

Pengaruh System Quality, Information Quality, dan User Experience terhadap Learning Effectiveness pada Media Pembelajaran Virtual Reality Airfield Lighting System Engineering Menggunakan SEM-PLS

Rifqi Raza Bunahri^{1✉}, Vidya Selasдини², Yuliarman Saragih³

(1,2,3) Program Studi Magister Pemasaran, Inovasi, dan Teknologi, Sekolah Tinggi Ilmu Pelayaran Indonesia

✉ Corresponding author
rifqiraza@gmail.com

Abstrak

Pembelajaran *Airfield Lighting System* (AFL) pada program studi vokasi kebandarudaraan selama ini banyak berlangsung secara teoretis akibat keterbatasan laboratorium praktik. Penelitian ini menguji pengaruh *system quality*, *information quality*, dan *user experience* terhadap *learning effectiveness* media pembelajaran *virtual reality* (VR) AFL yang dijalankan pada perangkat Oculus Quest 3. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif eksplanatori dengan survei *cross-sectional*. Responden mencakup seluruh 24 mahasiswa Program Studi D.III Teknik Listrik Bandara Angkatan IV Politeknik Penerbangan Jayapura sebagai populasi sasaran satu angkatan yang dilibatkan melalui sensus (*total population sampling*), sehingga $n = N = 24$. Data dianalisis dengan *Structural Equation Modeling-Partial Least Squares* (SEM-PLS). Model pengukuran memenuhi validitas konvergen, reliabilitas, serta validitas diskriminan Fornell-Larcker dan HTMT. Model struktural menunjukkan ketiga jalur berpengaruh positif dan signifikan terhadap *learning effectiveness*, dengan *information quality* sebagai prediktor terkuat ($\beta = 0,395$; $p = 0,006$; $f^2 = 0,796$), diikuti *system quality* dan *user experience*. Nilai R^2 sebesar 0,887 menunjukkan model menjelaskan 88,7% variasi *learning effectiveness*. Secara teoretis, penelitian memperluas *Information System Success Model* DeLone dan McLean melalui penambahan *user experience* sebagai dimensi kontekstual VR dan mengoperasionalkan manfaat tingkat individu sebagai *learning effectiveness*. Temuan menegaskan bahwa akurasi dan kelengkapan informasi prosedural menjadi faktor struktural utama efektivitas pelatihan teknik berbasis VR yang bersifat *safety-critical*.

Kata Kunci: information quality, learning effectiveness, system quality, user experience, virtual reality, SEM-PLS

Abstract

Instruction on the Airfield Lighting System (AFL) in airport vocational programmes has largely remained theoretical because dedicated practical laboratories are scarce. This study examines the effect of system quality, information quality, and user experience on the learning effectiveness of a virtual reality (VR) AFL learning medium running on the Oculus Quest 3. An explanatory quantitative design was applied through a cross-sectional survey. The respondents comprised all 24 students of the Diploma III Airport Electrical Engineering study programme, Cohort IV, Jayapura Aviation Polytechnic, treated as a single-cohort target population enumerated in full through census (total population sampling), so that $n = N = 24$. The data were analysed using Structural Equation Modeling-Partial Least Squares (SEM-PLS). The measurement model satisfied convergent validity, reliability, and discriminant validity under the Fornell-Larcker and HTMT criteria. The structural model shows that all three paths have positive and significant effects on learning effectiveness, with information quality the strongest predictor ($\beta = 0.395$; $p = 0.006$; $f^2 = 0.796$), followed by system quality and user experience. The R^2 of 0.887 indicates that the model explains 88.7% of the variance in learning effectiveness. Theoretically, the study extends the DeLone and McLean Information System Success Model by adding user experience as a VR-specific contextual dimension and by operationalising individual-level net benefit as learning effectiveness. The findings underline that the accuracy and completeness of procedural information constitute the principal structural driver of effectiveness in safety-critical VR-based technical training.

Keywords: information quality, learning effectiveness, system quality, user experience, virtual reality, SEM-PLS

PENDAHULUAN

Pendidikan vokasi kebandarudaraan menempatkan praktik sebagai inti pembentukan kompetensi. Pada mata kuliah *Airfield Lighting System (AFL)*, mahasiswa dituntut memahami tata letak, sudut pencahayaan, jenis lampu, serta prosedur instalasi dan pemeliharaan sistem penerangan bandara. Persoalan mendasar muncul ketika laboratorium kelistrikan belum dilengkapi instalasi AFL, sehingga praktik harus dilakukan di bandara aktif dengan keterbatasan waktu, biaya operasional, dan tuntutan keselamatan yang tinggi. Sebagian besar materi akhirnya tersampaikan secara teoretis melalui dokumen regulasi dan paparan kelas yang minim interaksi, dan mahasiswa kesulitan membentuk gambaran operasional yang utuh atas sistem yang kompleks tersebut.

Virtual reality (VR) menawarkan jalan keluar atas keterbatasan ini. Teknologi VR menghadirkan lingkungan tiga dimensi yang imersif sehingga pengguna seolah berada di dalam situasi nyata dan dapat berinteraksi langsung dengan objek digital melalui *headset* dan pengendali (Mystakidis, 2022; Rauschnabel dkk., 2022). Pada pendidikan vokasi, VR memungkinkan mahasiswa melatih keterampilan teknis dalam lingkungan yang aman, terkendali, dan dapat diulang tanpa risiko maupun biaya peralatan nyata (Marougkas dkk., 2023; Ravichandran & Mahapatra, 2023). Karakteristik itulah yang menjadikan VR relevan untuk mensimulasikan operasi AFL yang sulit dijangkau melalui media konvensional.

