

PENGEMBANGAN *VIRTUAL LABORATORY* BERBASIS PEMODELAN EKSPERIMEN INGENHOUSZ SEBAGAI REPRESENTASI DINAMIKA LAJU FOTOSINTESIS

Nur Hikmah, Adnan Adnan*, Muhammad Wiharto

Universitas Negeri Makassar, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Program Studi
Pendidikan Biologi, Jl. Mallengkeri Raya, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia

* corresponding author | email : adnan@unm.ac.id

Received: 1 Januari 2026

Accepted: 27 Februari 2026

Published: 28 Februari 2026

ABSTRAK

doi <https://dx.doi.org/10.17977/jum053v17i1p58-69>

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi kevalidan *Virtual Laboratory* berbasis pemodelan eksperimen Ingenhousz sebagai representasi dinamika laju fotosintesis untuk siswa SMA. Penelitian pengembangan ini menggunakan model Penelitian pengembangan ini menggunakan Model 4-D Thiagarajan yang dibatasi hingga tahap *development* (pengembangan), meliputi fase *define* (pendefinisian) beserta *design* (perancangan). Analisis awal di SMAN 2 Makassar menunjukkan bahwa pembelajaran fotosintesis masih didominasi metode konvensional, sementara peserta didik (97%) sangat membutuhkan media digital yang interaktif untuk memvisualisasikan konsep abstrak. *Virtual Laboratory* yang dikembangkan berbasis *website* dan memuat materi interaktif, simulasi eksperimen dengan manipulasi variabel (intensitas cahaya, suhu, konsentrasi CO₂), visualisasi data grafik *real-time*, serta evaluasi pembelajaran. Hasil validasi mencatatkan perolehan skor rata-rata ahli materi sebesar 4,69 beserta ahli media sebesar 4,71, mengkalkulasikan skor rata-rata total 4,70 berstatus valid, yang menunjukkan kategori valid. Temuan ini menegaskan bahwa *Virtual Laboratory* berbasis pemodelan eksperimen Ingenhousz layak digunakan sebagai sumber belajar alternatif yang interaktif, analitis, dan mampu mengatasi keterbatasan sarana praktikum biologi di sekolah.

Kata Kunci : *Virtual Laboratory, eksperimen Ingenhousz, laju fotosintesis, media pembelajaran, website*

This study aimed to develop and evaluate the validity of a Virtual Laboratory based on Ingenhousz experiment modeling as a representation of photosynthesis rate dynamics for senior high school students. This development research utilized Thiagarajan's 4-D Model restricted to the development stage, encompassing the define and design phases. Initial analysis at SMAN 2 Makassar indicated that photosynthesis learning is still dominated by conventional methods, while students (97%) have a high demand for interactive digital media to visualize abstract concepts. The developed website-based Virtual Laboratory integrates interactive materials, experiment simulations with variable manipulation (light intensity, temperature, CO₂ concentration), real-time graphical data visualization, and learning evaluation. Validation results recorded an average score of 4.69 from material experts and 4.71 from media experts, calculating a total average score of 4.70 (valid category). These findings confirm that the Ingenhousz experiment-based Virtual Laboratory is feasible as an interactive, analytical alternative learning resource capable of overcoming the limitations of physical biology laboratory facilities in schools.

Keywords : *Virtual Laboratory, Ingenhousz experiment, photosynthesis rate, learning media, website*

Perkembangan teknologi telah mendorong transformasi pembelajaran menuju pendekatan berbasis digital yang lebih fleksibel dan interaktif (Yanti, Adnan, & Nur., 2022; Garzón, 2021). Pemanfaatan *Information and Communication Technology* (ICT) memungkinkan integrasi berbagai sumber belajar serta meningkatkan efektivitas proses pembelajaran di berbagai jenjang pendidikan



<https://journal-fmipa.um.ac.id/index.php/jpb/index>



jpb.journal@um.ac.id

(Kurnia, Adnan, & Dzulkarnain, 2019; Msambwa, Daniel, & Cai, 2024). Media berbasis ICT memegang peranan krusial untuk membantu peserta didik mengonkretkan konsep biologi yang kompleks dan abstrak melalui sajian visual serta interaktivitas yang dinamis (Aripin, 2012; Adnan *et al.*, 2014; Adnan *et al.*, 2019; Hiola & Muis, 2023; Muis & Bahri, 2018). Pembelajaran biologi yang efektif tidak hanya menuntut penguasaan konsep secara teoretis, tetapi juga memerlukan pendekatan visual, sistematis, dan berbasis pengalaman agar peserta didik mampu membangun pemahaman konseptual yang mendalam terkait hubungan antarvariabel dalam sistem biologis sekaligus melatih literasi sains (Astuti & Najuba, 2024; Sulastri *et al.*, 2023; Wiharto, 2013; Adnan & Bahri, 2018; Adnan *et al.*, 2021). Pendekatan berbasis teknologi virtual juga memungkinkan visualisasi fenomena kompleks yang sulit diamati secara langsung serta meningkatkan pengalaman belajar yang imersif dan interaktif (Zhou *et al.*, 2025). Salah satu materi yang sangat menuntut kemampuan tersebut adalah fotosintesis, khususnya pada konsep dinamika laju fotosintesis yang melibatkan interaksi antara intensitas cahaya, suhu, dan ketersediaan karbon dioksida (Jančaříková & Jančařík, 2022; Vančugovienė *et al.*, 2024).

Meskipun urgensi pemahaman dinamis ini tinggi, praktik pembelajaran di sekolah masih dihadapkan pada keterbatasan sarana praktikum, waktu, serta konsistensi hasil pengamatan (Arsal, A. F., *et al.*, 2017). Data empiris menunjukkan bahwa hanya 22% sekolah yang memiliki laboratorium biologi tersendiri, sementara sisanya masih bergabung dengan laboratorium kimia atau fisika (Hasruddin & Rezeqi, 2014). Keterbatasan lingkungan dan organisasi ini menyebabkan 34,0% pelaksanaan praktikum masih berlangsung pola "*cookbook style*", di mana peserta didik hanya mengikuti prosedur tanpa melakukan analisis dan refleksi ilmiah lebih tajam (Oliveira & Bonito, 2023). Kondisi ini dapat memicu miskonsepsi yang persisten, resisten terhadap pengajaran standar, dan pada akhirnya menghambat kemampuan berpikir kritis peserta didik (Opre, Pinte, & Lucu, 2025).

