemampuan yang lebih luas dalam menggunakan pengetahuan dan proses ilmiah untuk memahami serta mengambil keputusan, sedangkan KPS lebih spesifik pada keterampilan melakukan penyelidikan ilmiah [3], [4]. Capaian literasi sains peserta didik Indonesia pada PISA 2022 berada di bawah rata-rata OECD [3], tetapi data tersebut hanya menjadi konteks mutu pembelajaran sains dan bukan ukuran langsung KPS. Bukti yang lebih dekat berasal dari studi yang mengukur KPS secara langsung. Misalnya, studi deskriptif pada 193 siswa kelas VIII dan IX di satu SMP melaporkan bahwa 58% siswa berada di bawah tingkat sedang [5]; indikator yang paling rendah pada studi tersebut adalah keterampilan observasi (skor 18; kategori sangat rendah), disusul prediksi (33) dan klasifikasi (35). Temuan tunggal ini bersifat kontekstual dan tidak dapat digeneralisasi, tetapi menunjukkan perlunya pembelajaran yang secara eksplisit melatihkan KPS.

Keterbatasan alat, bahan, waktu, keselamatan, dan akses laboratorium fisik dapat mengurangi kesempatan peserta didik berlatih KPS. Dalam kajian ini, laboratorium virtual didefinisikan sebagai lingkungan berbasis komputer yang memungkinkan peserta didik menjalankan prosedur eksperimen, mengubah variabel, mengamati respons sistem, dan mengulang penyelidikan secara interaktif. Simulasi digital dimasukkan hanya bila digunakan dalam aktivitas eksperimen terstruktur yang memungkinkan peserta didik mengubah variabel dan mengamati responsnya (misalnya PhET); simulasi di luar aktivitas tersebut, *remote laboratory* (peralatan fisik yang dioperasikan dari jarak jauh), realitas virtual imersif, video demonstrasi, dan multimedia non-interaktif tidak dimasukkan, sehingga laboratorium virtual dapat dibedakan secara konsisten dari kategori tersebut. Cakupan IPA meliputi fisika, kimia, dan biologi pada jenjang SMP dan SMA/sederajat. Sejumlah studi primer melaporkan peningkatan KPS setelah pembelajaran berbantuan laboratorium virtual yang dipadukan dengan *discovery*, inkuiri terbimbing, atau pendekatan investigatif [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Manfaat serupa dilaporkan pada literasi sains [12], keterampilan argumentasi ilmiah [13], dan pembelajaran berbasis ICT dengan simulasi PhET [14].

Kajian terdahulu telah membahas efektivitas laboratorium virtual secara umum dan hubungannya dengan laboratorium nyata. Tinjauan sistematis tingkat kedua pada pendidikan STEM sekolah menengah melaporkan bahwa laboratorium daring mendukung pembelajaran setara dengan laboratorium nyata dan lebih positif bila terintegrasi dalam praktik pengajaran tradisional, tetapi keterampilan praktis dan inkuiri yang terkait penalaran ilmiah lebih jarang diteliti daripada pengetahuan konten, dan data kuantitatif seperti ukuran efek sering tidak tersedia [15]. *Review* lain berfokus pada efektivitas umum laboratorium virtual [16], penggunaannya dalam IPA secara umum [17], domain afektif [18], pemahaman konseptual dan hasil belajar [19], efektivitas dan faktor yang memengaruhinya di sekolah menengah [20], serta tantangan dan peluang implementasi [21]. Berdasarkan tujuan yang dilaporkan, *review-review* tersebut tidak menjadikan KPS pada jenjang SMP dan SMA sebagai fokus sintesis utama. Kajian ini berbeda dalam tiga hal. Pertama, studi primer harus mengukur KPS peserta didik

SMP dan SMA/sederajat pada 2021–2025, sehingga indikator KPS yang dilaporkan dapat dipetakan. Kedua, bukti pengembangan produk, bukti pretes–postes satu kelompok, dan bukti dengan kelompok pembanding dipisahkan agar kekuatan inferensi tiap studi tidak disamakan. Ketiga, faktor pendukung dan kendala ditautkan pada studi sumbernya. Kajian ini tidak melakukan penilaian risiko bias formal maupun meta-analisis; klasifikasi desain merupakan ukuran kasar kekuatan inferensi dan bukan pengganti *critical appraisal*.

Berdasarkan celah tersebut, kajian ini menjawab tiga pertanyaan penelitian (RQ): (RQ1) Bagaimana karakteristik studi empiris tentang laboratorium virtual dan KPS pada pembelajaran IPA jenjang SMP dan SMA selama 2021–2025 menurut tahun, jenjang, bidang IPA, lokasi, desain, bentuk laboratorium virtual, dan model pembelajaran? (RQ2) Indikator KPS apa yang paling sering dilaporkan pada studi-studi tersebut dan bagaimana status buktinya? (RQ3) Faktor pendukung dan kendala apa yang dilaporkan, dan mana yang diuji, dilaporkan oleh penulis studi, atau merupakan penafsiran kajian ini? Hasil kajian diharapkan menjadi dasar pertimbangan pemanfaatan laboratorium virtual sebagai pelengkap praktikum IPA.

METODOLOGI

Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan *systematic literature review* (SLR) terhadap studi empiris. Pelaporan mengikuti PRISMA 2020 [22] dan PRISMA-S [23] untuk strategi pencarian. Kedua dokumen merupakan pedoman pelaporan, bukan instrumen penilaian kualitas studi primer, sehingga prosedur pelaksanaan kajian dijelaskan tersendiri pada paragraf berikut. Tahapan pelaksanaan mengacu pada panduan SLR [24]: perumusan RQ, penetapan kriteria, pencarian, seleksi, ekstraksi, dan sintesis. Protokol kajian tidak diregistrasi pada platform registrasi protokol mana pun. Karena desain, instrumen KPS, dan ukuran hasil antarstudi heterogen, hasil disintesis secara naratif dan tematik; meta-analisis tidak dilakukan. Pengodean (*coding*) digunakan pada tahap ekstraksi dan klasifikasi data.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria ditetapkan sebelum seleksi dan disajikan pada Tabel 1. Studi primer harus berupa artikel empiris dalam jurnal ilmiah yang telah melalui *peer review*; status terindeks tidak menjadi kriteria. “Mengukur KPS” didefinisikan secara operasional sebagai penggunaan tes, lembar observasi, atau rubrik yang menghasilkan data KPS peserta didik beserta hasilnya. Studi dengan KPS sebagai hasil sekunder diterima sepanjang data KPS dilaporkan terpisah dari hasil lain; studi yang hanya mengukur literasi sains, hasil belajar kognitif, motivasi, atau pemahaman konsep dikeluarkan. Studi R&D diterima hanya bila menyajikan pengukuran KPS peserta didik pada tahap uji coba; studi yang hanya melaporkan validasi atau kelayakan produk dikeluarkan.

Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi

Aspek	Kriteria inklusi	Kriteria eksklusi
Topik	Menggunakan laboratorium virtual (termasuk simulasi interaktif dalam aktivitas eksperimen terstruktur)	Tidak menggunakan laboratorium virtual; *remote laboratory*, realitas virtual imersif, video demonstrasi

Aspek	Kriteria inklusi	Kriteria eksklusi
Outcome	KPS peserta didik diukur dan hasilnya dilaporkan (sebagai hasil utama atau sekunder yang dilaporkan terpisah)	Hanya literasi sains, hasil belajar, motivasi, atau pemahaman konsep
Jenis studi	Empiris: eksperimen, kuasi-eksperimen, pra-eksperimen, atau R&D dengan pengukuran KPS pada uji coba	*Review*, studi kelayakan/validasi produk tanpa pengukuran KPS
Jenis publikasi	Artikel jurnal ilmiah *peer-reviewed*	Prosiding, skripsi, tesis, buku, dokumen non-jurnal
Tahun	2021–2025	Di luar 2021–2025
Bahasa	Indonesia atau Inggris	Bahasa lain
Akses	Teks lengkap tersedia	Teks lengkap tidak dapat diperoleh
Jenjang	SMP/SMA/sederajat, pembelajaran IPA	SD, perguruan tinggi, calon guru, atau di luar IPA

Sumber Data dan Strategi Pencarian

Empat sumber digunakan untuk menyeimbangkan cakupan: Scopus sebagai basis data berindeks internasional, Google Scholar untuk cakupan luas termasuk jurnal nasional, SINTA untuk jurnal nasional terakreditasi, dan DOAJ untuk jurnal akses terbuka. Rasional ini tidak menjamin cakupan lengkap, dan risiko bias pemilihan sumber dibahas pada keterbatasan. Artikel pada Scopus, SINTA, dan DOAJ diperoleh melalui pencarian artikel langsung pada antarmuka masing-masing, bukan penelusuran laman jurnal. Kata kunci berbahasa Indonesia dan Inggris dikombinasikan dengan operator Boolean; *string* lengkap, bidang pencarian, filter, tanggal, dan jumlah hasil setiap sumber disajikan pada Tabel 2, dan seluruh hasil pencarian dicatat per sumber. Pada Google Scholar, hasil yang diperiksa dibatasi pada 200 hasil teratas per *string* menggunakan Publish or Perish karena urutan hasil bersifat dinamis. Semua hasil diekspor dan disatukan dalam satu daftar. Duplikat antarsumber diidentifikasi dengan pencocokan DOI dan judul, kemudian diperiksa manual; sumber asal setiap studi terpilih dicatat.

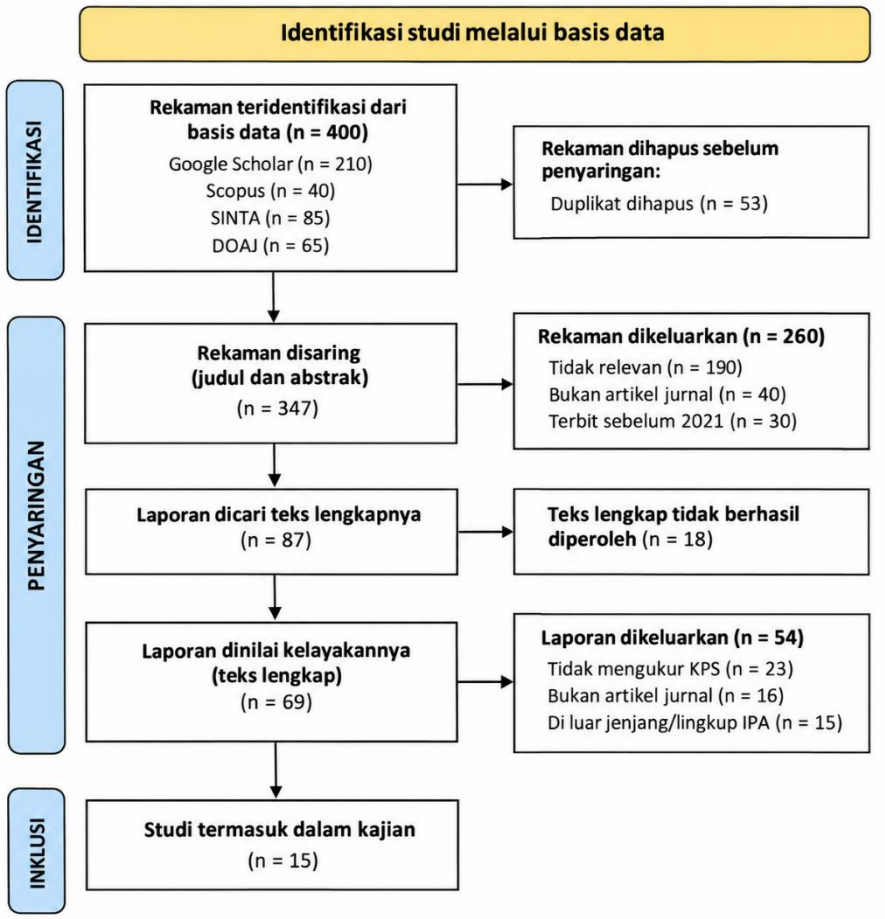
Tabel 2. Strategi pencarian dan hasil per sumber

Sumber	*String* pencarian	Bidang dan filter	Tanggal pencarian	Hasil (n)
Scopus	TITLE-ABS-KEY((“*virtual laborator**” OR “*virtual lab**” OR “*virtual experiment**” OR “*virtual practicum*” OR “PhET”) AND (“*science process skill**” OR “*scientific process skill**”) AND (*science* OR *physics* OR *chemistry* OR *biology* OR “*junior high*” OR “*senior high*” OR “*secondary school*”))	Judul, abstrak, kata kunci; 2021–2025; jenis dokumen artikel; bahasa Inggris atau Indonesia	5 Juni 2026	40
Google Scholar	(a) “*virtual laboratory*” “*science process skills*”; (b) “laboratorium virtual” “keterampilan proses sains”; (c) “*virtual lab*” “keterampilan proses sains” IPA	Publish or Perish; 2021–2025; 200 hasil teratas per *string*	5 Juni 2026	210
SINTA	(a) laboratorium virtual keterampilan proses sains; (b) *virtual laboratory science process skills*	Pencarian artikel; tanpa operator Boolean; 2021–2025	5 Juni 2026	85

Sumber	*String* pencarian	Bidang dan filter	Tanggal pencarian	Hasil (n)
DOAJ	("laboratorium virtual" OR "*virtual laboratory*") AND ("keterampilan proses sains" OR "*science process skills*")	Pencarian artikel; 2021–2025	5 Juni 2026	65
Total				400

