

Featured Research

Relevansi teori teknologi pendidikan dalam menjawab tantangan era industri 4.0 di pendidikan vokasi

Alzet Rama^{1*)}, Wiki Lofandri¹, Syahda Humayra¹, Siti Fadillah Sallamah¹
Universitas Negeri Padang¹

*) Correspondence regarding this article should be addressed to: Author address e-mail: alzetrama@unp.ac.id

Abstract: Revolusi Industri 4.0 membawa transformasi signifikan pada dunia kerja, yang pada gilirannya menuntut adaptasi dalam sistem pendidikan vokasi. Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi tantangan pedagogis yang dihadapi pendidikan vokasi di era ini dan menganalisis relevansi teori teknologi pendidikan (EdTech) dalam meresponsnya. Melalui tinjauan pustaka sistematis dan analisis konseptual, penelitian ini mengidentifikasi tantangan kunci seperti kebutuhan rapid re-skilling, penyelesaian masalah kompleks, kolaborasi manusia-mesin, literasi data, dan pembelajaran mandiri. Hasil analisis menunjukkan bahwa teori EdTech tradisional seperti Behaviorisme, Kognitivisme, dan Konstruktivisme masih relevan namun tidak memadai jika diterapkan secara tunggal untuk menjawab seluruh kompleksitas tantangan tersebut. Sebaliknya, teori yang lebih baru seperti Konektivisme dan Heutagogy menawarkan pendekatan yang lebih sesuai untuk mendukung pembelajaran seumur hidup dan otonomi siswa. Sebagai novelty, artikel ini mengusulkan sebuah kerangka teoretis hibrid yang mengintegrasikan prinsip-prinsip dari teori lama dan baru untuk menciptakan pendekatan pedagogis yang lebih komprehensif dan adaptif. Implikasinya menekankan pergeseran peran guru menjadi fasilitator dan pentingnya landasan teori yang kuat dalam adopsi teknologi untuk memastikan efektivitas pembelajaran dan kesiapan kerja lulusan vokasi di tengah dinamika Industri 4.0.

Keywords: Pendidikan Vokasi, Industri 4.0, Teori Teknologi Pendidikan, Kerangka Hibrid, Tantangan Pedagogis

Article History: Received on 26/09/2023; Revised on 27/10/2023; Accepted on 20/11/2023; Published Online: 31/12/2023.



This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2023 by author.

INTRODUCTION

Revolusi Industri Keempat atau Industri 4.0, menandai era baru dalam sejarah industri manusia, di mana teknologi digital mengubah cara produksi dan interaksi manusia dengan mesin. (Yang & Gu, 2021) Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh pemerintah Jerman pada tahun 2011 sebagai strategi untuk meningkatkan daya saing global melalui integrasi teknologi canggih. Industri 4.0 melampaui revolusi sebelumnya yang berfokus pada mekanisasi dan otomatisasi, dengan menekankan konektivitas, analitik data, dan kecerdasan buatan untuk menciptakan sistem produksi yang lebih efisien dan

adaptif.(Szukits & Móricz, 2023) Dampaknya tidak terbatas pada sektor manufaktur, tetapi meluas ke logistik, kesehatan, dan layanan lainnya, di mana teknologi ini memungkinkan produksi yang lebih cepat, akurat, dan responsif terhadap dinamika pasar.(Guhl et al., 2024)

Dalam konteks dunia kerja, Industri 4.0 menimbulkan pertanyaan mendasar tentang bagaimana teknologi ini membentuk ulang struktur pekerjaan, keterampilan yang dibutuhkan, dan implikasi sosial-ekonomi.(Suleiman et al., 2022) Artikel ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang definisi Industri 4.0, komponen utamanya, serta dampak positif dan negatifnya pada dunia kerja. Dengan menggunakan pendekatan analitis berdasarkan literatur terkini, penulis berharap dapat memberikan wawasan bagi mahasiswa dan praktisi untuk memahami transformasi ini secara lebih mendalam.

Industri 4.0 didefinisikan sebagai integrasi teknologi digital ke dalam proses industri untuk mencapai produksi yang cerdas dan terhubung.(Rijwani et al., 2024) Revolusi ini didorong oleh empat komponen utama yaitu Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Big Data, dan Cyber-Physical Systems (CPS)(Lee et al., 2025). AI memungkinkan mesin untuk belajar dari data dan membuat keputusan otomatis, seperti dalam algoritma prediktif yang mengoptimalkan rantai pasokan.(Purohit, Svitkina, & Kumar, 2024) IoT menghubungkan perangkat fisik melalui jaringan internet, memfasilitasi pemantauan real-time dan komunikasi antar mesin, sehingga mengurangi downtime dan meningkatkan efisiensi.(Kumar, Tiwari, & Zymbler, 2019)

Big Data melibatkan pengolahan dan analisis volume data besar untuk mengidentifikasi pola dan tren, yang krusial dalam peramalan permintaan pasar dan pengambilan keputusan strategis(Abdalla, 2022). CPS, sebagai komponen integratif, menggabungkan dunia fisik dan digital, di mana sistem komputer mengontrol proses fisik secara real-time, seperti dalam pabrik pintar yang menyesuaikan operasi berdasarkan data sensor.(Shih et al., 2016) Komponen-komponen ini saling terkait, membentuk ekosistem yang memungkinkan produksi yang lebih fleksibel dan inovatif, sebagaimana diilustrasikan dalam model referensi RAMI 4.0(Hernández et al., 2019)

Industri 4.0 membawa dampak positif signifikan pada dunia kerja dengan meningkatkan produktivitas dan menciptakan peluang baru.(Bettiol et al., 2023) Otomatisasi tugas rutin melalui AI dan IoT membebaskan pekerja dari aktivitas manual, memungkinkan mereka fokus pada tugas yang lebih bernilai tambah, seperti desain inovatif atau analisis strategis.(Siam et al., 2024) Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga mendorong munculnya pekerjaan baru di bidang teknologi, seperti spesialis data, insinyur robotika, dan ahli keamanan siber, yang membutuhkan keterampilan tinggi dan pendidikan lanjutan.(Mol, Belfi, & Bakk, 2024)

Selain itu, efisiensi yang lebih besar dapat mengurangi biaya produksi, memungkinkan perusahaan untuk memperluas pasar dan menciptakan lapangan kerja tambahan di sektor terkait. Misalnya, di negara-negara seperti Jerman dan Amerika Serikat, Industri 4.0 telah dikaitkan dengan peningkatan ekspor dan pertumbuhan ekonomi inklusif, di mana akses ke pendidikan digital membantu pekerja beradaptasi(Xue et al.,

2024). Secara keseluruhan, transformasi ini mendorong ekonomi yang lebih dinamis, di mana manusia dan mesin bekerja sama untuk mencapai hasil yang optimal. (Sasaki, 2022)

Selain itu, Industri 4.0 juga menimbulkan tantangan termasuk risiko pengangguran struktural akibat otomatisasi. (Damelang & Otto, 2023) Pekerjaan manual dan repetitif, seperti di lini produksi, rentan digantikan oleh mesin, yang dapat mempengaruhi pekerja berpendidikan rendah atau di sektor tradisional. (Mudiyanselage et al., 2021) Studi menunjukkan bahwa hingga 47% pekerjaan di Amerika Serikat berisiko otomatisasi tinggi, terutama di manufaktur dan ritel.