Sejumlah penelitian telah membuktikan efektivitas pendekatan digital guna mengatasi persoalan tersebut. *Virtual Laboratory* terbukti mampu menyediakan lingkungan belajar aman, fleksibel, serta memungkinkan eksplorasi parameter eksperimen yang lebih luas dibandingkan laboratorium konvensional (Zaturrahmi *et al.*, 2020; Berenjian *et al.*, 2026; Kismawan, 2022; Guzmán *et al.*, 2025). Penggunaan website interaktif memiliki tingkat kevalidan beserta kepraktisan tinggi guna meningkatkan keterlibatan peserta didik (Jufri, 2026; Abdulwahed *et al.*, 2021). Kehadiran media visual interaktif terbukti sangat krusial karena mampu mendorong proses pembelajaran biologi menjadi lebih efektif dan adaptif (Adnan *et al.*, 2025). Representasi visual beserta manipulasi variabel secara real-time pada platform *Virtual Laboratory* juga terbukti signifikan guna meningkatkan pemahaman konseptual, keterampilan berpikir analitis, serta kemampuan pengambilan keputusan peserta didik (Abdelmoneim, R., *et al.*, 2022; Herunata *et al.*, 2022). Terdapat kesenjangan penelitian di mana belum ada *Virtual Laboratory* yang secara simultan memadukan pemodelan eksperimen, visualisasi dinamika laju fotosintesis berbasis data, manipulasi variabel, serta evaluasi pembelajaran pada satu platform berbasis web terpadu (Chan *et al.*, 2021).

Menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan *Virtual Laboratory* berbasis pemodelan eksperimen Ingenhousz yang diintegrasikan di dalam sebuah website pembelajaran. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada penggabungan materi interaktif, pemodelan simulasi eksperimen, representasi visualisasi data berwujud grafik, serta evaluasi terpadu sebagai satu kesatuan pendekatan instruksional. Representasi materi teori disajikan lewat tata letak dinamis berwujud *grid of card*, *orbit carousel*, dan diagram molekuler reaksi terang dan Siklus Calvin responsif. Fitur memanipulasi variabel eksperimen Ingenhousz secara spesifik, meliputi pengaturan sakelar cahaya (*on/off*), jarak sumber cahaya, modifikasi suhu air lewat fitur *drag and drop* material es batu atau air panas, variasi takaran senyawa NaHCO_3 , hingga kebebasan pemilihan ragam tanaman uji seperti *Hydrilla*, *Elodea*, *Cabomba*, dan *Ceratophyllum*. Fasilitas *Experiment log viewer* bersinergi kuat bersama instrumen visualisasi analitik guna merekam seluruh parameter manipulasi peserta didik, untuk dikonversi seketika menjadi grafik garis perbandingan laju produksi gelembung oksigen secara real-time. Kehadiran website ini menjadi solusi taktis atas keterbatasan fasilitas fisik di sekolah, tetapi juga esensial dalam membekali peserta didik keterampilan berpikir analitis *21st-century skills*. Melalui inovasi ini, diharapkan peserta didik tidak hanya menerima informasi pasif.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) berbasis Model 4-D Thiagarajan yang dimodifikasi menjadi tiga tahap, mencakup tahapan pendefinisian (*define*), perancangan (*design*), dan pengembangan (*development*). Tahap penyebaran (*disseminate*) dieksklusi karena target penelitian terbatas pada uji validitas rancangan produk. Subjek penelitian melibatkan peserta didik kelas XI SMAN 2 Makassar pada fase analisis kebutuhan awal, bersandingan dengan tiga validator ahli materi beserta media pada tahap uji kelayakan. Proses pengumpulan data dieksekusi melalui teknik observasi, pengisian angket kebutuhan, beserta lembar penilaian produk. Penilaian tim ahli tersebut berfokus 12 aspek.

Seluruh data hasil validasi dianalisis secara deskriptif kuantitatif melalui penghitungan skor rata-rata. Penentuan Skor Validasi Aspek (SVA) merujuk rumusan Sudjana dan Rivai (2007) lewat persamaan:

$$SV A = \frac{\sum Skor Validator}{\sum item}$$

Keterangan: SVA merepresentasikan skor validasi setiap aspek, merupakan jumlah skor pemberian validator, bersandingan dengan sebagai representasi jumlah item penilaian tiap aspek. Tahapan selanjutnya berfokus menentukan Skor Validasi Sumber belajar (SVS) menggunakan rumus:

$$SV S = \frac{\sum Skor semua aspek}{\sum aspek}$$

Keterangan: SVS mewakili skor validasi sumber belajar, merupakan jumlah skor keseluruhan aspek, beriringan sebagai representasi jumlah aspek penilaian.

Kriteria penilaian diukur merujuk pedoman adaptasi Sugiyono (2015) berwujud lima tingkatan, yakni sangat valid ($Va = 5$), valid ($4 \leq Va < 5$), cukup valid ($3 \leq Va < 4$), kurang valid ($2 \leq Va < 3$), dan tidak valid ($1 \leq Va < 2$). Produk *Virtual laboratory* ini diputuskan layak terimplementasi pada proses pembelajaran apabila akumulasi hasil analisis minimal menyentuh kriteria valid.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap Define

Tahap pendefinisian diawali dengan analisis kondisi nyata di SMAN 2 Makassar, khususnya pada pelaksanaan pembelajaran dan praktikum biologi materi fotosintesis. Fakta di lapangan menunjukkan bahwa pembelajaran masih didominasi metode konvensional (ceramah dan buku teks). Meskipun sekolah memiliki sarana, pelaksanaan praktikum eksperimen Ingenhousz dihadapkan pada keterbatasan alat, bahan, alokasi waktu, serta kondisi kelas, sehingga peserta didik kesulitan memahami hubungan antarvariabel (intensitas cahaya, suhu, dan ketersediaan karbon dioksida) terhadap laju fotosintesis. Hasil analisis kebutuhan peserta didik yang diperoleh melalui angket disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Kebutuhan Peserta Didik