Prosedur Seleksi Studi

Unit analisis adalah artikel jurnal empiris. Seluruh rekaman terdeduplikasi diseleksi berdasarkan kriteria pada Tabel 1, bukan berdasarkan pertimbangan pribadi penelaah. Penyaringan judul dan abstrak serta penilaian teks lengkap dilakukan oleh satu penelaah secara tunggal, tanpa penelaah kedua; keputusan yang meragukan diselesaikan melalui pemeriksaan ulang terhadap kriteria pada Tabel 1 dan teks lengkap artikel, tanpa penelaah ketiga, dan kesepakatan antarpenelaah tidak dihitung karena hanya ada satu penelaah. Alur seleksi disajikan pada Gambar 1. Pada tahap identifikasi diperoleh 400 rekaman dari empat sumber; setelah 53 duplikat dihapus, 347 rekaman disaring berdasarkan judul dan abstrak dan 260 dikeluarkan. Sebanyak 87 laporan dicari teks lengkapnya, 18 di antaranya tidak berhasil diperoleh, dan 69 laporan dinilai kelayakannya. Dari jumlah tersebut, 54 laporan dikeluarkan dengan alasan yang sama dengan kriteria pada Tabel 1 (tidak mengukur KPS sebagai hasil, bukan artikel jurnal, di luar jenjang atau lingkup IPA, dan R&D tanpa pengukuran KPS). Sebanyak 15 artikel jurnal empiris dimasukkan sebagai korpus akhir.



Gambar 1. Diagram alur seleksi studi berdasarkan PRISMA 2020
Sumber: diadaptasi dari Page et al. [22].

Ekstraksi Data

Ekstraksi memakai lembar ekstraksi dengan variabel: penulis dan tahun, lokasi atau negara, jenjang, bidang dan materi IPA, jumlah peserta, desain dan kelompok pembanding, durasi intervensi, bentuk laboratorium virtual, model pembelajaran, instrumen KPS beserta bukti validitas dan reliabilitas, indikator KPS yang diukur, nilai hasil (skor, N-Gain, uji statistik), faktor pendukung dan kendala yang dilaporkan, serta halaman sumber setiap data. Definisi operasional dibuat sebelum ekstraksi: "merancang eksperimen" mengacu pada penyusunan langkah, alat, dan variabel percobaan, sedangkan "melakukan eksperimen" mengacu pada pelaksanaan percobaan dan pengumpulan data. Ekstraksi dilakukan oleh satu penelaah.

Teknik Analisis dan Sintesis Data

Analisis dilakukan dalam empat langkah. (1) Data yang berkaitan dengan RQ direduksi dari lembar ekstraksi. (2) Karakteristik studi dikodekan secara deduktif dan dihitung sebagai frekuensi dan persentase. Indikator KPS dikodekan secara deduktif terhadap kerangka KPS yang umum digunakan [2]; label indikator yang berbeda antarstudi diselaraskan dengan memadankannya pada label indikator yang paling umum digunakan (misalnya "mengumpulkan dan mengolah data" dipadankan dengan menginterpretasi data dan "mengenali variabel" dengan mengidentifikasi variabel), dan keputusan pengodean yang ambigu diselesaikan dengan merujuk kembali pada teks artikel. (3) Faktor pendukung dan kendala dikodekan secara induktif dari pernyataan penulis studi, lalu dikelompokkan menjadi tema; setiap tema diberi status: diuji, dilaporkan penulis studi, atau penafsiran kajian ini. (4) Hasil disintesis secara naratif dengan membedakan jenis bukti menurut desain (pengembangan, satu kelompok, dengan pembanding). Penyebut setiap persentase dinyatakan secara eksplisit, dan ketiadaan laporan suatu indikator tidak ditafsirkan sebagai bukti bahwa indikator itu tidak berkembang. Tidak ada penggabungan ukuran efek atau uji statistik lintas studi.

Pengendalian Mutu dan Risiko Bias

Keterlacakan dijaga melalui log pencarian, daftar eksklusi teks lengkap beserta alasannya, dan pencatatan sumber asal setiap studi. Metadata bibliografis dicocokkan dengan laman penerbit atau DOI, dan setiap hasil pengodean ditelusuri kembali pada teks artikel; angka pada abstrak, teks, tabel, dan gambar diperiksa silang. Penilaian risiko bias formal tidak dilakukan. Sebagai gantinya, studi diklasifikasikan menurut desain (pengembangan, satu kelompok pretes–postes, dengan kelompok pembanding), yang hanya memberi gambaran kasar kekuatan inferensi dan tidak menggantikan *critical appraisal*. Konsistensi pengodean tidak dapat dihitung sebagai kesepakatan antarpengode karena hanya ada satu penelaah; konsistensi dijaga melalui penelusuran ulang setiap kode ke teks artikel dan pemeriksaan silang angka antarbagian naskah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Korpus akhir terdiri atas 15 artikel jurnal empiris. Karakteristiknya (RQ1) disajikan pada Tabel 3 dan ringkasan setiap studi pada Tabel 4. Distribusi tahun relatif merata, dengan jumlah terbanyak pada 2024 (4 studi; 26,7%). Studi pada jenjang SMP (9 studi; 60,0%) lebih banyak daripada SMA/MA (6 studi; 40,0%). Berdasarkan bidang, kelompok terbesar adalah IPA

terpadu SMP (8 studi; 53,3%), diikuti fisika (5; 33,3%), sedangkan kimia [25] dan biologi [6] masing-masing satu studi (6,7%). Seluruh studi dilaksanakan pada sekolah di Indonesia.

Tabel 3. Karakteristik 15 studi dalam korpus (RQ1)

Karakteristik	Kategori	n	%	Studi
Tahun terbit	2021	3	20,0%	[6], [26], [27]
	2022	2	13,3%	[7], [28]
	2023	3	20,0%	[25], [8], [29]
	2024	4	26,7%	[9], [30], [31], [32]
	2025	3	20,0%	[10], [11], [33]
Jenjang	SMP	9	60,0%	[26], [7], [28], [8], [29], [9], [30], [10], [11]
	SMA/MA	6	40,0%	[6], [27], [25], [31], [32], [33]
Bidang IPA*	IPA terpadu SMP	8	53,3%	[26], [7], [28], [8], [29], [30], [10], [11]
	Fisika	5	33,3%	[27], [9], [31], [32], [33]
	Kimia	1	6,7%	[25]
	Biologi	1	6,7%	[6]
Desain dan struktur bukti	Satu kelompok pretes–postes	9	60,0%	[27], [7], [28], [29], [9], [30], [31], [11], [33]
	Dengan kelompok pembanding teridentifikasi	4	26,7%	[6], [8], [32], [10]
	Pengembangan (R&D)	2	13,3%	[26], [25]
Bentuk laboratorium virtual	*Virtual laboratory* (umum)	9	60,0%	[6], [26], [27], [7], [28], [29], [9], [30], [10]
	Simulasi PhET	2	13,3%	[8], [31]
	Virtual laboratory dengan lembar kerja (E-LKPD/*worksheet*)	2	13,3%	[11], [33]
	Multimedia *virtual laboratory*	1	6,7%	[25]
	Virtual practicum	1	6,7%	[32]
Model pembelajaran yang menyertai	Inkuiri (*guided inquiry*, *inquiry-based*, *level of inquiry*)	5	33,3%	[26], [7], [11], [9], [27]
	Discovery/*guided discovery*	3	20,0%	[6], [8], [29]
	Pendekatan saintifik	1	6,7%	[30]
	ICARE	1	6,7%	[32]
	Tidak dinyatakan spesifik pada ekstraksi	5	33,3%	[28], [25], [31], [10], [33]
Negara/lokasi	Indonesia (sekolah di Indonesia)	15	100,0%	[6], [26], [27], [7], [28], [25], [8], [29], [9], [30], [31], [32], [10], [11], [33]