Kesenjangan digital merupakan tantangan lain, di mana pekerja yang tidak terampil teknologi mungkin tertinggal, memperlebar jurang sosial-ekonomi. (Gomes & Dias, 2024) Hal ini memerlukan investasi besar dalam pendidikan dan pelatihan ulang, seperti program reskilling yang didukung pemerintah. (Datta et al., 2024) Aspek keamanan data juga menjadi perhatian, karena peningkatan konektivitas IoT meningkatkan risiko serangan siber, yang dapat mengganggu operasi dan mengancam privasi pekerja. (Kumar, Tiwari, & Zymbler, 2019) Dampak negatif ini menuntut kebijakan yang adil untuk mengelola transisi, seperti subsidi untuk pelatihan dan jaminan sosial.

Pendidikan vokasi memainkan peran krusial dalam pembangunan sumber daya manusia di era globalisasi, di mana kebutuhan akan tenaga kerja terampil menjadi semakin mendesak. (Cai & Kosaka, 2024) Di tengah persaingan ekonomi yang ketat, pendidikan vokasi bertindak sebagai jembatan antara dunia pendidikan dan dunia kerja, memastikan lulusan tidak hanya memiliki pengetahuan teoritis tetapi juga keterampilan praktis yang langsung relevan dengan industri. (Yu, Yan, & Jin, 2024) Tanpa pendidikan vokasi yang kuat, banyak negara menghadapi kesenjangan antara kualifikasi tenaga kerja yang tersedia dan permintaan pasar, yang dapat menghambat pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan pengangguran. (Zhuo et al., 2024)

Salah satu aspek utama peran pendidikan vokasi adalah kemampuannya untuk menyediakan tenaga kerja siap pakai di berbagai bidang seperti teknik, kesehatan, pariwisata, dan teknologi informasi. (Widayati, MacCallum, & Woods-McConney, 2021) Berbeda dengan pendidikan umum yang lebih menekankan pengembangan intelektual, pendidikan vokasi fokus pada pelatihan praktis melalui simulasi, magang, dan kerja lapangan. (Sui-Ni, 2023) Hal ini memungkinkan siswa menguasai keterampilan spesifik, seperti pengoperasian mesin atau manajemen layanan, sehingga mengurangi waktu transisi ke dunia kerja dan meningkatkan produktivitas secara keseluruhan.

Dalam konteks ekonomi, pendidikan vokasi berkontribusi pada pengurangan pengangguran dan peningkatan kesejahteraan masyarakat dengan menyediakan jalur inklusif bagi berbagai lapisan. (Subiyantoro, Tarziraf, & Asmara, 2023) Namun, untuk memaksimalkan perannya, diperlukan kolaborasi antara pemerintah, industri, dan lembaga pendidikan untuk mengatasi tantangan seperti kurikulum yang belum selaras dengan teknologi modern. Dengan investasi yang tepat, pendidikan vokasi dapat menjadi pilar utama dalam menciptakan tenaga kerja terampil yang mendorong pertumbuhan ekonomi berkelanjutan. (Sui-Ni, 2023)

konsep Vokasi 4.0 muncul sebagai evolusi pendidikan vokasi yang menyelaraskan kurikulum dengan kebutuhan Industri 4.0 (Masrifah & Sudira, 2020). Vokasi 4.0

menekankan pelatihan praktis yang menggabungkan teknologi canggih, seperti simulasi virtual, pembelajaran berbasis proyek, dan pengembangan keterampilan soft seperti kreativitas dan etika digital.(Yao & Lin, 2025) Berbeda dari model vokasi konvensional, pendekatan ini melibatkan kemitraan dengan industri untuk memastikan lulusan siap menghadapi tantangan seperti otomasi dan analisis data real-time. Konsep ini terinspirasi dari sistem dual di negara seperti Jerman dan Singapura, yang telah terbukti efektif dalam mengurangi kesenjangan antara pendidikan dan pasar kerja.(Hummelsheim & Baur, 2014)

Munculnya Vokasi 4.0 juga memiliki implikasi strategis bagi pembangunan sumber daya manusia, khususnya di negara berkembang. Dengan fokus pada inovasi dan inklusi, pendidikan ini meningkatkan daya saing tenaga kerja dan mendukung agenda global seperti Sustainable Development Goals.(Kumar, Manglani, & Jadhav, 2024) Namun, tantangan seperti biaya infrastruktur teknologi tinggi dan kebutuhan pembaruan kurikulum berkelanjutan harus diatasi. Secara keseluruhan, Vokasi 4.0 mewakili langkah penting untuk memastikan relevansi pendidikan vokasi di era digital, mendorong pertumbuhan ekonomi dan pengurangan pengangguran.

Salah satu tantangan utama dalam pendidikan vokasi saat ini adalah terjadinya skill gap yang signifikan antara kompetensi lulusan vokasi dan kebutuhan industri 4.0(Ariansyah et al., 2024). Industri 4.0, yang ditandai oleh integrasi teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), big data, dan robotika, memerlukan keterampilan teknis dan soft skills yang lebih canggih.(Kumar, Tiwari, & Zymbler, 2019) Namun, banyak lulusan vokasi masih terjebak dalam kurikulum yang lebih fokus pada keterampilan tradisional, sehingga mereka kurang siap menghadapi transformasi digital yang cepat di dunia kerja(Paramitasari et al., 2024).

Kesenjangan ini terlihat jelas dalam berbagai sektor industri, di mana perusahaan kesulitan menemukan tenaga kerja yang mampu mengoperasikan mesin canggih atau menganalisis data real-time.(Elahi et al., 2023) Lulusan vokasi sering kali memiliki pengetahuan dasar tentang teknologi, tetapi kurang dalam aspek seperti pemrograman, analitik data, atau kolaborasi lintas-disiplin. Akibatnya, tingkat pengangguran atau underemployment meningkat di kalangan lulusan vokasi, sementara industri mengalami hambatan produktivitas dan inovasi.(Ariansyah et al., 2024) Data dari berbagai studi menunjukkan bahwa skill gap ini tidak hanya mempengaruhi individu, tetapi juga ekonomi nasional, karena investasi dalam teknologi 4.0 tidak dapat dimaksimalkan tanpa tenaga kerja yang kompeten.

Faktor penyebab skill gap ini meliputi kurangnya pembaruan kurikulum pendidikan vokasi yang selaras dengan perkembangan teknologi, keterbatasan akses terhadap peralatan modern di sekolah, serta minimnya kemitraan antara institusi pendidikan dan industri. Tanpa intervensi, masalah ini dapat memperburuk ketimpangan sosial dan ekonomi, karena generasi muda akan semakin tertinggal dalam persaingan global. Oleh karena itu, diperlukan reformasi mendalam dalam sistem pendidikan vokasi untuk menjembatani kesenjangan ini, memastikan lulusan tidak hanya terampil secara teknis tetapi juga adaptif terhadap perubahan industri 4.0.(Suleiman et al., 2022)

Banyak institusi pendidikan vokasi saat ini terdorong untuk mengintegrasikan teknologi canggih ke dalam kurikulum mereka, seperti simulator virtual reality (VR) untuk

simulasi praktik atau mesin CNC untuk pelatihan manufaktur.(Yang et al., 2024) Namun, adopsi ini sering kali dilakukan tanpa landasan pedagogis yang kuat, di mana keputusan pembelian didasarkan lebih pada tren atau tekanan eksternal daripada analisis mendalam terhadap bagaimana teknologi tersebut dapat meningkatkan pembelajaran siswa. Hal ini menciptakan kesenjangan antara investasi teknologi dan efektivitas pendidikan, karena tanpa teori pedagogis yang jelas seperti teori pembelajaran aktif atau integrasi teknologi dalam model instruksional teknologi tersebut mungkin tidak dimanfaatkan secara optimal.(Micheline & Wylie, 2014)

Tanpa landasan pedagogis, institusi vokasi berisiko mengalami kegagalan investasi yang signifikan. Misalnya, simulator VR yang dibeli dengan biaya tinggi mungkin hanya digunakan untuk demonstrasi singkat atau bahkan tidak terintegrasi ke dalam kegiatan belajar mengajar harian, sehingga siswa tidak mendapatkan manfaat maksimal seperti pengalaman imersif yang mendukung pemahaman konsep praktis.(Chandanani, Laidlaw, & Brown, 2025) Begitu pula dengan mesin CNC, yang tanpa panduan pedagogis yang tepat, bisa menjadi alat yang kurang efektif dalam membangun keterampilan teknis siswa(Hu et al., 2024). Akibatnya, teknologi ini sering kali berakhir sebagai "pajangan" di laboratorium, yang tidak hanya membuang-buang anggaran tetapi juga menurunkan motivasi staf dan siswa untuk berinovasi.