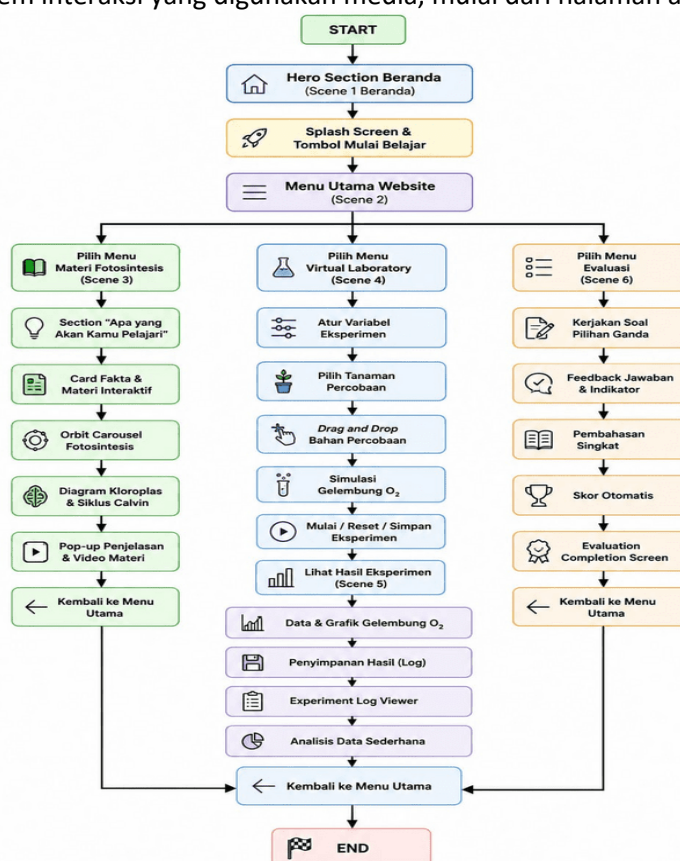
Indikator	Pernyataan	Mean	Persentase	Kategori
Minat terhadap Pembelajaran Biologi	P1	5.00	100%	Sangat Baik
Kesulitan Memahami Materi Fotosintesis	P2	3.33	66,67%	Cukup Baik
Kesesuaian Media Pembelajaran	P3	3.10	62%	Cukup Baik
Pemahaman Materi melalui Penjelasan Guru	P4	3.43	68,67%	Cukup Baik
Penggunaan Media oleh Guru	P5	3.83	76,67%	Baik
Sumber Belajar yang Digunakan	P6	3.50	70%	Baik
Representasi Visual Materi	P7	3.43	68,67%	Cukup Baik
Kebutuhan Visualisasi Praktikum	P8	3.57	71,33%	Baik
Keterbatasan Praktikum di Sekolah	P9	3.87	77,33%	Baik
Pemanfaatan Teknologi dalam Pembelajaran	P10	5.00	100%	Sangat Baik
Ketersediaan Perangkat Teknologi	P11	5.00	100%	Sangat Baik

Ketertarikan terhadap <i>Virtual Laboratory</i>	P12	4.90	98%	Sangat Baik
Pengetahuan tentang <i>Virtual Laboratory</i>	P13	3.93	78,67%	Baik
Pengalaman Menggunakan <i>Virtual Laboratory</i>	P14	2.97	59,33%	Cukup Baik
Kebutuhan Pengembangan <i>Virtual Laboratory</i>	P15	4.85	97%	Sangat Baik

Tabel 1, analisis kebutuhan di SMAN 2 Makassar mengonfirmasi urgensi pengembangan media biologi adaptif menyusul temuan kesenjangan tajam. Kesiapan perangkat teknologi beserta pemanfaatannya pada aktivitas akademik menyentuh angka maksimal (100%), berlawanan arah terhadap tingkat pemahaman materi fotosintesis yang tergolong sulit bagi mayoritas peserta didik (66,67%). Akar kesulitan ini bersumber dari tingginya keterbatasan pelaksanaan praktikum riil (77,33%), diperparah ketidakmampuan media konvensional merepresentasikan dinamika eksperimen secara visual. Kondisi tersebut merugikan penguasaan konsep eksperimen Ingenhousz yang menuntut ketajaman analisis terkait hubungan antarvariabel beserta fluktuasi laju fotosintesis. Kesenjangan fasilitas kognitif beserta tingginya kebutuhan visualisasi praktikum (71,33%) memicu preferensi masif terhadap inovasi digital. Fakta lapangan ini terbukti lewat besarnya ketertarikan (98%) sekaligus dukungan peserta didik terhadap pengembangan *Virtual laboratory* (97%) guna mengatasi minimnya pengalaman simulasi eksperimen ingenhousz (59,33%).

Tahap Design

Tahap perancangan merupakan kunci untuk memastikan kompleksitas materi fotosintesis. Langkah pertama adalah *Flowchart* menggambarkan hubungan antar halaman, alur perpindahan antar section, serta sistem interaksi yang digunakan media, mulai dari halaman awal hingga selesai.



Gambar 1. Flowchart Virtual Laboratory Fotosintesis

Berdasarkan rancangan alur navigasi pada Gambar 1, dilakukan pemetaan implementasi materi dan perancangan *storyboard* untuk menstrukturkan *Virtual Laboratory* ke dalam enam *scene* utama. Rincian komponen dan aktivitas pengguna disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pemetaan Materi dalam Virtual Laboratory

Menu Virtual Laboratory	Materi	Bentuk Aktivitas dalam Website
Materi Fotosintesis	Pengertian fotosintesis	Membaca materi interaktif dan deskripsi konsep dasar fotosintesis
Materi Fotosintesis	Faktor yang memengaruhi fotosintesis	Eksplorasi informasi melalui <i>card</i> materi dan visualisasi interaktif
Materi Fotosintesis	Reaksi terang dan reaksi gelap	Tampilan materi dan ilustrasi proses fotosintesis
Materi Fotosintesis	Diagram kloroplas dan siklus Calvin	Visualisasi proses fotosintesis melalui diagram interaktif
Materi Fotosintesis	<i>Orbit carousel</i> fotosintesis	Eksplorasi materi melalui <i>orbit carousel</i> interaktif
Virtual Laboratory	Eksperimen Ingenhousz	Simulasi eksperimen virtual menggunakan tabung percobaan
Virtual Laboratory	Pengaruh intensitas cahaya	Manipulasi jarak lampu dan pengamatan gelembung O ₂
Virtual Laboratory	Pengaruh suhu	Pengaturan suhu menggunakan air panas dan es batu
Virtual Laboratory	Pengaruh CO ₂ (NaHCO ₃)	Penambahan variabel CO ₂ melalui fitur <i>drag and drop</i>
Virtual Laboratory	Jenis tanaman percobaan	Pemilihan tanaman <i>Hydrilla</i> , <i>Elodea</i> , <i>Cabomba</i> , dan <i>Ceratophyllum</i>
Virtual Laboratory	Dinamika laju fotosintesis	Pengamatan jumlah gelembung O ₂ secara visual dan real-time
Hasil Eksperimen	Data hasil pengamatan	Menampilkan tabel data dan grafik gelembung O ₂
Hasil Eksperimen	Analisis hasil eksperimen	Penyimpanan log hasil eksperimen dan visualisasi data
Evaluasi	Pemahaman konsep fotosintesis	Pengerjaan soal pilihan ganda interaktif
Evaluasi	Analisis Hasil Belajar	<i>Feedback</i> jawaban, pembahasan dan skor otomatis dan piala skor.

