

KONSEP PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN KEJURUAN PADA ERA DIGITAL: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW 2020-2025

Fitra Sayyoda^{1*}, Naufal¹, Sahera Silvia Vaesar¹, Rijal Abdullah²

¹Program Magister Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang ¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
fitrasayyoda23@gmail.com

Abstract: *The digital era has changed the fundamentals of Technology and Vocational Education (PTK) around the world. This Systematic Literature Review (SLR) analyzes the transformation of PTK in the 2020-2025 period by synthesizing more than 80 academic sources. This study uses the PRISMA method to identify, select, and analyze relevant literature. The results of the study identified three main pillars of the transformation of PTK in the digital era: (1) TVET 4.0 conceptual framework that integrates cyber-physical systems, IoT, and AI technology; (2) The implementation of digital technologies such as VR, AR, and blended learning with varying effectiveness based on the learning context; (3) Development of digital competencies of teachers and students through frameworks such as DigCompEdu and UNESCO ICT CFT. The findings show that VR is effective for psychomotor skills (effect size $g=0.85$), but implementation faces challenges of infrastructure, teacher readiness, and digital divide. Link and match with Industry 4.0/5.0 demands a curriculum transformation that is responsive to the needs of 30-40% of employees who need reskilling. Case studies from Singapore, Germany, China, Indonesia, and Africa show a wide range of approaches and success rates. This study identified research gaps in methodology (qualitative dominance of 71%), limitations of longitudinal studies, and geographical disparities. Recommendations include strengthening empirical research, developing a specific digital competency framework for PTK, and policies that prioritize a people-first approach in digitalization.*

Keywords: *Technology and Vocational Education, TVET, Digital Era, Industry 4.0, Digital Competence, Systematic Literature Review.*

Abstrak: Era digital telah mengubah fundamental Pendidikan Teknologi dan Kejuruan (PTK) di seluruh dunia. *Systematic Literature Review* (SLR) ini menganalisis transformasi PTK dalam periode 2020-2025 dengan mensintesis lebih dari 80 sumber akademik. Penelitian ini menggunakan metode PRISMA untuk mengidentifikasi, menyeleksi, dan menganalisis literatur yang relevan. Hasil penelitian mengidentifikasi tiga pilar utama transformasi PTK era digital: (1) Kerangka konseptual TVET 4.0 yang mengintegrasikan teknologi *cyber-physical systems*, IoT, dan AI; (2) Implementasi teknologi digital seperti VR, AR, dan *blended learning* dengan efektivitas bervariasi berdasarkan konteks pembelajaran; (3) Pengembangan kompetensi digital guru dan siswa melalui *framework* seperti *DigCompEdu* dan UNESCO ICT CFT. Temuan menunjukkan bahwa VR efektif untuk keterampilan psikomotorik (*effect size* $g=0.85$), namun implementasi menghadapi tantangan infrastruktur, kesiapan guru, dan digital divide. *Link and match* dengan Industry 4.0/5.0 menuntut transformasi kurikulum yang responsif terhadap kebutuhan 30-40% karyawan yang memerlukan *reskilling*. Studi kasus dari Singapura, Jerman, China, Indonesia, dan Afrika menunjukkan beragam pendekatan dan tingkat keberhasilan. Penelitian ini mengidentifikasi gap penelitian dalam metodologi (dominasi kualitatif 71%), keterbatasan studi longitudinal, dan disparitas geografis. Rekomendasi mencakup penguatan riset empiris, pengembangan *framework* kompetensi digital spesifik PTK, dan kebijakan yang mengedepankan pendekatan *people-first* dalam digitalisasi.

Kata kunci: Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, TVET, Era Digital, Industry 4.0, Kompetensi Digital, *Systematic Literature Review*.

A. Pendahuluan

Revolusi Industri 4.0 telah mengubah lanskap pendidikan vokasi secara fundamental. Pendidikan Teknologi dan Kejuruan (PTK) atau *Technical and Vocational Education and Training* (TVET) menghadapi tantangan untuk menyesuaikan kurikulum, metode pengajaran, dan infrastruktur dengan kebutuhan tenaga kerja di era digital (UNESCO-UNEVOC, 2022). Transformasi digital bukan sekadar adopsi teknologi, melainkan perubahan paradigma yang mencakup pembelajaran berbasis data, personalisasi melalui kecerdasan buatan, dan integrasi teknologi *immersive* seperti *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) (Kim dkk., 2020).

