Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

MOZAIK
Journal Of Art and Architecture

Integrasi Teknologi *Digital Twin* pada Sistem Manajemen Laboratorium untuk Mitigasi *Human Error* Berbasis Realitas Virtual

Eko Agung Syaputra[1)], Novianti Rossalina[2)], Riska Apriliya Safitri[3)], Ridho Wibi Pradana[4)]

[1)] Desain Komunikasi Visual, Fakultas Pembangunan Berkelanjutan, Institut Teknologi Kalimantan
[2,3,4)] Laboratorium Arsitektur dan Desain, Laboratorium Terpadu, Institut Teknologi Kalimantan

*Corresponding Author
Email: eko.agung@lecturer.itk.ac.id

ABSTRAK

Potensi kesalahan manusia (*human error*) dalam operasional laboratorium menjadi tantangan kritis yang memicu risiko kecelakaan kerja, sementara metode pelatihan konvensional kurang interaktif dan belum terhubung secara optimal dengan praktik nyata. Adopsi laboratorium berbasis Realitas Virtual (VR) 360° hadir sebagai alternatif simulasi yang aman, namun perancangan alur pembelajaran yang kurang terarah berpotensi memicu disorientasi antarmuka dan meningkatkan beban kognitif berlebih (*extraneous cognitive load*). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji integrasi teknologi *digital twin* berbasis VR dalam Sistem Manajemen Laboratorium guna memitigasi *human error* melalui optimasi dan evaluasi desain alur pembelajaran linear dan non-linear. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui evaluasi kuesioner terstruktur dan ujian digital berbasis Moodle LMS terhadap 996 mahasiswa pengguna 11 laboratorium di Institut Teknologi Kalimantan. Data dianalisis secara statistik menggunakan uji *Chi-Square* Pearson dan distribusi frekuensi skala Likert. Hasil penelitian menunjukkan tingkat penerimaan yang sangat tinggi terhadap platform, di mana 94,7% responden menganggap tur VR bermanfaat untuk keselamatan laboratorium, 93,1% menilai ujian digital sebagai metode asesmen yang tepat, dan 92,6% menyatakan alur pembelajaran berlangsung secara jelas dan logis. Lebih lanjut, 46,5% responden secara eksplisit lebih memilih alur terstruktur linear dibandingkan alur non-linear (25,9%), yang diperkuat oleh umpan balik kualitatif bahwa penyajian materi secara bertahap dinilai lebih mudah dipahami serta memberikan kejelasan arah navigasi dalam mempelajari prosedur keselamatan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa keberhasilan integrasi *digital twin* dalam menekan *human error* sangat ditentukan oleh keselarasan antara desain struktur interaksi dan karakteristik kognitif pembelajar. Implikasi temuan ini memberikan panduan desain instruksional (*design guidelines*) yang berharga bagi pengembangan ekosistem pelatihan simulasi virtual yang aman, terukur, inklusif, dan responsif di perguruan tinggi.

KEYWORDS

Alur Pembelajaran
Digital Twin
Human Error
Manajemen Lab
Virtual Reality

This is an open access article under the CC–BY-NC-SA license

PENDAHULUAN

Pelatihan keselamatan laboratorium merupakan aspek mendasar dalam membangun budaya kerja laboratorium yang aman dan terstandardisasi (Soewardi et al., 2026). Program pelatihan keselamatan yang dirancang secara terstruktur memungkinkan mahasiswa bekerja dengan aman di lingkungan laboratorium serta meminimalkan risiko kecelakaan yang dapat mengakibatkan cedera hingga kematian (Muttaqin & Lestari, 2022). Metode pelatihan konvensional, seperti kuliah tatap muka, materi cetak, dan slide presentasi, memiliki keterbatasan dalam interaksi serta kurang terhubung dengan praktik nyata, sehingga menghasilkan pemahaman keselamatan laboratorium yang sempit dan parsial (Srinivasan et al., 2022).

Untuk mengatasi keterbatasan metode tradisional tersebut, laboratorium virtual hadir sebagai pendekatan pembelajaran alternatif yang semakin populer, seiring dengan meningkatnya adopsi metode pengajaran berbasis daring secara umum (Shah et al., 2021). Laboratorium virtual

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

menyediakan lingkungan simulasi yang bebas dari risiko fisik, memungkinkan mahasiswa untuk mempelajari dan melatih aspek keselamatan laboratorium sesuai dengan ritme belajar mandiri (*self-paced*) (Viitaharju et al., 2023). Selain itu, *platform* virtual yang interaktif dilengkapi dengan fitur umpan balik dan asesmen mandiri yang mendorong mahasiswa untuk merefleksikan proses pembelajaran mereka secara berkesinambungan (Girmay et al., 2021).

Dalam konteks studi ini, fokus pembahasan diarahkan pada laboratorium virtual berbasis citra panorama 360° yang dapat diakses melalui web standar, sehingga dikategorikan sebagai lingkungan *virtual reality* (VR) non-imersif. Berbeda dengan VR imersif yang menggunakan perangkat *head-mounted display* (HMD) dan pengendali spasial untuk mengisolasi indra pengguna sepenuhnya serta melacak pergerakan fisik dalam ruang tiga dimensi, VR *non-imersif* menyajikan lingkungan virtual melalui layar datar dua dimensi (seperti monitor laptop atau ponsel pintar) dengan navigasi berbasis tetikus (*mouse*), papan ketik, atau layar sentuh yang membatasi interaksi pada rotasi sudut pandang tanpa isolasi sensorik penuh. Meskipun tingkat imersinya berbeda dengan VR berbasis *headset*, laboratorium virtual 360° tetap mampu menghadirkan sensasi kehadiran nyata (*sense of presence*) di lingkungan laboratorium fisik melalui navigasi interaktif (Seifan et al., 2020) serta mengintegrasikan beragam tugas pembelajaran yang mencakup materi teks, citra, video, hingga kuis interaktif (Guzmán & Joseph, 2021). Keunggulan utama pendekatan ini terletak pada kemudahan akses menggunakan laptop atau ponsel pintar standar tanpa memerlukan *headset* VR maupun perangkat keras khusus lainnya (Poyade et al., 2021). Karakteristik tersebut menjadikan laboratorium virtual 360° sebagai solusi yang sangat potensial untuk diterapkan pada kegiatan perkuliahan maupun kelas dengan jumlah peserta mencapai ratusan hingga ribuan mahasiswa (Alnagrat et al., 2022).