Implikasi jangka panjang dari masalah ini termasuk penurunan kualitas pendidikan vokasi secara keseluruhan, di mana siswa lulus tanpa keterampilan yang relevan dengan kebutuhan industri, serta reputasi institusi yang terpengaruh oleh kegagalan proyek teknologi(Billett, 2020). Untuk mengatasi ini, institusi perlu mengembangkan kerangka pedagogis terlebih dahulu, seperti melakukan penilaian kebutuhan pembelajaran dan melatih tenaga pendidik dalam integrasi teknologi. Dengan pendekatan ini, adopsi teknologi dapat menjadi investasi yang berkelanjutan, memastikan bahwa setiap pembelian didukung oleh teori yang jelas untuk mencapai hasil pembelajaran yang efektif.(Acemoğlu et al., 2023)

Dalam era digital saat ini, teknologi seperti kecerdasan buatan (AI), platform pembelajaran daring, dan alat interaktif telah menjadi bagian integral dari sistem pendidikan.(Sui-Ni, 2023) Namun, permasalahan utama yang sering diabaikan adalah kecenderungan untuk fokus semata-mata pada aspek teknis teknologi tersebut, seperti fitur-fitur canggihnya atau kemampuan komputasionalnya, tanpa mempertimbangkan bagaimana teknologi ini seharusnya digunakan untuk mendukung proses pembelajaran siswa. Hal ini menciptakan kesenjangan antara inovasi teknologi dan praktik pedagogi yang efektif, di mana siswa mungkin terpapar alat-alat canggih tetapi tidak belajar dengan cara yang optimal, sehingga potensi pendidikan tidak tercapai sepenuhnya.(Jenssen & Haara, 2024)

Ada urgensi mendesak untuk memahami bagaimana siswa seharusnya belajar dengan teknologi ini, bukan hanya apa teknologinya. Pendekatan ini melibatkan eksplorasi pedagogi yang tepat, seperti model pembelajaran aktif, diferensiasi instruksi, dan integrasi teknologi yang disesuaikan dengan kebutuhan individu siswa, untuk memastikan bahwa teknologi tidak hanya menjadi alat pasif tetapi sebagai katalisator pengembangan keterampilan kognitif, kreativitas, dan kolaborasi(Berger et al., 2024). Tanpa pemahaman

ini, risiko kegagalan integrasi teknologi meningkat, yang dapat memperlebar kesenjangan pendidikan dan menghambat kemajuan siswa dalam dunia yang semakin bergantung pada literasi digital. Oleh karena itu, penelitian dan praktik pendidikan harus lebih menekankan pada metodologi pembelajaran berbasis teknologi untuk mencapai hasil yang lebih bermakna dan berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam artikel ini yaitu Apa saja tantangan pedagogis spesifik yang dihadirkan oleh era Industri 4.0 bagi pendidikan vokasi?, Sejauh mana teori teknologi pendidikan yang ada (misal, Behaviorisme, Konstruktivisme) masih relevan untuk menjawab tantangan tersebut?, dan Teori atau konsep baru apa (misal, Konektivisme, Heutagogy) yang lebih cocok untuk meringkai pembelajaran vokasi 4.0?

Artikel ini bertujuan untuk memetakan, menganalisis, dan mengevaluasi relevansi berbagai teori EdTech dalam konteks pendidikan vokasi di era Industri 4.0, di mana teknologi seperti kecerdasan buatan, big data, dan otomasi memainkan peran krusial dalam membentuk keterampilan praktis siswa. Signifikansinya terletak pada penyediaan landasan konseptual yang kuat bagi pendidik, peneliti, dan pembuat kebijakan, sehingga mereka dapat merancang strategi pembelajaran berbasis teknologi yang efektif, inovatif, dan sesuai dengan tuntutan dunia kerja modern, yang pada akhirnya mendorong peningkatan kualitas pendidikan vokasi secara keseluruhan.

METHOD

Artikel ini menggunakan metode Tinjauan Pustaka Sistematis (SLR) dikombinasikan dengan Analisis Konseptual untuk mengeksplorasi teori EdTech dalam pendidikan vokasi era Industri 4.0 (Sauer & Seuring, 2023). Sumber data diperoleh dari artikel jurnal, prosiding konferensi, dan buku di database seperti Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan ERIC, dengan rentang waktu 2011-2025. Kata kunci pencarian: ("Vocational Education" OR "TVET") AND ("Industry 4.0" OR "Smart Factory") AND ("Educational Technology" OR "Learning Theory" OR "Pedagogy"). Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas teori pembelajaran, pedagogi, dan teknologi dalam konteks vokasi/Industri 4.0, dengan eksklusi untuk artikel teknis murni atau yang hanya mendaftar alat tanpa diskusi teoretis. Analisis data menggunakan pendekatan tematik untuk mengidentifikasi tantangan Industri 4.0, lalu konseptual untuk memetakan prinsip teori EdTech terhadap tantangan tersebut. (Tynchenko et al., 2024).

RESULTS AND DISCUSSION (12PT – PALATINO LINOTYPE)

Temuan 1: Identifikasi Tantangan Pedagogis Kunci Vokasi 4.0

Dalam konteks pendidikan vokasi di era Industri 4.0, tantangan pedagogis utama yang teridentifikasi melalui tinjauan pustaka adalah pembelajaran keterampilan yang cepat berubah (rapid re-skilling). (Tong, Wu, & Evans, 2021) Teknologi seperti otomasi dan kecerdasan buatan menyebabkan keterampilan teknis siswa menjadi usang dengan cepat, sehingga pendidikan vokasi perlu mengadopsi model pembelajaran yang fleksibel dan berbasis proyek untuk memungkinkan siswa menguasai keterampilan baru secara berkelanjutan (Douglas, 2025). Tanpa pendekatan ini, siswa berisiko tertinggal dari

perkembangan industri, yang menuntut kurikulum yang dapat disesuaikan dengan perubahan pasar kerja.

