

Smart Laboratory sebagai Ekosistem Pembelajaran STEM dalam Meningkatkan Kompetensi Sains dan Teknologi Peserta Didik

Kajian Literatur Sistematis

Yusrizal Hasja

Prodi Pendidikan IPA, FKIP, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, Indonesia

*Email Korespodensi: ijalhasja@gmail.com

Diterima: 20-08-2026 | Disetujui: 28-08-2026 | Diterbitkan: 01-09-2026

ABSTRACT

Background: The integration of digital technology into science laboratories has given rise to the concept of the Smart Laboratory, an Internet of Things (IoT)-based learning space that connects sensors, actuators, and cloud platforms to support real-time, data-driven experimentation. Within the framework of Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) education, the Smart Laboratory is increasingly positioned not merely as a facility but as part of a broader learning ecosystem that links curriculum, pedagogy, infrastructure, and stakeholders. Objectives: This study aims to synthesize empirical and conceptual evidence on how Smart Laboratory-based learning environments contribute to the development of students' science and technology competence, and to map the opportunities and challenges of their implementation, particularly within the Indonesian STEM education context. Methods: A systematic literature review was conducted following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 guideline. Relevant records were identified through structured searches using combinations of the keywords "smart laboratory", "IoT", "virtual laboratory", "remote laboratory", "STEM education", and "science competence" in international databases and reputable publishers, then screened based on relevance, recency (2014-2026), and methodological clarity. Results: The review indicates that IoT-based and virtual/remote laboratories are consistently associated with improved conceptual understanding, science process skills, and higher-order thinking, while simultaneously fostering technological competencies such as digital literacy, computational thinking, and data-driven reasoning. Implementation success is moderated by teacher digital competence and technology acceptance, infrastructure readiness, and data security and privacy safeguards. Conclusion: Smart Laboratory functions most effectively when designed as an integrated ecosystem-combining sensor-based infrastructure, project-based STEM pedagogy, and institutional support-rather than as an isolated tool, and its adoption in Indonesian schools requires deliberate teacher training, infrastructure investment, and policy alignment with the Kurikulum Merdeka.

Keywords: *Internet of Things; science competence; smart laboratory; STEM education ecosystem; systematic literature review*

ABSTRAK

Latar Belakang: Integrasi teknologi digital ke dalam laboratorium sains melahirkan konsep Smart Laboratory, yaitu ruang belajar berbasis Internet of Things (IoT) yang menghubungkan sensor, aktuator, dan platform cloud untuk mendukung eksperimen berbasis data secara real-time. Dalam kerangka pendidikan Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM), Smart Laboratory semakin diposisikan bukan sekadar fasilitas, melainkan bagian dari ekosistem pembelajaran yang lebih luas yang menghubungkan kurikulum, pedagogi, infrastruktur, dan pemangku kepentingan. Tujuan: Penelitian ini bertujuan mensintesis bukti empiris dan konseptual mengenai kontribusi lingkungan belajar berbasis Smart Laboratory terhadap penguatan kompetensi sains dan teknologi peserta didik, serta memetakan peluang dan tantangan implementasinya, khususnya dalam konteks pendidikan STEM di Indonesia. Metode: Kajian sistematis dilakukan mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020. Artikel relevan diidentifikasi melalui pencarian terstruktur menggunakan kombinasi kata kunci "smart laboratory", "IoT", "virtual laboratory", "remote laboratory", "STEM education", dan "science competence" pada basis data internasional dan penerbit bereputasi, kemudian diseleksi berdasarkan relevansi, kebaruan (2014-2026), dan kejelasan metodologis. Hasil: Kajian menunjukkan bahwa laboratorium berbasis IoT maupun virtual/remote secara konsisten berasosiasi dengan peningkatan pemahaman konsep, keterampilan proses sains, dan kemampuan berpikir tingkat tinggi, sekaligus menumbuhkan kompetensi teknologi seperti literasi digital, computational thinking, dan penalaran berbasis data. Keberhasilan implementasi dipengaruhi oleh kompetensi digital dan penerimaan teknologi guru, kesiapan infrastruktur, serta jaminan keamanan dan privasi data. Simpulan: Smart Laboratory berfungsi paling efektif ketika dirancang sebagai ekosistem terintegrasi—memadukan infrastruktur berbasis sensor, pedagogi STEM berbasis proyek, dan dukungan kelembagaan—bukan sekadar sebagai alat yang berdiri sendiri, dan penerapannya di sekolah Indonesia memerlukan pelatihan guru, investasi infrastruktur, serta keselarasan kebijakan dengan Kurikulum Merdeka.

Kata kunci: *Ekosistem pendidikan STEM; Internet of Things; kajian literatur sistematis; kompetensi sains; smart laboratory*

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Hasja, Y. (2026). Smart Laboratory sebagai Ekosistem Pembelajaran STEM dalam Meningkatkan Kompetensi Sains dan Teknologi Peserta Didik. *Kajian Literatur Sistematis*. Educational Journal, 2(1), 200-213. <https://doi.org/10.63822/z735tt40>