Studi terdahulu oleh Viitaharju et al. (2021) memperkenalkan laboratorium virtual 360° interaktif berbasis web sebagai platform terukur untuk pelatihan keselamatan laboratorium yang diikuti oleh lebih dari 500 mahasiswa. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pelatihan tersebut mendapat tanggapan yang sangat positif karena mahasiswa dapat mempelajari materi keselamatan laboratorium sesuai kecepatan belajar masing-masing serta berlatih berulang kali melalui video dan kuis interaktif. Meskipun demikian, salah satu kritik utama dari umpan balik mahasiswa menyoroti struktur alur pembelajaran laboratorium virtual tersebut, yang dirasa kurang terarah dan berpotensi memberikan dampak negatif terhadap pengalaman belajar serta motivasi mereka.

Dalam literatur pendidikan, alur pembelajaran didefinisikan sebagai rute yang dilalui oleh pembelajar dalam melalui serangkaian tujuan pembelajaran untuk meningkatkan pengetahuan atau keterampilan pada subjek maupun program studi tertentu (Gudonienė et al., 2021). Alur pembelajaran memegang peranan krusial dalam proses edukasi karena membantu mahasiswa memahami topik-topik kompleks secara bertahap dengan membangun fondasi dari materi yang lebih sederhana yang telah dipelajari sebelumnya (Sukmawati et al., 2025). Selain itu, perancangan alur pembelajaran yang tepat dapat memperdalam pemahaman mahasiswa terhadap konten sekaligus meningkatkan motivasi belajar mereka (Ridho et al., 2025). Secara umum, literatur mengklasifikasikan alur pembelajaran ke dalam dua jenis struktur utama, yaitu alur linear dan alur non-linear (Derichs et al., 2022).

Alur pembelajaran non-linear merujuk pada struktur yang memberikan kebebasan kepada mahasiswa untuk menentukan sendiri urutan dalam mempelajari materi (Ruskandi et al., 2021). Pendekatan non-linear menawarkan fleksibilitas tinggi, memberikan kesempatan bagi mahasiswa untuk merancang pengalaman belajar mereka sendiri, serta mendorong kegiatan eksplorasi dan penemuan mandiri (Ishaq, 2024). Studi Viitaharju et al. (2021) secara khusus menerapkan alur non-linear yang memungkinkan mahasiswa mengeksplorasi ruang laboratorium virtual dan mempelajari materi dalam urutan serta kecepatan pilihan mereka sendiri. Akan tetapi, struktur non-linear berisiko menimbulkan kebingungan navigasi, disorientasi ruang, serta potensi terlewatnya tahapan prosedur krusial bagi pembelajar (Li et al., 2024). Kritik serupa juga ditemukan dalam studi Levonis et al. (2021), yang menekankan perlunya meninjau kembali perancangan alur pembelajaran pada platform virtual. Meskipun demikian, kajian terdahulu tersebut belum secara spesifik menjawab bagaimana restrukturisasi alur menjadi terarah dan

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

berurutan memengaruhi persepsi kemudahan pemahaman, adaptasi kognitif pengguna pemula, serta preferensi navigasi dalam pelatihan keselamatan laboratorium berskala besar. Oleh karena itu, pengembangan alur pembelajaran linear perlu dikaji lebih lanjut karena pelatihan keselamatan kerja menuntut penguasaan Standar Operasional Prosedur (SOP) secara utuh dan bertahap guna mencegah kelalaian prosedural (*human error*), sekaligus memastikan seluruh materi mitigasi risiko tersampaikan secara sistematis tanpa membebani pengguna dengan kompleksitas eksplorasi bebas.

Sebaliknya, dalam alur pembelajaran linear, mahasiswa mempelajari materi secara runtut sesuai dengan urutan yang telah ditetapkan sebelumnya. Sebagai contoh, untuk mempelajari konten B, mahasiswa diwajibkan untuk menyelesaikan konten A terlebih dahulu (Siren & Tzerpos, 2022). Buku teks dan video pembelajaran dapat dikategorikan sebagai alur pembelajaran berstruktur linear karena materi disajikan secara sekuensial (Derakhshandeh & Esmaeili). Meskipun demikian, pembelajar tetap memiliki fleksibilitas terbatas untuk mengubah urutan belajar dengan memilih bab tertentu pada buku atau *timestamp* pada video (Nurhatmi, 2025). Keunggulan alur linear meliputi efisiensi waktu, kemudahan mahasiswa dalam memahami materi secara logis dan teratur, serta kepastian bahwa seluruh cakupan materi telah disajikan kepada mahasiswa (Bakar, 2021). Namun, perancangan materi ke dalam struktur yang linear dan logis membutuhkan waktu persiapan yang lebih lama bagi pengajar, sementara dari sudut pandang mahasiswa, struktur ini dapat membatasi fleksibilitas karena mereka tidak dapat memilih urutan belajar secara bebas (Viitaharju et al., 2023). Ringkasan perbandingan kelebihan dan kekurangan dari kedua alur pembelajaran ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komparasi Karakteristik Alur Pembelajaran Linear dan Non-Linear

Jenis Alur	Kelebihan	Kekurangan
Linear	• Struktur informasi mudah dipahami dan diikuti secara logis • Efisien dan menghemat waktu pelatihan • Relatif efektif untuk penyampaian materi keselamatan berskala besar	• Membatasi fleksibilitas dan inisiatif eksplorasi pengguna • Mengasumsikan urutan progresif yang seragam bagi seluruh pengguna • Membutuhkan perancangan urutan materi yang presisi di awal
Non-Linear	• Membebaskan pengguna memilih dan mengeksplorasi topik sesuai minat • Memberikan fleksibilitas navigasi dalam lingkungan virtual	• Berisiko memicu kebingungan dan disorientasi antarmuka • Waktu pembelajaran cenderung lebih lama akibat tantangan navigasi • Membutuhkan pengulangan materi untuk membangun konteks pembelajaran bagi mahasiswa.