World Economic Forum (2023) melaporkan bahwa dua pertiga keterampilan kerja saat ini akan berubah atau menjadi usang dalam dekade mendatang, menciptakan dampak ekonomi potensial sebesar \$2,5 triliun. Kondisi ini menuntut PTK untuk tidak hanya mengajarkan keterampilan teknis spesifik, tetapi juga mengembangkan kompetensi digital, keterampilan abad ke-21 seperti berpikir kritis, kolaborasi, dan kreativitas, serta kemampuan pembelajaran sepanjang hayat (González-Pérez & Ramírez-Montoya, 2022).

Pandemi COVID-19 menjadi akselerator digitalisasi PTK yang memaksa institusi untuk beradaptasi secara cepat. Namun, transisi ini juga mengungkap ketimpangan akses teknologi (*digital divide*), keterbatasan kompetensi digital guru, dan tantangan dalam menyelenggarakan pembelajaran *hands-on* secara daring (British Council, 2021). Periode 2020-2025 menjadi fase kritis dimana literatur akademik mendokumentasikan pengalaman, inovasi, dan tantangan transformasi digital PTK di berbagai negara (ILO, 2021).

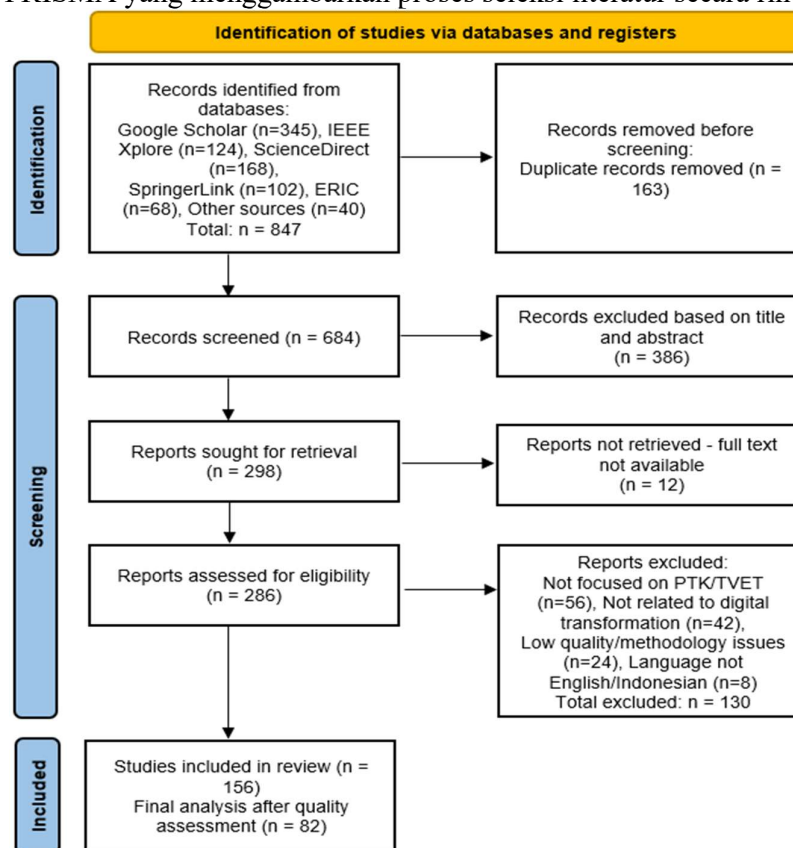
Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini merumuskan beberapa pertanyaan penelitian yang mencakup bagaimana kerangka konseptual PTK berkembang di era digital, teknologi digital apa saja yang diterapkan dalam PTK dan bagaimana efektivitasnya, bagaimana *framework* kompetensi digital untuk guru dan siswa PTK, bagaimana *link and match* PTK dengan kebutuhan Industry 4.0 dan 5.0, apa saja tantangan implementasi digitalisasi PTK dan bagaimana solusinya, serta bagaimana studi kasus implementasi PTK digital di berbagai negara.

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis literatur akademik periode 2020-2025 tentang konsep PTK di era digital, mengidentifikasi tren teknologi dan inovasi pedagogi, menganalisis tantangan dan *best practices* implementasi, serta merumuskan rekomendasi untuk penelitian dan kebijakan masa depan. Melalui pendekatan *systematic literature review*, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif tentang transformasi PTK di era digital dan arah pengembangan ke depan.

B. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengikuti protokol PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan transparansi, reproduibilitas, dan kualitas dalam proses identifikasi, seleksi, dan analisis literatur (Page dkk., 2021; Wagino dkk., 2023). Pencarian literatur dilakukan pada beberapa database akademik utama meliputi *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, ERIC (*Education Resources Information Center*), serta *ResearchGate* dan repositori institusional. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi kombinasi dari "*Technical and Vocational Education*" OR "TVET" OR "*Vocational Education*" OR "*Career and Technical Education*", dikombinasikan dengan "*Digital Transformation*" OR "*Industry 4.0*" OR "*Digitalization*" OR "*Digital Technology*", serta "*Virtual Reality*" OR "*Augmented Reality*" OR "*E-Learning*" OR "*Blended Learning*" OR "*Artificial Intelligence*", dan "*Digital Competence*" OR "*21st Century Skills*" OR "*Teacher Professional Development*". Kriteria inklusi mencakup publikasi tahun 2020-2025, artikel jurnal *peer-reviewed*, prosiding konferensi internasional, laporan penelitian dari organisasi

internasional (UNESCO, ILO, World Bank), fokus pada pendidikan teknologi dan kejuruan (PTK/TVET), membahas aspek digitalisasi atau transformasi era digital, dan berbahasa Inggris atau Indonesia. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi publikasi sebelum tahun 2020, artikel non-akademik seperti blog atau berita, studi yang fokus pada pendidikan umum tanpa konteks vokasional, serta duplikasi publikasi atau publikasi tanpa akses teks lengkap. Proses seleksi literatur mengikuti tahapan PRISMA yang sistematis. Pada tahap identifikasi, pencarian awal mengidentifikasi 847 publikasi dari berbagai database. Setelah menghapus duplikasi sejumlah 163 artikel, tersisa 684 artikel untuk tahap *screening*. *Screening* berdasarkan judul dan abstrak menghasilkan 298 artikel yang relevan untuk dicari *full text*-nya, namun 12 artikel tidak tersedia sehingga 286 artikel dilakukan *full-text assessment*. Setelah kelayakan dinilai dengan mengeliminasi 130 artikel yang tidak memenuhi kriteria (56 tidak fokus pada PTK/TVET, 42 tidak terkait transformasi digital, 24 memiliki masalah kualitas/metodologi, dan 8 berbahasa selain Inggris/Indonesia), tersisa 156 artikel untuk *review*. Setelah *quality assessment* lebih lanjut, 82 artikel berkualitas tinggi dimasukkan dalam analisis akhir. Gambar 1 menunjukkan diagram alir PRISMA yang menggambarkan proses seleksi literatur secara rinci.



Gambar 1. Diagram Alir PRISMA Flow Diagram

Proses seleksi PRISMA yang sistematis ini memastikan bahwa hanya literatur yang berkualitas tinggi dan relevan yang dimasukkan dalam analisis, sehingga hasil *review* dapat diandalkan dan komprehensif. Data yang diekstraksi dari setiap literatur meliputi informasi bibliografi (penulis, tahun, judul, sumber publikasi), metodologi penelitian, konteks penelitian (negara, jenjang PTK, sektor), teknologi atau inovasi yang dibahas, temuan utama dan implikasi, serta keterbatasan dan rekomendasi penelitian lanjutan. Analisis data dilakukan dengan pendekatan tematik untuk mengidentifikasi pola, tema utama, dan gap penelitian. Literatur diklasifikasikan berdasarkan tema seperti kerangka konseptual, teknologi, kurikulum, kompetensi, keterkaitan industri, dan tantangan implementasi, kemudian disintesis untuk menjawab pertanyaan penelitian.

C. Hasil dan Pembahasan

Kerangka Konseptual PTK di Era Digital

Literatur mengidentifikasi transformasi konseptual PTK dari model tradisional menuju TVET 4.0. Kerangka Digital *Digital Transformation Ecosystem* yang dikembangkan ILO/UNESCO (2023) mencakup enam komponen yang saling terkait yaitu konten pelatihan terdigitalisasi, metode pengajaran dan pembelajaran digital, guru dan peserta didik yang kompeten secara digital, infrastruktur dan platform digital, tata kelola digital, dan kerangka regulasi pendukung. Konsep TVET 4.0 merujuk pada integrasi sistem *cyber-physical*, *Internet of Things*, *cloud computing*, dan kecerdasan buatan dalam pendidikan vokasi (Spöttl & Windelband, 2021).

Paradigma baru menunjukkan pergeseran dari keterampilan spesifik pekerjaan menuju keterampilan transferable plus digital, dari pembelajaran berbasis ruang kelas atau bengkel menuju *blended learning* yang mengombinasikan aspek fisik, virtual, dan simulasi, serta dari kurikulum statis menuju kurikulum adaptif yang responsif terhadap kebutuhan industri. González-Pérez dan Ramírez-Montoya (2022) mengidentifikasi *framework Education 4.0* yang mencakup kompetensi inti meliputi manajemen informasi, komunikasi, kolaborasi, kreativitas, berpikir kritis, dan pemecahan masalah, serta kompetensi kontekstual seperti kesadaran etis, kesadaran budaya, fleksibilitas, *self-direction*, dan pembelajaran sepanjang hayat.