Penggunaan desain *grid of card*, *orbit carousel*, dan *drag and drop* bertujuan untuk menurunkan *cognitive load* (beban kognitif) peserta didik dengan memecah informasi kompleks menjadi fragmen visual interaktif yang terstruktur.

Tahap Development

Tahap pengembangan difokuskan pada realisasi pengkodean berbasis *web* menggunakan platform Replit.ai, dilanjutkan dengan validasi ahli (*Expert Appraisal*). Validasi dilakukan oleh dua dosen ahli materi dan satu dosen ahli media. Berdasarkan masukan ahli pada peninjauan awal, produk mengalami perbaikan krusial.

Tahap awal *Virtual Laboratory* mengungkap sejumlah kekurangan substansial antarmuka beserta fungsionalitas sistem. Rancangan *frontend* awal masih menerapkan nomenklatur judul berskala umum, menyajikan materi seketika meniadakan halaman pengantar orientasi, gambar gelas beaker belum sesuai dengan eksperimen ingenhousz, corong bentuknya masih tidak nampak jelas, tabung reaksi belum tersedia didalam gelas beaker. Tata letak konten teoretis tampak monoton berformat acak, diperparah ketiadaan informasi kredit pengembang. Spesifikasi metrik jarak sumber cahaya belum tercantum. Komponen diagram kloroplas beserta skema molekuler Siklus Calvin bersifat statis mengabaikan fitur klik penampil penjelasan, beriringan tata letak *orbit carousel* tak beraturan. Beranjak menuju modul eksperimen, susunan visual alat praktikum belum merepresentasikan kaidah riil Ingenhousz. Keterbatasan interaktivitas simulasi mencakup ketidakjelasan parameter jarak cahaya, kekaburan takaran panel bahan uji, ketiadaan mekanisme pengaplikasian material interaktif, hingga minimnya opsi ragam tanaman percobaan. Defisit fungsionalitas berlanjut pada tahapan akhir instruksional akibat penyajian rekaman berwujud tabel statis, ketiadaan instrumen konversi grafik,

serta sistem evaluasi meniadakan fasilitas umpan balik akurasi jawaban.

Tahap Akhir Revisi, perubahan yang terjadi selama proses pembimbingan dan validasi ahli berfokus pada penyempurnaan arsitektur pengkodean berbasis web menggunakan platform Replit app. Penyempurnaan dieksekusi secara komprehensif menasar aspek antarmuka (*User Interface*) hingga fungsionalitas sistem simulasi. Tahap awal perbaikan mencakup penetapan nama judul spesifik bersandingan dengan penambahan halaman pengantar beranda guna mengarahkan orientasi.

Tata letak penyajian materi statis ditransformasi menjadi struktur *grid of card* interaktif serta *orbit carousel* dinamis. Diagram kloroplas beserta detail molekuler Siklus Calvin turut dibekali fitur klik berwujud *pop-up* penjelasan singkat terstruktur. Beranjak ke *Virtual Laboratory*, visualisasi instrumen dasar direkonstruksi menyerupai susunan riil rangkaian eksperimen Ingenhousz. Optimalisasi fungsionalitas pada tahapan ini mencakup spesifikasi parameter metrik jarak sumber cahaya, reposisi strategis panel takaran bahan, hingga integrasi fitur drag and drop berindikator visual khusus material es batu, air panas, dan senyawa NaHCO_3 .

Peserta didik juga diberikan kebebasan otoritas melalui perluasan opsi ragam tanaman uji meliputi *Hydrilla*, *Elodea*, *Cabomba*, serta *Ceratophyllum*. Puncak penyempurnaan bermuara pada penguatan aspek literasi data melalui kehadiran fitur penyimpanan log parameter eksperimen, konversi hasil pengamatan berwujud representasi grafik analitik, serta penyempurnaan instrumen evaluasi berumpan balik warna indikator tingkat akurasi jawaban terintegrasi card pembahasan interaktif Media dievaluasi menggunakan instrumen yang mencakup 4 aspek penilaian. Hasil validasi ahli disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Validasi Ahli Media terhadap *Virtual Laboratory*

No	Aspek penilaian	Skor Rata-rata	Keterangan
1	Kualitas Tampilan Antarmuka (<i>User Interface/UI</i>)	4.67	Valid
2	Fungsionalitas Sistem	4.60	Valid
3	Kualitas Pengalaman Pengguna (<i>User Experience/UX</i>)	4.75	Valid
4	Interaktivitas Eksperimen	4.83	Valid
Rata-rata Total		4,71	Valid

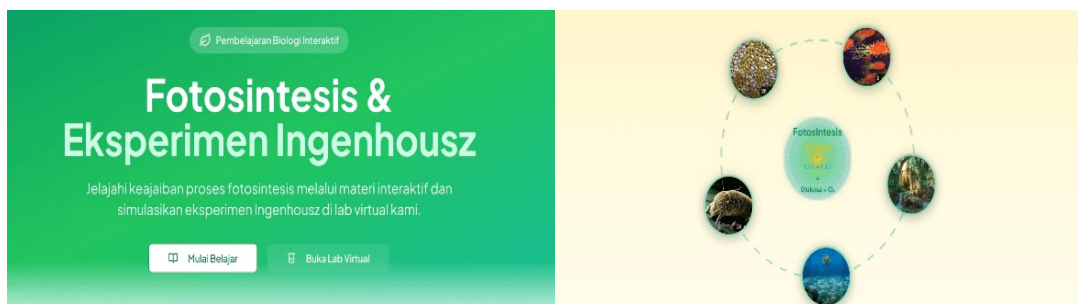
Evaluasi kelayakan instrumen berlanjut menasar aspek substansi keilmuan, bahasa, beserta kelayakan pedagogik melalui tahapan validasi ahli materi. Rincian perolehan skor ranah materi terkumpul pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Validasi Ahli Materi terhadap *Virtual Laboratory*