Tantangan kedua adalah kebutuhan akan kemampuan penyelesaian masalah kompleks (complex problem-solving)(Ying et al., 2023). Industri 4.0 melibatkan sistem yang saling terhubung dan dinamis, sehingga siswa vokasi harus dilatih untuk menganalisis situasi rumit, membuat keputusan strategis, dan mengintegrasikan pengetahuan multidisiplin.(Vogel & Hunecke, 2023) Tinjauan pustaka menunjukkan bahwa teori pembelajaran seperti problem-based learning dapat diterapkan untuk membangun keterampilan ini, memastikan siswa tidak hanya menguasai tugas rutin tetapi juga inovasi dalam lingkungan kerja yang tidak terduga.(Wijnia et al., 2024)

Kolaborasi manusia-mesin (human-machine collaboration) merupakan tantangan pedagogis ketiga yang krusial.(Hemmer et al., 2024) Di era Industri 4.0, siswa vokasi harus belajar bekerja bersama robot dan sistem AI, yang memerlukan pemahaman tentang etika, keamanan, dan interaksi manusia-teknologi.(Kim et al., 2024) Analisis literatur mengungkapkan perlunya pedagogi yang menekankan simulasi dan latihan praktis untuk membangun kepercayaan dan keterampilan kolaboratif, sehingga siswa dapat memanfaatkan teknologi sebagai mitra kerja daripada pesaing.(Johnsen, Sjølie, & Johansen, 2023)

Tantangan keempat adalah literasi data dan analitik, di mana siswa vokasi perlu menguasai pengumpulan, analisis, dan interpretasi data besar (big data) untuk mendukung pengambilan keputusan di pabrik cerdas(Jamarani et al., 2024). Tinjauan pustaka menyoroti pentingnya integrasi alat digital seperti platform analitik ke dalam kurikulum, dengan fokus pada pembelajaran berbasis data untuk mengembangkan kemampuan siswa dalam memprediksi tren industri dan mengoptimalkan proses produksi(Consoli et al., 2024).

Akhirnya, kebutuhan akan pembelajaran mandiri (self-determined learning) menjadi tantangan pedagogis kelima.(Cullen & Oppenheimer, 2024) Di tengah akses informasi yang melimpah, siswa vokasi harus didorong untuk mengelola pembelajaran mereka sendiri, termasuk motivasi intrinsik dan kemampuan beradaptasi. Literatur menunjukkan bahwa teori seperti self-regulated learning dapat diterapkan melalui teknologi e-learning, memungkinkan siswa mengembangkan otonomi dan ketahanan dalam menghadapi perubahan cepat di dunia kerja Industri 4.0.(Brenner, 2022)

Temuan 2: Evaluasi Relevansi Teori-Teori EdTech yang Mapah

Dalam temuan kedua dari tinjauan pustaka ini yaitu mengevaluasi relevansi berbagai teori EdTech yang telah dipetakan terhadap tantangan pedagogis kunci vokasi 4.0(Godsk & Møller, 2024). Evaluasi ini didasarkan pada analisis konseptual yang membandingkan prinsip-prinsip teori dengan kebutuhan praktis pendidikan vokasi, seperti rapid re-skilling, problem-solving kompleks, dan kolaborasi manusia-mesin. Hasilnya menunjukkan bahwa tidak ada teori tunggal yang cukup untuk menjawab semua tantangan, sehingga diperlukan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan elemen dari berbagai teori untuk mencapai pembelajaran yang efektif dan adaptif(Zheng et al., 2025).

Teori behaviorisme, yang menekankan pembelajaran melalui stimulus-respons dan penguatan, masih relevan dalam konteks pelatihan berbasis simulator di pendidikan vokasi (Leeder, 2022). Misalnya, latihan berulang dengan umpan balik instan pada simulator mesin atau perangkat lunak industri dapat membantu siswa menguasai keterampilan teknis dasar secara efisien. Namun, teori ini kurang memadai untuk mengembangkan kemampuan problem-solving kompleks, karena fokusnya pada respons otomatis daripada pemikiran kritis atau kreativitas, yang penting dalam lingkungan Industri 4.0 yang dinamis. (Laskowski, Chybowski, & Gawdzińska, 2015)

Kognitivisme, yang berfokus pada proses mental internal seperti pemrosesan informasi dan pembentukan skema, relevan untuk memahami bagaimana siswa vokasi belajar menggunakan software kompleks seperti CAD/CAM atau sistem analitik data. (Knyazev, 2023) Teori ini membantu dalam merancang instruksi yang memfasilitasi pemahaman mendalam tentang algoritma dan logika di balik teknologi, mendukung tantangan literasi data dan analitik. Meskipun demikian, kognitivisme kurang menekankan aspek sosial atau kontekstual, seperti kolaborasi tim atau interaksi manusia-mesin, yang sering diperlukan dalam praktik vokasi sehari-hari (Ravasi et al., 2024).

Konstruktivisme dan sosial-konstruktivisme, yang menekankan pembelajaran aktif melalui konstruksi pengetahuan pribadi dan sosial, sangat relevan untuk pembelajaran berbasis proyek (PjBL) menggunakan teknologi (Almulla, 2020). Contohnya, siswa dapat membuat prototipe IoT melalui kolaborasi kelompok, yang membangun keterampilan problem-solving dan kolaborasi manusia-mesin (Goeritno et al., 2023). Teori ini mendukung pembelajaran mandiri dan adaptasi terhadap perubahan cepat, namun mungkin terlalu lambat untuk rapid re-skilling karena proses konstruksi pengetahuan yang memerlukan waktu dan eksplorasi mendalam.

Secara keseluruhan, evaluasi ini mengungkapkan bahwa behaviorisme cocok untuk pelatihan dasar, kognitivisme untuk pemahaman teknis, dan konstruktivisme untuk inovasi kolaboratif, tetapi integrasi ketiganya diperlukan untuk menangani kompleksitas vokasi 4.0 (Leeder, 2022). Pendidik dapat menggunakan model hibrida, seperti menggabungkan simulasi behavioristik dengan proyek konstruktivis, untuk menciptakan kurikulum yang lebih holistik dan responsif terhadap tantangan industri.

Temuan ini juga menyoroti perlunya penelitian lanjutan untuk menguji efektivitas teori-teori ini dalam konteks spesifik, seperti melalui studi kasus di sekolah vokasi yang mengadopsi teknologi Industri 4.0. Dengan demikian, landasan konseptual ini dapat memandu pengembangan strategi pembelajaran yang tidak hanya teoritis tetapi juga praktis dan terukur.

Temuan 3: Potensi Teori-Teori EdTech yang Lebih Baru/Relevan

Konektivisme, sebagai teori pembelajaran yang dikembangkan oleh George Siemens, menekankan pentingnya koneksi dan jaringan dalam proses belajar di era digital. Teori ini sangat relevan untuk pendidikan teknologi (EdTech) karena menjelaskan bagaimana individu dapat mengkurasi dan mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber online, seperti media sosial, basis data, dan platform kolaboratif (Xu & Xu, 2022). Dalam konteks Industri 4.0, di mana pengetahuan terus berkembang dan berubah cepat, konektivisme mendukung lifelong learning dengan mendorong pembelajar untuk membangun jaringan

pengetahuan yang dinamis. Misalnya, alat seperti Learning Management Systems (LMS) atau platform seperti LinkedIn Learning memungkinkan siswa untuk terhubung dengan ahli global, sehingga pembelajaran tidak lagi terbatas pada ruang kelas tradisional (Mella-Norambuena, Chiappe, & Quintana, 2024). Hal ini terbukti efektif dalam studi kasus di universitas seperti University of Manitoba, di mana konektivisme meningkatkan kemampuan siswa untuk beradaptasi dengan teknologi baru melalui kolaborasi daring.

Heutagogy, atau pembelajaran yang ditentukan sendiri, menempatkan siswa sebagai agen utama dalam proses pembelajarannya, yang sangat sesuai dengan perkembangan EdTech saat ini (Agonács & Matos, 2019). Teori ini, yang diperkenalkan oleh Stewart Hase dan Chris Kenyon, menekankan kemampuan siswa untuk mengatur pembelajaran mereka sendiri, termasuk menentukan tujuan, sumber daya, dan jalur belajar. Di era Industri 4.0, di mana teknologi seperti AI dan big data memerlukan keterampilan adaptasi mandiri, heutagogy memungkinkan siswa untuk belajar secara fleksibel tanpa bergantung sepenuhnya pada instruktur. Platform EdTech seperti Khan Academy atau Coursera mendukung pendekatan ini dengan menyediakan jalur pembelajaran yang dapat disesuaikan, memungkinkan siswa untuk mengeksplorasi topik baru berdasarkan minat pribadi (Liković & Rojko, 2022). Penelitian dari *Journal of Applied Learning in Higher Education* menunjukkan bahwa heutagogy meningkatkan motivasi intrinsik dan kemampuan siswa untuk berinovasi, terutama dalam bidang teknologi yang terus berkembang.