PENDAHULUAN

Konvergensi yang cepat antara teknologi digital dan pendidikan telah mengubah cara kerja laboratorium sains, bergeser dari ruang statis yang sepenuhnya dikendalikan guru menuju lingkungan dinamis berbasis sensor yang mampu mengumpulkan, mengirimkan, dan menganalisis data eksperimen secara real-time (Hwang, 2014; Ghashim & Arshad, 2023). Transformasi ini erat kaitannya dengan kemunculan Internet of Things (IoT), yaitu jaringan sensor, aktuator, dan perangkat komputasi yang saling terhubung sehingga memungkinkan peralatan laboratorium fisik berkomunikasi dengan platform digital tanpa memerlukan mediasi manusia secara terus-menerus (Kassab et al., 2020; Khan, 2024). Ketika diterapkan dalam konteks pendidikan, konfigurasi semacam ini umumnya disebut sebagai Smart Laboratory, yaitu ruang praktikum berteknologi tinggi yang proses pengukuran, pemantauan, dan umpan baliknya berlangsung secara otomatis, dapat diakses dari jarak jauh, dan berbasis data (Khriji et al., 2020; Asad et al., 2024). Kit sensor berbiaya rendah dan berbasis perangkat keras terbuka yang semula dikembangkan untuk pemantauan lingkungan berbasis citizen science menunjukkan bahwa infrastruktur penginderaan yang sama, yang mendukung pengumpulan data ilmiah di luar kelas, dapat dimanfaatkan kembali untuk pembelajaran laboratorium berbasis IoT yang otentik (Camprodon et al., 2019).

Sejalan dengan pergeseran teknologi ini, pendidikan Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) telah menjadi prioritas global untuk mencetak peserta didik yang tidak hanya melek sains, tetapi juga mampu menerapkan penalaran teknologi, keteknikan, dan kuantitatif untuk memecahkan masalah nyata (Kwon & Lee, 2025; Goyal et al., 2022). Asesmen internasional menegaskan urgensi agenda ini: capaian sains siswa berusia 15 tahun di Indonesia dalam PISA 2022 masih berada di bawah rata-rata OECD, dengan hanya sekitar sepertiga siswa yang mencapai setidaknya tingkat literasi sains dasar (OECD, 2023; Ayu et al., 2025), pola yang menurut bukti meta-analitik berkaitan dengan minimnya pembelajaran STEM yang bersifat hands-on dan diperkaya teknologi (Cao et al., 2025). Kerangka standar seperti Next Generation Science Standards di Amerika Serikat telah merespons hal ini dengan menempatkan desain keteknikan setara dengan inkuiri ilmiah dalam kurikulum sains K-12 (NGSS Lead States, 2013), sementara kerangka keterampilan abad ke-21 menekankan kreativitas, berpikir kritis, komunikasi, dan kolaborasi sebagai capaian inti yang seyogianya dikembangkan oleh setiap lingkungan belajar STEM (Trilling & Fadel, 2009; Thornhill-Miller et al., 2023). Pendidikan STEM kian dikonseptualisasikan bukan sebagai intervensi kelas tunggal, melainkan sebagai ekosistem pembelajaran, yaitu jejaring kurikulum, pedagogi, infrastruktur teknologi, guru, dan mitra di luar sekolah yang secara bersama-sama membentuk kesempatan belajar (Benita et al., 2021). Dalam pandangan ekosistemik ini, Smart Laboratory diposisikan sebagai simpul (node) yang krusial: ruang hibrida fisik-digital tempat peserta didik terlibat dalam inkuiri, desain, dan analisis data, sekaligus mengembangkan kompetensi digital dan komputasional yang dituntut oleh karier STEM abad ke-21 (Setyawarno et al., 2025), termasuk keterampilan pemecahan masalah, abstraksi, dan penalaran algoritmik yang menjadi inti dari computational thinking (Wing, 2006).

Bukti dari penelitian pendidikan sains menunjukkan bahwa laboratorium yang diperkaya teknologi, baik virtual, jarak jauh (remote), maupun berbasis IoT, dapat secara signifikan meningkatkan pemahaman konsep, keterampilan proses sains, dan kemampuan berpikir tingkat tinggi peserta didik. Studi meta-analisis melaporkan ukuran efek sedang hingga besar untuk penggunaan laboratorium virtual terhadap capaian belajar siswa pada mata pelajaran fisika, kimia, dan biologi (Santos & Prudente, 2022), sementara kajian sistematis terhadap smart laboratory berbasis IoT di pendidikan tinggi menyoroti peningkatan capaian akademik yang terukur berkat akses data real-time dan eksperimen jarak jauh (Asad et al., 2024). Kajian sistematis terhadap laboratorium kimia virtual juga menemukan bahwa simulasi yang dirancang dengan baik mampu mereplikasi fungsi instruksional utama laboratorium fisik sekaligus menghilangkan kendala terkait risiko bahaya dalam eksperimen (Chan et al., 2021), dan sistem keselamatan kimia berbasis realitas campuran (mixed reality) terbukti menghasilkan capaian belajar terkait keselamatan yang jauh lebih baik dibandingkan pembelajaran konvensional (Chen et al., 2024). Pada jenjang sekolah menengah, kegiatan laboratorium inkuiri terbimbing yang diperkaya alat digital dan alat yang diadaptasi secara lokal terbukti secara signifikan memperkuat keterampilan proses sains siswa, termasuk perumusan hipotesis, perancangan eksperimen, dan interpretasi data (Chengere et al., 2025), dan meta-analisis yang lebih luas terhadap mobile learning dalam pembelajaran sains sekolah melaporkan efek positif yang besar terhadap capaian belajar, khususnya untuk aktivitas berbasis inkuiri dan permainan (Dong et al., 2024). Temuan-temuan ini secara kolektif mengindikasikan bahwa nilai penting Smart Laboratory bukan sekadar kebaruan teknologi, melainkan kemampuannya membuat proses ilmiah menjadi lebih tampak, iteratif, dan digerakkan oleh peserta didik itu sendiri.