Teknologi Digital dalam PTK dan Efektivitasnya

Tabel 1 berikut merangkum berbagai teknologi digital yang diterapkan dalam PTK beserta efektivitas, kelebihan, dan keterbatasannya.

Tabel 1. Teknologi Digital dalam PTK dan Efektivitasnya

Teknologi	Aplikasi Utama	Efektivitas	Kelebihan	Keterbatasan
<i>Virtual Reality (VR)</i>	Pelatihan prosedural, simulasi bengkel, hospitality	Tinggi ($\eta^2=0.261$)	Pengembangan keterampilan psikomotorik tanpa risiko	Biaya tinggi, motion sickness
<i>Augmented Reality (AR)</i>	Pemeliharaan, perakitan, pembelajaran bahasa	Tinggi	Integrasi informasi digital dengan lingkungan fisik	Membutuhkan keahlian instruktur
<i>Artificial Intelligence (AI)</i>	Personalisasi pembelajaran, asesmen adaptif	Sedang-Tinggi	Jalur pembelajaran yang dipersonalisasi	Privasi data, bias algoritmik
<i>Blended Learning</i>	Kombinasi tatap muka dan daring	Tinggi	Meningkatkan kehadiran dan partisipasi	Membutuhkan adaptasi pedagogis
<i>Virtual Laboratory</i>	Praktikum teknik, sains	Tinggi	Cost-effective, tanpa batasan waktu	Membutuhkan pembelajaran eksperiensial

Studi Thomann dkk. (2024) pada 79 trainee retail di Jerman menunjukkan bahwa *Immersive VR* memberikan keunggulan signifikan dalam akuisisi pengetahuan dengan effect size $\eta^2=0.261$. Namun, penelitian lain dengan RCT pada 72 siswa vokasi menemukan bahwa pembelajaran tradisional atau blended lebih efektif untuk pengetahuan deklaratif segera. Meta-analisis Chernikova dkk. (2020) terhadap 145 studi menunjukkan bahwa *simulation-based learning* memiliki effect size $g=0.85$, menunjukkan efektivitas tinggi untuk keterampilan prosedural dan pengambilan keputusan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemilihan

teknologi harus disesuaikan dengan tujuan pembelajaran spesifik, dimana VR dan AR sangat efektif untuk pengembangan keterampilan psikomotorik dan prosedural, sementara *blended learning* optimal untuk keseimbangan antara fleksibilitas dan pengalaman *hands-on* (Kim dkk., 2020).

Kompetensi Digital Guru dan Siswa PTK

Framework kompetensi digital yang dominan dalam literatur meliputi *DigCompEdu* dari Uni Eropa dan UNESCO *ICT Competency Framework for Teachers* (ICT CFT v3). *DigCompEdu* mencakup enam area yaitu *professional engagement, digital resources, teaching and learning, assessment, empowering learners, dan facilitating learners'* digital competence. UNESCO ICT CFT meliputi kebijakan TIK dalam pendidikan, kurikulum dan asesmen, pedagogi, aplikasi keterampilan digital, organisasi dan administrasi, serta pembelajaran profesional (UNESCO-UNEVOC, 2022).

Wu dkk. (2025) dalam *systematic review* terhadap 25 studi menemukan bahwa tingkat kemahiran digital guru PTK secara global berada pada level sedang hingga rendah. Faktor personal seperti sikap dan frekuensi penggunaan teknologi menjadi prediktor lebih kuat dibandingkan faktor kontekstual. Dukungan kurikulum teridentifikasi sebagai faktor konteks terbesar untuk pengembangan kompetensi digital. Cattaneo dkk. (2022) mengidentifikasi bahwa 59% penyedia *further education* di UK membutuhkan pelatihan digital mendesak bahkan sebelum pandemi. Tabel 2 berikut merangkum *framework* kompetensi digital untuk guru PTK berdasarkan studi (Diao dkk., 2023).

Tabel 2. Framework Kompetensi Digital Guru PTK

Konstruk Kompetensi	Deskripsi
Pengembangan Kurikulum Digital	Kemampuan merancang dan mengembangkan kurikulum yang mengintegrasikan teknologi digital sesuai kebutuhan industri dan standar kompetensi
Fasilitasi Pembelajaran dengan Teknologi	Keterampilan menggunakan berbagai platform dan tools digital untuk memfasilitasi pembelajaran yang efektif, termasuk LMS, <i>e-learning</i> , dan teknologi <i>immersive</i>
Pengetahuan dan Keahlian Vokasional Digital	Penguasaan pengetahuan teknis vokasional yang terintegrasi dengan aplikasi teknologi digital sesuai bidang keahlian (misalnya CAD/CAM untuk teknik mesin)
Kapasitas Vokasional dengan Teknologi	Kemampuan menggunakan teknologi digital untuk meningkatkan praktik vokasional, termasuk <i>troubleshooting, maintenance</i> , dan adaptasi teknologi baru
Kompetensi Digital Personal	Literasi digital dasar, keamanan informasi, etika digital, dan kemampuan beradaptasi dengan teknologi baru
Penelitian dan Pengembangan Diri	Kemampuan melakukan refleksi, penelitian tindakan kelas, dan pembelajaran berkelanjutan untuk mengembangkan praktik pedagogi digital