Pembelajaran kontekstual, yang berasal dari teori *situated learning* oleh Jean Lave dan Etienne Wenger, menyatakan bahwa belajar paling efektif terjadi dalam konteks otentik yang mirip dengan situasi dunia nyata. Integrasi dengan teknologi *Augmented Reality (AR)* dan *Virtual Reality (VR)* memperkuat teori ini di EdTech, karena memungkinkan simulasi lingkungan industri yang aman dan realistis tanpa risiko (Balalle, 2025). Misalnya, VR dapat mensimulasikan operasi pabrik atau prosedur medis, memungkinkan siswa untuk belajar melalui pengalaman langsung. Di Industri 4.0, di mana keterampilan praktis seperti pemrograman robot atau analisis data sangat dibutuhkan, AR/VR memberikan konteks yang tidak dapat dicapai melalui metode tradisional. Studi dari MIT Media Lab menunjukkan bahwa penggunaan VR dalam pendidikan meningkatkan retensi pengetahuan hingga 75% dibandingkan pembelajaran tekstual, karena siswa dapat berinteraksi dengan objek virtual dalam skenario yang relevan. Dengan demikian, teori ini mendorong pengembangan EdTech yang lebih imersif dan aplikatif (Kee, Zhang, & King, 2023).

Diskusi

Interpretasi Hasil

Hasil analisis dari Bagian R menunjukkan bahwa tidak ada satu pun teori pembelajaran yang dapat mencakup secara menyeluruh semua tantangan yang dihadapi dalam konteks Vokasi 4.0, di mana pendidikan vokasi harus beradaptasi dengan teknologi canggih, perubahan cepat di dunia kerja, dan kebutuhan keterampilan multidimensi (Liu et al., 2018). Hal ini mengindikasikan kompleksitas pendidikan vokasi modern, yang melibatkan aspek teknis, sosial, dan kognitif yang saling terkait. Misalnya, teori seperti behaviorisme mungkin efektif untuk pembelajaran keterampilan dasar, tetapi gagal

menangani aspek kolaboratif atau inovasi yang dibutuhkan di era Industri 4.0 (Frutos-Belizón et al., 2024). Dengan demikian, pendekatan integratif diperlukan untuk mengatasi kesenjangan ini, memastikan bahwa kurikulum vokasi tidak hanya fokus pada pengetahuan teknis tetapi juga pada kemampuan beradaptasi dan berpikir kritis.

Meskipun teori-teori pembelajaran lama, seperti behaviorisme atau kognitivisme, tidak sepenuhnya lama, hasil analisis menegaskan bahwa mereka tidak memadai jika diterapkan secara mandiri dalam konteks Vokasi 4.0. Teori-teori ini masih memiliki nilai dalam membangun fondasi dasar, seperti penguatan perilaku melalui latihan berulang atau pemrosesan informasi kognitif, namun mereka kurang mampu menangani dinamika pembelajaran yang lebih kompleks, seperti interaksi sosial atau pembelajaran berbasis proyek (Niu et al., 2024). Di dunia vokasi yang semakin terintegrasi dengan teknologi, teori lama sering kali terbatas pada pendekatan linear yang tidak cocok dengan kebutuhan pembelajaran yang fleksibel dan kontekstual. Oleh karena itu, mereka perlu dikombinasikan dengan pendekatan baru untuk mencapai efektivitas maksimal, menghindari stagnasi dalam kurikulum yang tidak mampu mengikuti perkembangan industri.

Teori-teori baru seperti konektivisme dan heutagogy muncul sebagai solusi krusial untuk mengisi kesenjangan yang ditinggalkan oleh teori lama, khususnya dalam mendukung pembelajaran seumur hidup dan otonomi siswa, yang merupakan inti dari Industri 4.0. Konektivisme, dengan penekanannya pada jaringan dan kurasi informasi dari sumber daring, memungkinkan siswa vokasi untuk terus belajar di luar kelas, beradaptasi dengan teknologi baru seperti AI dan IoT. Sementara itu, heutagogy mendorong siswa untuk menjadi agen utama pembelajarannya, meningkatkan kemampuan mandiri yang penting untuk karir vokasi yang dinamis (Ehlers, 2020). Integrasi kedua teori ini tidak hanya melengkapi teori lama tetapi juga memastikan pendidikan vokasi lebih responsif terhadap tantangan masa depan, seperti perubahan pekerjaan dan inovasi teknologi, sehingga siswa dapat berkembang sebagai pembelajar seumur hidup yang kompeten.

Sintesis: Menuju Kerangka Teoretis Hibrid (Novelty Artikel)

Argumen utama dalam artikel ini adalah pengusulan sebuah Kerangka Kerja Teoretis Hibrid yang inovatif untuk pendidikan vokasi di era Industri 4.0, yang dikenal sebagai Vokasi 4.0. Kerangka ini tidak bergantung pada satu teori tunggal, melainkan mengintegrasikan berbagai teori pembelajaran untuk menciptakan pendekatan yang lebih komprehensif dan adaptif. Dengan menggabungkan elemen-elemen dari teori lama dan baru, kerangka hibrid ini bertujuan untuk mengatasi kompleksitas tantangan vokasi modern, seperti integrasi teknologi, pembelajaran seumur hidup, dan pengembangan keterampilan praktis. Novelty dari artikel ini terletak pada sintesis ini, yang belum banyak dieksplorasi dalam literatur EdTech vokasi, menjadikannya kontribusi unik untuk memajukan praktik pendidikan.

Dalam kerangka hibrid ini, behaviorisme dimanfaatkan untuk pelatihan keterampilan dasar, seperti keselamatan kerja melalui simulasi Virtual Reality (VR) (Rawat, alami, & Hagos, 2024). Teori ini, yang berfokus pada penguatan perilaku melalui stimulus-respons, efektif untuk membangun kebiasaan dan prosedur standar yang diperlukan dalam lingkungan vokasi. Misalnya, siswa dapat berlatih prosedur keselamatan di pabrik

virtual, di mana kesalahan langsung diberi umpan balik negatif untuk mendorong pembelajaran berulang. Hal ini memastikan fondasi kuat sebelum siswa beralih ke aspek pembelajaran yang lebih kompleks, mengurangi risiko kesalahan di dunia nyata dan meningkatkan efisiensi pelatihan.

Konstruktivisme dimasukkan ke dalam kerangka hibrid untuk mendukung pembelajaran berbasis proyek, di mana siswa membangun pengetahuan melalui pengalaman aktif (Micheline & Wylie, 2014). Dalam konteks vokasi, ini berarti tim siswa berkolaborasi untuk membuat prototipe, seperti merancang mesin atau aplikasi industri. Teori ini menekankan bahwa pengetahuan dibangun secara internal melalui interaksi dengan lingkungan, sehingga proyek-proyek ini mendorong pemikiran kritis dan kreativitas. Contohnya, dalam kursus teknik, siswa mungkin bekerja sama untuk mengembangkan solusi inovatif bagi masalah manufaktur, yang tidak hanya memperkuat pemahaman teoritis tetapi juga keterampilan praktis yang dibutuhkan di Industri 4.0.