**Bidang dipetakan dari judul dan materi yang dilaporkan. Persentase dihitung dengan penyebut 15 studi; kategori dalam satu karakteristik saling lepas.*

Sebagian besar studi (9 dari 15; 60,0%) menggunakan satu kelompok pretes–postes: delapan studi pra-eksperimen [27], [7], [28], [29], [9], [30], [31], [11] dan satu studi berlabel kuasi-eksperimen yang ternyata berdesain satu kelompok tanpa kelompok kontrol [33]. Empat studi berlabel kuasi-eksperimen memiliki kelompok pembanding yang teridentifikasi eksplisit [6], [8], [32], [10], dan dua studi berupa pengembangan perangkat [26], [25]. Laboratorium virtual paling sering muncul sebagai "*virtual laboratory*" umum (9 studi; 60,0%), diikuti

simulasi PhET (2; 13,3%). Sebanyak 10 studi (66,7%) memadukannya dengan kerangka inkuiri, *discovery*, pendekatan saintifik, atau ICARE.

Tabel 4. Matriks analisis 15 studi yang memenuhi kriteria inklusi

No	Studi	Desain (label penulis dan struktur)	Jenjang; bidang	Laboratorium virtual; model	Hasil KPS yang dilaporkan	Jenis bukti
1	Khairuna *et al.* (2021) [6]	Kuasi-eksperimen; pretes–postes dengan kelompok kontrol (57 eksperimen, 56 kontrol; dua madrasah)	SMA; biologi (sistem ekskresi)	*Virtual laboratory*; *discovery learning*	Rerata N-Gain KPS 75,93 (eksperimen) dan 68,92 (kontrol); uji-t signifikan (t hitung 2,015 > t tabel 1,982; p = 0,046); korelasi KPS dengan hasil belajar r = 0,842	Dengan pembandi ng
2	Saputra *et al.* (2021) [26]	R&D (model Kemp); uji coba pretes–postes satu kelompok	SMP; IPA	*Virtual laboratory*; inkuiri terbimbing	Perangkat dinyatakan layak; uji coba (analisis deskriptif) menunjukkan perangkat efektif melatihkan KPS	Pengemba ngan + uji coba satu kelompok
3	Nosela *et al.* (2021) [27]	Pra-eksperimen	SMA; fisika (fluida statis)	*Virtual lab*; *level of inquiry*	N-Gain KPS 0,65 (sedang)	Satu kelompok
4	Arumningtyas *et al.* (2022) [7]	Pra-eksperimen	SMP; IPA	*Virtual laboratory*; inkuiri terbimbing	N-Gain KPS 0,80 (tinggi)	Satu kelompok
5	Hermana *et al.* (2022) [28]	Pra-eksperimen	SMP; IPA	*Virtual laboratory*	Skor KPS 70 menjadi 83; N-Gain 0,47 (sedang)	Satu kelompok
6	Selviana *et al.* (2023) [25]	R&D	SMA; kimia (laju reaksi)	Multimedia *virtual laboratory*	Sangat valid dan praktis; peningkatan KPS dengan N-Gain 0,93 (tinggi)	Pengemba ngan (R&D)
7	Azhar *et al.* (2023) [8]	Kuasi-eksperimen	SMP; IPA	PhET; *guided discovery*	Rerata KPS 76,76 (perlakuan) dan 57,23 (kontrol); perbedaan signifikan	Dengan pembandi ng
8	Seftriana *et al.* (2023) [29]	Pra-eksperimen	SMP; IPA	*Virtual laboratory*; *guided discovery*	71% siswa berada pada kategori tinggi setelah pembelajaran	Satu kelompok
9	Rato *et al.* (2024) [9]	Pra-eksperimen	SMP; fisika (bidang miring)	*Virtual laboratory*; berbasis inkuiri	Peningkatan signifikan; N-Gain 0,73 (tinggi); ukuran efek 3,75 (kategori tinggi)	Satu kelompok
10	Pairi *et al.* (2024) [30]	Pra-eksperimen; satu kelompok pretes–postes pada dua kelas (VIII-A dan VIII-B), tanpa kelompok kontrol	SMP kelas VIII; IPA (tekanan zat)	*Virtual laboratory*; pendekatan saintifik	N-Gain 0,30 (VIII-A) dan 0,31 (VIII-B), kategori sedang; ukuran efek 1,68 dan 1,57 (kategori kuat)	Satu kelompok

No	Studi	Desain (label penulis dan struktur)	Jenjang; bidang	Laboratorium virtual; model	Hasil KPS yang dilaporkan	Jenis bukti
11	Prihatiningtyas *et al.* (2024) [31]	Pra-eksperimen	SMA/MA; fisika (gelombang mekanik)	PhET	Peningkatan pada perumusan masalah, hipotesis, identifikasi variabel, interpretasi data, dan kesimpulan	Satu kelompok
12	Nuraeni *et al.* (2024) [32]	Kuasi-eksperimen; *posttest-only control group* (35 siswa per kelompok)	SMA/MA; fisika (gelombang berjalan dan stasioner)	*Virtual practicum*; ICARE	Rerata *posttest* seluruh indikator 84,52 (eksperimen) dan 77,70 (kontrol); uji-t signifikan (t hitung 3,35 > t tabel 1,67)	Dengan pembanding
13	Purwati *et al.* (2025) [10]	Kuasi-eksperimen; pretes–postes dengan kelompok kontrol (VII-3 eksperimen, VII-4 kontrol)	SMP kelas VII; IPA (suhu dan kalor)	*Virtual laboratory*	Uji-t p < 0,05 (uji-t antarkelompok pada *posttest*, sig. 0,000; N-Gain 0,73 pada kelompok eksperimen dan 0,39 pada kontrol); respons siswa 94% dilaporkan terpisah dan bukan ukuran peningkatan KPS	Dengan pembanding
14	Jannah *et al.* (2025) [11]	Pra-eksperimen	SMP; IPA	*Virtual laboratory* dengan E-LKPD; *guided inquiry*	Perbedaan signifikan (uji-t sampel berpasangan) dengan efek besar (jenis ukuran efek: tidak dilaporkan pada artikel sumber, yang hanya menyatakan efek besar)	Satu kelompok
15	Syukriah *et al.* (2025) [33]	Satu kelompok pretes–postes (berlabel kuasi-eksperimen; tanpa kelompok kontrol); 35 siswa kelas XI SMAN 1 Langsa	SMA; fisika	*Worksheet* berbasis *virtual laboratory*	N-Gain: identifikasi variabel 0,92 (tinggi); merancang eksperimen 0,69; merumuskan masalah 0,56; hipotesis 0,53	Satu kelompok