Selain kompetensi sains, lingkungan Smart Laboratory juga diyakini menumbuhkan kompetensi teknologi dengan cara yang tidak dapat dicapai oleh laboratorium konvensional. Bekerja dengan sensor berbasis IoT, dasbor data, dan protokol komunikasi seperti MQTT menuntut peserta didik untuk mempraktikkan literasi data, pemecahan masalah teknis, dan computational thinking sebagai bagian integral dari tugas eksperimen, bukan sebagai pelajaran teknologi yang terpisah (Setyawarno et al., 2025). Hal ini sejalan dengan kerangka Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK), yang memandang integrasi teknologi yang efektif sebagai irisan antara pengetahuan konten, pedagogi, dan teknologi (Mishra & Koehler, 2006), serta dengan bukti bahwa kompetensi digital guru dan persepsi kebermanfaatan teknologi merupakan prediktor kuat keberhasilan adopsi teknologi di kelas (Scherer et al., 2019; Davis, 1989).

Meskipun menjanjikan, implementasi smart laboratory berbasis IoT menghadapi tantangan yang terus berulang. Kajian sistematis tentang IoT dalam pendidikan secara konsisten mengidentifikasi biaya infrastruktur, keandalan jaringan, keamanan dan privasi data, serta keterbatasan kesiapan guru sebagai hambatan utama adopsi (Kassab et al., 2020; Ghashim & Arshad, 2023; Hasan, 2025). Di banyak konteks negara berkembang, termasuk Indonesia, hambatan-hambatan ini diperparah oleh ketimpangan akses terhadap fasilitas laboratorium,

komputer, dan konektivitas internet yang stabil, khususnya di luar kota-kota besar. Pada saat yang sama, Kurikulum Merdeka di Indonesia telah membuka fleksibilitas struktural bagi pembelajaran berbasis proyek dan lintas disiplin ilmu, sehingga menciptakan peluang kebijakan bagi integrasi infrastruktur smart laboratory ke dalam pembelajaran sains berbasis sekolah secara terencana.

Meskipun sejumlah besar literatur telah mengkaji laboratorium virtual, laboratorium jarak jauh, dan aplikasi IoT dalam pendidikan secara terpisah, relatif sedikit penelitian yang mensintesis bagaimana ketiga arus ini berkonvergensi menjadi model ekosistem Smart Laboratory yang koheren, yang secara khusus berorientasi pada capaian ganda berupa kompetensi sains dan teknologi dalam pendidikan STEM. Sebagian besar kajian yang ada berfokus secara sempit pada konteks keteknikan pendidikan tinggi (Asad et al., 2024; Kassab et al., 2020) atau pada infrastruktur smart education secara umum tanpa lensa pedagogis khusus terhadap pengembangan kompetensi sains (Zhu et al., 2016; Ghashim & Arshad, 2023). Kesenjangan ini melandasi kajian literatur sistematis ini, yang bertujuan untuk (1) mensintesis bagaimana lingkungan belajar berbasis Smart Laboratory dikonseptualisasikan dan distrukturkan sebagai bagian dari ekosistem pembelajaran STEM; (2) mengkaji bukti empiris yang menghubungkan implementasi Smart Laboratory dengan peningkatan kompetensi sains dan teknologi peserta didik; dan (3) mengidentifikasi peluang, tantangan, dan prasyarat implementasi Smart Laboratory dalam konteks pendidikan STEM di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan desain kajian literatur sistematis, mengikuti struktur pelaporan yang direkomendasikan oleh pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 (Page et al., 2021). Pendekatan sistematis dipilih karena mampu menghasilkan sintesis bukti yang transparan, dapat direplikasi, dan meminimalkan bias dari studi-studi dengan metodologi yang beragam terkait smart laboratory, pembelajaran berbasis IoT, dan kompetensi STEM, yang tidak dapat diperoleh secara memadai hanya dari satu studi primer.

Strategi Pencarian

Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci berikut: "smart laboratory", "IoT-based laboratory", "virtual laboratory", "remote laboratory", "STEM education ecosystem", "science process skills", dan "technology competence", yang dihubungkan dengan operator Boolean (AND/OR). Pencarian menyasar artikel jurnal terindeks (peer-reviewed), prosiding konferensi, dan kajian sistematis yang terindeks pada sumber internasional bereputasi (misalnya penerbit jurnal terindeks Scopus dan Web of Science, PubMed Central, dan penerbit akademik utama lainnya), dilengkapi dengan dokumen kebijakan dan kurikulum yang relevan dengan pendidikan STEM di Indonesia. Pencarian dibatasi pada publikasi tahun 2014 hingga 2026 untuk menangkap periode ketika teknologi IoT sudah cukup matang untuk diterapkan dalam

pendidikan, mengikuti konseptualisasi fondasional Hwang (2014) tentang lingkungan belajar cerdas (smart learning environment).