No	Aspek Penilaian	Skor Rata-rata	Keterangan
1	Kelayakan Materi	4.75	Valid
2	Penyajian Materi	4.67	Valid
3	Bahasa	4.67	Valid
4	Evaluasi Pembelajaran	4.33	Valid
5	Pemecahan Masalah Ilmiah	4.83	Valid
6	Analisis Data Eksperimen Ingenhousz	4.89	Valid
7	Pemahaman Konsep Fotosintesis	4.56	Valid
8	Transfer Konsep Ke Dunia Nyata	4.78	Valid
Rata-rata Total		4,69	Valid

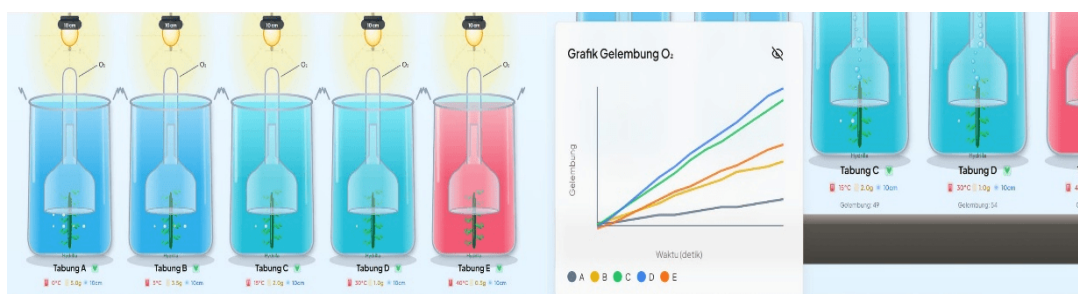
Merujuk Tabel 3 beserta Tabel 4, kalkulasi hasil validasi pakar media (4,71) bersandingan pakar materi (4,69) menetapkan perolehan skor rata-rata total produk sebesar 4,70 berkategori valid. Pencapaian kumulatif ini merepresentasikan sinergi optimal antara kelayakan desain antarmuka visual beserta akurasi substansi keilmuan biologi. Kesesuaian instrumen terhadap standar operasional pembelajaran turut terkonfirmasi secara meyakinkan melalui rentang skor tersebut. Sorotan paling signifikan dari ekstraksi data empiris ini terletak pada tingginya angka pencapaian aspek Analisis Data

Eksperimen Ingenhousz (4,89) beriringan metrik Interaktivitas Eksperimen (4,83). Dominasi kedua metrik krusial ini memberikan afirmasi kuat mengenai posisi produk pengembangan ini. *Virtual laboratory* tersebut terbukti tidak sekadar menduplikasi modul cetak ke medium digital, melainkan sukses menghadirkan ekosistem simulasi aktif guna menstimulasi kapabilitas peserta didik saat mengekstraksi data kuantitatif sekaligus merumuskan simpulan saintifik berbasis bukti grafik.



Gambar 2. Tampilan Fitur Interaktif Simulasi Eksperimen Ingenhousz

Tingginya penilaian pada aspek analisis dan interaktivitas tersebut membuktikan bahwa media tidak sekadar memindahkan modul cetak ke layar digital. Perbedaan paling mendasar dari media ini terletak pada integrasi sistem *Experiment log viewer*. Saat peserta didik secara presisi memanipulasi variabel pada simulasi (Gambar 2) seperti menjauhkan sumber cahaya atau mengubah suhu, sistem merespons dengan menampilkan perubahan jumlah gelembung oksigen secara dinamis.



Gambar 3. Visualisasi Grafik Data Hasil Eksperimen

Data pengamatan tersebut kemudian direkam dan divisualisasikan berwujud grafik perbandingan (Gambar 3). Pendekatan interaktif ini selaras bersama teori inkuiri terbimbing. Kemampuan peserta didik saat menginterpretasi data dan menarik kesimpulan berdasarkan pola grafik terbukti mengasah keterampilan pemecahan masalah ilmiah (memperoleh skor 4,83) (Gultom *et al.*, 2025; Abdelmoneim *et al.*, 2022). Gabungan antara validasi keilmuan ketat beserta interaktivitas antarmuka tinggi menegaskan posisi *Virtual Laboratory* ini sebagai sumber belajar alternatif efektif.

Skor sempurna pada aspek desain visual (5,0) menunjukkan penerapan prinsip keterpaduan multimedia secara nyata pada rancangan media *Virtual Laboratory* ini. Keterpaduan teks, gambar, dan animasi diwujudkan melalui penyajian artikel berbasis teks ringkas bersusun hierarkis, berpadu kuat bersama pemodelan eksperimen Ingenhousz guna memvisualisasikan konsep inti fotosintesis, seperti proses oksigen beserta hubungan sebab-akibat antarvariabel lingkungan. Infografis dan simulasi tersebut dirancang menggunakan ilustrasi, ikon, dan warna konsisten guna membantu peserta didik mengaitkan informasi verbal terhadap representasi visual, sebagaimana kaidah pengolahan ganda pada teori multimedia learning (Mayer, 2021; Nurhatmi, 2025; Fiorella & Mayer, 2023).

Kombinasi materi teoretis, visualisasi *orbit carousel*, dan simulasi interaktif memfasilitasi peserta didik memproses informasi melalui jalur verbal beserta visual secara simultan. Proses ini membangun representasi mental lebih tangguh terhadap konsep fotosintesis yang bersifat abstrak (Mayer, 2021; Meronda *et al.*, 2025). Temuan ini sejalan dengan Ilham *et al.* (2023) terkait pemanfaatan media pembelajaran berbasis teknologi berintegrasi unsur visual kuat guna mempermudah transfer informasi sekaligus meningkatkan retensi pengetahuan peserta didik.

Fitur simulasi eksperimen Ingenhousz pada satu platform website mempermudah peserta didik saat mengeksekusi eksplorasi mandiri (Kusmawan, 2022). Fakta tersebut berkesesuaian dengan

pandangan Munadi (2022) mengenai kriteria media pembelajaran ideal berupa kesederhanaan operasional, kemudahan akses, serta signifikansi dukungan terhadap pencapaian tujuan pembelajaran. Keberterimaan media ini diperkuat oleh Sadiman (2014) terkait fungsi media sebagai sarana penjernih pesan sekaligus peningkat interaksi bermakna antarsiswa.