Pelaporan hasil tidak seragam (N-Gain, skor akhir, persentase siswa, uji signifikansi). Jumlah peserta, durasi, dan instrumen tidak diringkas pada Tabel 4 karena pelaporannya berbeda antarstudi

.

Karena pelaporan hasil tidak seragam, angka antarstudi tidak diperingkat. Respons positif peserta didik dan kelayakan produk bukan bukti langsung peningkatan KPS: respons 94% pada [10] mencerminkan tanggapan siswa, dan status "layak" pada studi pengembangan [26] hanya menjawab kelayakan produk, sementara bukti KPS pada studi tersebut berasal dari uji coba pretes–postes satu kelompok yang dianalisis secara deskriptif. Nilai p < 0,05 tanpa ukuran efek juga belum menunjukkan besar atau pentingnya efek. Seluruh studi melaporkan hasil KPS yang searah positif.

Untuk RQ2, dua belas studi melaporkan indikator KPS pada tingkat indikator, sedangkan tiga studi lainnya hanya melaporkan hasil agregat atau kelayakan perangkat tanpa hasil per indikator [26], [25], [30] (Tabel 5). Penyebut persentase pada Tabel 5 adalah 12 studi tersebut. Indikator dianggap paling sering dilaporkan bila muncul pada sedikitnya separuh studi (6 dari 12): merumuskan hipotesis (8 studi; 66,7%), menarik kesimpulan (7; 58,3%), dan

menginferensi/memprediksi (7; 58,3%), diikuti mengamati, menginterpretasi data, dan mengklasifikasi/menerapkan konsep (masing-masing 6; 50,0%). Mengidentifikasi variabel, merancang eksperimen, dan mengomunikasikan hasil muncul pada lima studi (41,7%); merumuskan masalah, melakukan eksperimen, dan mengukur/menggunakan alat dan bahan pada tiga studi (25,0%). Merancang dan melakukan eksperimen dipisahkan karena tidak semua studi menyatakan keduanya. Studi [10] hanya menyebut aspek yang diukur pada instrumennya tanpa merinci hasil per aspek.

Tabel 5. Pemetaan indikator KPS yang dilaporkan (RQ2; penyebut = 12 studi dengan hasil per indikator)

Indikator KPS	Studi yang melaporkan	n (dari 12)	%
Mengamati	[6], [27], [28], [8], [9], [32]	6	50,0%
Merumuskan masalah	[7], [31], [33]	3	25,0%
Merumuskan hipotesis	[6], [27], [7], [8], [29], [31], [11], [33]	8	66,7%
Mengidentifikasi variabel	[27], [7], [29], [31], [33]	5	41,7%
Merancang eksperimen	[27], [8], [29], [10], [33]	5	41,7%
Melakukan eksperimen/menguji hipotesis	[6], [7], [29]	3	25,0%
Menginterpretasi data	[7], [8], [29], [31], [10], [11]	6	50,0%
Menarik kesimpulan	[6], [7], [28], [9], [31], [32], [11]	7	58,3%
Menginferensi/memprediksi	[27], [28], [8], [9], [32], [10], [11]	7	58,3%
Mengklasifikasi/menerapkan konsep	[6], [28], [8], [9], [32], [10]	6	50,0%
Mengomunikasikan hasil	[28], [8], [9], [32], [10]	5	41,7%
Mengukur/menggunakan alat dan bahan	[28], [8], [32]	3	25,0%

Tabel mencatat indikator yang dilaporkan oleh studi dan tidak membedakan besar peningkatan maupun apakah suatu indikator hanya disebut, diukur, atau menunjukkan peningkatan.

Untuk RQ3, faktor pedagogis yang dapat ditelusuri dari desain studi disajikan pada Tabel 6. Sepuluh studi memadukan laboratorium virtual dengan kerangka inkuiri, *discovery*, pendekatan saintifik, atau ICARE, dan tiga studi menyertakan lembar kerja terstruktur [26], [11], [33]. Kedua faktor ini merupakan konfigurasi intervensi yang dilaporkan penulis studi dan tidak diuji secara komparatif.

Tabel 6. Faktor pendukung dan kendala beserta studi sumber dan status buktinya (RQ3)

Jenis	Faktor atau kendala	Studi sumber	Status bukti
Faktor pendukung	Laboratorium virtual dipadukan dengan kerangka inkuiri, *discovery*, pendekatan saintifik, atau ICARE	[26], [7], [11], [9], [27], [6], [8], [29], [30], [32] (10 studi)	Dilaporkan penulis (konfigurasi intervensi); tidak diuji komparatif
Faktor pendukung	Lembar kerja terstruktur (LKPD, E-LKPD, *worksheet*) yang menyertai laboratorium virtual	[26], [11], [33] (3 studi)	Dilaporkan penulis (konfigurasi intervensi); tidak diuji terpisah
Kendala	Ketersediaan perangkat dan konektivitas	[7] (konektivitas internet)	Dilaporkan penulis (saran penggunaan: koneksi internet harus lancar); tidak diuji
Kendala	Keterbatasan pengalaman manipulatif	[10] (1 studi)	Dilaporkan penulis (keterbatasan *hands-on* dan keterampilan merangkai alat); tidak diuji

Jenis	Faktor atau kendala	Studi sumber	Status bukti
Kendala	Ketidakterbiasaan peserta didik dengan tahapan inkuiri, media simulasi, atau metode pembelajaran, termasuk kesulitan menafsirkan grafik pada simulasi	[26], [33], [32] (3 studi)	Dilaporkan penulis (catatan selama uji coba atau pelaksanaan); tidak diuji

Status bukti: diuji = dibandingkan secara langsung dalam studi; dilaporkan penulis = pernyataan penulis studi tanpa pengujian; penafsiran = simpulan kajian ini.