Untuk siswa PTK, kompetensi yang dibutuhkan meliputi keterampilan fondasi seperti literasi digital, manajemen informasi, dan keamanan *online*, keterampilan teknis atau okupasional mencakup *software* industri, pengoperasian peralatan digital, dan penanganan data, keterampilan transversal abad ke-21 meliputi berpikir kritis, kolaborasi, komunikasi, kreativitas, dan pemecahan masalah, serta keterampilan emerging seperti literasi AI, dasar analitik data, dan kesadaran *cybersecurity* (Rajamanickam dkk., 2024).

Link and Match PTK dengan Industry 4.0/5.0

Transformasi industri menuju era 4.0 dan 5.0 menciptakan pergeseran signifikan dalam kebutuhan keterampilan. Studi Rampasso dkk. (2020) mengidentifikasi bahwa 30-40%

karyawan akan membutuhkan peningkatan keterampilan signifikan dalam 10 tahun ke depan. *World Economic Forum* (2023) melaporkan bahwa dua pertiga keterampilan kerja saat ini akan berubah atau menjadi usang, menciptakan potensi dampak ekonomi \$2,5 triliun. Industry 4.0 menekankan keterampilan teknis digital seperti AI/ML, IoT, *Cloud Computing*, Big Data, *Cybersecurity*, *Robotics*, dan *Digital Twins*. Sementara Industry 5.0 menambahkan dimensi *human-centric* dengan fokus pada *human-AI collaboration*, *AI ethics*, keterampilan sosio-emosional seperti empati, kepemimpinan, dan resiliensi, serta keberlanjutan melalui *green skills* dan *circular economy* (Lopes Martínez dkk., 2022). Tabel 3 membandingkan kebutuhan keterampilan kedua era industri ini.

Tabel 3. Perbandingan Keterampilan Industry 4.0 dan 5.0

Kategori Keterampilan	Industry 4.0	Industry 5.0
Teknis Digital	AI/ML, IoT, <i>Cloud Computing</i> , Big Data, <i>Cybersecurity</i> , <i>Robotics</i> , 3D Printing, AR/VR, <i>Digital Twins</i>	<i>Human-AI Collaboration</i> , <i>AI Ethics</i> , <i>Human-Machine Teaming</i>
Data	<i>Data entry, management, analysis, visualization, database</i>	<i>Data-driven decision making, data storytelling</i>
Kognitif	<i>Automation programming, CNC, PLC</i>	<i>Creative thinking, analytical thinking, critical thinking, complex decision-making</i>
Sosio-Emosional	<i>Digital communication</i>	<i>Collaboration, empathy, leadership, adaptability, resilience</i>
Keberlanjutan	-	<i>Green skills, circular economy, environmental management</i>

Model kemitraan PTK-Industri yang teridentifikasi meliputi Link-and-Match di Indonesia dengan sinkronisasi sistematis melalui magang dan pengembangan kurikulum bersama, Dual VET System di Jerman dengan 430.000 perusahaan mitra dan tingkat penerimaan kerja 80%, *Learning Factory 4.0* yang mensimulasikan lingkungan industri terintegrasi sebagaimana diterapkan di sekolah teknik Jerman (Marzo, 2024; Roll & Ifenthaler, 2021; Widiatna dkk., 2025), serta Regional TVET *Flagship Institutes* di Afrika yang berfungsi sebagai pusat keunggulan regional yang didanai World Bank (IIEP-UNESCO, 2022).