Respons positif melalui skor validasi pada aspek analisis data beserta pemecahan masalah ilmiah (4,89 dan 4,83) mengindikasikan penerimaan sangat baik terhadap *Virtual Laboratory* ini sebagai fasilitator belajar mandiri. Peserta didik menilai media ini sangat menarik berkat tampilan visual informatif, kemudahan navigasi, beserta fleksibilitas akses guna mendukung pelaksanaan pembelajaran tanpa batasan ruang dan waktu. Fitur multimedia simulasi berbasis grafik membantu peserta didik memahami materi secara lebih cepat. Konten berbasis website turut menyajikan pengalaman belajar personal berkebalikan dari karakter pembelajaran konvensional yang cenderung pasif. Temuan empiris ini selaras bersama riset Fitrianiingsih *et al.* (2023) beserta Wulandari *et al.* (2023) terkait kemampuan media pembelajaran berbasis website interaktif guna mendorong motivasi dan keterlibatan peserta didik secara signifikan pada proses belajar. Hal ini merespons langsung urgensi inovasi pedagogik sorotan Adnan *et al.* (2025) beserta Abdulwahed *et al.* (2021).

Gabungan hasil validasi ahli membuktikan pemenuhan indikator krusial media pembelajaran pada *Virtual Laboratory* ini, mencakup keabsahan isi beserta keberterimaan teknis produk. Fakta ini sesuai bersama prinsip penelitian dan pengembangan (Sugiyono, 2015) mengenai syarat kelayakan produk pendidikan berupa ketuntasan tahap validasi ahli bersandingan dengan respons positif penilaian. Berbekal fleksibilitas format beserta kevalidan tinggi, *Virtual Laboratory* ini memiliki potensi besar memperkaya praktik pembelajaran biologi untuk menggantikan dominasi metode konvensional

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Merujuk hasil penelitian beserta pembahasan, pengembangan *Virtual laboratory* berbasis pemodelan eksperimen Ingenhousz terbukti memenuhi kriteria valid. Evaluasi pakar mencatatkan perolehan skor rata-rata ahli materi sebesar 4,69 bersandingan ahli media sebesar 4,71, mengkalkulasikan nilai rata-rata **total 4,70** berkategori **valid**. Seluruh indikator penilaian, meliputi kualitas antarmuka visual, fungsionalitas sistem, kedalaman substansi keilmuan, beserta instrumen pemecahan masalah analitis, telah menuntaskan standar kualifikasi kelayakan media pembelajaran biologi secara meyakinkan.

Saran

Penelitian ini terbatas pada tahap pengembangan produk hingga uji validitas ahli, bagi peneliti selanjutnya yang ingin mengembangkan media ini lebih lanjut, disarankan untuk melakukan uji kepraktisan dan uji efektivitas guna mengetahui dampak media terhadap hasil belajar siswa secara kuantitatif. Pengembangan fitur dapat diperluas pada topik biologi lain yang bersifat abstrak, serta penambahan variasi soal pada evaluasi untuk meningkatkan kualitas konten media komprehensif.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdelmoneim, R., Hassounah, E., & Radwan, E. (2022). Effectiveness of virtual laboratories on developing expert thinking and decision-making skills among female school students in Palestine. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 18(12), em2199.
- Abdulwahed, M., Jaworski, B., & Crawford, A. (2021). Impact of remote experimentation, interactivity and platform effectiveness on laboratory learning outcomes. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 18, 1–22. <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00272-z>
- Adnan, & Bahri, A. (2018, January). Beyond effective teaching: Enhancing students' metacognitive skill through guided inquiry. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 954, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Adnan, A., Abimanyu, S., Bundu, P., & Arsyad, N. (2014). Enhance Cognitive Learning Of Junior High-School Students Through The Implementation Of Constructivist Models Of Learning Biology-Based ICT (ICT-Based MPBK). *International Journal Of Academic Research*, 6(6), 55-62.

