

Integrasi STEM, TVET dan Teknologi Digital dalam Pendidikan Tenaga Boleh Baharu: Satu Ulasan Kritikal

Integrating STEM, TVET, and Digital Technologies in Renewable Energy Education: A Critical Review

**Norazuwana Shaari¹, Siti Hasanah Osman¹, Sahriah Basri¹, Siti Kartom Kamarudin¹,
Umawathy a/p techanamurthy², Aisyah Mohamad Sharif³**

¹Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.

²Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

³Jabatan Kimia, Fakulti Sains dan Matematik, Universiti Pendidikan Sultan Idris Shah

Email: norazuwanashaari@ukm.edu.my

ABSTRACT

Peralihan global kepada sistem tenaga rendah karbon bukan sahaja bergantung pada kemajuan teknologi, malah memerlukan ekosistem pendidikan yang mampu membangunkan modal insan dengan pengetahuan saintifik, kemahiran teknikal dan kecekapan digital yang relevan. Pendidikan tenaga boleh baharu menjadi penghubung penting antara Matlamat Pembangunan Mampan, khususnya SDG 4, SDG 7, SDG 8 dan SDG 13, dengan keperluan tenaga kerja sektor tenaga bersih. Ulasan kritikal ini menilai secara tematik perkembangan pendidikan tenaga boleh baharu dengan memberi tumpuan kepada tiga komponen yang saling melengkapi, iaitu pendidikan Sains, Teknologi, Kejuruteraan dan Matematik (STEM), Pendidikan dan Latihan Teknikal dan Vokasional (TVET), serta teknologi baharu seperti realiti terimbuh (AR), realiti maya (VR) dan Internet Benda (IoT). Literatur menunjukkan bahawa STEM mengukuhkan pemahaman konsep, pemikiran sistem dan penyelesaian masalah, manakala TVET menukar pengetahuan tersebut kepada kompetensi pemasangan, operasi dan penyelenggaraan. Teknologi digital pula memperluas pengalaman eksperimen melalui simulasi, visualisasi dan pemantauan masa nyata. Walau bagaimanapun, keberkesanan ketiga-tiga komponen masih terhad oleh kurikulum yang terpisah, kos infrastruktur, latihan pendidik yang tidak mencukupi, jurang digital dan ketidakselarasan dengan keperluan industri. Berdasarkan sintesis ini, artikel mencadangkan kerangka integrasi STEM–TVET–teknologi yang menghubungkan pembelajaran konseptual, pengalaman praktikal, kompetensi digital dan pengesahan industri dalam satu laluan pembelajaran berterusan. Kerangka tersebut berpotensi memperkukuh kebolehpasaran graduan, meningkatkan akses kepada latihan berkualiti dan menyokong pembangunan tenaga kerja hijau yang lebih tangkas terhadap perubahan teknologi. (219 patah perkataan)



Kata kunci: “Pendidikan” “STEM” “TVET” “teknologi digital” “tenaga boleh baharu”

ABSTRAK

The global transition towards low-carbon energy systems depends not only on technological advancement but also on an educational ecosystem capable of developing human capital with relevant scientific knowledge, technical skills, and digital competencies. Renewable energy education serves as an important bridge between the Sustainable Development Goals, particularly SDGs 4, 7, 8, and 13, and the workforce requirements of the clean energy sector. This critical review thematically evaluates developments in renewable energy education by focusing on three complementary components: Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) education; Technical and Vocational Education and Training (TVET); and emerging technologies such as augmented reality (AR), virtual reality (VR), and the Internet of Things (IoT). The literature indicates that STEM strengthens conceptual understanding, systems thinking, and problem-solving skills, whereas TVET translates this knowledge into practical competencies in system installation, operation, and maintenance. Digital technologies further extend experiential learning through simulation, visualization, and real-time monitoring. However, the effectiveness of these components remains constrained by fragmented curricula, high infrastructure costs, inadequate educator training, the digital divide, and misalignment with industry requirements. Based on this synthesis, this review proposes an integrated STEM–TVET–technology framework that connects conceptual learning, practical experience, digital competencies, and industry validation within a continuous learning pathway. The proposed framework offers a structured approach to enhancing graduate employability, broadening access to quality training, and supporting the development of a future-ready green workforce capable of adapting to rapid technological change. (234 words)