Tantangan Implementasi Digitalisasi PTK

Implementasi digitalisasi PTK menghadapi berbagai tantangan yang dapat dikategorikan dalam lima area utama sebagaimana dirangkum dalam Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Tantangan dan Solusi Implementasi Digitalisasi PTK

Kategori Tantangan	Tantangan Spesifik	Solusi yang Diusulkan
Infrastruktur dan Akses	<i>Digital divide</i> (2,6 miliar orang <i>offline</i>), ketersediaan perangkat terbatas, infrastruktur listrik lemah	<i>Offline digital kits, mobile-first approach, public-private partnerships</i> untuk akses gratis
Kesiapan Guru	Keterampilan digital tidak memadai (59% penyedia FE di UK membutuhkan pelatihan mendesak), resistensi guru senior	<i>Digital Teaching Professional Framework, gamified upskilling platforms, train-the-trainers, industry attachment</i>
Kurikulum dan Pedagogi	Pembelajaran <i>hands-on</i> sulit dilakukan secara digital,	<i>Additional digital qualifications, AR/VR integration, modularized</i>

Kategori Tantangan	Tantangan Spesifik	Solusi yang Diusulkan
	ketidakselarasan kurikulum-industri, tidak ada <i>framework</i> jelas untuk integrasi AI	<i>credentials, Industry 4.0 alignment</i>
<i>Quality Assurance</i>	Metode asesmen tradisional tidak cocok untuk PTK <i>online</i> , sertifikasi <i>online</i> tidak diakui <i>employer</i>	<i>E-credentialing systems, SELFIE-WBL diagnostic tools, competency-based assessment</i>
Pendanaan dan Kebijakan	Pendanaan PTK terbatas, biaya digitalisasi tinggi, gap antara kebijakan dan implementasi	<i>National Digital Strategies, people-first approach, cross-sectoral collaboration, model pendanaan berkelanjutan</i>

Pandemi COVID-19 menjadi akselerator sekaligus pengungkap ketidaksetaraan. Hanya 6% institusi berencana mempertahankan pengajaran tatap muka murni pasca-pandemi, dan 9 dari 10 institusi mengubah kebijakan sejak *onset* COVID-19 (British Council, 2021). Studi Habibi dkk. (2023) terhadap 1.355 guru di Indonesia mengidentifikasi hambatan eksternal meliputi keterbatasan internet atau *hardware* dan kurangnya pelatihan pemerintah, serta hambatan internal seperti keyakinan guru senior dan kurangnya kepercayaan diri sebagai penghalang utama adopsi teknologi digital.

Studi Kasus Implementasi PTK Digital

Studi kasus dari berbagai negara menunjukkan beragam pendekatan dan tingkat keberhasilan. Singapura melalui *Institute of Technical Education* (ITE) menjadi model keberhasilan dengan ekosistem terdigitalisasi penuh, analitik pembelajaran berbasis AI, dan tingkat pekerjaan lulusan hampir 90% dalam enam bulan pasca-kelulusan, didukung investasi \$4,5 miliar dalam *Industry Transformation Programme*. Jerman mempertahankan kualitas sistem dual dengan integrasi digital, menawarkan kualifikasi tambahan untuk kompetensi digital, namun menghadapi tantangan utama meliputi kapasitas layanan yang tidak memadai untuk digitalisasi industri dan daya tarik PTK yang menurun (Spöttl & Windelband, 2021). China melalui *Shenzhen Polytechnic University* sebagai sistem PTK terbesar dunia dengan 11.000+ institusi dan 30 juta siswa, mengembangkan 66 sumber VR dan 113 sumber AR, serta menerapkan *blockchain* untuk ketelusuran rekaman pembelajaran. Indonesia menghadapi tantangan dengan 25,80% pemuda NEET dan digital divide signifikan, namun mengembangkan inisiatif meliputi ekosistem SIAPKerja, program Pre-Employment Card, dan integrasi AI atau *coding* ke kurikulum nasional mulai 2025 (ILO, 2021). Afrika menunjukkan koordinasi kontinental melalui *Pan-African Digital Transformation Initiative*, namun menghadapi tantangan infrastruktur berat dimana 82% populasi di Sub-Saharan Africa tanpa akses internet, dengan solusi inovatif seperti *Ideas Cube* yaitu *nano-server* portabel yang telah diimplementasikan di 28 pusat vokasi Burundi dan DRC (IIEP-UNESCO, 2022).

Gap Penelitian dan Arah Masa Depan

Analisis literatur mengidentifikasi beberapa gap penelitian signifikan. Gap metodologis menunjukkan dominasi metode kualitatif sebesar 71% dengan *narrative inquiry* tanpa data kuantitatif, studi longitudinal yang melacak dampak jangka panjang sangat terbatas, RCT dalam konteks efektivitas PTK digital sangat jarang, dan banyak studi tidak melaporkan *reliability* atau *validity testing instrument* penelitian. Gap integrasi teknologi terlihat dari penelitian tentang IoT, *Robotics*, *Data Science*, AI, dan *cloud computing* dalam PTK yang masih terbatas, tidak ada *framework* kompetensi digital yang spesifik untuk konteks vokasional, serta adopsi ICT yang rendah dalam *monitoring*, evaluasi, bimbingan karir, dan

penempatan kerja (Braun dkk., 2024). Gap geografis dan kontekstual menunjukkan distribusi penelitian tidak seimbang dimana China, USA, UK, Jerman, dan Australia mendominasi publikasi, penelitian tentang *secondary* TVE (SMK) lebih sedikit dibandingkan *higher* TVE, dan sektor PTK informal hampir tidak tersentuh penelitian.