- Adnan, A., Mulbar, U., & Bahri, A. (2021). Scientific literacy skills of students: Problem of biology teaching in junior high school in south sulawesi, indonesia. *International Journal of Instruction*, 14(3), 847-860.
- Adnan, A., Saenab, S., Rahmatullah, R., Almunawarah, R., Sahira, S., Aulia, M. A., & Jannah, H. N. (2025). Citizen science project (CSP) learning model as innovation learning in improving 21st century skills. *BIO-INOVED: Jurnal Biologi-Inovasi Pendidikan*, 7(1), 27-36.
- Adnan, Faisal, & Marliyah, S. (2012). Studi Motivasi Siswa SMP dan Sederajat di Kota Makassar pada Mata Pelajaran IPA Biologi. *Jurnal Bionature*. 13(2). 103-107.
- Adnan, Muharram, & Jihadi, A. (2019). Pengembangan E-book Biologi Berbasis Konstruktivistik untuk Meningkatkan Motivasi Belajar Siswa SMA Kelas XI. *Indonesian Journal of Educational Studies (IJES)*. 22(2). 112-119.
- Adnan, Ristiana, E., GH, M., & Aldi, S. (2025). Practicality test of static infographics on Biology material FMIPA UNM. *Jurnal Biotek*, 13(2), 154-171. <https://doi.org/10.24252/jb.v13i2.60308>
- Al-nakhle, H. (2022). The effectiveness of scenario-based *Virtual Laboratory simulations* to improve learning outcomes and scientific report writing skills. *PLOS ONE*, 17(11), e0277359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277359>
- Antonelli, D., Christopoulos, A., Laakso, M.-J., Dagienė, V., Juškevičienė, A., Masiulionytė-Dagienė, V., Stylios, C. (2023). A virtual reality laboratory for blended learning education: *Design, implementation and evaluation*. *Education Sciences*, 13(5), 528.
- Aripin, I., & Suryaningsih, Y. (2019). Augmented Reality dalam Pembelajaran Biologi. In *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan* (Vol. 1, pp. 662-668).
- Arsal, A. F., Dirawan, G. D., Hala, Y., Tahmir, S., Arifin, A. N., & Bahri, A. (2017). Identifikasi sumber belajar pada pembelajaran berbasis lingkungan di Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Makassar. *Jurnal Sainsmat*, VI(2), 73-83.
- Astuti, R. and Najuba, N. (2024). Penggunaan model pembelajaran contextual teaching and learning (ctl) untuk meningkatkan hasil belajar dan keaktifan siswa. *Prima Magistra: Jurnal Ilmiah Kependidikan*, 5(1), 1-7. <https://doi.org/10.37478/jpm.v5i1.3141>
- Berns, R. G., & Erickson, P. M. (2001). Contextual teaching and learning: Preparing students for the new economy. National Dissemination Center for Career and Technical Education.
- Chan, C. K. Y., Fong, E. T. Y., Luk, L. Y. Y., & Ho, R. (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>
- Dawadi, R., Shakya, A., & Shrestha, S. (2025). *Virtual laboratories* in STEM education: A scoping literature review. *Engineering Proceedings*, 112(1), 17. <https://doi.org/10.3390/engproc2025112017>
- de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and *virtual laboratories* in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305–308. <https://doi.org/10.1126/science.1230579>
- Efendy, B., Lanos, M., Setiawan, E., & Gani, R. (2023). Experts' judgment and perception of android-based materials for sports massage learning. *Journal Sport Area*, 8(1), 95-104. [https://doi.org/10.25299/sportarea.2023.vol8\(1\).10547](https://doi.org/10.25299/sportarea.2023.vol8(1).10547)
- Ertmer, P. A., & Newby, T. J. (1993). Behaviorism, cognitivism, constructivism: Comparing critical features from an instructional *design* perspective. *Performance Improvement Quarterly*, 6(4), 50-72. <https://doi.org/10.1111/j.1937-8327.1993.tb00605.x>
- Fermani, M. and Γεωργίου, M. (2023). Teaching Photosynthesis Using An Inquiry-Based Approach Via A Digital Educational Platform To Promote Students' Understanding. *European Journal of Education Studies*, 10(12). <https://doi.org/10.46827/ejes.v10i12.5088>
- Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2023). The past, present, and future of the *cognitivetheory* of multimedia learning. *Educational Psychology Review*, 35, 8. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1>
- Flavell, J. H. (1979). Metacognition and *cognitivemonitoring*: A new area of cognitive-*developmental* inquiry. *American Psychologist*, 34(10), 906-911. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.34.10.906>
- Gultom, T., Sinaga, R., & Sipayung, M. (2025). The effect of inquiry-based *Virtual Laboratory* on

- students' science process skills. *Jurnal Eduscience*, 12(1), 1-10.
- Guzmán, J. L., Rodríguez-Miranda, E., Berenguel, M., Acien, F. G., & García-Gallardo, J. (2025). A web-based *virtual lab* for microalgae raceway photobioreactors: Enhancing modeling and control education. *IFAC-PapersOnLine*, 59(7), 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.08.019>
- Hamid, M., Buhari, S., Noor, H., Azizan, N., Malek, K., Asmawi, U., & Nor, N. (2024). *Development and validation of D-PATH website to improve hypertension management among hypertensive patients in Malaysia*. *Digital Health*, 10. <https://doi.org/10.1177/20552076241242661>
- Hamka, L., Ristiana, E., Adnan, Muis, A., Arsal, A. F., Muliana, G. H., & Yasin, Y. K. (2022). Pelatihan pembuatan media pembelajaran berbasis Canva untuk guru SD Negeri Mandai Kota Makassar. *JHP2M*, 1(1), 71-76.
- Hasruddin, & Rezeqi, S. (2014). Analisis pelaksanaan praktikum biologi dan permasalahannya di SMA Negeri se Kabupaten Karo. *Jurnal Pendidikan Biologi*, 4(1), 17-32.
- Herunata, H., Fadilah, R. A., & Affriyenni, Y. (2022). The *development* of Adobe Flash-based *Virtual Laboratory* to improve understanding on photosynthesis in junior high school. *AIP Conference Proceedings*, 2600, 060011. <https://doi.org/10.1063/5.0112181>
- Hiola, S. F., & Muis, A. (2023). Analisis kebutuhan guru dan peserta didik terhadap pengembangan bahan ajar Biologi di SMA. *Prosiding Seminar Nasional Dies Natalis ke-62*, 715-720.
- Jančaříková, K., & Jančařík, A. (2022). How to teach photosynthesis? A review of academic research. *Sustainability*, 14(20), 13529. <https://doi.org/10.3390/su142013529>
- Johar, S., & Shanwal, V. K. (2023). The Evolving Role of a Teacher: A Sage to Facilitator. *UNIVERSITY NEWS*, 61, 156.
- Johnson, D. W., Johnson, R. T., & Smith, K. A. (1991). *Active learning: Cooperation in the college classroom*. Interaction Book Company.
- Killow, V., Lin, J., & Ingledew, P. (2022). The Past and Present of Breast Cancer Resources: A Re-evaluation of the Quality of Online Resources After Eight Years. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.28120>
- Kroeze, K., Berg, S., Veldkamp, B., & Jong, T. (2021). Automated Assessment of and *Feedback* on Concept Maps During Inquiry Learning. *Ieee Transactions on Learning Technologies*, 14(4), 460-473. <https://doi.org/10.1109/tlt.2021.3103331>
- Kurnia, N., Adnan, & Dzulkarnain, A. F. (2019). Pengembangan Multimedia Interaktif Biologi Kelas XI Untuk Meningkatkan Motivasi dan Kemandirian Belajar Peserta Didik.
- Kusmawan, U. (2022). A *virtual lab* as a vehicle for active learning through distance education. *International Journal of Research in STEM Education*, 4(2), 18–38. <https://doi.org/10.31098/ijrse.v4i2.1188>
- Mahiroh, F., Suryanti, S., & Azizah, U. (2024). Website-Based Learning Media to Improve Elementary School Students' Reproductive Health Literacy. *International Journal of Elementary Education*, 8(1), 167-177. <https://doi.org/10.23887/ijee.v8i1.63786>
- Mahmud, A. P. M., Mursalin, M., Abdjul, T., Pikoli, M., Yusuf, M., & Odja, A. H. (2025). A *Virtual Laboratory* to Improve the Effectiveness of Interactive Learning Media on Science Process Skills and Science Literacy in the Competency Aspects of Dynamic Electricity. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(11), 1441–1450. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i11.13531>
- Mahmud, A. P. M., Mursalin, M., Abdjul, T., Pikoli, M., Yusuf, M., & Odja, A. H. (2025). A *Virtual Laboratory* to Improve the Effectiveness of Interactive Learning Media on Science Process Skills and Science Literacy in the Competency Aspects of Dynamic Electricity. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(11), 1441–1450. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i11.13531>
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Adding immersive virtual reality to a science lab *simulation* causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- Makransky, G., Thisgaard, M. W., & Gadegaard, H. (2016). Virtual *simulations* as preparation for lab exercises: Assessing learning of key laboratory skills in microbiology and improvement of essential non-cognitiveskills. *PLOS ONE*, 11(6), e0155895