Pembahasan

Ditinjau dari karakteristik studi dan kekuatan bukti, korpus didominasi studi pada jenjang SMP dan studi IPA terpadu, dan lebih dari separuh studi (9 dari 15) menggunakan satu kelompok pretes–postes (Tabel 3). Desain ini tidak dapat memisahkan efek laboratorium virtual dari pengulangan tes, lamanya waktu belajar, dan model pembelajaran yang menyertainya. Empat studi dengan pembanding yang teridentifikasi eksplisit melaporkan hasil lebih tinggi pada kelompok perlakuan: rerata N-Gain KPS 75,93 dibanding 68,92 pada [6], rerata KPS 76,76 dibanding 57,23 pada [8], N-Gain 0,73 dibanding 0,39 pada [10], dan rerata *posttest* 84,52 dibanding 77,70 pada [32]. Dua di antaranya ([8] dan [32]) hanya memiliki *posttest* sehingga kesetaraan kemampuan awal tidak dapat diperiksa, dan empat studi dengan materi dan ukuran hasil yang berbeda tidak cukup untuk menarik simpulan umum. Studi dalam korpus karena itu lebih tepat dibaca sebagai bukti bahwa KPS berkembang pada kondisi pembelajaran yang menggunakan laboratorium virtual, bukan bukti kausal bahwa laboratorium virtual yang menyebabkan perkembangan tersebut. Seluruh studi melaporkan hasil searah positif; hal ini dapat mencerminkan efek nyata, tetapi juga bias publikasi atau bias pelaporan yang tidak dapat dinilai pada kajian ini.

Dari sisi pedagogis, sepuluh dari 15 studi memadukan laboratorium virtual dengan kerangka inkuiri atau *discovery*, dan tidak ada ringkasan studi yang membandingkan laboratorium virtual dengan dan tanpa kerangka tersebut. Akibatnya, peran kerangka pedagogis tidak dapat dipisahkan dari peran laboratorium virtual. Sebagai penafsiran kajian ini, bukan temuan korpus, pola tersebut sejalan dengan pembelajaran konstruktivistik dan *experiential learning*, karena peserta didik memperoleh pengalaman eksploratif, merefleksikan hasil, dan menguji kembali gagasan melalui simulasi [34]. Representasi visual yang interaktif juga sejalan dengan prinsip pembelajaran multimedia yang memadukan informasi verbal dan visual [35].

Berdasarkan pemetaan indikator KPS, hipotesis, penarikan kesimpulan, dan inferensi atau prediksi paling sering dilaporkan, diikuti observasi, interpretasi data, dan klasifikasi atau penerapan konsep (Tabel 5). Misalnya, [7] melaporkan perumusan masalah, hipotesis, identifikasi variabel, pengujian hipotesis, interpretasi data, dan kesimpulan; [27] melaporkan observasi, inferensi, prediksi, identifikasi variabel, hipotesis, dan perancangan percobaan; [31] melaporkan perumusan masalah, hipotesis, identifikasi variabel, interpretasi data, dan kesimpulan; dan [33] mengukur empat indikator dengan N-Gain identifikasi variabel 0,92, merancang eksperimen 0,69, merumuskan masalah 0,56, dan hipotesis 0,53. Perbedaan N-Gain dalam satu studi tersebut menunjukkan bahwa indikator tidak berkembang setara, tetapi perbandingan antarstudi tidak dibenarkan karena sampel, materi, instrumen, dan desain berbeda. Frekuensi pelaporan tidak berarti suatu indikator paling berkembang, dan indikator

yang tidak dilaporkan tidak berarti tidak berkembang. Studi [28] dan [32] melaporkan keterampilan proses dasar seperti mengamati, mengklasifikasi, mengukur, dan mengomunikasikan, sedangkan [7], [27], [31], dan [33] lebih banyak melaporkan keterampilan terintegrasi seperti hipotesis dan identifikasi variabel. Sebagai penafsiran, frekuensi pelaporan tampak dipengaruhi oleh kerangka KPS dan instrumen yang dipakai tiap studi, dan dugaan ini perlu diuji pada studi yang mengukur seluruh indikator secara seragam.

Dalam konteks faktor pendukung dan kendala implementasi, faktor pedagogis pada Tabel 6 merupakan konfigurasi intervensi, bukan faktor yang diuji. Kendala implementasi yang dapat ditelusuri dari korpus sangat terbatas: kelancaran koneksi internet disebut sebagai prasyarat penggunaan laboratorium virtual [7], dan keterbatasan pengalaman *hands-on* serta keterampilan merangkai alat praktikum dilaporkan pada [10]; selain itu, kesulitan peserta didik dengan tahapan inkuiri atau media PhET dan ketidakterbiasaan dengan metode dilaporkan pada [26] dan [33], serta kesulitan menafsirkan grafik pada simulasi pada [32]; semuanya merupakan pernyataan penulis studi dan tidak diuji; kesiapan guru dan ketersediaan perangkat tidak ditemukan sebagai kendala yang dilaporkan pada studi inti. Studi biologi pembanding menunjukkan bahwa laboratorium virtual meningkatkan hasil belajar [36] dan lebih fleksibel daripada laboratorium konvensional [37]; keduanya bukan bagian dari 15 studi inti dan tidak dihitung sebagai temuan korpus. Dengan bukti yang tersedia, kajian ini tidak dapat menyimpulkan bahwa laboratorium virtual menggantikan praktikum fisik. Penempatannya sebagai pelengkap, misalnya untuk pra-praktikum, latihan prosedur, atau pengulangan eksperimen, merupakan rekomendasi berbasis sintesis yang terbatas, selaras dengan temuan *review* tingkat kedua bahwa laboratorium daring lebih positif bila terintegrasi dalam praktik tradisional [15]. Korpus ini tidak membandingkan kondisi virtual saja, fisik saja, dan gabungan, sehingga generalisasi kebijakan pembelajaran perlu dibatasi.

Kajian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Tidak dilakukan penilaian kualitas atau risiko bias formal; klasifikasi desain hanya ukuran kasar kekuatan inferensi. Selain itu, seleksi dan pengodean dilakukan oleh satu penelaah tanpa pemeriksaan independen, sehingga potensi bias seleksi dan bias interpretasi tidak dapat dikendalikan; keputusan inklusi, pengodean indikator, dan ekstraksi data tidak diverifikasi penelaah lain. Seluruh studi melaporkan hasil positif sehingga bias publikasi mungkin ada, dan literatur kelabu tidak ditelusuri. Pembatasan bahasa (Indonesia dan Inggris) dan keharusan teks lengkap dapat menyebabkan studi relevan terlewat serta menghasilkan korpus yang seluruhnya berasal dari konteks Indonesia, sehingga simpulan terbatas pada konteks tersebut. Dari sisi strategi pencarian, urutan hasil Google Scholar bersifat dinamis dan pencarian dibatasi pada 200 hasil teratas per *string*, sedangkan SINTA tidak mendukung operator Boolean, sehingga replikasi dapat menghasilkan daftar yang berbeda. Heterogenitas desain, materi, instrumen, dan ukuran hasil menghalangi perbandingan langsung dan penggabungan ukuran efek.