Keberhasilan sebuah media digital sebagai sistem informasi pembelajaran dapat ditelaah melalui kerangka kesuksesan sistem informasi DeLone dan McLean, yang menempatkan *system quality* dan *information quality* sebagai determinan penggunaan dan manfaat sistem (DeLone & McLean, 2003). Dalam konteks media pembelajaran, *learning effectiveness* dapat diposisikan sebagai manfaat tingkat individu yang terkontekstualisasi (*contextualized individual-level net benefit*),

yakni peningkatan pemahaman konsep, keterampilan prosedural, retensi pengetahuan, dan keyakinan menjalankan prosedur AFL. Sejumlah studi SEM-PLS mengonfirmasi bahwa kualitas sistem dan kualitas informasi berpengaruh signifikan terhadap luaran penggunaan sistem pada berbagai konteks (Fitriati dkk., 2020; Viriando & Sfenrianto, 2021), sehingga kerangka ini layak menjadi landasan analisis media VR AFL.

Meski demikian, model DeLone dan McLean tidak sepenuhnya menangkap karakter fenomenologis sistem imersif, seperti kehadiran (*presence*), imersi, interaksi terwujud (*embodied interaction*), keterlibatan, intuitivitas, kepuasan, dan kenyamanan interaksi. Dimensi inilah yang direpresentasikan oleh *user experience* (UX). Karena itu UX ditambahkan sebagai perluasan kontekstual (*contextual extension*) untuk lingkungan VR, bukan sebagai pengganti *system quality* dan bukan sebagai pembentukan teori universal baru. Kedua konstruk perlu dibedakan secara konseptual. *System quality* merepresentasikan properti teknis dan fungsional sistem, seperti kestabilan aplikasi, responsivitas kontrol, kemudahan navigasi, reliabilitas, dan kelancaran *rendering* serta *visual fidelity*. *User experience* merepresentasikan respons psikologis pengguna ketika berinteraksi dengan sistem, seperti imersi, *presence*, keterlibatan, intuitivitas, kepuasan, dan kenyamanan. Sebuah sistem dapat berkinerja teknis baik tetapi belum tentu menghasilkan pengalaman imersif yang optimal, sehingga kedua konstruk tidak identik. Model afektif-kognitif pembelajaran imersif menegaskan bahwa fitur teknologi memicu *presence* dan *agency* yang kemudian menggerakkan proses kognitif menuju penguasaan pengetahuan (Makransky & Petersen, 2021; Guerra-Tamez, 2023; Henström dkk., 2024; Silseth dkk., 2024).

Luaran yang menjadi perhatian adalah *learning effectiveness*. Tinjauan sistematis menunjukkan VR imersif berdampak positif terhadap capaian belajar pada pendidikan teknik dan vokasi, meskipun besar pengaruhnya bergantung pada rancangan media dan konteks penggunaannya (Conrad dkk., 2024; Laine dkk., 2024; Mallek dkk., 2024; Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023). Arah pengaruh yang konsisten sudah banyak dilaporkan, namun mekanisme yang menjelaskan bagaimana atribut media bekerja bersama-sama terhadap efektivitas pembelajaran masih jarang dimodelkan secara kausal. Mayoritas studi VR di pendidikan berhenti pada evaluasi kelayakan, kegunaan, atau satu luaran tunggal, dan belum banyak yang memodelkan hubungan simultan *system quality*, *information quality*, dan *user experience* terhadap *learning effectiveness* dalam satu kerangka struktural, khususnya pada pelatihan operasional sistem penerangan bandara.

Berpijak pada celah tersebut, penelitian ini memberi empat kontribusi teoretis. Pertama, mengontekstualisasikan manfaat tingkat individu sebagai *learning effectiveness* pada pelatihan teknik. Kedua, mengintegrasikan atribut kualitas sistem informasi dengan dimensi pengalaman imersif dalam satu model. Ketiga, menguji *system quality*, *information quality*, dan *user experience* secara simultan pada pelatihan *Airfield Lighting System*. Keempat, menunjukkan bahwa pada pelatihan teknik yang bersifat prosedural dan *safety-critical*, *information quality* memberikan kontribusi struktural yang lebih kuat daripada *user experience*. Atas dasar itu, penelitian menguji tiga hipotesis: *system quality* berpengaruh positif terhadap *learning effectiveness* (H1); *information quality* berpengaruh positif terhadap *learning effectiveness* (H2); dan *user experience* berpengaruh positif terhadap *learning effectiveness* (H3). Tujuannya adalah menguji ketiga pengaruh tersebut secara simultan sekaligus menetapkan prediktor yang paling kuat terhadap efektivitas pembelajaran media VR AFL.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatori dengan desain survei *cross-sectional*. Pendekatan dipilih karena tujuannya menjelaskan dan memprediksi hubungan antarvariabel laten, bukan sekadar mendeskripsikan kondisi. Populasi sasaran adalah seluruh mahasiswa Program Studi D.III Teknik Listrik Bandara Angkatan IV Politeknik Penerbangan Jayapura yang menjadi pengguna media simulasi VR *Airfield Lighting System*. Jumlah populasi sasaran adalah 24 mahasiswa, dan seluruh anggotanya dilibatkan, sehingga $n = N = 24$. Teknik penentuan responden adalah sampling jenuh atau sensus (*total population sampling / complete enumeration*), digunakan karena populasi bersifat kecil, terbatas, homogen secara akademik, dapat diidentifikasi secara lengkap, memiliki pengalaman pembelajaran yang relevan, dan seluruh anggotanya terjangkau. Sampling jenuh memastikan seluruh populasi sasaran terwakili dan menekan persoalan *sampling error* dalam satu angkatan yang telah didefinisikan; namun teknik ini tidak otomatis menjamin *statistical power* maupun generalisasi eksternal ke populasi lain.