Keywords: “Education” “STEM” “TVET” “Digital Technologies” “Renewable Energy”

INTRODUCTION

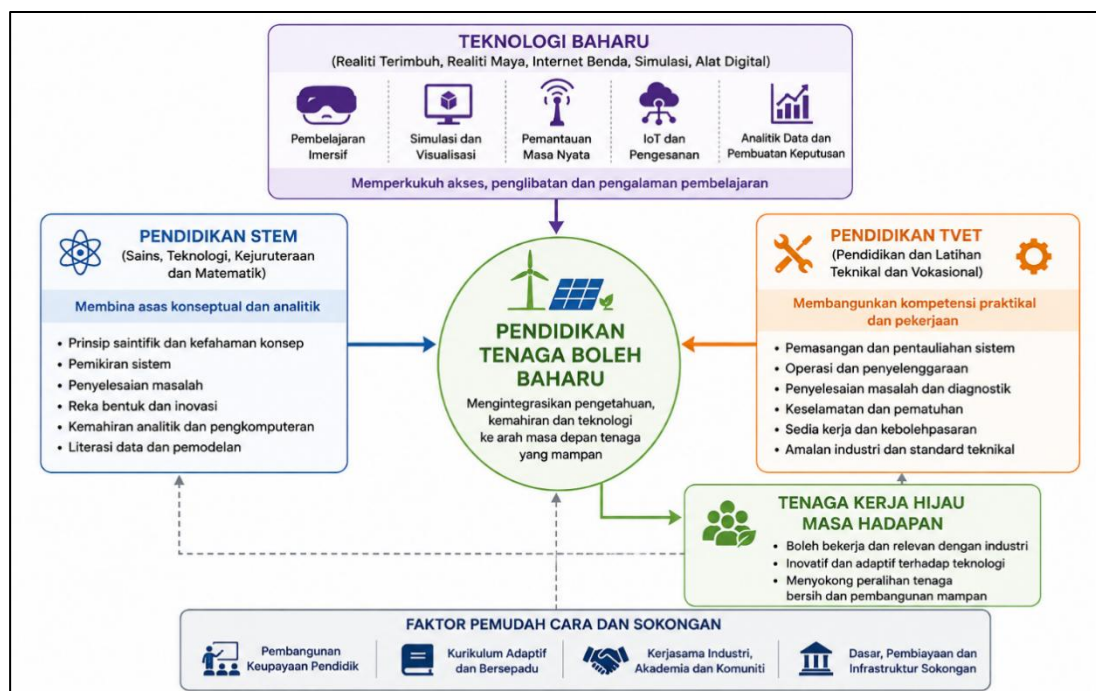
Peralihan kepada sistem tenaga mampan merupakan agenda global yang berkait secara langsung dengan SDG 4 (Pendidikan Berkualiti), SDG 7 (Tenaga Mampu Milik dan Bersih) dan SDG 13 (Tindakan Iklim). Kejayaan agenda ini memerlukan lebih daripada pemasangan kapasiti solar, angin, hidrogen atau sistem penyimpanan tenaga; ia memerlukan tenaga kerja yang memahami prinsip teknologi, mampu mengendalikan sistem sebenar dan dapat menyesuaikan diri dengan perubahan teknologi yang pantas (Popp et al., 2024). Dalam konteks ini, pendidikan tenaga boleh baharu berfungsi sebagai mekanisme pembangunan kapasiti yang menghubungkan pengetahuan saintifik, kemahiran kejuruteraan, kecekapan teknikal dan kesedaran kelestarian. Oleh itu, persoalan utama bukan lagi sama ada topik tenaga boleh baharu perlu dimasukkan dalam pendidikan, tetapi bagaimana kandungannya perlu disusun supaya pembelajaran benar-benar menghasilkan kompetensi yang diperlukan oleh peralihan tenaga.