Kriteria Kelayakan

Artikel dimasukkan ke dalam kajian apabila (a) diterbitkan dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia pada jurnal terindeks, bab buku, atau prosiding konferensi bereputasi; (b) membahas laboratorium cerdas, virtual, jarak jauh, atau berbasis IoT, ataupun ekosistem pembelajaran STEM, dalam konteks pendidikan K-12 atau pendidikan tinggi bidang sains/STEM; dan (c) melaporkan temuan empiris, kerangka konseptual, atau sintesis sistematis/meta-analitik yang relevan dengan kompetensi sains atau teknologi. Artikel dikeluarkan dari kajian apabila berupa opini yang tidak didasarkan pada kajian teoretis atau empiris yang jelas, berfokus secara eksklusif pada aplikasi IoT non-pendidikan (misalnya IoT industri atau kesehatan tanpa komponen pendidikan), atau tidak dapat diakses dalam bentuk teks lengkap.

Seleksi dan Sintesis

Artikel yang teridentifikasi diseleksi melalui dua tahap: seleksi awal berdasarkan judul dan abstrak untuk menyingkirkan artikel yang jelas tidak relevan atau duplikat, dilanjutkan dengan penilaian teks lengkap terhadap kriteria kelayakan di atas. Studi yang memenuhi kriteria kemudian disintesis secara tematik menggunakan pendekatan naratif berbasis kerangka kerja, di mana temuan dikelompokkan berdasarkan tiga tema analitis yang diturunkan secara deduktif dari pertanyaan penelitian: (1) konseptualisasi Smart Laboratory sebagai bagian dari ekosistem pembelajaran STEM, (2) bukti empiris tentang capaian kompetensi sains dan teknologi, serta (3) tantangan implementasi dan kondisi pemungkin (enabling conditions). Pendekatan sintesis naratif ini sesuai mengingat heterogenitas desain studi (eksperimen, kuasi-eksperimen, konseptual, dan studi kajian pustaka) yang tercakup dalam korpus penelitian, sehingga tidak memungkinkan dilakukannya meta-analisis statistik formal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Smart Laboratory sebagai Simpul dalam Ekosistem Pembelajaran STEM

Literatur yang dikaji secara konsisten menunjukkan bahwa Smart Laboratory paling tepat dikonseptualisasikan bukan sebagai satu perangkat tunggal, melainkan sebagai lingkungan belajar yang context-aware dan adaptif. Hwang (2014) mendefinisikan lingkungan belajar cerdas sebagai lingkungan yang context-aware, mampu mengenali situasi peserta didik secara real-time, dan mampu memberikan dukungan yang adaptif, kriteria yang kemudian disempurnakan oleh Zhu et al. (2016) menjadi sepuluh properti, termasuk kesadaran lokasi (location-awareness), interoperabilitas, konektivitas yang mulus (seamless), dan keterlibatan yang tinggi. Diterapkan pada laboratorium sains, properti-properti ini termanifestasi dalam bentuk sensor jaringan yang secara terus-menerus menangkap variabel eksperimen (suhu, pH, intensitas cahaya, gerakan, dan sebagainya), dasbor berbasis cloud yang memvisualisasikan data secara real-time, serta protokol

komunikasi seperti MQTT yang memungkinkan pertukaran data yang ringan dan berlatensi rendah antara perangkat dan platform pembelajaran (Khriji et al., 2020; Setyawarno et al., 2025).

Benita et al. (2021) memperluas definisi teknis ini menjadi model ekosistemik dengan mengajukan ekosistem "Data-driven Thinking" berbasis IoT yang menghubungkan infrastruktur sensor, desain kurikulum, dan kemitraan multi-pemangku kepentingan—termasuk sekolah, universitas, dan pemerintah—untuk menskalakan pembelajaran STEM berbasis pengalaman ke populasi peserta didik yang besar. Perspektif ekosistem ini penting karena memposisikan ulang Smart Laboratory dari sekadar peningkatan fasilitas yang berdiri sendiri menjadi struktur integratif yang secara bersamaan menuntut desain ulang pedagogi (misalnya tugas berbasis inkuiri dan proyek), investasi infrastruktur (konektivitas, sensor, dan komputasi), serta dukungan kelembagaan (pelatihan guru, kebijakan, dan pendanaan). Kajian Ghashim dan Arshad (2023) terhadap pembelajaran dan pengajaran berbasis IoT mengonfirmasi hal ini, menunjukkan bahwa implementasi IoT yang berhasil di sekolah biasanya mencakup berbagai lapisan fungsional, mulai dari pemantauan kelas cerdas hingga lingkungan laboratorium khusus yang mendukung IoT, dan bukan sekadar perangkat gawai yang berdiri sendiri.

Kontribusi terhadap Kompetensi Sains

Bukti empiris menunjukkan bahwa lingkungan laboratorium yang diperkaya teknologi digital dan IoT berasosiasi dengan peningkatan kompetensi sains yang terukur. Dalam konteks pendidikan tinggi bidang keteknikan, Asad et al. (2024) mensintesis berbagai studi internasional menggunakan pedoman PRISMA dan menyimpulkan bahwa smart laboratory berbasis IoT meningkatkan capaian akademik peserta didik dengan memungkinkan akses data yang berkelanjutan dan real-time, sehingga mendukung pengujian hipotesis yang iteratif dan bukan sekadar eksperimen satu kali percobaan. Pada tingkat keterampilan proses sains secara spesifik, Chengere et al. (2025) menunjukkan melalui studi kuasi-eksperimen bahwa pembelajaran laboratorium inkuiri terbimbing—ketika diperkaya dengan alat digital dan alat yang diadaptasi secara lokal—menghasilkan peningkatan yang signifikan secara statistik baik pada keterampilan proses sains dasar maupun terintegrasi, dibandingkan dengan pembelajaran laboratorium konvensional yang bersifat hafalan, tanpa adanya disparitas hasil belajar berdasarkan gender.