Sumber: Hasil olahan Penulis (2026)

Di samping buku teks dan video, kegiatan praktikum di laboratorium fisik pada dasarnya juga bersifat linear karena umumnya diselesaikan berdasarkan urutan tahapan kerja tertentu. Eksperimen laboratorium pada disiplin ilmu seperti kimia analitik, misalnya, secara alamiah menuntut pengembangan laboratorium virtual berbasis struktur linear (Girmay et al., 2026). Sebaliknya, pada pelatihan keselamatan laboratorium, terdapat fleksibilitas yang lebih luas dalam merancang alur pembelajarannya sehingga materi dapat disajikan secara linear maupun non-linear. Dalam konteks integrasi sistem manajemen laboratorium, teknologi *digital twin* berperan mereplikasi lingkungan fisik dan instrumen laboratorium riil ke dalam ruang simulasi virtual yang bebas risiko. Agar representasi virtual tersebut efektif mencegah kesalahan operasional (*human*

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

error) saat mahasiswa bekerja di laboratorium fisik, diperlukan desain alur pembelajaran linear yang memandu pemahaman prosedur keselamatan—mulai dari identifikasi potensi bahaya, pemilihan Alat Pelindung Diri (APD), hingga penanganan limbah—secara runtut dan utuh tanpa ada tahapan yang terlewat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana penerapan alur pembelajaran linear pada laboratorium virtual berbasis *digital twin* memengaruhi pengalaman belajar serta preferensi mahasiswa dalam mendukung mitigasi *human error* di lingkungan laboratorium..

METODE

Penelitian ini menerapkan desain kuantitatif deskriptif melalui evaluasi pasca-pelatihan (*post-training evaluation*) tanpa kelompok pembanding (*non-between-groups design*) demi menjaga kesetaraan standar keselamatan praktikum bagi seluruh mahasiswa. Pengukuran keterlibatan (*engagement*) dan capaian pembelajaran dilakukan melalui dua instrumen pada *Moodle* LMS. Pertama, aspek keterlibatan dan pengalaman belajar diukur menggunakan kuesioner skala Likert lima poin serta pertanyaan terbuka. Kedua, aspek capaian pembelajaran diukur melalui ujian digital (*Moodle quiz*) yang mencakup lima domain keselamatan laboratorium dan dianalisis menggunakan distribusi frekuensi serta uji *Chi-Square Pearson*. Subbagian berikut merinci capaian pembelajaran, desain instruksional, serta spesifikasi teknis *digital twin* yang dikembangkan.

Capaian Pembelajaran (*Learning Outcomes*)

Setelah menyelesaikan program simulasi VR berbasis *digital twin* dan sistem manajemen laboratorium ini, peserta didik diharapkan memiliki kemampuan untuk:

a. Mengidentifikasi potensi risiko keselamatan dan titik rawan *human error* yang berkaitan dengan pekerjaan di laboratorium.
b. Memilih Alat Pelindung Diri (APD) yang sesuai serta mengoperasikan peralatan keselamatan laboratorium.
c. Menguasai prosedur kerja yang aman dan bersifat mencegah kecelakaan *(accident preventive)* di laboratorium.
d. Menentukan langkah-langkah mitigasi dan keselamatan yang tepat.
e. Memahami tata cara dan tindakan darurat ketika terjadi kecelakaan di laboratorium.
f. Meningkatkan kesadaran *(awareness)* terhadap keselamatan diri sendiri maupun rekan sejawat.
g. Mengelola dan menangani limbah laboratorium secara benar dan aman.

Tujuan utama dari sistem pelatihan ini bukanlah sekadar menghafal seluruh detail materi teknis, melainkan membangun pemahaman komprehensif mengenai praktik laboratorium yang aman guna memitigasi *human error* saat bekerja di lingkungan laboratorium. Secara operasional dalam penelitian ini, *human error* dibatasi pada kesalahan prosedural dan kognitif pengguna terkait kepatuhan keselamatan kerja, yang mencakup kelalaian mengidentifikasi potensi bahaya peralatan, ketidaktepatan pemilihan Alat Pelindung Diri (APD) wajib, penyimpangan tahapan Standar Operasional Prosedur (SOP), serta kesalahan penanganan limbah dan tindakan darurat. Dengan berfokus pada mahasiswa serta pengelola laboratorium, sistem ini dapat mempersiapkan mereka dengan lebih baik untuk bekerja secara aman sekaligus mendorong budaya keselamatan dan tanggung jawab di dalam lingkungan laboratorium.

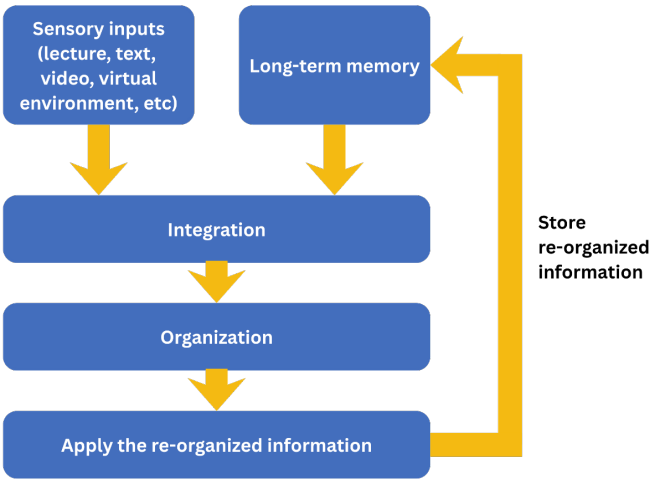
Desain Pembelajaran (*Learning Design*)

Penerapan alur pembelajaran linear dirancang berdasarkan Kerangka Kerja Generatif Wittrock (*Wittrock's Generative Learning Model*) (Fiorella, 2026). Model ini dipilih sebagai landasan desain alur linear karena pembentukan pemahaman yang bermakna menuntut pengorganisasian dan pengintegrasian informasi secara bertahap dengan cara menghubungkan input sensorik baru dari simulasi virtual dengan pengetahuan awal di dalam memori jangka panjang secara sistematis. Dalam konteks pelatihan keselamatan laboratorium yang menuntut

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

kepatuhan prosedural, penyajian materi secara berurutan (*step-by-step*) diperlukan agar mahasiswa menguasai konsep keselamatan dasar terlebih dahulu sebelum melangkah ke prosedur penanganan risiko yang lebih kompleks, sehingga mencegah fragmentasi informasi dan memitigasi kesalahan interpretasi (*human error*). Secara spesifik, model ini menekankan empat tahapan proses kognitif yang menjadi acuan pengurutan aktivitas pembelajaran pada sistem:

a. Mengingat kembali pengetahuan awal *(recall of prior knowledge).*
b. Mengintegrasikan informasi baru ke dalam pengetahuan awal *(integrate new information to prior knowledge).*
c. Menghubungkan pengetahuan yang telah dipelajari secara bersamaan *(link the learned knowledge together).*
d. Menerapkan informasi baru untuk menghasilkan pemahaman/informasi baru *(apply the new information to produce new information).*



Gambar 1. Representasi skematis model kerangka kerja generatif Wittrock.