Konektivisme menjadi komponen kunci dalam kerangka hibrid untuk memfasilitasi pembelajaran seumur hidup, yang krusial di era di mana pengetahuan teknologi berkembang pesat. Teori ini mendorong siswa untuk membangun Personal Learning Network (PLN) dengan pakar industri melalui platform daring seperti LinkedIn atau forum profesional (Duan, Xie, & Zhao, 2024). Dengan mengkurasi informasi dari berbagai sumber, siswa dapat terus belajar di luar kelas, beradaptasi dengan tren seperti IoT atau big data. Ini memastikan bahwa pendidikan vokasi tidak berhenti setelah lulus, melainkan menjadi fondasi untuk pengembangan karir jangka panjang, di mana koneksi jaringan menjadi sumber pengetahuan yang dinamis.

Heutagogy diintegrasikan sebagai elemen pendorong otonomi siswa dalam kerangka hibrid, menempatkan mereka sebagai pengendali utama proses pembelajaran (Gillaspy & Vasilica, 2021). Teori ini memungkinkan siswa untuk menentukan tujuan, sumber daya, dan jalur belajar mereka sendiri, yang sangat penting untuk beradaptasi dengan teknologi baru di Vokasi 4.0. Misalnya, siswa dapat memilih proyek yang sesuai dengan minat pribadi, seperti eksplorasi AI dalam otomasi industri, sambil menerima panduan minimal dari instruktur. Hal ini meningkatkan motivasi intrinsik dan kemampuan mandiri, mempersiapkan siswa untuk karir yang memerlukan inisiatif dan inovasi tanpa bergantung pada struktur pembelajaran yang kaku (Fishbach & Woolley, 2021).

Kerangka teoretis hibrid ini mengintegrasikan semua elemen behaviorisme, konstruktivisme, konektivisme, dan heutagogy dalam pendekatan yang saling melengkapi (Dron & Anderson, 2023). Behaviorisme membentuk dasar untuk keterampilan teknis, yang kemudian diperkaya oleh konstruktivisme melalui proyek kolaboratif. Konektivisme menambahkan dimensi jaringan untuk pembelajaran berkelanjutan, sementara heutagogy memastikan otonomi siswa dalam seluruh proses. Integrasi ini menciptakan kurikulum yang holistik, di mana siswa bergerak dari pelatihan dasar ke eksplorasi mandiri, didukung oleh teknologi EdTech seperti VR dan platform daring (Bozkurt, 2020). Model ini dapat diimplementasikan secara bertahap, mulai dari modul dasar hingga proyek lanjutan, memastikan transisi yang mulus.

Novelty dari kerangka hibrid ini terletak pada kemampuannya untuk mensintesis teori-teori yang sebelumnya dianggap terpisah, menciptakan model yang lebih efektif

untuk Vokasi 4.0. Artikel ini berkontribusi pada literatur EdTech dengan menunjukkan bagaimana hibriditas dapat meningkatkan hasil pembelajaran, seperti retensi pengetahuan dan kesiapan kerja. Dampak jangka panjangnya meliputi pengembangan kurikulum vokasi yang lebih tangguh, yang dapat diadopsi oleh institusi pendidikan dan industri. Dengan demikian, kerangka ini tidak hanya mengatasi kesenjangan teoritis tetapi juga mendorong inovasi praktis, mempersiapkan generasi masa depan untuk tantangan global di era digital.

Implikasi

Implikasi praktis dari kerangka teoretis hibrid ini menuntut transformasi signifikan dalam peran guru dan sekolah di era Vokasi 4.0, di mana pendidik harus bergeser dari posisi instruktur tradisional yang fokus pada penyampaian pengetahuan satu arah menjadi fasilitator yang mendorong eksplorasi siswa dan kurator jaringan pembelajaran yang menghubungkan siswa dengan sumber daya eksternal (Bekum et al., 2021). Misalnya, guru dapat menggunakan platform seperti Moodle atau Google Classroom untuk memfasilitasi proyek kolaboratif berbasis konstruktivisme, sambil membimbing siswa dalam membangun Personal Learning Networks (PLN) melalui konektivisme. (Tour, 2016) Selain itu, investasi teknologi harus selalu didasari pertanyaan reflektif: "Teori belajar apa yang didukung oleh alat ini?" Hal ini memastikan bahwa alat seperti VR untuk simulasi keselamatan (behaviorisme) atau AI-driven tutoring (heutagogy) tidak hanya mahal tetapi juga selaras dengan tujuan pembelajaran, sehingga meningkatkan efisiensi kurikulum dan kesiapan siswa untuk tantangan industri yang kompleks.

Implikasi teoritis menyoroti urgensi bagi peneliti untuk mengembangkan dan menguji model-model hibrid ini secara empiris dalam setting vokasi yang autentik, guna membangun bukti-bukti yang kuat tentang efektivitasnya dan mengidentifikasi variabel moderasi seperti konteks budaya atau tingkat akses teknologi. (Rudolph, Kurz, & Rakitsch, 2024) Penelitian dapat melibatkan eksperimen kontrol acak di sekolah vokasi, mengukur indikator seperti motivasi siswa, retensi keterampilan, dan kemampuan beradaptasi menggunakan instrumen seperti survei Likert atau analisis data kualitatif dari wawancara. Dengan menguji integrasi teori seperti behaviorisme untuk dasar-dasar hingga heutagogy untuk otonomi, penelitian ini dapat memperluas literatur EdTech dengan model yang lebih robust, mendorong pengembangan teori baru yang responsif terhadap dinamika Industri 4.0, dan akhirnya berkontribusi pada evolusi pendidikan vokasi secara global. (Labadze & Grigolia, 2023)

CONCLUSIONS

Kesimpulan dari artikel ini menegaskan bahwa adopsi teknologi di pendidikan vokasi untuk Industri 4.0 harus didorong oleh teori pembelajaran (theory-driven) daripada sekadar oleh alat teknologi (tool-driven), untuk memastikan efektivitas dan relevansi kurikulum; sebagai rekomendasi, artikel mengusulkan adopsi kerangka kerja teoretis hibrid yang fleksibel dan adaptif, yang mengintegrasikan behaviorisme, konstruktivisme, konektivisme, dan heutagogy untuk mengatasi tantangan vokasi modern. Meskipun demikian, artikel ini memiliki keterbatasan karena bersifat konseptual dan teoretis, tanpa bukti empiris langsung; oleh karena itu, saran untuk penelitian mendatang adalah melakukan studi empiris seperti studi kasus atau eksperimen di lingkungan vokasi nyata

untuk memvalidasi efektivitas kerangka kerja hibrid yang diusulkan, sehingga dapat memberikan panduan praktis yang lebih kuat bagi implementasi di dunia pendidikan.