Bukti pelengkap dari laboratorium virtual dan jarak jauh memperkuat pola ini. Meta-analisis Santos dan Prudente (2022) terhadap studi-studi laboratorium virtual melaporkan ukuran efek sedang secara keseluruhan terhadap capaian belajar siswa, dengan efek terkuat teramati pada mata pelajaran fisika dan kimia, yaitu bidang studi dengan fenomena abstrak atau berbahaya yang sulit diamati secara langsung dalam laboratorium fisik. Kajian sistematis terhadap laboratorium kimia virtual juga menegaskan bahwa simulasi yang dirancang dengan baik dapat mereplikasi fungsi instruksional inti laboratorium fisik tanpa risiko keselamatan yang menyertainya (Chan et al., 2021), dan sistem pembelajaran keselamatan kimia berbasis realitas campuran terbukti menghasilkan capaian belajar terkait keselamatan yang secara signifikan lebih baik dibandingkan

pembelajaran di laboratorium fisik konvensional (Chen et al., 2024). Secara keseluruhan, temuan-temuan ini menunjukkan bahwa mekanisme yang membuat Smart Laboratory memperkuat kompetensi sains bukanlah sekadar peningkatan paparan terhadap teknologi, melainkan cara IoT dan instrumentasi virtual membuat data eksperimen menjadi lebih segera, dapat diulang, dan mudah diinterpretasikan secara visual, sehingga mendukung siklus iteratif prediksi, observasi, dan revisi yang menjadi inti dari inkuiri ilmiah.

Kontribusi terhadap Kompetensi Teknologi

Rangkaian bukti kedua yang sama pentingnya berkaitan dengan kompetensi teknologi. Setyawarno et al. (2025), dalam studi yang melibatkan calon guru sains di Indonesia, menemukan bahwa penerapan pembelajaran kontekstual STEM berbasis IoT dengan protokol MQTT menghasilkan pengaruh positif yang signifikan terhadap keterampilan literasi digital peserta, dengan menempatkan mereka pada kategori "performa tinggi" dan "di atas rata-rata" di dua universitas. Temuan ini sangat relevan dengan konteks Indonesia, karena menunjukkan bahwa praktik laboratorium berbasis IoT dapat sekaligus berfungsi sebagai pembelajaran sains dan sebagai pelatihan literasi digital yang otentik, tanpa memerlukan mata kuliah teknologi yang terpisah. Bukti pelengkap dari pendidikan STEM berbasis robotika menunjukkan pola kompetensi ganda yang serupa, di mana integrasi teknologi secara hands-on membangun pengetahuan disipliner sekaligus keterampilan digital dan desain yang dapat ditransfer (Darmawansah et al., 2023), dan kajian sistematis terhadap kompetensi digital calon guru mengonfirmasi bahwa pengalaman belajar yang terstruktur dan kaya teknologi selama masa pendidikan guru berasosiasi kuat dengan capaian kompetensi digital yang lebih baik (Zhang et al., 2026).

Capaian kompetensi ganda ini sejalan dengan kerangka TPACK, yang mengonseptualisasikan pengajaran yang terintegrasi teknologi secara efektif sebagai keterjalinan antara pengetahuan teknologi, pedagogi, dan konten, dan bukan memperlakukan teknologi sekadar sebagai tambahan (Mishra & Koehler, 2006). Namun demikian, mewujudkan integrasi ini dalam praktik sangat bergantung pada penerimaan teknologi oleh guru itu sendiri. Scherer et al. (2019), dalam model persamaan struktural meta-analitik yang mencakup berbagai negara, menunjukkan bahwa persepsi kebermanfaatan dan persepsi kemudahan penggunaan—konstruk inti dari Technology Acceptance Model milik Davis (1989)—tetap menjadi prediktor kuat niat guru untuk mengadopsi alat digital di kelas. Konsekuensinya, inisiatif Smart Laboratory yang mengabaikan kepercayaan diri guru dan persepsi nilai instruksionalnya berisiko menghadapi keterbatasan adopsi di kelas, betapapun canggihnya infrastruktur IoT yang mendasarinya.

Integrasi Pedagogis melalui STEM Project-Based Learning

Literatur yang dikaji juga menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis proyek (project-based learning/PjBL) merupakan kendaraan pedagogis yang paling efektif dalam menerjemahkan infrastruktur Smart Laboratory menjadi peningkatan kompetensi. Bukti meta-analitik

menunjukkan bahwa STEM project-based learning menghasilkan pengaruh positif yang substansial terhadap kreativitas peserta didik (Kwon & Lee, 2025) dan bahwa asesmen berbasis proyek, ketika dipetakan secara sistematis terhadap capaian pembelajaran mata kuliah dan program studi, secara bermakna memperkuat berpikir kritis, pengambilan keputusan secara kolaboratif, dan keterampilan komunikasi (Goyal et al., 2022). Elemen gamifikasi yang dirancang dengan baik dan dilekatkan pada proyek semacam itu—poin, umpan balik, dan struktur tantangan—semakin memperkuat motivasi dan keterlibatan tanpa menggeser fokus tugas inkuiri yang mendasarinya (Li et al., 2023), dan aktivitas STEM berbasis maker yang bersifat hands-on terbukti mengembangkan disposisi serupa terhadap kreativitas dan rasa kepemilikan terhadap masalah yang dihadapi (George-Reyes et al., 2025). Ketika ditempatkan dalam Smart Laboratory, tugas-tugas berbasis proyek—seperti merancang perangkat pemantauan lingkungan berbasis IoT atau membangun eksperimen berbasis sensor untuk menguji hipotesis ilmiah—memberikan peserta didik masalah otentik yang kaya data untuk diselidiki, selaras dengan penekanan ekosistem pembelajaran STEM pada penerapan lintas disiplin dan dunia nyata (Benita et al., 2021), sekaligus menggemakan pandangan Vygotsky (1978) bahwa pembelajaran paling efektif ketika discaffolding melalui aktivitas terbimbing yang berlangsung secara sosial dalam zona perkembangan proksimal peserta didik.