Model ini terbukti memiliki keterkaitan erat dengan motivasi dan keterlibatan (*engagement*) mahasiswa. Berdasarkan model tersebut, mahasiswa pada sistem pelatihan keselamatan non-linear terbukti mampu memperoleh pengetahuan baru dan memanggil ingatan awal. Namun, ketiadaan struktur alur yang linear membuat mahasiswa kesulitan mengintegrasikan serta menghubungkan informasi baru tersebut secara efisien, sehingga mengganggu pengalaman belajar dan meningkatkan potensi kesalahan operasional (*human error*). Oleh karena itu, adopsi struktur linear bertujuan untuk mengoptimalkan pengorganisasian dan integrasi informasi dengan pengetahuan awal, yang berkontribusi pada pengodean (*encoding*) dan pemanggilan (*recalling*) memori yang lebih presisi. Dalam penelitian ini, penerapan struktur alur linear tersebut dievaluasi secara empiris melalui instrumen survei dan asesmen pasca-pelatihan yang terintegrasi pada *Moodle* LMS. Evaluasi dilakukan dengan mengukur: (1) persepsi mahasiswa terhadap kejelasan dan kelogisan alur materi pada skala Likert sebagai indikator kemudahan pengorganisasian informasi; (2) perbandingan langsung tingkat preferensi antara jalur linear dan jalur eksplorasi bebas (non-linear); (3) umpan balik kualitatif melalui pertanyaan terbuka terkait kemudahan pemahaman, interaktivitas, serta kendala navigasi; dan (4) asosiasi antara riwayat pengalaman belajar virtual sebelumnya dengan preferensi alur menggunakan uji *Chi-Square* Pearson.

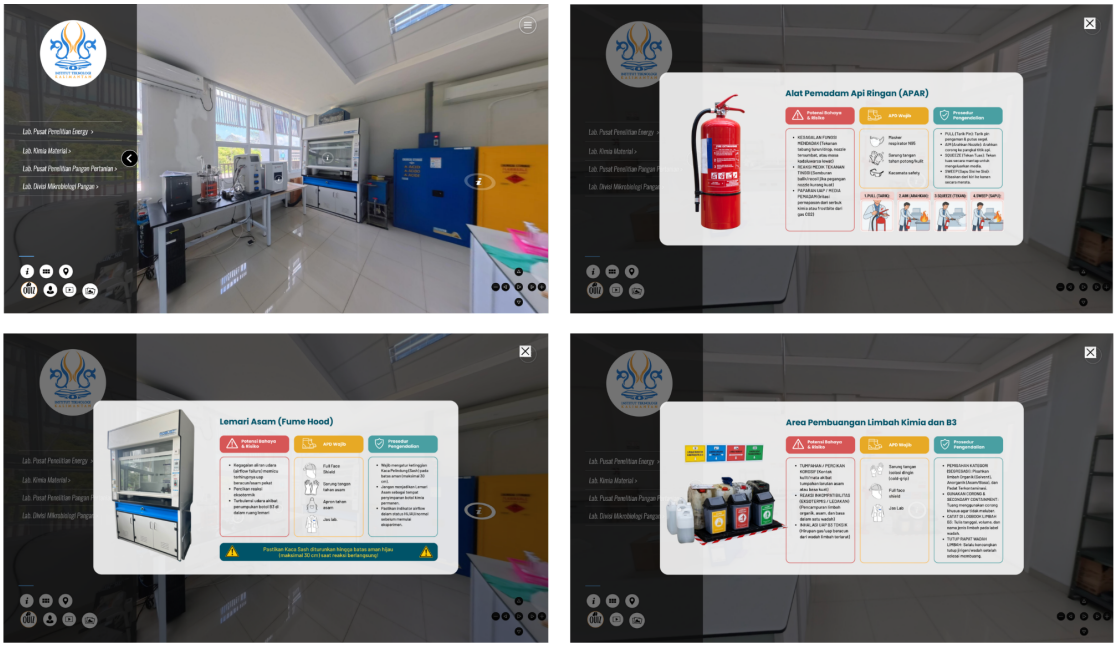
Desain Laboratorium Virtual dan *Digital Twin*

Pelatihan berbasis realitas virtual dan *digital twin* ini bersifat wajib bagi seluruh mahasiswa yang mengambil mata kuliah praktikum di Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan (ITK), sehingga profil partisipan cukup heterogen. Kelompok sasaran utama mencakup mahasiswa jenjang S1 yang menggunakan 11 laboratorium (Lab) yang terdiri dari: Lab.

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

MOZAIK
Journal Of Art and Architecture

Karakterisasi A, Lab. Karakterisasi B, Lab. Teknologi Proses, Lab. Kimia Dasar, Lab. Operasi Teknologi Kimia, Lab. Rekayasa Lingkungan dan Pengolahan Limbah, Lab. Karakterisasi C, Lab. Pusat Penelitian Pangan Pertanian, Lab. Pusat Penelitian Energi, Lab. Teknologi Pangan, dan Lab. Kimia Material.



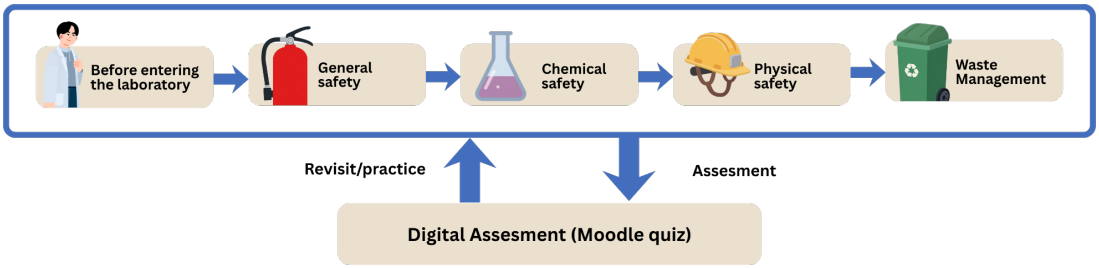
Gambar 2. *User Interface web safety induction* berbasis *virtual tour*