Kecukupan responden dinilai melalui beberapa lapisan argumentasi. Pertama, penelitian melakukan *complete enumeration* atas seluruh populasi sasaran yang relevan, bukan mengambil sebagian kecil responden secara *convenience sampling*. Kedua, model struktural bersifat *parsimonious*, terdiri atas tiga konstruk eksogen yang mengarah langsung ke satu konstruk endogen, tanpa mediasi, moderasi, *higher-order construct*, atau jalur kompleks. Ketiga, SEM-PLS dipilih karena penelitian berorientasi pada penjelasan varians dan prediksi konstruk target menggunakan model komposit (*variance-based*) serta menghadapi populasi sasaran yang secara substantif terbatas, bukan semata-mata karena sampelnya kecil (Hair dkk., 2019; Hair dkk., 2022). Perlu ditegaskan bahwa PLS-SEM tetap menghadapi *standard error* yang lebih besar, *power* yang lebih rendah, dan stabilitas estimasi yang lebih terbatas ketika sampel kecil (Goodhue dkk., 2012), sehingga aturan praktis seperti *10-times rule* tidak memadai sebagai justifikasi tanpa analisis daya.

Keempat, karena pengumpulan data telah selesai, kecukupan sampel dievaluasi melalui *sensitivity analysis* (analisis efek minimum yang terdeteksi), bukan *a priori power analysis*. Analisis dilakukan dengan G*Power untuk konfigurasi uji F, regresi linear berganda model tetap dengan R^2 increase, jenis analisis *sensitivity*, total sampel 24, tiga prediktor, satu prediktor yang diuji, $\alpha = 0,05$, dan *power* = 0,80 (Faul dkk., 2009). Konfigurasi dan hasilnya diringkas pada Tabel 2. Perhitungan menghasilkan f^2 minimum yang dapat dideteksi sekitar 0,39, yang tergolong efek besar. Ukuran efek empiris untuk *system quality* (0,636) dan *information quality* (0,796) berada di atas ambang tersebut, sedangkan *user experience* (0,383) berada tepat pada ambang. Konsisten dengan metode akar kuadrat terbalik (Kock & Hadaya, 2018), untuk mendeteksi jalur terkecil yang teramati ($\beta \approx 0,32$) pada *power* 0,80 diperlukan sekitar 62 responden, sehingga $n = 24$ berada di bawahnya. Dengan demikian, desain sensus ini memungkinkan identifikasi hubungan dengan ukuran efek besar pada populasi sasaran yang terbatas, tetapi memiliki kemampuan lebih rendah untuk mendeteksi efek kecil dan tidak mendukung generalisasi luas.

Tabel 2. Konfigurasi dan hasil analisis sensitivitas (G*Power)

Parameter	Nilai
Uji statistik	Uji F – regresi linear berganda, model tetap, R^2 increase
Jenis analisis	Sensitivity (minimum detectable effect)

Jumlah prediktor total	3
Prediktor yang diuji	1
α (dua sisi)	0,05
Power ($1 - \beta$)	0,80
Ukuran sampel ($n = N$)	24
f^2 minimum terdeteksi	$\approx 0,39$ (efek besar)
f^2 empiris (SQ; IQ; UX)	0,636; 0,796; 0,383

Catatan: karena pengumpulan data telah selesai, analisis diperlakukan sebagai sensitivity analysis, bukan a priori power analysis. Ambang $f^2 \approx 0,39$ menunjukkan desain sensus hanya sensitif terhadap efek besar; SQ dan IQ berada di atas ambang, sedangkan UX berada tepat pada ambang.

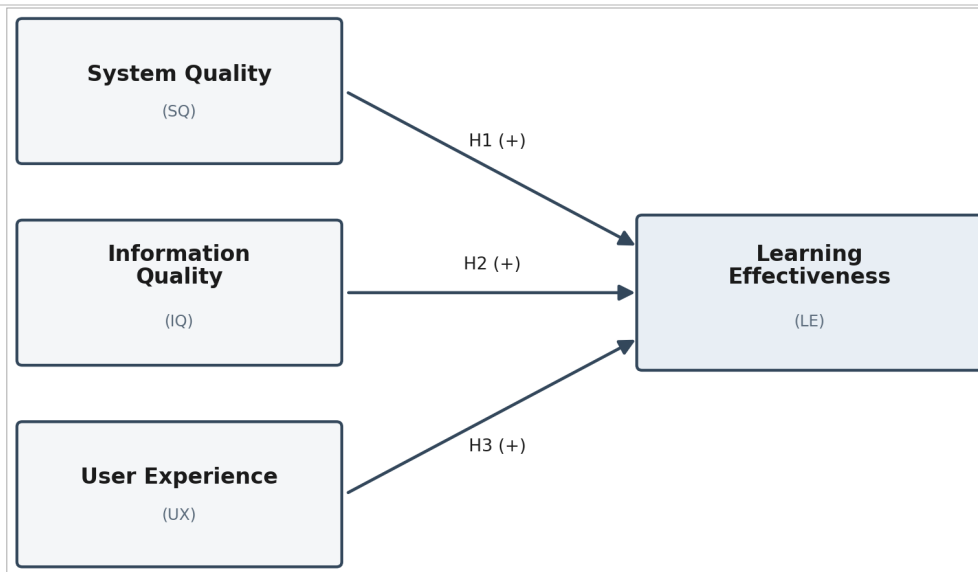
Objek penelitian adalah media pembelajaran VR *Airfield Lighting System Engineering* yang dibangun dengan *game engine* Unity dan bahasa C#, dengan aset tiga dimensi dari SketchUp, 3ds Max, dan Blender, serta dijalankan pada Oculus Meta Quest 3. Lingkungan pelatihan menyerupai prosedur operasional bandara, mencakup penelusuran area (*travel tour airfield*), penyalaan transformator, pengoperasian *Constant Current Regulator* (CCR) secara manual maupun melalui *desktop*, hingga penggantian lampu *runway*, *threshold end*, *taxiway*, dan MAGS. Setiap tindakan pengguna memperoleh umpan balik visual sehingga proses belajar berlangsung interaktif.