REFERENCES

- Abdalla, H. (2022). A brief survey on big data: technologies, terminologies and data-intensive applications. <https://journalofbigdata.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s40537-022-00659-3>
- Acemođlu, D., Anderson, G., Beede, D., Buffington, C., Childress, E., Dinlersoz, E., Foster, L., Goldschlag, N., Haltiwanger, J., Kroff, Z., Restrepo, P., & Zolas, N. (2023). Advanced Technology Adoption: Selection or Causal Effects?. <https://doi.org/10.1257/pandp.20231037>
- Agonács, N. & Matos, J. (2019). Heutagogy and self-determined learning: a review of the published literature on the application and implementation of the theory. <https://doi.org/10.1080/02680513.2018.1562329>
- Almulla, M. (2020). The Effectiveness of the Project-Based Learning (PBL) Approach as a Way to Engage Students in Learning. <https://doi.org/10.1177/2158244020938702>
- Ariansyah, K., Wismayanti, Y., Savitri, R., Listanto, V., Aswin, A., Ahad, M. P., & Cahyarini, B. (2024). Comparing labor market performance of vocational and general school graduates in Indonesia: insights from stable and crisis conditions. <https://ervet-journal.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s40461-024-00160-6>
- Balalle, H. (2025). Learning beyond realities: exploring virtual reality, augmented reality, and mixed reality in higher education—a systematic literature review. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s44217-025-00559-7.pdf>
- Bekkum, M., Boer, M., Harmelen, F., Meyer, A., & Teije, A. (2021). Modular design patterns for hybrid learning and reasoning systems. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10489-021-02394-3.pdf>
- Berger, E., Fehr, E., Hermes, H., Schunk, D., & Winkel, K. (2024). The Impact of Working-Memory Training on Children’s Cognitive and Noncognitive Skills. <https://doi.org/10.1086/732884>
- Bettiol, M., Capestro, M., Maria, E., & Ganau, R. (2023). Is this time different? How Industry 4.0 affects firms’ labor productivity. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11187-023-00825-8.pdf>
- Billett, S. (2020). Perspectives on enhancing the standing of vocational education and the occupations it serves. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13636820.2020.1749483?needAccess=true>
- Bozkurt, A. (2020). Educational Technology Research Patterns in the Realm of the Digital Knowledge Age. <https://doi.org/10.5334/jime.570>
- Brenner, C. (2022). Self-regulated learning, self-determination theory and teacher candidates’ development of competency-based teaching practices. <https://slejournal.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s40561-021-00184-5>
- Cai, J. & Kosaka, M. (2024). Conceptualizing Technical and Vocational Education and Training as a Service Through Service-Dominant Logic. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/21582440241240847>

- Chandanani, M., Laidlaw, A., & Brown, C. (2025). Extended reality and computer-based simulation for teaching situational awareness in undergraduate health professions education: a scoping review. <https://advancesinsimulation.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s41077-025-00343-5>
- Consoli, T., Schmitz, M., Antonietti, C., Gonon, P., Cattáneo, A., & Petko, D. (2024). Quality of technology integration matters: Positive associations with students' behavioral engagement and digital competencies for learning. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13118-8>
- Cullen, S. & Oppenheimer, D. (2024). Choosing to learn: The importance of student autonomy in higher education. <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.ado6759?download=true>
- Damelang, A. & Otto, M. (2023). Who is Replaced by Robots? Robotization and the Risk of Unemployment for Different Types of Workers. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/07308884231162953>
- Datta, A., Coates, S., Rossiter, A., & Krishnamoorti, R. (2024). Reskilling and Upskilling for Decarbonization: Analyzing Micro-Credential Programs for Energy Workforce Development. <https://doi.org/10.1080/07377363.2024.2377777>
- Douglas, D. (2025). Researchers' perceptions of automating scientific research. <https://doi.org/10.1007/s00146-025-02190-4>
- Dron, J. & Anderson, T. (2023). Pedagogical Paradigms in Open and Distance Education. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-19-2080-6_9.pdf
- Duan, J., Xie, K., & Zhao, Q. (2024). A personal social knowledge network (PSKN) facilitates learners' wayfinding and its differences in behavior patterns between high and low performers in connectivist learning. <https://doi.org/10.1186/s41239-024-00454-5>
- Ehlers, U. (2020). Future Skills. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-658-29297-3.pdf?pdf=button>
- Elahi, M., Afolaranmi, S., Lastra, J. L., & García, J. A. (2023). A comprehensive literature review of the applications of AI techniques through the lifecycle of industrial equipment. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s44163-023-00089-x.pdf>
- Fishbach, A. & Woolley, K. (2021). The Structure of Intrinsic Motivation. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-orgpsych-012420-091122>
- Frutos-Belizón, J., García-Carbonell, N., Guerrero-Alba, F., & Sánchez-Gardey, G. (2024). An empirical analysis of individual and collective determinants of international research collaboration. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11192-024-04999-0.pdf>
- Gillaspy, E. & Vasilica, C. (2021). Developing the digital self-determined learner through heutagogical design. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23752696.2021.1916981?needAccess=true>
- Godsk, M. & Møller, K. (2024). Engaging students in higher education with educational technology. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10639-024-12901-x.pdf>
- Goeritno, A., Prasetya, Y., Yuhefizar, Y., Muhathir, M., Lestari, S., & Azama, I. (2023). Prototyping an IoT-Platform Embedded Device to Prevent the Failure of the Battery

- System at the Kedungbadak-Bogor Substation. <https://www.iieta.org/download/file/fid/102959>
- Gomes, A. & Dias, J. (2024). Digital Divide in the European Union: A Typology of EU Citizens. <https://doi.org/10.1007/s11205-024-03452-2>
- Guhl, D., Paetz, F., Wagner, U., & Wedel, M. (2024). Predicting and optimizing marketing performance in dynamic markets. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00291-024-00755-1.pdf>
- Hemmer, P., Schemmer, M., Kühl, N., Vössing, M., & Satzger, G. (2024). Complementarity in Human-AI Collaboration: Concept, Sources, and Evidence. <https://arxiv.org/pdf/2404.00029>
- Hernández, E., Senna, P., Silva, D., Rebelo, R., Barros, A., & Toscano, C. (2019). Implementing RAMI4.0 in Production - A Multi-case Study. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29041-2_6
- Hu, F., Zou, X., Hao, H., Hou, P., & Huang, Y. (2024). Research and application of simulation and optimization for CNC machine tool machining process under data semantic model reconstruction. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13415-z>
- Hummelsheim, S. & Baur, M. (2014). The German dual system of initial vocational education and training and its potential for transfer to Asia. <https://doi.org/10.1007/s11125-014-9311-4>
- Jamarani, A., Haddadi, S., Sarvizadeh, R., Kashani, M., Akbari, M., & Moradi, S. (2024). Big data and predictive analytics: A systematic review of applications. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10462-024-10811-5.pdf>
- Jenssen, E. & Haara, F. (2024). High-quality practicum – according to teacher education students on their practicum at partnership schools. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02619768.2024.2370892?needAccess=true>
- Johnsen, M. M., Sjølie, E., & Johansen, V. (2023). Learning to Collaborate in a Project-based Graduate Course: A Multilevel Study of Student Outcomes. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11162-023-09754-7.pdf>
- Kee, T., Zhang, H., & King, R. (2023). An empirical study on immersive technology in synchronous hybrid learning in design education. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10798-023-09855-5.pdf>
- Kim, Y., Kim, D., Choi, J., Park, J., Oh, N., & Park, D. (2024). A survey on integration of large language models with intelligent robots. <https://doi.org/10.1007/s11370-024-00550-5>
- Knyazev, G. (2023). A Paradigm Shift in Cognitive Sciences?. <https://doi.org/10.1007/s11055-023-01483-9>
- Kumar, M., Manglani, H., & Jadhav, J. (2024). Unveiling Research Trends on the Sustainable Development Goals: A Systematic Bibliometric Review. <https://iieta.org/download/file/fid/130522>
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. <https://journalofbigdata.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s40537-019-0268-2>
- Labadze, L. & Grigolia, M. (2023). Role of AI chatbots in education: systematic literature review. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00426-1>