Sistem manajemen laboratorium berbasis digital ini terdiri dari dua bagian utama yang terintegrasi secara fungsional: pelatihan laboratorium virtual berbasis *digital twin* dan ujian digital. Dalam tata kelola keselamatan Laboratorium Terpadu ITK, pelatihan virtual berperan sebagai modul induksi prapraktikum yang membekali mahasiswa dengan pemahaman prosedur kerja aman secara mandiri dan bebas risiko sebelum memasuki laboratorium riil. Selanjutnya, ujian digital berbasis *Moodle* berfungsi sebagai instrumen verifikasi kompetensi untuk mengevaluasi tingkat penguasaan materi keselamatan setelah mahasiswa menyelesaikan seluruh tahapan pelatihan linear. Kedua komponen tersebut terhubung dalam siklus umpan balik berkelanjutan (Gambar 3), di mana evaluasi pada ujian digital menjadi acuan bagi mahasiswa untuk meninjau kembali (*revisit*) ruang maupun aktivitas simulasi tertentu guna memperbaiki kekeliruan pemahaman sebelum berinteraksi langsung dengan peralatan laboratorium fisik. Pada modul pelatihan virtual tersebut, *pop-up* detail tiap alat laboratorium dibagi ke dalam empat informasi utama terstruktur yang mewakili tema utama keselamatan dan manajemen laboratorium guna memitigasi *human error* berdasarkan panduan keselamatan Laboratorium Terpadu ITK.

a. Potensi bahaya dan risiko
b. APD wajib yang digunakan ketika menggunakan alat tersebut
c. Pengendalian bahaya yang dapat dilakukan
d. *Highlight* informasi penting mengenai K3 alat spesifik

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

MOZAIK
Journal Of Art and Architecture



Gambar 3. fokus bagian *digital assessment*

Dalam kondisi eksisting pada Laboratorium Terpadu ITK, proses pelatihan mencakup total 110 slide materi pembelajaran yang tersebar di 11 lingkungan laboratorium virtual. Secara keseluruhan, komposisi 110 slide tersebut terdiri atas 77 slide materi informasi tekstual dan visual/infografis (yang memaparkan pengenalan ruang, potensi bahaya dan risiko, APD wajib, prosedur pengendalian bahaya, serta informasi K3 spesifik alat), 11 slide video interaktif, serta 22 slide kuis dan permainan interaktif untuk asesmen mandiri. Alur pembelajaran tersebut dirancang secara berurutan oleh pengajar/pengampu untuk merefleksikan skenario pengajaran, kondisi praktikum, serta lima domain keselamatan kerja (persiapan sebelum memasuki laboratorium, keselamatan umum, keselamatan kimia, keselamatan fisik, dan pengelolaan limbah). Berbeda dengan sistem non-linear terdahulu, aktivitas dalam tur berbasis *digital twin* ini muncul secara bertahap (*step-by-step*: aktivitas B baru terbuka setelah aktivitas A diselesaikan). Pendekatan berbasis model Wittrock ini membantu pemahaman bertahap (*incremental knowledge building*). Meskipun alur linear memiliki keterbatasan dalam eksplorasi, sistem ini menyediakan navigasi berupa tanda panah antarruangan setelah seluruh modul diselesaikan, serta memungkinkan pengguna untuk meninjau kembali (*revisit*) ruangan dan aktivitas sebelumnya kapan saja.

Dalam proses desain teknis, pengembangan lingkungan realitas virtual berbasis digital twin mengacu pada kerangka teknis Tabel 2 berikut;

Tabel 2. Detail teknis proses *digital twin*

Komponen Teknis	Implementasi / Spesifikasi Sistem
Foto Panorama 360°	Menggunakan citra panorama 360° yang diambil langsung dari laboratorium pengajaran riil (*real-world teaching lab*).
Perangkat Lunak Lingkungan Virtual	Dibangun menggunakan 3DVista (https://www.3dvista.com/) dan diekspor ke dalam berkas statis HTML5 & *JavaScript*. Sistem kompatibel diakses via peramban web pada perangkat desktop maupun seluler.
Aktivitas Interaktif	Menggunakan kerangka kerja *open-source* H5P (https://h5p.org/) dan aplikasi LUMI (https://app.lumi.education/).
Hosting & Integrasi System	Berbeda dari versi terdahulu yang terikat LMS *Moodle*, modul interaktif H5P kini diadopsi secara mandiri *(independently hosted)* sebagai halaman web statis yang disematkan *(embedded)* ke dalam lingkungan 3DVista.
Evaluasi Hasil Belajar	Evaluasi kemampuan dan mitigasi *human error* diukur menggunakan ujian digital berbasis *Moodle* setelah pelatihan virtual selesai.

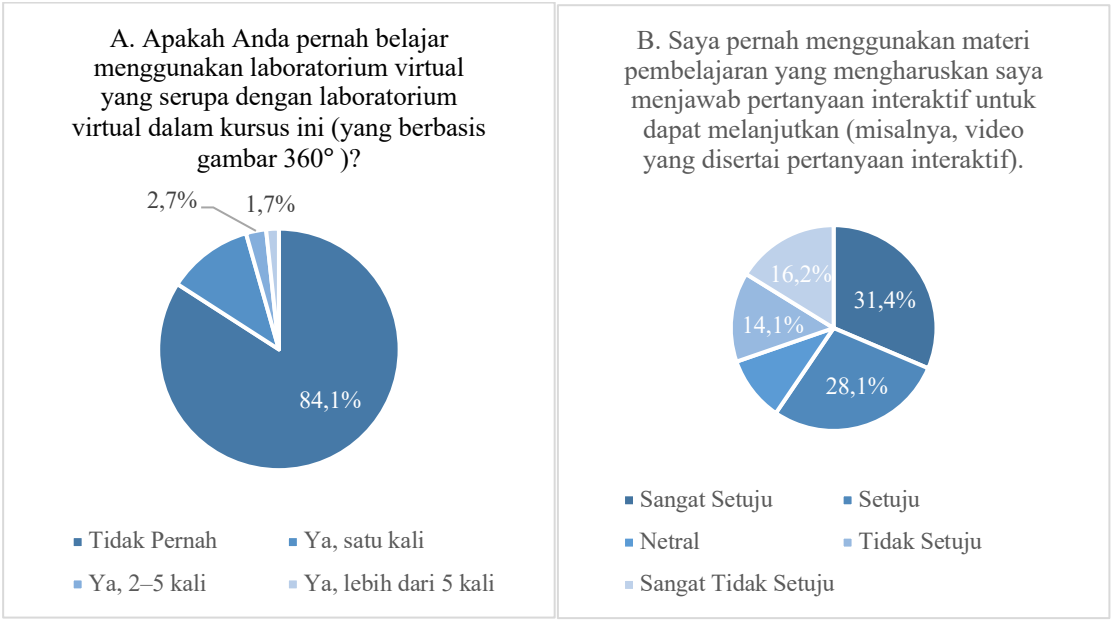
Sumber: Hasil olahan Penulis (2026)

Pendekatan teknis independen ini memberikan kontrol penuh atas desain *digital twin* pada lingkup studi laboratorium. Panduan teknis pengembangan sistem ini dipublikasikan secara terbuka pada Laboratorium Terpadu ITK.