STEM dan TVET menawarkan dua laluan yang saling melengkapi. STEM menekankan pemahaman konsep, penaakulan kuantitatif, reka bentuk, penyelesaian masalah dan inovasi, manakala TVET memberi penekanan kepada penguasaan tugas, prosedur, pemasangan, operasi dan penyelenggaraan sistem (Frady, 2023; Rohanai et al., 2024). Dalam pendidikan tenaga boleh baharu, pemisahan kedua-dua laluan ini boleh menghasilkan dua kelemahan: graduan akademik yang kukuh secara teori tetapi kurang pengalaman praktikal, atau graduan teknikal yang cekap melaksanakan prosedur tetapi kurang pendedahan kepada pemikiran sistem dan inovasi. Keperluan industri yang semakin kompleks menunjukkan bahawa tenaga kerja masa hadapan memerlukan gabungan kedua-duanya, khususnya bagi bidang fotovolta, turbin angin, sel fuel hidrogen, penyimpanan tenaga dan sistem tenaga pintar. Teknologi baharu menambah dimensi ketiga kepada hubungan tersebut. AR dan VR boleh mewakili struktur atau persekitaran yang mahal, berbahaya atau sukar dicapai, manakala IoT membolehkan pelajar berinteraksi dengan data operasi sebenar dan membina kecekapan pemantauan serta diagnostik (AlGerafi et al., 2023). Potensi ini penting kerana pendidikan tenaga boleh

baharu mempunyai komponen eksperimen yang tinggi, sedangkan akses kepada makmal dan sistem berskala industri tidak seragam. Namun, digitalisasi tidak secara automatik menyelesaikan jurang pendidikan. Tanpa reka bentuk pedagogi, latihan pendidik, infrastruktur dan penjajaran dengan hasil pembelajaran, teknologi boleh menjadi tambahan visual yang menarik tetapi tidak menghasilkan kompetensi yang bermakna.

Literatur sedia ada membincangkan pendidikan tenaga boleh baharu melalui pelbagai lensa, termasuk dasar (Seetharaman et al., 2016), kemajuan teknologi (Østergaard et al., 2023), pembangunan tenaga kerja (Jafarinejad et al., 2021), pasaran tenaga (Blazquez et al., 2018), instrumen dasar (Liu et al., 2019) serta reka bentuk sistem tenaga hibrid dan hidrogen (Singla et al., 2022). Walaupun kajian-kajian tersebut menyediakan konteks penting, fokus terhadap teknologi atau dasar semata-mata tidak menjelaskan bagaimana sistem pendidikan harus menghubungkan teori, kemahiran amali dan kecekapan digital. Manuskrip asal turut menunjukkan pertumbuhan ketara penerbitan berkaitan tenaga boleh baharu dan pendidikan, dengan peningkatan minat global sepanjang dekad kebelakangan serta sumbangan aktif dari China, Jerman dan Amerika Syarikat (Kandpal & Broman, 2014). Pertumbuhan literatur ini memperkukuh keperluan untuk bergerak daripada pemetaan deskriptif kepada sintesis kritikal tentang bentuk pendidikan yang paling sesuai untuk menyokong tenaga kerja hijau.

Berdasarkan jurang tersebut, ulasan ini bertujuan menilai secara kritikal bagaimana pendidikan tinggi, STEM, TVET dan teknologi baharu telah digunakan dalam pendidikan tenaga boleh baharu; membandingkan kekuatan dan keterbatasan pendekatan utama; mengenal pasti halangan sistemik yang mengekang keberkesannya; dan mencadangkan kerangka integrasi yang menghubungkan pembelajaran konseptual, latihan praktikal, pengalaman digital dan penglibatan industri. Sumbangan utama artikel ialah meletakkan STEM, TVET dan teknologi bukan sebagai tiga agenda pendidikan yang berasingan, tetapi sebagai komponen saling bergantung dalam satu ekosistem pembangunan kompetensi tenaga boleh baharu. Rajah 1 menggambarkan hubungan saling melengkapi antara STEM, TVET dan teknologi baharu, yang masing-masing menyumbang kepada pembentukan pengetahuan konseptual, kompetensi praktikal dan keupayaan digital dalam membangunkan tenaga kerja hijau yang responsif terhadap keperluan industri tenaga boleh baharu.