Variabel dan Instrumen Penelitian

Penelitian melibatkan empat variabel laten reflektif yang diukur melalui 17 indikator dengan skala Likert lima poin. *System quality* (SQ) mengukur kestabilan sistem, responsivitas kontrol, kemudahan navigasi, dan realisme *rendering*. *Information quality* (IQ) mengukur akurasi prosedur, kelengkapan materi AFL, kejelasan instruksi, dan kesesuaian standar. *User experience* (UX) menangkap imersi atau *presence*, keterlibatan, intuitivitas, kepuasan, dan kenyamanan pengendali. *Learning effectiveness* (LE) mengukur pemahaman konsep, keterampilan prosedural, retensi pengetahuan, dan keyakinan diri. Operasionalisasi variabel diringkas pada Tabel 1, sedangkan model konseptual dan hipotesis ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Operasionalisasi variabel dan indikator

Variabel	Kode	Indikator
System Quality (SQ)	SQ1-SQ4	Kestabilan sistem; responsivitas kontrol; kemudahan navigasi; realisme rendering 3D
Information Quality (IQ)	IQ1-IQ4	Akurasi prosedur; kelengkapan materi AFL; kejelasan instruksi/UI; kesesuaian standar
User Experience (UX)	UX1-UX5	Imersi/presence; keterlibatan; intuitivitas; kepuasan; kenyamanan pengendali
Learning Effectiveness (LE)	LE1-LE4	Pemahaman konsep; keterampilan prosedural; retensi pengetahuan; keyakinan diri



Gambar 1. Model konseptual penelitian dan hipotesis

Prosedur dan Teknik Analisis Data

Data dikumpulkan setelah responden menyelesaikan rangkaian modul simulasi, yaitu orientasi lingkungan, penyalan transformator dan CCR, kontrol melalui *desktop*, serta penggantian lampu, kemudian mengisi kuesioner keempat variabel. Analisis menggunakan SEM-PLS dengan SmartPLS karena metode ini bersifat *variance-based*, sesuai untuk tujuan prediktif, dan tidak menuntut asumsi normalitas multivariat yang ketat (Hair dkk., 2019; Hair dkk., 2022). Evaluasi dilakukan dua tahap. Model pengukuran (*outer model*) dinilai melalui *loading factor*, *average variance extracted* (AVE), *composite reliability* (CR), Cronbach's alpha, serta validitas diskriminan Fornell-Larcker dan rasio *heterotrait-monotrait* (HTMT). Model struktural (*inner model*) dievaluasi melalui *variance inflation factor* (VIF), koefisien jalur, nilai t dan p hasil *bootstrapping*, koefisien determinasi (R^2), ukuran efek (f^2), serta *standardized root mean square residual* (SRMR). Ambang yang digunakan konsisten: *loading* $\geq 0,70$; AVE $\geq 0,50$; CR dan Cronbach's alpha $\geq 0,70$; HTMT $< 0,85$; VIF $< 3,3$; serta jalur dinyatakan signifikan apabila $t > 1,96$ dan $p < 0,05$ pada pengujian dua sisi $\alpha = 0,05$ (Hair dkk., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Profil Responden dan Statistik Deskriptif

Seluruh 24 mahasiswa populasi sasaran berpartisipasi. Responden didominasi laki-laki (17 orang) dengan mayoritas berusia 19–20 tahun. Sebanyak 20 responden memiliki pengalaman VR yang relatif terbatas sebelum penelitian, sehingga efek kebaruan (*novelty effect*) masih mungkin memengaruhi persepsi dan perlu menjadi salah satu pertimbangan interpretasi. Profil responden disajikan pada Tabel 3, sedangkan persepsi rata-rata keempat variabel pada skala lima poin disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Profil responden penelitian (n = 24)

Karakteristik	Kategori	Jumlah
Jenis kelamin	Laki-laki	17
	Perempuan	7
Rentang usia	19–20 tahun	15
	21–22 tahun	9
Pengalaman VR	Belum pernah	20
	Pernah	4

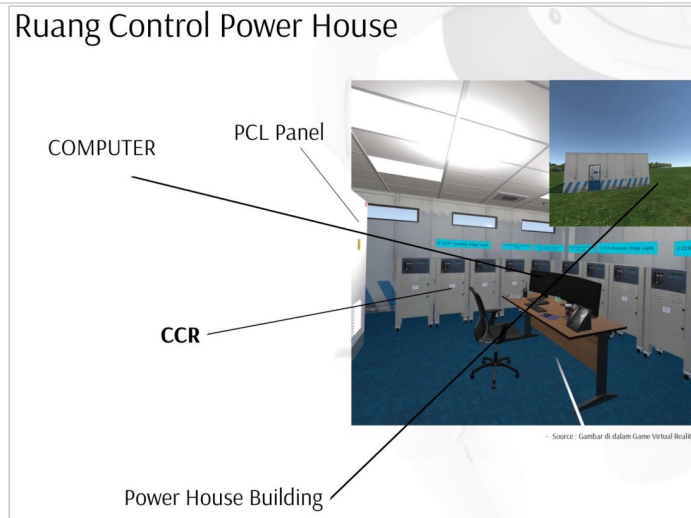
Tabel 4. Statistik deskriptif variabel penelitian

Variabel	Mean	Std. Deviasi	Kategori
System Quality (SQ)	4,08	0,51	Tinggi
Information Quality (IQ)	4,15	0,47	Tinggi
User Experience (UX)	4,34	0,44	Sangat Tinggi
Learning Effectiveness (LE)	4,21	0,49	Sangat Tinggi

Seluruh variabel memperoleh persepsi positif. *User experience* meraih rata-rata tertinggi (4,34) dengan simpangan baku terkecil (0,44), yang menandakan responden paling konsisten merasakan kualitas pengalaman interaksi. Rata-rata deskriptif tertinggi tidak boleh disamakan dengan pengaruh struktural terbesar: nilai mean hanya mencerminkan tingkat persepsi rata-rata, sedangkan kekuatan pengaruh terhadap *learning effectiveness* ditentukan melalui koefisien jalur dan ukuran efek pada model struktural. Rata-rata *learning effectiveness* sebesar 4,21 menegaskan responden mempersepsikan media efektif menunjang pembelajaran AFL.