Vol 4, No 2, (2026) Page 71-82
SSN 3024-9848 (print) | 3024-9856 (online)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data kuesioner umpan balik melibatkan partisipasi awal dari 1.026 mahasiswa melalui platform *Moodle* LMS yang diintegrasikan langsung dengan modul ujian digital guna meningkatkan aksesibilitas pengguna. Prosedur *data cleaning* diterapkan untuk menjaga validitas data dan meminimalkan redundansi; untuk mahasiswa yang melakukan pengulangan, hanya respons dari sesi ujian dengan nilai tertinggi yang dianalisis. Berdasarkan kriteria eliminasi tersebut, diperoleh 996 respons valid (N = 996) untuk dianalisis lebih lanjut pada tahap akhir. Rincian instrumen pertanyaan dilampirkan pada *supplementary material*, sementara distribusi respons terhadap enam indikator utama disajikan pada Gambar 4 dan Tabel 2.



Gambar 4. Tanggapan mahasiswa mengenai pengalaman belajar sebelumnya (N = 996). Mahasiswa ditanya mengenai pengalaman mereka sebelumnya terkait A) laboratorium virtual dan B) materi pembelajaran interaktif.

Evaluasi Analisis Pengalaman Belajar Terdahulu dan Adaptasi Beban Kognitif

Pengukuran tingkat pemahaman pengguna terhadap materi instruksional virtual dan media interaktif dilakukan untuk mengidentifikasi kesiapan adaptasi mahasiswa terhadap lingkungan laboratorium berbasis VR. Hasil survei (N = 996) menunjukkan bahwa 84,1% responden belum memiliki pengalaman berinteraksi dengan laboratorium virtual, sementara 15,9% sisanya telah memiliki pengalaman terdahulu. Distribusi ini mengonfirmasi bahwa laboratorium VR masih merupakan instrumen pembelajaran baru bagi mayoritas partisipan, sehingga memunculkan tantangan adaptasi awal. Ketiadaan skema mental terhadap media pembelajaran yang asing (seperti lingkungan 360° atau kuis interaktif) berpotensi memicu peningkatan beban kognitif berlebih (*extraneous cognitive load*), karena perhatian mahasiswa terbagi antara memahami fungsionalitas antarmuka dan menyerap substansi materi.

Meskipun demikian, hasil survei pada indikator pengalaman belajar terdahulu menunjukkan bahwa 59,5% responden telah memiliki pengalaman menggunakan media pembelajaran digital interaktif. Data ini menggambarkan tingkat keakraban responden terhadap karakteristik media digital interaktif, yang secara konseptual berperan sebagai pengetahuan awal (*prior knowledge*) dan fondasi kognitif untuk mengintegrasikan informasi baru ke dalam skema pemahaman yang sudah ada. Merujuk pada temuan Fiorella (2026), keakraban terhadap komponen intrinsik media tersebut berpotensi mereduksi hambatan adaptasi antarmuka dan memacu motivasi belajar, sehingga potensi beban kognitif berlebih (*extraneous cognitive load*) saat berinteraksi dengan lingkungan virtual dapat diredam. Dengan dukungan elemen interaktif yang sudah familier,

MOZAIK
Journal Of Art and Architecture

simulasi VR dipersepsikan sebagai pengalaman instruksional yang menyegarkan dibandingkan dengan metode konvensional seperti tatap muka atau buku teks.

Penguatan temuan ini juga tercermin dari analisis umpan balik kualitatif melalui pertanyaan terbuka; responden mengidentifikasi laboratorium virtual sebagai pengalaman belajar yang positif, menyenangkan, mudah dipahami, serta memberikan kesan penyegaran dibandingkan metode konvensional, dengan laporan kendala teknis operasional yang sangat minim. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa minimnya pengalaman awal mahasiswa terhadap laboratorium virtual (84,1%) tidak menghambat penerimaan maupun kemudahan mereka dalam mengikuti alur pelatihan berbasis elemen interaktif. Implikasi praktis dari temuan ini menggarisbawahi pentingnya peran perancang instruksional dalam mempertimbangkan latar belakang teknis pengguna serta merancang penyajian materi interaktif yang jelas secara pedagogis guna mendukung kenyamanan adaptasi dan pengalaman belajar mahasiswa.

Pengalaman Belajar Mahasiswa

Evaluasi kuantitatif terhadap persepsi mahasiswa (N = 996) menunjukkan tingkat penerimaan yang sangat tinggi terhadap efektivitas simulasi laboratorium virtual dan metode asesmen digital pada Tabel 3.

Tabel 3. Pernyataan dan distribusi tanggapan skala *Likert* dari mahasiswa (N = 996).

Pernyataan Evaluasi	Sangat Setuju	Setuju	Netral	Tidak Setuju	Sangat Tidak Setuju	Mode
Tur laboratorium virtual merupakan metode yang baik untuk mempelajari tentang keselamatan laboratorium.	57,5%	37,2%	3,3%	1,7%	0,3%	Sangat Setuju
Ujian digital semacam ini merupakan metode yang baik untuk menilai pembelajaran pada mata kuliah ini.	52,9%	40,2%	5,2%	1,2%	0,4%	Sangat Setuju
Tur laboratorium virtual berlangsung secara jelas dan logis.	60,4%	32,2%	6,3%	1,0%	0,2%	Sangat Setuju
Pengalaman menjelajahi laboratorium virtual secara bebas lebih disukai daripada mengikuti jalur linier yang telah ditentukan.	11,8%	14,1%	27,6%	34,1%	12,4%	Tidak Setuju

Sumber: Hasil olahan Penulis (2026)

Lebih dari 94,7% responden menyetujui bahwa laboratorium virtual bermanfaat sebagai sarana pemahaman keselamatan kerja, sementara lebih dari 93,1% menilai ujian digital sebagai instrumen evaluasi yang tepat, serta 92,6% menyatakan bahwa tur laboratorium virtual berlangsung secara jelas dan logis.

Penggalian umpan balik kualitatif melalui kuesioner terbuka dilakukan untuk mengeksplorasi fungsionalitas teknis, capaian pembelajaran, dan motivasi belajar secara lebih mendalam. Berdasarkan analisis tanggapan, teridentifikasi tiga tema utama:

1. Struktur instruksional terorganisir: Mayoritas mahasiswa mengapresiasi alur pembelajaran yang terstruktur serta penyampaian materi bertahap. Kejelasan alur navigasi tur ini

mengonfirmasi *Cognitive Load Theory* (Sweller, 2024) di mana penyajian informasi yang terstruktur secara sistematis mampu mengoptimalkan pemrosesan memori dan memperjelas keterkaitan antar Standar Operasional Prosedur (SOP) tanpa memicu kelelahan kognitif.