Tantangan Implementasi dan Kondisi Pemungkin

Meskipun bukti capaian belajar positif cukup konsisten, studi-studi yang dikaji sepakat mengenai beberapa hambatan implementasi yang berulang. Kassab et al. (2020), dalam kajian literatur sistematis tentang IoT dalam pendidikan, mengidentifikasi biaya infrastruktur, integrasi dengan sistem sekolah yang sudah ada (legacy), serta keterbatasan keahlian guru dan staf teknis sebagai hambatan utama keberlanjutan adopsi IoT. Ghashim dan Arshad (2023) juga melaporkan bahwa perlindungan keamanan dan privasi data merupakan salah satu perhatian paling mendesak dalam pembelajaran dan pengajaran berbasis IoT, mengingat jaringan sensor dan perangkat yang terhubung secara terus-menerus menghasilkan dan mengirimkan data pada level siswa dan kelas yang harus dilindungi dari akses yang tidak sah. Kajian sistematis Hasan (2025) terhadap smart education berbasis IoT juga mencatat bahwa jumlah studi yang dievaluasi secara ketat dalam bidang ini masih relatif sedikit dibandingkan dengan laju perkembangan teknologi, sehingga membatasi kekuatan klaim kausal yang saat ini dapat dibuat tentang dampak IoT terhadap pendidikan. Kajian terhadap aplikasi kecerdasan buatan (AI) dalam pendidikan STEM menunjukkan pola yang serupa: bukti awal yang menjanjikan berdampingan dengan infrastruktur yang terfragmentasi, kesiapan guru yang terbatas, dan perhatian terhadap perlindungan privasi yang belum merata (Xu & Ouyang, 2022; Tsakeni et al., 2025), yang menegaskan bahwa lapisan manusia dan kelembagaan dalam ekosistem Smart Laboratory, dan bukan teknologi penginderaan itu sendiri, biasanya menjadi kendala utama.

Bukti yang berfokus pada guru menunjukkan kondisi pemungkin (enabling condition) yang relevan: pengembangan profesional yang berkelanjutan secara terukur meningkatkan efikasi diri guru STEM yang sedang bertugas (Liu et al., 2025), dan pelatihan STEM berorientasi digitalisasi yang diselenggarakan bekerja sama dengan laboratorium siswa di luar sekolah terbukti memperkuat pengetahuan profesional, efikasi diri, dan komitmen teknologi guru secara bersamaan (Reher et al., 2025), sejalan dengan pandangan Bandura (1997) bahwa pengalaman keberhasilan (mastery experience) merupakan sumber keyakinan efikasi diri yang paling kuat. Dasbor learning analytics berbasis cloud menawarkan mekanisme pemungkin lainnya, yang memungkinkan pengajar memantau progres siswa berdasarkan data yang dihasilkan sensor secara terdistribusi tanpa memerlukan infrastruktur komputasi lokal (on-premises) (Naranjo et al., 2019), dan Kerangka Kompetensi TIK untuk Guru dari UNESCO menyediakan struktur siap pakai untuk menyusun urutan kompetensi digital semacam itu pada tahap pendidikan pra-jabatan maupun dalam-jabatan (UNESCO, 2018).

Dalam konteks Indonesia secara khusus, tantangan global tersebut berpotongan dengan ketimpangan struktural dalam fasilitas laboratorium, akses komputer, dan konektivitas internet, khususnya di sekolah-sekolah di luar kota besar, disertai variasi kesiapan guru dalam mengintegrasikan pendekatan STEM lintas disiplin ke dalam pembelajaran berbasis mata pelajaran—ketimpangan yang tampak dari capaian sains PISA Indonesia yang masih di bawah rata-rata OECD (OECD, 2023; Ayu et al., 2025). Pada saat yang sama, penekanan Kurikulum Merdeka pada pembelajaran berbasis proyek dan Proyek Penguatan Profil Pelajar Pancasila (P5) memberikan peluang struktural untuk menyematkan kegiatan Smart Laboratory ke dalam fleksibilitas kurikulum yang sudah ada, tanpa memerlukan jalur kurikulum yang sepenuhnya baru (Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia, 2022).

Mewujudkan peluang ini memerlukan investasi terkoordinasi pada tiga tingkatan yang teridentifikasi di sepanjang literatur yang dikaji: (1) infrastruktur—konektivitas yang andal, kit sensor yang terjangkau, dan platform cloud atau server lokal; (2) pedagogi—pengembangan profesional guru yang berkelanjutan dan berlandaskan TPACK serta desain STEM berbasis proyek; dan (3) kebijakan—dukungan kelembagaan yang memperlakukan pengembangan Smart Laboratory sebagai bagian dari ekosistem pembelajaran STEM sekolah secara menyeluruh, bukan sekadar pengadaan peralatan yang bersifat satu kali.