Bukti Pelaksanaan Simulasi oleh Responden

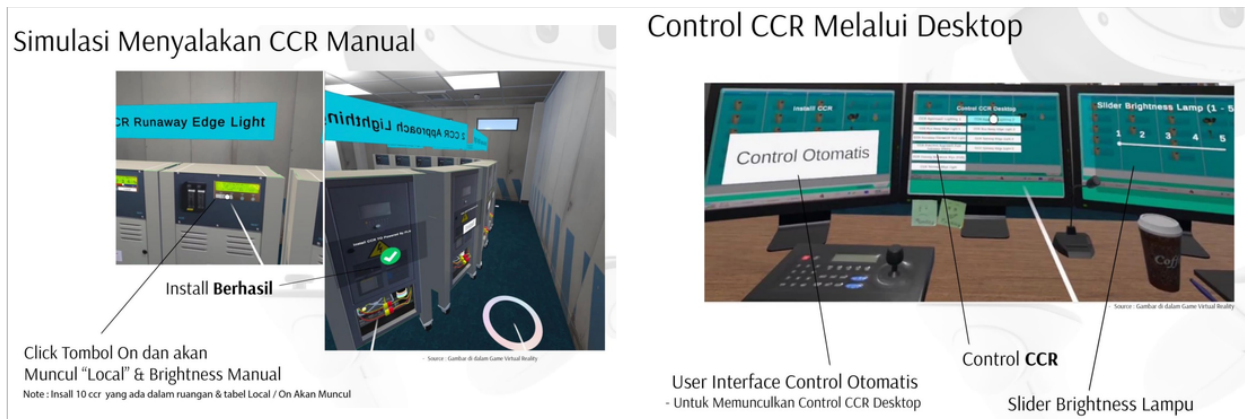
Penilaian responden diberikan setelah mereka mengerjakan langsung modul simulasi, bukan secara hipotetis. Gambar 2 hingga Gambar 5 menampilkan bukti pelaksanaan modul orientasi lingkungan dan ruang kontrol *power house*, interaksi pengendali, penyalan CCR manual dan melalui *desktop*, serta penggantian lampu *airfield*. Modul-modul prosedural inilah yang menjadi dasar penilaian indikator keterampilan prosedural, pemahaman konsep, dan retensi pada *learning effectiveness*.



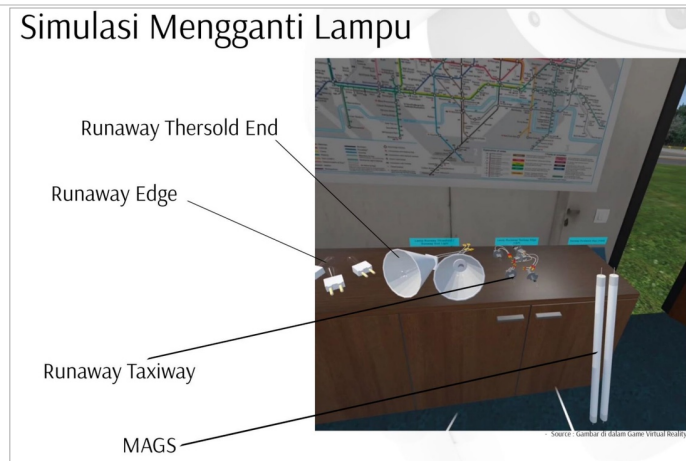
Gambar 2. Modul orientasi lingkungan: ruang kontrol power house dan unit CCR



Gambar 3. Interaksi pengguna dengan pengendali Oculus Quest 3



Gambar 4. Modul prosedural: penyalan CCR manual (kiri) dan kontrol CCR melalui *desktop* (kanan)



Gambar 5. Modul penggantian lampu *airfield* secara langsung oleh pengguna

Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

Seluruh indikator memenuhi validitas konvergen. Nilai *loading factor* berada pada rentang 0,960–0,991 dan melampaui ambang 0,70, sehingga tidak ada indikator yang dieliminasi. Nilai AVE keempat konstruk di atas 0,50, sedangkan CR dan Cronbach's alpha seluruhnya melampaui 0,70 (Tabel 5). Nilai *loading* yang sangat tinggi menunjukkan reliabilitas dan validitas konvergen yang terpenuhi; hal ini dilaporkan secara objektif tanpa menyebut instrumen “sempurna”. Kemiripan semantik antarindikator yang tinggi merupakan hal yang dapat ditinjau pada penelitian lanjutan, tanpa mengubah data atau menghapus indikator secara sepihak.

Tabel 5. Validitas konvergen dan reliabilitas (outer model)

Konstruk	Rentang Loading	AVE	CR	CA
System Quality (SQ)	0,960–0,987	0,947	0,986	0,981
Information Quality (IQ)	0,967–0,991	0,958	0,989	0,985
User Experience (UX)	0,963–0,990	0,954	0,990	0,988
Learning Effectiveness (LE)	0,976–0,986	0,965	0,991	0,988

Validitas diskriminan diuji dengan kriteria Fornell-Larcker dan rasio HTMT yang diringkas dalam satu matriks pada Tabel 6. Nilai diagonal, yakni akar kuadrat AVE, selalu lebih besar daripada korelasi antarkonstruk di segitiga bawah, sementara seluruh rasio HTMT di segitiga atas berada di bawah ambang 0,85 dengan nilai tertinggi 0,836 pada hubungan *user experience–learning effectiveness*. Kedua kriteria konsisten menegaskan bahwa setiap konstruk berbeda secara empiris dan tidak terjadi tumpang tindih konseptual yang berlebihan.

Tabel 6. Validitas diskriminan (Fornell-Larcker dan HTMT)

	SQ	IQ	UX	LE
SQ	0,973	0,557	0,700	0,826
IQ	0,548	0,979	0,639	0,813
UX	0,690	0,631	0,977	0,836
LE	0,814	0,802	0,827	0,982

Catatan: diagonal (cetak tebal secara konsep) = akar kuadrat AVE; segitiga bawah = korelasi antarkonstruksi (Fornell-Larcker); segitiga atas = rasio HTMT (ambang < 0,85).