2. Interaktivitas dan Pembelajaran Aktif: Keberadaan elemen interaktif (seperti pertanyaan terintegrasi dalam video dan materi presentasi) terbukti meningkatkan pemikiran kritis, keterlibatan aktif, dan motivasi belajar. Hal ini menunjukkan prinsip behaviorisme dan pembelajaran aktif, serta sejalan dengan temuan Levonis et al. (2021) mengenai peran penting fitur interaktif pada media laboratorium virtual 360.

Analisis Desain Alur Pembelajaran, Evaluasi Asesmen, dan Inklusivitas Aksesibilitas

Evaluasi preferensi alur pembelajaran menunjukkan bahwa 46,5% responden memilih alur terstruktur (*linear pathway*), 25,9% memilih alur eksplorasi bebas (*non-linear pathway*), dan 27,6% bersikap netral. Dominasi preferensi alur linier ini selaras dengan umpan balik kualitatif yang mengapresiasi kejelasan serta pemerataan struktur navigasi pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Preferensi Alur Pembelajaran Berdasarkan Pengalaman Penggunaan Laboratorium Virtual

Pengalaman Penggunaan Lab Virtual	Sangat Setuju (Non-Linear)	Setuju (Non-Linear)	Netral	Tidak Setuju (Linear)	Sangat Tidak Setuju (Linear)	Total (N)
0 kali	89	112	232	300	105	838
1 kali	12	14	28	26	12	92
2–5 kali	12	12	14	13	6	57
Lebih dari 5 kali (> 5)	5	2	1	1	0	9
Total (N)	118	140	275	340	123	996
Presentase	**11,8%**	**14,1%**	**27,6%**	**34,1%**	**12,4%**	**100%**

Sumber: Hasil olahan Penulis (2026)

Uji *Chi-Square Pearson* menunjukkan hubungan signifikan antara pengalaman VR terdahulu dan preferensi alur pembelajaran ($\chi^2(12, N = 996) = 30{,}37$, $\rho = 0{,}002$, Cramér's $V = 0{,}101$). Berdasarkan Tabel 4, mahasiswa yang pernah menggunakan laboratorium virtual lebih dari lima kali cenderung memilih alur non-linear (77,8%), meskipun ukuran kelompok ini jauh lebih kecil ($N = 9$) dibandingkan kategori lainnya ($N \geq 45$) dan memiliki kekuatan asosiasi lemah. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan distribusi sampel yang lebih seimbang diperlukan untuk memvalidasi temuan awal ini.

Secara metodologis, desain eksperimen antarkelompok tidak diterapkan demi menjaga kesetaraan hak belajar pada mata kuliah wajib keselamatan laboratorium sekaligus mencegah risiko kecelakaan fisik akibat ketimpangan pemahaman SOP. Untuk mengantisipasi duplikasi data akibat fasilitas pengulangan ujian, penyaringan dari 1.026 entri menjadi N = 996 responden dilakukan dengan memilih sesi percobaan dengan nilai tertinggi sebagai representasi capaian optimal mahasiswa. Selanjutnya, analisis regresi pendahuluan diterapkan sebagai proses *screening check* untuk mengevaluasi pengaruh frekuensi pengulangan ujian terhadap skor akhir, sehingga dapat dipastikan bahwa pemilihan nilai tertinggi tidak menimbulkan bias sistematis terhadap analisis preferensi alur pembelajaran.

Keragaman preferensi navigasi ini mengonfirmasi Teori Gaya Belajar (Seifan et al., 2020) mengenai pentingnya penyelarasan desain instruksional dengan capaian pembelajaran *(learning outcomes).* Model non-linear efektif meningkatkan keterlibatan pada pembelajaran berbasis eksplorasi bebas (Derichs et al., 2022), sedangkan pada pelatihan keselamatan kerja berisiko tinggi, alur linear terstruktur memvalidasi temuan Viitaharju et al. (2021) dan Levonis et al.

(2021) dalam meminimalkan disorientasi ruang serta menjamin ketuntasan prosedur secara sistematis. Meskipun ujian pilihan ganda memperoleh persepsi positif (Tabel 3), instrumen evaluasi studi ini memiliki tiga keterbatasan utama: soal pilihan ganda lebih mengukur ingatan kognitif dasar *(recall)* dan rentan tebakan; asesmen virtual non-imersif belum memverifikasi keterampilan psikomotorik di laboratorium riil; serta kuesioner masih mengandalkan persepsi laporan mandiri tanpa observasi langsung kepatuhan praktikum. Oleh karena itu, diversifikasi penilaian seperti asesmen praktikal dan studi kasus deskriptif diperlukan untuk mengukur kedalaman kognitif serta kesiapan psikomotorik secara komprehensif (Chan et al., 2021). Selain itu, penguatan aksesibilitas pada 3DVista dan H5P melalui *closed captioning*, deskripsi audio, dan navigasi area ketik menjadi fokus pengembangan berikutnya demi mewujudkan simulasi yang inklusif (Jeffery et al., 2022).

KESIMPULAN

Penerapan alur pembelajaran linear dalam simulasi laboratorium virtual berbasis digital twin memperoleh penerimaan yang lebih dominan dibandingkan alur non-linear. Kejelasan struktur navigasi, urutan materi yang logis, serta integrasi elemen interaktif berperan penting dalam mempermudah pemahaman tahapan Standar Operasional Prosedur (SOP) dan menjaga keterlibatan belajar mahasiswa. Meskipun demikian, adanya perbedaan preferensi navigasi antara pengguna pemula dan pengguna yang telah terbiasa dengan lingkungan virtual, disertai tingginya apresiasi terhadap fitur interakti, mendasari pentingnya mempertahankan serta mendiversifikasi moda instruksional (integrasi teks, infografis, video interaktif, dan kuis mandiri) yang selaras dengan capaian pembelajaran *(learning outcomes)* guna mengakomodasi karakteristik pembelajar yang heterogen.