Rekomendasi arah penelitian masa depan meliputi peningkatan studi empiris dengan sampel lebih besar dan desain eksperimental, investigasi aplikasi AI dalam *personalized learning paths* dan eksplorasi VR atau AR untuk keterampilan psikomotorik, studi dampak *digital divide* pada akses dan *outcomes* PTK dengan fokus pada inklusi dan kesetaraan, serta analisis komparatif kebijakan digitalisasi PTK nasional dan *cost-effectiveness* intervensi (Rajamanickam dkk., 2024).

D. Penutup

Systematic Literature Review ini mengidentifikasi bahwa transformasi digital PTK bukan sekadar adopsi teknologi, melainkan rekonstruksi sistemik yang mencakup redefinisi kurikulum, reorientasi pedagogi, pengembangan kapasitas guru, dan penguatan kemitraan industri. Evidence base menunjukkan bahwa teknologi *immersive* seperti VR, AR, dan *simulation* sangat efektif untuk keterampilan psikomotorik dengan effect size yang kuat ($g=0.85$), sementara *blended learning* optimal untuk keseimbangan fleksibilitas dan hands-on experience. Keberhasilan digitalisasi PTK bergantung pada tiga pilar utama yaitu transformasi kurikulum berbasis kompetensi yang responsif terhadap Industry 4.0/5.0, peningkatan kapasitas digital guru melalui *framework* seperti *DigCompEdu* dan UNESCO ICT CFT, dan kemitraan industri yang sistematis melalui model *Link-and-Match*, *Dual VET System*, dan *Learning Factory 4.0*. Tantangan utama meliputi digital divide (2,6 miliar orang *offline*), kesiapan guru yang rendah (59% membutuhkan pelatihan mendesak), ketidakselarasan kurikulum dengan industri, dan gap antara kebijakan dan implementasi. Pergeseran dari Industry 4.0 yang *technology-centric* ke *Industry 5.0* yang *human-centric* menghadirkan tantangan dan peluang dimana PTK perlu memikirkan ulang seluruh *framework* pedagogis untuk mengintegrasikan dimensi keberlanjutan, *human-AI collaboration*, dan keterampilan sosio-emosional. Penelitian ini merekomendasikan agar institusi PTK memprioritaskan investasi dalam pengembangan kompetensi digital guru melalui program pelatihan berkelanjutan, mengimplementasikan *blended learning* sebagai model pembelajaran utama, dan membangun kemitraan strategis dengan industri untuk memastikan relevansi kurikulum. Pembuat kebijakan perlu mengembangkan strategi nasional digitalisasi PTK yang komprehensif dengan pendekatan *people-first*, mengalokasikan anggaran memadai untuk infrastruktur digital terutama di daerah dengan digital divide tinggi, serta memfasilitasi *public-private partnerships* untuk mempercepat akses teknologi. Peneliti diharapkan melakukan studi longitudinal untuk melacak dampak jangka panjang digitalisasi PTK, mengembangkan dan memvalidasi *framework* kompetensi digital yang spesifik untuk konteks PTK, memperkuat riset dengan metodologi kuantitatif dan *quasi-experimental design*, serta menginvestigasi implementasi PTK digital di negara berkembang dan sektor informal yang masih kurang tersentuh penelitian. Transformasi PTK di era digital memerlukan komitmen jangka panjang dari semua *stakeholder* yaitu pemerintah, institusi pendidikan, industri, dan masyarakat sipil untuk memposisikan PTK sebagai pusat pengembangan tenaga kerja yang berkelanjutan, inklusif, dan siap menghadapi tantangan masa depan.

Daftar Pustaka

Braun, G., Rikala, P., Järvinen, M., Hämäläinen, R., & Stahre, J. (2024). Bridging Skill Gaps – A Systematic Literature Review of Strategies for Industry. Dalam J. Andersson, S. Joshi, L. Malmsköld, & F. Hanning (Ed.), *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE240209>