Evaluasi Model Struktural (Inner Model)

Sebelum pengujian hipotesis, kolinearitas antarprediktor diperiksa melalui VIF. Nilai VIF untuk SQ, IQ, dan UX masing-masing 1,989; 1,731; dan 2,311, seluruhnya di bawah 3,3, sehingga model bebas dari multikolinearitas. Pengujian hipotesis melalui *bootstrapping* menunjukkan ketiga jalur bertanda positif dan signifikan (Tabel 7). *Information quality* merupakan prediktor paling kuat dengan koefisien jalur tertinggi ($\beta = 0,395$) dan ukuran efek terbesar ($f^2 = 0,796$), diikuti *system quality* ($\beta = 0,378$; $f^2 = 0,636$) dan *user experience* ($\beta = 0,317$; $f^2 = 0,383$); ketiganya tergolong efek besar sehingga seluruh hipotesis diterima.

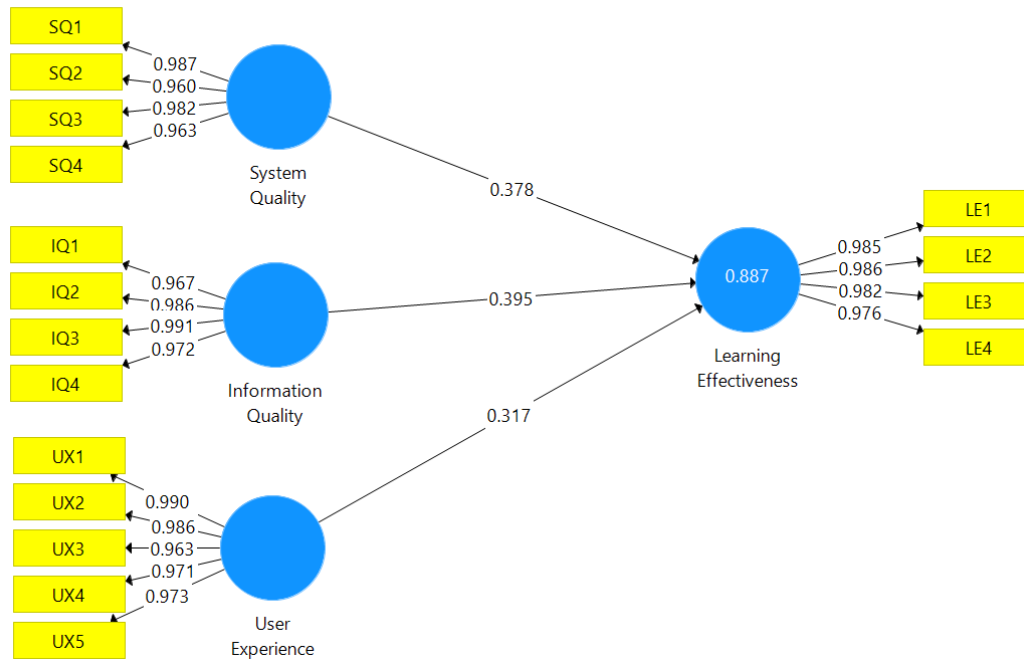
Tabel 7. Hasil pengujian hipotesis dan ukuran efek model struktural

Hipotesis (Jalur)	Koefisien (β)	t-stat	p-value	f^2	Keputusan
H1: SQ $\rightarrow$ LE	0,378	2,127	0,034	0,636	Diterima
H2: IQ $\rightarrow$ LE	0,395	2,771	0,006	0,796	Diterima
H3: UX $\rightarrow$ LE	0,317	2,326	0,020	0,383	Diterima

Kualitas dan kecocokan model secara keseluruhan dirangkum pada Tabel 8. Nilai R^2 *learning effectiveness* sebesar 0,887 dan R^2 *adjusted* 0,870 menunjukkan kemampuan penjelasan yang kuat pada sampel dan konteks penelitian. Nilai Q^2 sebesar 0,827 menandakan relevansi prediktif berdasarkan prosedur yang digunakan, sedangkan SRMR 0,033 menunjukkan residual model yang rendah menurut ambang yang dirujuk. Struktur hubungan beserta koefisiennya divisualkan pada Gambar 6.

Tabel 8. Ringkasan kualitas dan kecocokan model

Kriteria	Nilai	Interpretasi
R^2 Learning Effectiveness	0,887	Kuat
R^2 adjusted	0,870	Kuat
Q^2 (relevansi prediktif)	0,827	Relevansi prediktif kuat
SRMR	0,033	Kecocokan model memadai



Gambar 6. Hasil estimasi model struktural SEM-PLS

PEMBAHASAN

Pengaruh System Quality terhadap Learning Effectiveness

Hipotesis pertama diterima ($\beta = 0,378$; $p = 0,034$). Kestabilan, responsivitas kontrol, navigasi yang lancar, dan *visual fidelity* berperan sebagai *enabling conditions* pembelajaran VR. Gangguan teknis dapat memutus *sense of presence* dan menambah *extraneous cognitive load* sehingga menurunkan efisiensi belajar, sebagaimana ditunjukkan pada studi yang memodelkan imersi dan interaktivitas dalam VR (Petersen dkk., 2022; Albus dkk., 2021). Sebaliknya, navigasi yang mudah membantu mahasiswa membentuk representasi spasial atas ruang *power house*, lokasi CCR, panel, dan sistem lampu *airfield*, yang menjadi fondasi pemahaman operasional. Temuan ini searah dengan kerangka kesuksesan sistem informasi yang menempatkan kualitas sistem sebagai determinan penggunaan (DeLone & McLean, 2003; Fitriati dkk., 2020), namun mekanisme yang bekerja pada media imersif lebih spesifik: kualitas sistem tidak sekadar memudahkan akses, melainkan menjaga keberlangsungan *presence* yang menopang pemrosesan informasi (Makransky & Petersen, 2021). Perbedaan konteks ini menjelaskan mengapa kualitas sistem tetap signifikan meski bukan prediktor terkuat.