- Meronda, D. A., Widarti, H. R., & Yahmin, Y. (2025). *Virtual laboratories in science education: A systematic review of effectiveness on conceptual understanding and learning outcomes*. Jurnal Pendidikan MIPA, 26(3).
- Msambwa, M. M., Daniel, K., & Cai, L. (2024). Integration of information and communication technology in secondary education for better learning: A systematic literature review. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 101203. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.101203>
- Muis, A., & Bahri, A. (2018). Respon guru dan siswa SMA terhadap penggunaan Quipper School dalam blended learning pada pembelajaran Biologi. *Jurnal Biology Teaching and Learning*, 1(2), 162-171.
- Muñoz, J. and Letouzé, P. (2022). Some considerations on the principles of the *Cognitive Theory of Multimedia Learning* for instructional video *design* for the elderly. *Research Society and Development*, 11(10), e499111032333. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32333>
- Nurhatmi, J. (2025). Teori multimedia pembelajaran: Landasan kognitif dan implikasi desain instruksional. *Al Habib: Jurnal Pendidikan Islam dan Keguruan*, 1(2).
- Ojetunde, S. M. (2025). A systematic review of effectiveness and factors affecting the usage of virtual science laboratories in high schools. *J. Educ. Learn. Technol*, 6(9), 696-713.
- Oliveira, H., & Bonito, J. (2023). Practical work in science education: A systematic literature review. *Frontiers in Education*, 8, 1151641. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1151641>
- Oliveira, H., & Bonito, J. (2023). Practical work in science education: A systematic literature review. *Frontiers in Education*, 8, 1151641. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1151641>
- Opre, D., Pintea, S., & Iucu, R. (2025). Pre-service teachers' misconceptions about brain and mind: Prevalence and predictors. *Trends in Neuroscience and Education*, 40, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2025.100260>
- Rizky, M., Muis, A., & Asrah. (2024). Penerapan model discovery learning berbantuan media Wordwall untuk meningkatkan motivasi belajar peserta didik kelas VIII-J UPT SPF SMP Negeri 19 Makassar. *Jurnal Pemikiran dan Pengembangan Pembelajaran*, 6(2), 156-162.
- Sari, R. T., Angreni, S., & Salsa, F. J. (2022). Pengembangan virtual-lab berbasis STEM untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis mahasiswa. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 10(2), 391-402.
- Sherrer, S. (2020). A *Virtual Laboratory* module exploring photosynthesis during COVID-19. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 48(6), 659-661. <https://doi.org/10.1002/bmb.21464>
- Sriadhi, S., Hamid, A., & Restu, R. (2022). Web-Based *Virtual Laboratory Development* for Basic Practicums in Science and Technology. *Tem Journal*, 396-402. <https://doi.org/10.18421/tem111-50>
- Sriadhi, S., Hamid, A., & Restu, R. (2022). Web-Based *Virtual Laboratory Development* for Basic Practicums in Science and Technology. *TEM Journal*, 11(1), 396-402. <https://doi.org/10.18421/TEM111-50>
- Sriadhi, S., Sitompul, H., Restu, R., Khaerudin, S., & Yahaya, W. (2022). Virtual-laboratory based learning to improve students' basic engineering competencies based on their spatial abilities. *Computer Applications in Engineering Education*, 30(6), 1857-1871. <https://doi.org/10.1002/cae.22560>
- Sugiyono. (2015). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta
- Sulastri, Arsal, A. F., & Adnan. (2023). Identifikasi sumber belajar yang mendukung pembelajaran Biologi SMA. *Jurnal Amal Pendidikan*, 4(1), 57-66. <http://doi.org/10.36709/japend.v4i1.21>
- Terkaj, W., Kleine, K., & Kuts, V. (2024). *Virtual labs* for higher education in industrial engineering. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 73(2), 142-149. <https://doi.org/10.3176/proc.2024.2.07>
- Vančugovienė, V., Södervik, I., Lehtinen, E., & McMullen, J. (2024). Individual differences in secondary school students' conceptual knowledge: Latent profile analysis of biology concepts. *Learning and Individual Differences*, 111, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2024.102436>

- Wiharto, M. (2013). Analisis kluster menggunakan bahasa pemrograman R untuk kajian ekologi. *Jurnal Bionature*, 14(2), 73-79.
- Wood, D., Bruner, J. S., & Ross, G. (1976). The role of tutoring in problem solving. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 17(2), 89-100. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x>
- Yanti, D. H., Adnan, A., & Nur, E. (2022). Peningkatan Hasil Belajar Melalui Penerapan Media Pembelajaran Power Point Dalam Pembelajaran Anatomi Fisiologi Kelas XA Keperawatan Pada SMKS St. Elisabeth Lela Tahun Pelajaran 2021/2022. *Jurnal Profesi Kependidikan*, 3(2), 233-238.
- Youhasan, P., Henning, M. A., Chen, Y., & Lyndon, M. P. (2022). Developing and evaluating an educational web-based tool for health professions education: The Flipped Classroom Navigator. *BMC Medical Education*, 22, 594. <https://doi.org/10.1186/s12909-022-03647-6>
- Youhasan, P., Henning, M., Chen, Y., & Lyndon, M. (2022). Developing and evaluating an educational web-based tool for health professions education: the Flipped Classroom Navigator. *BMC Medical Education*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12909-022-03647-6>
- Zaturrahmi, Z., *et al.* (2020). The utilization of *Virtual Laboratory* in learning: A meta-analysis. *Indonesian Journal of Science and Mathematics Education*.
- Zhou, H., Dong, Y., Inami, M., Sarsenbayeva, Z., & Withana, A. (2025). A Survey on Methodological Approaches to Collaborative Embodiment in Virtual Reality. *arXiv preprint arXiv:2507.18877*.