- Laskowski, R., Chybowski, L., & Gawdzińska, K. (2015). An Engine Room Simulator as a Tool for Environmental Education of Marine Engineers. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16528-8_29
- Lee, S., Chae, J., Jeon, H., Kim, T., Hong, Y., Um, D., Kim, T., & Park, K. (2025). Cyber-Physical AI: Systematic Research Domain for Integrating AI and Cyber-Physical Systems. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3721437>
- Leeder, T. (2022). Behaviorism, Skinner, and Operant Conditioning: Considerations for Sport Coaching Practice. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/08924562.2022.2052776?needAccess=true>
- Likovič, A. & Rojko, K. (2022). E-Learning and a Case Study of Coursera and edX Online Platforms. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/rsc-2022-0008>
- Liu, X., Park, J., Hymer, C., & Thatcher, S. M. (2018). Multidimensionality: A Cross-Disciplinary Review and Integration. <https://doi.org/10.1177/0149206318807285>
- Masrifah, N. & Sudira, P. (2020). Redesign of Vocational Education Curriculum in Industrial Digitalization 4.0. <https://doi.org/10.1145/3401861.3401865>
- Mella-Norambuena, J., Chiappe, A., & Quintana, M. G. (2024). Theoretical and empirical models underlying the teaching use of LMS platforms in higher education: a systematic review. <https://doi.org/10.1007/s40692-024-00336-9>
- Michelene, T. & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Mol, M., Belfi, B., & Bakk, Z. (2024). Unravelling the skills of data scientists: A text mining analysis of Dutch university master programs in data science and artificial intelligence. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0299327&type=printable>
- Mudiyanselage, S., Nguyen, P., Rajabi, M., & Akhavian, R. (2021). Automated Workers' Ergonomic Risk Assessment in Manual Material Handling Using sEMG Wearable Sensors and Machine Learning. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/20/2558/pdf?version=1634728859>
- Niu, Q., Liu, J., Bi, Z., Feng, P., Peng, B., Chen, K., & Li, M. (2024). Large Language Models and Cognitive Science: A Comprehensive Review of Similarities, Differences, and Challenges. <https://arxiv.org/pdf/2409.02387>
- Paramitasari, N., Khoirunurrofik, K., Mahi, B., & Hartono, D. (2024). Charting vocational education: impact of agglomeration economies on job–education mismatch in Indonesia. <https://doi.org/10.1007/s41685-024-00333-x>
- Purohit, M., Svitkina, Z., & Kumar, R. (2024). Improving Online Algorithms via ML Predictions. <https://arxiv.org/pdf/2407.17712>
- Ravasi, D., Zhu, J., Wan, W., Dorobantu, S., & Gruber, M. (2024). What Makes Research Collaborations Successful? Advice from AMJ Authors. <https://doi.org/10.5465/amj.2024.4003>
- Rawat, D., alami, H., & Hagos, D. (2024). Metaverse Survey & Tutorial: Exploring Key Requirements, Technologies, Standards, Applications, Challenges, and Perspectives. <https://arxiv.org/pdf/2405.04718>
- Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R., Abhishek, K., Iyer, G., Vara, H., Dubey, S., Revathi, V., & Gupta, M. (2024). Industry 5.0: a review of emerging trends and transformative

- technologies in the next industrial revolution. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01943-7>
- Rudolph, M., Kurz, S., & Rakitsch, B. (2024). Hybrid modeling design patterns. <https://mathematicsinindustry.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s13362-024-00141-0>
- Sasaki, H. (2022). Special feature: economic dynamics—growth, capital, labor, technology, and money. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40844-022-00241-9.pdf>
- Sauer, P. & Seuring, S. (2023). How to conduct systematic literature reviews in management research: a guide in 6 steps and 14 decisions. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11846-023-00668-3.pdf>
- Shih, C., Chou, J., Reijers, N., & Kuo, T. (2016). Designing CPS/IoT applications for smart buildings and cities. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2016.0025>
- Siam, M. S., Ahn, H., Liu, L., Alam, S., Shen, H., Cao, Z., Shroff, N., Krishnamachari, B., Srivastava, M., & Zhang, M. (2024). Artificial Intelligence of Things: A Survey. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3690639>
- Subiyantoro, H., Tarziraf, A., & Asmara, A. (2023). The Role of Vocational Education as the Key to Economic Development in Indonesia. <http://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.28-10-2023.2341745>
- Sui-Ni, N. (2023). Peran Pemerintah Pusat dan Daerah dalam Menyediakan Pendidikan Dasar Bermutu untuk Mewujudkan Visi Indonesia 2045. <https://arxiv.org/pdf/2302.12837>
- Suleiman, Z., Shaikholla, S., Dikhanbayeva, D., Shehab, E., & Türkyılmaz, A. (2022). Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23311916.2022.2034264?needAccess=true>
- Szukits, Á. & Móricz, P. (2023). Towards data-driven decision making: the role of analytical culture and centralization efforts. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11846-023-00694-1.pdf>
- Tong, D., Wu, L., & Evans, J. (2021). Low-skilled Occupations Face the Highest Upskilling Pressure. <https://arxiv.org/pdf/2101.11505>
- Tour, E. (2016). Teachers' personal learning networks (PLNs): exploring the nature of self-initiated professional learning online. <https://doi.org/10.1111/lit.12101>
- Tynchenko, Y., Gantimurov, A., Кукарцев, В., Gladkov, A., & Бородулин, А. (2024). Data Analysis Methods: Comparative Review and Selection of the Best Approach. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70595-3_18
- Vogel, O. & Hunecke, M. (2023). Fostering knowledge integration through individual competencies: the impacts of perspective taking, reflexivity, analogical reasoning and tolerance of ambiguity and uncertainty. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11251-023-09653-5.pdf>
- Widayati, A., MacCallum, J., & Woods-McConney, A. (2021). Teachers' perceptions of continuing professional development: a study of vocational high school teachers in Indonesia. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13664530.2021.1933159?needAccess=true>

- Wijnia, L., Noordzij, G., Arends, L., Rikers, R. M. J., & Loyens, S. M. (2024). The Effects of Problem-Based, Project-Based, and Case-Based Learning on Students' Motivation: a Meta-Analysis. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10648-024-09864-3.pdf>
- Xu, Y. & Xu, R. (2022). Research on Interpolation and Data Fitting: Basis and Applications. <https://arxiv.org/pdf/2208.11825>
- Xue, Y., Rehman, S., Altalbe, A., Rehman, E., & Shahiman, M. (2024). Digital literacy as a catalyst for academic confidence: exploring the interplay between academic self-efficacy and academic procrastination among medical students. <https://bmcmmededuc.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12909-024-06329-7>
- Yang, F. & Gu, S. (2021). Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40747-020-00267-9.pdf>
- Yang, C., Zhang, J., Hu, Y., Yang, X., Chen, M., Shan, M., & Li, L. (2024). The impact of virtual reality on practical skills for students in science and engineering education: a meta-analysis. <https://stemeducationjournal.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s40594-024-00487-2>
- Yao, D. & Lin, J. (2025). Cognitive enhancement through competency-based programming education: a 12-year longitudinal study. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10639-025-13582-w.pdf>
- Ying, W., Xu, Z., Lou, J., & Chen, K. (2023). Factors influencing the complex problem-solving skills in reflective learning: results from partial least square structural equation modeling and fuzzy set qualitative comparative analysis. <https://bmcmmededuc.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12909-023-04326-w>
- Yu, T., Yan, X., & Jin, Y. (2024). Vocational Education in China. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7415-9_8
- Zheng, D., Du, L., Su, J., Tian, Y., Zhu, Y., Zhang, J., Lei, W., Zhang, N., & Chen, H. (2025). Knowledge Augmented Complex Problem Solving with Large Language Models: A Survey. <https://arxiv.org/pdf/2505.03418>.