Menuju Sintesis Konseptual

Mensintesis tema-tema di atas, bukti yang dikaji mendukung model konseptual berlapis tentang Smart Laboratory sebagai ekosistem pembelajaran STEM. Pada inti teknisnya terdapat infrastruktur penginderaan dan konektivitas berbasis IoT (Khrijj et al., 2020; Setyawarno et al., 2025). Infrastruktur ini diaktifkan secara pedagogis melalui tugas STEM berbasis inkuiri dan proyek yang memberi peserta didik alasan otentik untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menindaklanjuti data secara real-time (Kwon & Lee, 2025; Chengere et al., 2025). Lapisan

pedagogis ini, pada gilirannya, bergantung pada lapisan manusia berupa kompetensi digital dan penerimaan teknologi guru (Scherer et al., 2019; Mishra & Koehler, 2006), yang selanjutnya dibentuk oleh lapisan kelembagaan dan kebijakan yang mencakup pendanaan, fleksibilitas kurikulum, dan tata kelola data (Kassab et al., 2020; Ghashim & Arshad, 2023). Keselarasan keempat lapisan ini—teknis, pedagogis, manusia, dan kelembagaan—dan bukan salah satu lapisan secara terpisah, yang menentukan apakah Smart Laboratory berhasil memperkuat kompetensi sains sekaligus kompetensi teknologi peserta didik.

SIMPULAN

Kajian literatur sistematis ini menunjukkan bahwa lingkungan belajar berbasis Smart Laboratory, ketika dipahami sebagai komponen terintegrasi dari ekosistem pembelajaran STEM yang lebih luas dan bukan sekadar peningkatan teknologi yang berdiri sendiri, secara konsisten berasosiasi dengan peningkatan kompetensi sains peserta didik (pemahaman konsep, keterampilan proses sains, dan berpikir tingkat tinggi) serta kompetensi teknologi (literasi digital, computational thinking, dan penalaran berbasis data). Manfaat ini paling andal terwujud ketika infrastruktur berbasis IoT dipadukan dengan pedagogi STEM berbasis proyek, didukung oleh guru dengan kompetensi digital yang memadai dan penerimaan teknologi yang positif, serta disematkan dalam kebijakan kelembagaan yang menangani pendanaan infrastruktur dan keamanan data. Bagi konteks Indonesia, fleksibilitas yang ditawarkan oleh Kurikulum Merdeka menghadirkan peluang yang tepat waktu untuk menyematkan kegiatan Smart Laboratory ke dalam struktur pembelajaran berbasis proyek yang sudah ada. Namun demikian, mewujudkan potensi ini memerlukan investasi yang disengaja dan terkoordinasi dalam pengembangan profesional guru, distribusi infrastruktur yang berkeadilan, dan kebijakan tata kelola data yang jelas, dan bukan sekadar mengandalkan adopsi teknologi semata. Penelitian empiris di masa depan, khususnya studi eksperimental dan longitudinal yang dilakukan dalam konteks pendidikan K-12 di Indonesia, diperlukan untuk mengukur secara lebih presisi kontribusi komparatif implementasi Smart Laboratory terhadap kompetensi sains dan teknologi pada berbagai jenjang dan latar sekolah yang beragam

DAFTAR PUSTAKA

- Ayu, G. N., Putri, C. A., Riyanto, A. R., & Koto, I. (2025). The scientific literacy competence of students in Indonesia and Mexico based on PISA 2022: An international comparative study. *TOFEDU: The Future of Education Journal*.
- Bandura, A. (1997). Self-efficacy: The exercise of control. W. H. Freeman.
- Benita, F., Virupaksha, D., Wilhelm, E., & Tunçer, B. (2021). A smart learning ecosystem design for delivering Data-driven Thinking in STEM education. *Smart Learning Environments*, 8, Article 11. <https://doi.org/10.1186/s40561-021-00153-y>

- Camprodon, G., González, Ó., Barberán, V., Pérez, M., Smári, V., de Heras, M. Á., & Bizzotto, A. (2019). Smart Citizen Kit and Station: An open environmental monitoring system for citizen participation and scientific experimentation. *HardwareX*, 6, e00070. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00070>
- Cao, X., Lu, H., Wu, Q., & Hsu, Y. (2025). Systematic review and meta-analysis of the impact of STEM education on students learning outcomes. *Frontiers in Psychology*, 16, 1579474. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1579474>
- 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>
- Chen, C.-M., Li, M.-C., & Tu, C.-C. (2024). A mixed reality-based chemistry experiment learning system to facilitate chemical laboratory safety education. *Journal of Science Education and Technology*, 33, 505–520.
- Chengere, A. M., Bono, B. D., Zinabu, S. A., & Jilo, K. W. (2025). Enhancing secondary school students' science process skills through guided inquiry-based laboratory activities in biology. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320692>
- Darmawansah, D., Hwang, G.-J., Chen, M.-R. A., & Liang, J.-C. (2023). Trends and research foci of robotics-based STEM education: A systematic review from diverse angles based on the technology-based learning model. *International Journal of STEM Education*, 10, Article 12. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00400-3>
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Dong, Z., Chiu, M. M., Zhou, S., et al. (2024). The effect of mobile learning on school-aged students' science achievement: A meta-analysis. *Education and Information Technologies*, 29, 517–544. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12240-3>
- George-Reyes, C. E., Tapia-Bastidas, T., Sandoval-Benitez, L. F., Caicedo-Quiroz, R., & Pinto-Santos, A. R. (2025). Rethinking maker education: Makerspaces, gender, and STEM skills in the era of inclusive educational intelligence. *Frontiers in Education*, 10, 1729067. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1729067>
- Ghashim, I. A., & Arshad, M. (2023). Internet of Things (IoT)-based teaching and learning: Modern trends and open challenges. *Sustainability*, 15(21), Article 15656. <https://doi.org/10.3390/su152115656>
- Goyal, M., Gupta, C., & Gupta, V. (2022). A meta-analysis approach to measure the impact of project-based learning outcome with program attainment on student learning using fuzzy inference systems. *Heliyon*, 8(8), e10248. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10248>
- Hasan, D. O. (2025). IoT-based smart education: A systematic review of the state of the art. *Journal of Intelligent Systems and Information Technology*, 2(1), 1–24.