Berdasarkan temuan dan keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan perlu membandingkan kondisi virtual, fisik, dan gabungan dengan instrumen KPS yang sama dan tes retensi, menggunakan kelompok pembanding, melaporkan ukuran efek beserta interval kepercayaan, serta melaporkan kendala implementasi secara sistematis. Kajian berikutnya dapat menambahkan penilaian risiko bias formal dan, bila data memungkinkan, meta-analisis. Hanya satu studi dalam korpus yang berfokus pada biologi [6] dan satu pada kimia [25],

sehingga kajian ini tidak membuat rekomendasi khusus biologi atau kimia; efektivitas pada kedua bidang perlu diuji tersendiri.

KESIMPULAN

Lima belas artikel jurnal empiris 2021–2025 pada jenjang SMP dan SMA seluruhnya melaporkan hasil KPS yang searah positif pada pembelajaran yang melibatkan laboratorium virtual. Namun, sembilan studi menggunakan satu kelompok pretes–postes, dua studi berupa pengembangan perangkat, dan hanya empat studi yang pembandingnya teridentifikasi eksplisit, sehingga temuan ini lebih tepat dibaca sebagai bukti perkembangan KPS pada kondisi pembelajaran tersebut dan bukan bukti kausal. Pada dua belas studi yang melaporkan hasil per indikator, merumuskan hipotesis, menarik kesimpulan, dan menginferensi/memprediksi paling sering dilaporkan, diikuti mengamati, menginterpretasi data, dan mengklasifikasi/menerapkan konsep; frekuensi ini bukan ukuran besarnya perkembangan.

Laboratorium virtual pada studi-studi tersebut hampir selalu digunakan bersama kerangka inkuiri, *discovery*, atau lembar kerja terstruktur, sehingga kontribusinya tidak dapat dipisahkan dari pedagogi yang menyertainya. Sebagai rekomendasi berbasis sintesis yang terbatas, laboratorium virtual lebih tepat diposisikan sebagai pelengkap praktikum fisik, misalnya untuk pra-praktikum dan latihan prosedur, bukan sebagai pengganti. Penelitian berikutnya perlu membandingkan kondisi virtual, fisik, dan gabungan dengan instrumen KPS yang sama, kelompok pembanding, dan tes retensi.

INFORMASI PENULIS

Penulis Koresponden

Putri Nurjannah – Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung (Indonesia);
Email: nurjanahp296@gmail.com

Penulis

Putri Nurjannah – Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung (Indonesia);
Email: nurjanahp296@gmail.com
Akbar Handoko – Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung (Indonesia);
orcid.org/0009-0002-3817-0462
Email: akbarhandoko@radenintan.ac.id
Andri Jaya Kesuma – Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung (Indonesia);
Email: andrijayakesuma@radenintan.ac.id

KONFLIK KEPENTINGAN

"Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan."

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. P. Trianto, *Model Pembelajaran Terpadu: Konsep, Strategi, dan Implementasinya dalam Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan (KTSP)*. Jakarta: Bumi Aksara, 2024.

[2] I. W. Suja, *Keterampilan Proses Sains dan Instrumen*. Jakarta: PT RajaGrafindo Persada, 2023.

[3] OECD, *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. Paris: OECD Publishing, 2023.

[4] N. Rustaman et al., *Strategi Belajar Mengajar Biologi*. Malang: UM Press, 2005.

[5] R. Buhera and R. M. Muspa, "Analisis keterampilan proses sains siswa di SMP Muhammadiyah 1 Berbah," *Saqbe: Sains dan Pembelajarannya*, vol. 3, no. 1, Mar. 2026. https://ojs.unsulbar.ac.id/index.php/saqbe/article/view/6527

[6] K. Khairuna, H. Rahmatan, M. A. Sarong, S. Supriatno, and A. U. T. Pada, "Penerapan model *discovery learning* dengan pemanfaatan *virtual laboratory* untuk meningkatkan keterampilan proses sains dan hasil belajar peserta didik pada materi sistem ekskresi," *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, vol. 9, no. 2, pp. 280–292, 2021. https://doi.org/10.24815/jpsi.v9i2.18875

[7] N. Arumningtyas, M. Budiyanto, and A. R. Purnomo, "Penerapan *virtual laboratory* untuk meningkatkan keterampilan proses sains siswa di masa pandemi," *Pensa E-Jurnal: Pendidikan Sains*, vol. 10, no. 2, pp. 246–252, 2022. https://doi.org/10.26740/pensa.v10i2.45056

[8] A. Azhar, M. Irianti, and M. Rahmadhani, "The effectiveness of the virtual lab-assisted guided discovery learning model on students' science process skills," *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, vol. 9, no. 1, pp. 35–40, 2023. https://doi.org/10.21009/1.09104

[9] A. U. A. Rato, A. A. Herdiawan, I. Wilujeng, S. Nurohman, L. Rahmawati, and I. F. Natadiwijaya, "The effect of inquiry-based virtual laboratory on students' science process skills," *Jurnal Eduscience*, vol. 11, no. 3, pp. 658–671, 2024. https://doi.org/10.36987/jes.v11i3.6484

[10] P. Purwati, R. Darwis, and N. A. Natsir, "Efektivitas laboratorium virtual IPA dalam meningkatkan keterampilan proses sains peserta didik kelas VII pada materi suhu dan kalor," *Jurnal Pendidikan MIPA*, vol. 15, no. 1, pp. 322–330, 2025. https://doi.org/10.37630/jpm.v15i1.2574

[11] M. Jannah, Z. K. Prasetyo, and S. Y. Ungirwalu, "Using guided inquiry-based electronic science worksheets assisted by virtual laboratories on the science process skills of middle school students," *Jurnal Pendidikan Indonesia*, vol. 14, no. 1, pp. 1–10, 2025. https://doi.org/10.23887/jpiundiksha.v14i1.82740

[12] I. Ismail, A. Permanasari, and W. Setiawan, "STEM virtual lab: An alternative practical media to enhance student's scientific literacy," *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 239–246, 2016. https://doi.org/10.15294/jpii.v5i2.5492

[13] T. L. Hidayah, S. Supeno, and U. Nuha, "Pengaruh model inkuiri terbimbing menggunakan laboratorium virtual terhadap keterampilan argumentasi ilmiah siswa SMP," *EDUSAINTEK: Jurnal Pendidikan, Sains dan Teknologi*, vol. 9, no. 1, pp. 239–250, 2022. https://doi.org/10.47668/edusaintek.v9i1.425

[14] W. Aulia, V. Dian, and A. Resti, "Pengaruh penggunaan PhET Simulation Hukum Newton sebagai media pembelajaran IPA berbasis ICT," *Eduproxima: Jurnal Ilmiah Pendidikan IPA*, pp. 234–243, 2025. https://doi.org/10.29100/.v7i1.5707