Rajah 1: Peranan saling melengkapi antara STEM, TVET dan teknologi baharu dalam pendidikan tenaga boleh baharu dan pembangunan tenaga kerja hijau masa hadapan.

PENDEKATAN ULASAN KRITIKAL

Artikel ini menggunakan pendekatan ulasan kritikal berasaskan sintesis tematik terhadap literatur yang telah dikumpulkan dalam manuskrip asal. Skopnya merangkumi pendidikan tenaga boleh baharu pada peringkat sekolah, pendidikan tinggi dan TVET, dengan perhatian khusus kepada pembangunan kurikulum, pedagogi berasaskan projek dan masalah, latihan praktikal, akreditasi, hubungan industri serta penggunaan AR, VR dan IoT. Berbeza daripada ulasan yang hanya menyenaraikan kajian, analisis disusun mengikut persoalan tentang fungsi setiap pendekatan, bukti keberkesannya, batas pelaksanaan dan hubungannya dengan pembangunan kompetensi tenaga kerja.

Strategi carian literatur dilaksanakan melalui pencarian kata kunci dengan memberi tumpuan kepada gabungan istilah berkaitan pendidikan tenaga boleh baharu, STEM, TVET, pembelajaran berasaskan projek, realiti terimbuh, realiti maya, Internet Benda dan pembangunan tenaga kerja tenaga bersih. Literatur yang dimasukkan dalam sintesis merangkumi penerbitan antara tahun 2000 hingga 2025, dengan keutamaan diberikan kepada artikel jurnal dan prosiding akademik yang mempunyai hubungan langsung dengan reka bentuk kurikulum, pedagogi, pembangunan kompetensi, latihan praktikal atau penggunaan teknologi digital dalam pendidikan tenaga. Pemilihan dibuat berdasarkan kerelevanan terhadap persoalan ulasan, kejelasan konteks pendidikan dan sumbangan kepada sekurang-kurangnya satu daripada tema analisis, manakala sumber yang bertindih atau tidak mempunyai kaitan langsung dengan pendidikan dan pembangunan kompetensi adalah dikecualikan. Oleh sebab artikel ini merupakan ulasan kritikal dan bukannya ulasan sistematik, proses pemilihan bertujuan mendapatkan liputan konseptual dan bukti representatif bagi setiap tema, bukan menghasilkan anggaran kuantitatif menyeluruh terhadap keseluruhan literatur.

Sintesis dilaksanakan melalui pengelompokan dapatan kepada tema yang berulang: (i) inisiatif pendidikan tinggi dan penjajaran kurikulum; (ii) integrasi STEM dan pedagogi pengalaman; (iii) TVET dan pembangunan tenaga kerja; (iv) teknologi baharu sebagai pengantara pembelajaran; serta (v) cabaran struktur dan strategi integrasi. Dalam setiap tema, kajian dibandingkan berdasarkan konteks, pendekatan, hasil pembelajaran dan batas kebolehpindahan. Pendekatan ini selari dengan prinsip sintesis tematik yang bergerak daripada tema deskriptif kepada interpretasi analitikal. Justeru, kesimpulan ditafsirkan sebagai sintesis kritikal terhadap badan literatur yang dihipunkan, bukan anggaran menyeluruh terhadap semua kajian yang pernah diterbitkan.