- Hwang, G.-J. (2014). Definition, framework and research issues of smart learning environments – A context-aware ubiquitous learning perspective. *Smart Learning Environments*, 1, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s40561-014-0004-5>
- Kassab, M., DeFranco, J., & Laplante, P. (2020). A systematic literature review on Internet of Things in education: Benefits and challenges. *Journal of Computer Assisted Learning*, 36(2), 115–127. <https://doi.org/10.1111/jcal.12383>
- Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia. (2022). Panduan pengembangan proyek penguatan profil pelajar Pancasila. Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan.
- Khan, F. (2024). Emerging trends and challenges of IoT in smart healthcare systems, smart cities, and education. *Sensors*, 24(17), Article 5735. <https://doi.org/10.3390/s24175735>
- Khriji, S., El Houssaini, D., Barioul, R., Rehman, T., & Kanoun, O. (2020). Smart-Lab: Design and implementation of an IoT-based laboratory platform. In 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT) (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT48130.2020.9221143>
- Kwon, H., & Lee, Y. (2025). A meta-analysis of STEM project-based learning on creativity. *STEM Education*, 5(2), 275–290. <https://doi.org/10.3934/steme.2025014>
- Li, M., Ma, S., & Shi, Y. (2023). Examining the effectiveness of gamification as a tool promoting teaching and learning in educational settings: A meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 14, 1253549. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1253549>
- Liu, J., Wang, K., & Pan, Z. (2025). The effectiveness of professional development in the self-efficacy of in-service teachers in STEM education: A meta-analysis. *Behavioral Sciences*, 15(10), 1364. <https://doi.org/10.3390/bs15101364>
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017–1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- OECD. (2023). PISA 2022 results (Volume I and II): Country notes – Indonesia. OECD Publishing.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Reher, A., Ziegler, M., Blumberg, E., El Tegani, M., Peperkorn, C., Röllke, K., Schwedler, S., Stinken-Rösner, L., Wassing, J. L., & Kirchhoff, T. (2025). Impact of digitalization-related STEM in-service teacher trainings in cooperation with out-of-school student labs on

- teachers' professional knowledge, self-efficacy and technology commitment. *Frontiers in Psychology*.
- Santos, M. L. A., & Prudente, M. C. (2022). Effectiveness of virtual laboratories in science education: A meta-analysis. *International Journal of Information and Education Technology*, 12(2), 143–150.
- Scherer, R., Siddiq, F., & Tondeur, J. (2019). The technology acceptance model (TAM): A meta-analytic structural equation modeling approach to explaining teachers' adoption of digital technology in education. *Computers & Education*, 128, 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.009>
- Setyawarno, D., Rosana, D., Ibrohim, Hamimi, E., & Abdulloh, A. G. (2025). Implementation of IoT-based STEM-Contextual learning with the MQTT protocol on the digital literacy skills of pre-service science teacher. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*, 12(4), Article 2277. <https://doi.org/10.31129/LUMAT.12.4.2277>
- Thornhill-Miller, B., Camarda, A., Mercier, M., Burkhardt, J.-M., Morisseau, T., Bourgeois-Bougrine, S., Vinchon, F., El Hayek, S., Augereau-Landais, M., Mourey, F., Feybesse, C., Sundquist, D., & Lubart, T. (2023). Creativity, critical thinking, communication, and collaboration: Assessment, certification, and promotion of 21st century skills for the future of work and education. *Journal of Intelligence*, 11(3), 54. <https://doi.org/10.3390/jintelligence11030054>
- Tsakeni, M., Nwafor, S. C., Mosia, M., & Egara, F. O. (2025). Mapping the scaffolding of metacognition and learning by AI tools in STEM classrooms: A bibliometric–systematic review approach (2005–2025). *Journal of Intelligence*, 13(11), 148. <https://doi.org/10.3390/jintelligence13110148>
- UNESCO. (2018). UNESCO ICT competency framework for teachers (Version 3). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wing, J. M. (2006). Computational thinking. *Communications of the ACM*, 49(3), 33–35. <https://doi.org/10.1145/1118178.1118215>
- Xu, W., & Ouyang, F. (2022). The application of AI technologies in STEM education: A systematic review from 2011 to 2021. *International Journal of STEM Education*, 9, Article 59. <https://doi.org/10.1186/s40594-022-00377-5>
- Zhang, L., Yang, C., & Zheng, Y. (2026). Digital competence for sustainable education of pre-service teachers: A systematic literature review (2014–2024). *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1710983>
- Zhu, Z.-T., Yu, M.-H., & Riezebos, P. (2016). A research framework of smart education. *Smart Learning Environments*, 3, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s40561-016-0026-2>