Pengaruh Information Quality terhadap Learning Effectiveness

Hipotesis kedua diterima dan menempatkan *information quality* sebagai prediktor paling kuat ($\beta = 0,395$; $p = 0,006$; $f^2 = 0,796$). Pada simulasi teknik yang *safety-critical*, daya tarik visual dan imersi tidak mencukupi apabila urutan kerja, simbol, spesifikasi komponen, instruksi, standar, dan prosedur yang ditampilkan tidak akurat. Akurasi prosedur penyalaan CCR, pengoperasian melalui *desktop*, serta penggantian lampu membantu pembentukan pengetahuan prosedural, sementara kelengkapan materi dan kejelasan instruksi mengurangi ambiguitas ketika mahasiswa menjalankan simulasi. Dengan kata lain, kebaruan teknologi tidak menggantikan kualitas konten instruksional;

keunggulan media justru bertumpu pada ketepatan informasi yang memandu tindakan. Interpretasi ini konsisten dengan model afektif-kognitif yang menautkan pemrosesan informasi dengan penguasaan pengetahuan prosedural (Makransky & Petersen, 2021) dan dengan tinjauan pelatihan virtual yang menekankan bahwa efektivitas ditentukan oleh kesahihan konten, bukan semata imersi (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023). Pola kualitas informasi yang signifikan pada penerapan model kesuksesan sistem informasi juga dilaporkan pada konteks lain (Viriando & Sfenrianto, 2021), namun pada pelatihan prosedural AFL kontribusinya bahkan menjadi yang paling menentukan.

Pengaruh User Experience terhadap Learning Effectiveness

Hipotesis ketiga diterima ($\beta = 0,317$; $p = 0,020$; $f^2 = 0,383$). *Presence*, imersi, keterlibatan, intuitivitas, dan *embodied interaction* memungkinkan mahasiswa belajar melalui tindakan, eksplorasi spasial, dan *procedural rehearsal*. Ketika responden mengoperasikan pengendali untuk menyalakan CCR atau mengganti lampu *runway* secara langsung, mereka membangun pengetahuan prosedural melalui perbuatan, bukan sekadar membaca, sejalan dengan kajian yang menempatkan imersi, kehadiran, dan keterlibatan sebagai mekanisme inti pembelajaran VR (Guerra-Tamez, 2023; Henström dkk., 2024; Silseth dkk., 2024). Meski rata-rata deskriptif *user experience* paling tinggi, kekuatan pengaruh strukturalnya menempati urutan ketiga; hal ini menegaskan bahwa persepsi yang menonjol tidak serta-merta menjadi determinan struktural terbesar. *User experience* berperan sebagai penguat pengalaman dan keterlibatan belajar, sedangkan *information quality* tetap menjadi faktor struktural paling kuat pada penelitian ini. Karena model tidak memuat konstruk *perceived usefulness*, *perceived ease of use*, *behavioral intention*, atau *actual use*, penelitian ini tidak menguji *Technology Acceptance Model*; kerangka tersebut hanya relevan sebagai perspektif pembanding yang terbatas.

Kemampuan Penjelas Model dan Implikasi

Secara keseluruhan model menjelaskan 88,7% varians *learning effectiveness*, yang menegaskan ketiga konstruk secara simultan membentuk efektivitas pembelajaran, dengan urutan kontribusi *information quality*, *system quality*, lalu *user experience*. Nilai R^2 , Q^2 , dan SRMR yang baik berlaku pada sampel dan konteks penelitian dan tidak dapat langsung digeneralisasi ke populasi luas. Sampel yang homogen, data *self-report*, pengukuran dalam satu waktu, konteks pengukuran yang sama, serta pengalaman menggunakan media yang identik dapat berkontribusi terhadap tingginya hubungan antarkonstruk. Karena pengujian *common method bias* tidak dilakukan secara khusus, penelitian ini tidak mengklaim ada atau tidaknya bias tersebut. Secara praktis, hasil ini mengarahkan pengembangan media VR AFL untuk memprioritaskan akurasi prosedur, kelengkapan materi, dan kejelasan instruksi, dengan tetap menjaga kestabilan sistem serta kualitas pengalaman interaksi (Conrad dkk., 2024; Mallek dkk., 2024; Maroungkas dkk., 2023; Refdinal dkk., 2023). VR pun tepat diposisikan sebagai laboratorium virtual yang melengkapi praktik AFL, khususnya pada institusi dengan keterbatasan fasilitas dan akses lapangan.

SIMPULAN

Temuan dan Kontribusi Ilmiah

System quality, *information quality*, dan *user experience* berpengaruh positif dan signifikan terhadap *learning effectiveness* media pembelajaran VR *Airfield Lighting System Engineering*, dengan *information quality* sebagai prediktor paling kuat dan model menjelaskan 88,7% varians *learning*

effectiveness ($R^2 = 0,887$). Kontribusi teoretisnya adalah perluasan kontekstual *Information System Success Model* DeLone dan McLean dengan *user experience* untuk lingkungan VR, sekaligus operasionalisasi manfaat tingkat individu sebagai *learning effectiveness* pada pelatihan teknik yang prosedural dan *safety-critical*.

Implikasi Praktis

Pengembang media perlu memprioritaskan akurasi prosedur, kelengkapan materi, kejelasan instruksi, dan kesesuaian standar AFL, dengan tetap mengoptimalkan kestabilan sistem, responsivitas kontrol, navigasi, *visual fidelity*, kenyamanan, *presence*, dan keterlibatan. Validasi konten oleh ahli AFL dan instruktur sebaiknya menjadi bagian pengembangan. VR diposisikan sebagai pelengkap laboratorium dan praktik lapangan, bukan pengganti mutlak seluruh praktik nyata.