Di samping keselarasan alur dan moda penyajian, penguatan aspek aksesibilitas melalui fitur alternatif seperti *closed captioning*, deskripsi audio, dan navigasi ramah disabilitas merupakan bagian yang krusial untuk menjamin kesetaraan akses belajar. Secara keseluruhan, integrasi digital twin berbasis VR berpotensi andal sebagai modul induksi prapraktikum dalam mendukung penguasaan prosedur keselamatan dan memitigasi risiko human error sebelum mahasiswa bekerja di laboratorium fisik. Untuk menjawab keterbatasan yang ditemukan selama penelitian, studi mendatang disarankan memprioritaskan tiga pengembangan utama: (1) perancangan navigasi adaptif guna menjembatani perbedaan preferensi alur antara pengguna pemula dan berpengalaman; (2) diversifikasi evaluasi berbasis kinerja untuk mengatasi keterbatasan soal pilihan ganda dalam mengukur kedalaman pemahaman maupun keterampilan psikomotorik riil; serta (3) pengujian teknis fitur penyimpanan progres guna menyelesaikan kendala teknis yang dikeluhkan pengguna akibat keterbatasan arsitektur web statis tanpa autentikasi akun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi setinggi-tingginya kepada Institut Teknologi Kalimantan (ITK) atas penyediaan fasilitas Laboratorium Terpadu ITK sebagai lokasi pelaksanaan studi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh mahasiswa dan staf akademik yang telah berpartisipasi aktif serta mendukung kelancaran proses pengumpulan data dalam penelitian ini.

REFERENSI

Alnagrat, A. J. A., Ismail, R. C., & Idrus, S. Z. S. (2022). The Opportunities and challenges in virtual reality for virtual laboratories. *Innovative Teaching and Learning Journal*, *6*(2), 73-89.

Bakar, S. (2021). Investigating the dynamics of contemporary pedagogical approaches in higher education through innovations, challenges, and paradigm shifts. *Social Science Chronicle*, *1*(1), 1-19.

Derakhshandeh, Z., & Esmaeili, B. (2020). Active-learning in the online environment. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, *29*(4), 299-311.

Derichs, D., Sevón, S., Votkin, T., & Kauppinen, T. (2022). Creating a production pipeline for 360 learning environments. In *EDULEARN22 Proceedings* (pp. 5818-5824). IATED.

Fiorella, L. (2026). Instruction Based on Generative Learning Activities. *Handbook of Research on*

Learning and Instruction, 339-357.
Girmay, S., Yliniemi, K., Nieminen, M., Linnera, J., & Karttunen, A. J. (2024). Enhancing 360 virtual laboratory safety training with linear learning pathway design: Insights from student experiences. *Education for Chemical Engineers*, *47*, 12-21.
Girmay, S., Yliniemi, K., Nieminen, M., Vilhunen, A., & Karttunen, A. J. (2026). Universal Design for Learning Framework Enhances Learning Experience in Web-Based Virtual Laboratories. *Journal of Chemical Education*, *103*(3), 1182-1194.
Gudonienė, D., Paulauskaitė-Tarasevičienė, A., Daunorienė, A., & Sukackė, V. (2021). A case study on emerging learning pathways in SDG-focused engineering studies through applying CBL. *Sustainability*, *13*(15), 8495.
Guzmán, J. L., & Joseph, B. (2021). Web-based virtual lab for learning design, operation, control, and optimization of an anaerobic digestion process. *Journal of Science Education and Technology*, *30*(3), 319-330.
Ishaq, I. (2024). Pembelajaran Berbasis Heutagogi Di Pendidikan Tinggi Digital: Tinjauan Teoretis, Sintesis Literatur, Dan Implikasi Masa Depan. *Jurnal Riset Evaluasi Pendidikan*, *1*(1), 487-497.
Levonis, S. M., Tauber, A. L., & Schweiker, S. S. (2021). 360 virtual laboratory tour with embedded skills videos.
Li, J., Yu, S., & Zhang, T. (2024). Learning Path Recommendation Based on Reinforcement Learning. *Engineering Letters*, *32*(9), 1823.
Muttaqin, N., & Lestari, J. D. K. (2024, October). Membangun Wawasan Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Institusi Pendidikan Tinggi: Pengembangan Small Private Online Course (SPOC) untuk Staff Administrasi. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan* (No. 1).
Nurhatmi, J. (2025). Teori multimedia pembelajaran: Landasan kognitif dan implikasi desain instruksional. *Al Habib: Jurnal Pendidikan Islam Dan Keguruan*, *1*(2), 91-117.
Ridho, H., Asmara, A., Safarati, N., Mutoharoh, M., Marnita, M., Haryono, H., & Natadiwijaya, I. F. (2025). *Desain Pembelajaran Inovatif Di Perguruan Tinggi*. Star Digital Publishing.
Ruskandi, K., Pratama, E. Y., & Asri, D. J. N. (2021). *Transformasi arah tujuan pendidikan di era Society 5.0*. CV. Caraka Khatulistiwa.
Seifan, M., Robertson, N., & Berenjian, A. (2020). Use of virtual learning to increase key laboratory skills and essential non-cognitive characteristics. *Education for Chemical Engineers*, *33*, 66-75.
Shah, U., Inguva, P., Tan, B., Yuwono, H., Bhute, V. J., Campbell, J., ... & Brechtelsbauer, C. (2021). CREATE labs–Student centric hybrid teaching laboratories. *Education for Chemical Engineers*, *37*, 22-28.
Siren, A., & Tzerpos, V. (2022). Automatic learning path creation using OER: a systematic literature mapping. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *15*(4), 493-507.
Soewardi, H., Kusrini, E., AP, R. A. A., Basumerda, C., Gunawan, A. S., & Parhan, B. D. L. (2026). Penguatan Budaya Keselamatan Laboratorium Universitas X Malaysia melalui Identifikasi Risiko dan Penerapan K3. *Journal of Appropriate Technology for Community Services*, *7*(1), 62-72.
Srinivasan, B., Iqbal, M. U., Shahab, M. A., & Srinivasan, R. (2022). Review of virtual reality (VR) applications to enhance chemical safety: from students to plant operators. *ACS Chemical Health & Safety*, *29*(3), 246-262.
Sukmawati, F., Ridhani, J., & Trisnaningsih, S. (2025). *Desain dan Evaluasi Bahan Ajar Digital: Panduan Lengkap dari Konsep ke Kelas*. Pradina Pustaka.
Viitaharju, P., Nieminen, M., Linnera, J., Yliniemi, K., & Karttunen, A. J. (2023). Student experiences from virtual reality-based chemistry laboratory exercises. *Education for Chemical Engineers*, *44*, 191-199.
Viitaharju, P., Yliniemi, K., Nieminen, M., & Karttunen, A. J. (2021). Learning experiences from digital laboratory safety training. *Education for Chemical Engineers*, *34*, 87-93.