- British Council. (2021). *Vocational training and education changed forever due to the pandemic*. <https://www.britishcouncil.org/organisation/press/vocational-training-and-education-changed-forever-due-pandemic>
- Cattaneo, A. A. P., Antonietti, C., & Rausedo, M. (2022). How digitalised are vocational teachers? Assessing digital competence in vocational education and looking at its underlying factors. *Computers & Education*, 176, 104358. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104358>
- Chernikova, O., Heitzmann, N., Stadler, M., Holzberger, D., Seidel, T., & Fischer, F. (2020). Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 90(4), 499–541. <https://doi.org/10.3102/0034654320933544>
- Diao, J., Han, X., Zhou, Q., & Wang, Y. (2023). Professional Competencies in TVET: Framework, Indicators and Assessment Instrument. Dalam *Handbook of Technical and Vocational Teacher Professional Development in the Digital Age* (hlm. 41–73). Springer Nature Singapore Singapore. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/76797/978-981-99-5937-2.pdf?sequence=1#page=50>
- González-Pérez, L. I., & Ramírez-Montoya, M. S. (2022). Components of Education 4.0 in 21st Century Skills Frameworks: Systematic Review. *Sustainability*, 14(3), 1493. <https://doi.org/10.3390/su14031493>
- Habibi, A., Sofyan, S., & Mukminin, A. (2023). Factors affecting digital technology access in vocational education. *Scientific Reports*, 13(1), 5682. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32755-6>
- IIEP-UNESCO. (2022). *Digitalization of TVET and skills systems in Africa: Scoping study*. UNESCO International Institute for Educational Planning.
- International Labour Organization. (2021). *The digitization of TVET and skills systems*. ILO. <https://www.ilo.org/media/396161/download>
- Kim, K. G., Oertel, C., Dobricki, M., Olsen, J. K., Coppi, A. E., Cattaneo, A., & Dillenbourg, P. (2020). Using immersive virtual reality to support designing skills in vocational education. *British Journal of Educational Technology*, 51(6), 2199–2213. <https://doi.org/10.1111/bjet.13026>
- Lopes Martínez, I., Cuesta Santos, A., Vilalta Alonso, J., Sonia Fleitas Triana, M., Delgado Fernández, T., Neumann, G., & Cruz Ruiz, A. (2022). Creating capacities: Towards industry 5.0 in the training of industrial engineers. *Revista Cubana de Administración Pública y Empresarial*, 6(2).
- Marzo, D. (2024). *Learning Factory: Systematic Literature Review through Innovative Approaches*. <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/33567/1/tesi.pdf>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rajamanickam, S., Che'Rus, R., Raji, M. A., Mina, H., & Vebrianto, R. (2024). Enhancing TVET education for the future: A comprehensive review of strategies and approaches. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 69–89. <https://pdfs.semanticscholar.org/aa36/d9949cce69766065afb40b6a673981996380.pdf>
- Rampasso, I. S., Mello, S. L. M., Walker, R., Simão, V. G., Araújo, R., Chagas, J., Quelhas, O. L. G., & Anholon, R. (2020). An investigation of research gaps in reported skills required for Industry 4.0 readiness of Brazilian undergraduate students. *Higher*

- Education, Skills and Work-based Learning*, 11(1), 34–47.
<https://doi.org/10.1108/HESWBL-10-2019-0131>
- Roll, M., & Ifenthaler, D. (2021). Learning Factories 4.0 in technical vocational schools: Can they foster competence development? *Empirical Research in Vocational Education and Training*, 13(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40461-021-00124-0>
- Spöttl, G., & Windelband, L. (2021). The 4th industrial revolution – its impact on vocational skills. *Journal of Education and Work*, 34(1), 29–52.
<https://doi.org/10.1080/13639080.2020.1858230>
- Thomann, H., Zimmermann, J., & Deutscher, V. (2024). How effective is immersive VR for vocational education? Analyzing knowledge gains and motivational effects. *Computers & Education*, 220, 105127. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105127>
- UNESCO-UNEVOC. (2022). *Digital skills development in TVET teacher training: Trends mapping study*. UNESCO International Centre for Technical and Vocational Education and Training.
- UNESCO-UNEVOC. (2023). *Digital transformation ecosystem for TVET*. UNESCO-UNEVOC International Centre.
- Wagino, W., Maksum, H., Purwanto, W., Krismadinata, K., Suhendar, S., & Koto, R. D. (2023). Exploring the Full Potential of Collaborative Learning and E-Learning Environments in Universities: A Systematic Review. *TEM Journal*, 1772–1785.
<https://doi.org/10.18421/TEM123-60>
- Widiatna, A. D., Utami, P. P., & Kemal, I. (2025). Implementing and Managing the Teaching Factory Learning Model at Vocational Schools. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(5), 341–351. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i5.10944>
- World Economic Forum. (2023). *Future of jobs report 2023*. World Economic Forum.
- Wu, J., Husnin, H., Mohamad, M., Jia, X., & Zhang, Y. (2025). Teachers' digital competency in vocational education: A systematic review. *Multidisciplinary Reviews*, 8(10), 2025313–2025313. <https://doi.org/10.31893/multirev.2025313>