[15] D. Fadda, C. Salis, and G. Vivanet, "About the efficacy of virtual and remote laboratories in STEM education in secondary school: A second-order systematic review," *Journal of Educational, Cultural and Psychological Studies*, no. 26, pp. 51–72, 2022. https://doi.org/10.7358/ecps-2022-026-fadd

[16] M. L. Santos and M. Prudente, "Effectiveness of virtual laboratories in science education," *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 150–156, 2022. https://doi.org/10.18178/ijiet.2022.12.2.1598
[17] I. K. W. B. Wijaya, I. G. W. Sudatha, I. K. Suartama, and M. H. Santosa, "Penggunaan laboratorium virtual dalam pembelajaran Ilmu Pengetahuan Alam (IPA): *Systematic literature review*," *Jurnal Studi Guru dan Pembelajaran*, vol. 8, no. 2, pp. 952–961, 2025. https://doi.org/10.30605/jsgp.8.2.2025.6330
[18] N. W. Lailiyah and H. R. Widarti, "Research trends of virtual laboratory in science learning to improve affective domain: A systematic literature review," *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, vol. 12, no. 4, pp. 915–934, 2024. https://doi.org/10.24815/jpsi.v12i4.40091
[19] D. A. Meronda, H. R. Widarti, and Yahmin, "Virtual laboratories in science education: A systematic review of effectiveness on conceptual understanding and learning outcomes," *Jurnal Pendidikan MIPA*, vol. 26, no. 3, pp. 2020–2042, 2025. https://doi.org/10.23960/jpmipa.v26i3.pp2020-2042
[20] S. M. Ojetunde, "A systematic review of effectiveness and factors affecting the usage of virtual science laboratories in high schools," *Journal of Education and Learning Technology (JELT)*, vol. 6, no. 8, pp. 696–713, 2025. https://doi.org/10.38159/jelt.2025691
[21] G. Gunawan, L. Herayanti, I. Imran, R. Rahmatullah, and F. Fathoroni, "Virtual laboratories in science learning: Challenges and opportunities," *Indonesian Journal of STEM Education*, vol. 5, no. 1, 2023. https://doi.org/10.67434/ijse.v5i1.1752
[22] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 134, pp. 178–189, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001
[23] M. L. Rethlefsen et al., "PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews," *Systematic Reviews*, vol. 10, Art. no. 39, 2021. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z
[24] B. Kitchenham and S. Charters, *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Keele, UK: Keele Univ. and Univ. of Durham, Technical Report EBSE-2007-01, 2007.
[25] E. Selviana, M. D. Devasyah, H. F. Sari, and D. Novita, "Development of virtual laboratory as multimedia innovation for interactive learning on reaction rate materials to improve students' science process skills," *Journal of Chemistry Education Research*, vol. 7, no. 2, pp. 237–242, 2023. https://doi.org/10.26740/jcer.v7n2.p237-242
[26] I. G. P. E. Saputra, Harnipa, and M. Akhfar, "Development of science learning device oriented guided inquiry with virtual laboratory to train science process skills of junior high school students in Kendari," *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 13–22, 2021. https://doi.org/10.21009/1.07102
[27] S. Nosela, P. Siahaan, and I. Suryana, "Pengaruh model pembelajaran *level of inquiry* dengan *virtual lab* terhadap keterampilan proses sains peserta didik SMA pada materi fluida statis," *Journal of Teaching and Learning Physics*, vol. 6, no. 2, pp. 100–109, 2021. https://doi.org/10.15575/jotalp.v6i2.11018
[28] A. H. D. Hermana, H. Subekti, and W. B. Sabtiawan, "Implementasi laboratorium virtual untuk meningkatkan motivasi belajar dan keterampilan proses sains siswa SMP dalam pembelajaran IPA," *Pensa E-Jurnal: Pendidikan Sains*, vol. 10, no. 2, pp. 233–239, 2022. https://doi.org/10.26740/pensa.v10i2.45012
[29] S. M. Seftriana, W. P. Hadi, A. Y. R. Wulandari, I. Rosidi, and M. Yasir, "Penerapan pembelajaran *guided discovery learning* dengan laboratorium virtual terhadap keterampilan proses sains siswa," *Media Penelitian Pendidikan: Jurnal Penelitian dalam Bidang Pendidikan dan Pengajaran*, vol. 17, no. 1, pp. 90–100, 2023.

https://doi.org/10.26877/mpp.v17i1.12717
[30] R. A. Pairi, M. Tawil, and Hasanuddin, "Implementasi pendekatan saintifik berbasis laboratorium virtual untuk meningkatkan keterampilan proses sains kelas VIII di SMPN 13 Makassar," *Celebes Science Education*, vol. 3, no. 3, 2024. https://doi.org/10.35580/cse.v3i3.53745
[31] S. Prihatiningtyas, H. E. Haryono, and I. A. Putra, "Digitization of learning through virtual laboratory in assessing students' science process skills on mechanical wave material," *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika*, vol. 12, no. 1, pp. 44–59, 2024. https://doi.org/10.33394/j-lkf.v12i1.11534
[32] N. Nuraeni, Aripin, and Y. S. Makiyah, "Effect of ICARE model assisted by virtual practicum on students' science process skills in traveling and stationary wave materials," *JPPS: Jurnal Penelitian Pendidikan Sains*, vol. 14, no. 1, pp. 39–50, 2024. https://doi.org/10.26740/jpps.v14n1.p39-50
[33] Syukriah, Evendi, Zainuddin, M. Syukri, and T. S. Subramaniam, "Virtual physics experiments: Transforming science process skills through digital integration," *Jurnal IPA & Pembelajaran IPA*, vol. 9, no. 3, pp. 708–720, 2025. https://doi.org/10.24815/jipi.v9i3.46854
[34] D. A. Kolb, *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.
[35] R. E. Mayer, "Designing multimedia instruction in anatomy: An evidence-based approach," *Clinical Anatomy*, vol. 33, no. 1, pp. 2–11, 2020. https://doi.org/10.1002/ca.23265
[36] R. Rana, Y. M. S. Y. Sani, and Y. D. Solo, "Efektivitas penggunaan laboratorium virtual dalam meningkatkan hasil belajar biologi peserta didik MAS Muhammadiyah Nangahure," *Jurnal Penelitian Inovatif*, vol. 3, no. 3, pp. 589–596, 2023. https://doi.org/10.54082/jupin.232
[37] F. M. Saleh, R. Riandi, and H. K. Surtikanti, "Laboratorium konvensional vs laboratorium virtual dalam efektivitas dan motivasi pembelajaran biologi: Studi literatur," *Jurnal Jeumpa*, vol. 11, no. 1, pp. 13–24, 2024. https://doi.org/10.33059/jj.v11i1.9143