Keterbatasan

Penelitian hanya mencakup 24 mahasiswa dalam satu angkatan dan satu institusi, menggunakan desain *cross-sectional* dan data persepsi *self-report*, belum menerapkan kelompok kontrol, belum menggunakan *pretest-posttest*, belum mengukur performa objektif maupun retensi jangka panjang, serta menggunakan satu perangkat dan satu versi aplikasi. Karena itu hasil terutama berlaku pada konteks mahasiswa D.III Teknik Listrik Bandara Angkatan IV Politeknik Penerbangan Jayapura dan media VR AFL yang diuji, dan tidak diperluas ke angkatan lain, program studi lain, Politeknik Penerbangan lain, instruktur atau teknisi profesional, maupun perangkat dan versi aplikasi yang berbeda.

Penelitian Berikutnya

Agenda pengembangan mencakup penggunaan sampel multisitus dan lintas angkatan, desain eksperimen atau kuasi-eksperimen dengan *pretest-posttest* dan kelompok kontrol, pengukuran kinerja objektif, uji retensi longitudinal, serta pemanfaatan *log* interaksi dan *immersive learning analytics*. Integrasi *adaptive learning*, umpan balik berbasis kecerdasan buatan, dan *intelligent tutoring* (Wang dkk., 2024) serta *Digital Twin* AFL (Zhang dkk., 2024) dan perluasan *extended reality* dapat diuji sebagai pengembangan lanjutan, bukan sebagai bagian penelitian saat ini. Evaluasi terhadap *cognitive load*, *cybersickness*, *presence*, *flow*, motivasi, *transfer of training*, biaya, dan skalabilitas juga penting untuk memastikan efektivitas dan kelayakan penerapan yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Penerbangan Jayapura atas dukungan fasilitas dan kesempatan pengambilan data, serta kepada seluruh mahasiswa yang berpartisipasi sebagai responden dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Albus, P., Vogt, A., & Seufert, T. (2021). Signaling in virtual reality influences learning outcome and cognitive load. *Computers & Education*, 166, 104154. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104154>
- Conrad, M., Kablitz, D., & Schumann, S. (2024). Learning effectiveness of immersive virtual reality in education and training: A systematic review of findings. *Computers & Education: X Reality*, 4, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2024.100053>

- DeLone, W. H., & McLean, E. R. (2003). The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update. *Journal of Management Information Systems*, 19(4), 9–30. <https://doi.org/10.1080/07421222.2003.11045748>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160. <https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149>
- Fitriati, A., Tubastuvi, N., Pratama, B. C., & Anggoro, S. (2020). Study of DeLone–McLean information system success model: The relationship between system quality and information quality. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 98(3), 423–434.
- Goodhue, D. L., Lewis, W., & Thompson, R. (2012). Does PLS have advantages for small sample size or non-normal data? *MIS Quarterly*, 36(3), 981–1001. <https://doi.org/10.2307/41703490>
- Guerra-Tamez, C. R. (2023). The impact of immersion through virtual reality in the learning experiences of art and design students: The mediating effect of the flow experience. *Education Sciences*, 13(2), 185. <https://doi.org/10.3390/educsci13020185>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2022). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (3rd ed.). Sage.
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24. <https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203>
- Henström, J., Mononen, R., Akgün, B., & Saaremäki, J. (2024). Immersive engineering instruction: Using virtual reality to enhance students' experience in the classroom. *Computers & Graphics*, 121, 103944. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2024.103944>
- Kock, N., & Hadaya, P. (2018). Minimum sample size estimation in PLS-SEM: The inverse square root and gamma-exponential methods. *Information Systems Journal*, 28(1), 227–261. <https://doi.org/10.1111/isj.12131>
- Laine, J., Korhonen, T., & Hakkarainen, K. (2024). Immersive virtual reality for complex skills training: Content analysis of experienced challenges. *Virtual Reality*, 28(1), 61. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00955-8>
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937–958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- Mallek, F., Mazhar, T., Shah, S. F. A., Ghadi, Y. Y., & Hamam, H. (2024). A review on cultivating effective learning: Synthesizing educational theories and virtual reality for enhanced educational experiences. *PeerJ Computer Science*, 10, e2000. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2000>
- Marougkas, A., Troussas, C., Krouska, A., & Sgouropoulou, C. (2023). Virtual reality in education: A review of learning theories, approaches and methodologies for the last decade. *Electronics*, 12(13), 2832. <https://doi.org/10.3390/electronics12132832>
- Mystakidis, S. (2022). Metaverse. *Encyclopedia*, 2(1), 486–497. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031>
- Petersen, G. B., Petkakis, G., & Makransky, G. (2022). A study of how immersion and interactivity drive VR learning. *Computers & Education*, 179, 104429. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104429>
- Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). What is XR? Towards a framework for augmented and virtual reality. *Computers in Human Behavior*, 133, 107289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>
- Ravichandran, R., & Mahapatra, J. (2023). Virtual reality in vocational education and training: Challenges and possibilities. *Journal of Digital Learning and Education*, 3(1), 25–31. <https://doi.org/10.52562/jdle.v3i1.602>
- Refdinal, Ambiyar, Jalinus, N., & Wulansari, R. E. (2023). Effectiveness of using virtual reality media for students' knowledge and practice skills in practical learning. *International Journal on Informatics Visualization*, 7(3), 688–694. <https://doi.org/10.30630/joiv.7.3.2060>

- Silseth, K., Steier, R., & Arnseth, H. C. (2024). Exploring students' immersive VR experiences as resources for collaborative meaning making and learning. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 19(1), 11–36. <https://doi.org/10.1007/s11412-023-09413-0>
- Strojny, P., & Dużmańska-Misiarczyk, N. (2023). Measuring the effectiveness of virtual training: A systematic review. *Computers & Education: X Reality*, 2, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2022.100006>
- Viriando, A., & Sfenrianto. (2021). Using DeLone & McLean information system success to evaluate the success of an information system. *Journal of System and Management Sciences*, 11(2), 182–198.
- Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 252, 124167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>
- Zhang, J., Zhu, J., Tu, W., Wang, M., Yang, Y., Qian, F., & Xu, Y. (2024). The effectiveness of a digital twin learning system in assisting engineering education courses: A case of landscape architecture. *Applied Sciences*, 14(15), 6484. <https://doi.org/10.3390/app14156484>