DAPATAN DAN PERBINCANGAN

Pendidikan tinggi, pembangunan kurikulum dan standard

Institusi pendidikan tinggi telah mengembangkan pendidikan tenaga boleh baharu melalui kursus khusus, program ijazah, makmal demonstrasi dan projek kampus. IFAM (*Federal Institute of Amazonas*) dan UFAM (*Federal University of Amazonas*), misalnya, menggunakan penyelidikan serta latihan kecekapan tenaga dan fotovolt sebagai asas pembangunan kapasiti (da Silva Damasceno et al., 2022), manakala *Elizabeth City State University* menggabungkan kursus dengan makmal tenaga angin, sistem latihan solar/angin dan pemasangan sistem PV 1300 W oleh pelajar (Rawat et al., 2023). Di Chile, projek fotovolt tersambung grid turut digunakan dalam konteks universiti (Mac-Lean et al., 2020). Kes-kes ini menunjukkan perubahan penting daripada pengajaran berorientasikan kuliah kepada pembelajaran yang menghubungkan kandungan akademik dengan sistem tenaga sebenar. Nilai pendekatan tersebut bukan hanya pada pendedahan teknologi, tetapi pada peluang untuk pelajar menghubungkan ukuran, prestasi sistem, reka bentuk dan keputusan operasi.

Pada tahap kurikulum, inisiatif PEETS (*The Promoting Excellence in Employability and Transversal Skills*) menggabungkan pembelajaran multidisiplin dan antara budaya (Gilmour, 2022), manakala pembaharuan kurikulum kejuruteraan di *University of Minho* menonjolkan pembelajaran berasaskan projek (Fernandes Teixeira et al., 2007). Program tenaga moden juga semakin menggabungkan kejuruteraan elektrik, sains bahan, kimia, kelestarian dan dasar (Abo-Khalil, 2024). Kekuatan pendekatan multidisiplin ialah keupayaannya menggambarkan sistem tenaga sebagai masalah sosio-teknikal, bukan hanya peranti kejuruteraan. Walau bagaimanapun, keluasan kandungan boleh

menjadi kelemahan jika kurikulum menambah banyak topik tanpa membina urutan kompetensi yang jelas. Jurang antara kursus teoritikal dan keperluan industri kekal ketara apabila pengalaman menggunakan peralatan sebenar, data operasi dan proses penyelesaian masalah tidak diberikan secara mencukupi (Saunders & Machell, 2000).

Bukti pembelajaran pengalaman menyokong keperluan tersebut. Program FLEAP (*Faculty-Led Education Abroad Program* bagi kursus *Renewable Resources*) di Jerman menunjukkan peningkatan dalam pembelajaran peribadi, budaya, konsep kejuruteraan dan kesedaran tenaga, dengan skor sekitar 3.51–3.73 in (Kerzmann et al., 2016). Kem STEM yang menggunakan sel fotovolta, turbin angin dan sel fuel pula melaporkan peningkatan kefahaman melalui ujian pra dan pasca (Zabihian, 2016), sementara projek capstone tenaga hijau dikaitkan dengan kreativiti, kepimpinan dan integrasi kompetensi (Husanu et al., 2017). Secara perbandingan, ketiga-tiga model mempunyai kekuatan berbeza: mobiliti antarabangsa memperluas perspektif sistem dan budaya, eksperimen berstruktur mengukuhkan konsep, manakala capstone menuntut integrasi pengetahuan dalam penyelesaian terbuka. Namun, sebahagian bukti masih bersifat program-spesifik dan tidak semestinya menunjukkan keberkesanan jangka panjang atau kebolehpasaran selepas graduasi.

Akreditasi dan standard menawarkan mekanisme untuk mengurangkan variasi kualiti. Program latihan semakin diselaraskan dengan standard industri (Weissman & Laflin, 2006), program *Electronics Engineering Technology* pula mengintegrasikan tenaga boleh baharu dan kelestarian dalam kerangka ETAC-ABE (*Engineering Technology Accreditation Commission*), sementara Transfer Assurance Guidelines di Ohio menghubungkan kandungan kursus dengan standard NABCEP (*North American Board of Certified Energy Practitioners*) dan memudahkan pemindahan kredit. Projek dalam kursus sains terma dan capstone juga dipetakan kepada hasil ABET. Di peringkat antarabangsa, projek TEMPUS di Jordan menggunakan prinsip Bologna bagi pembangunan dan akreditasi kursus tenaga boleh baharu (Pastor et al., 2020). Standardisasi membantu memastikan hasil pembelajaran dapat dikenal pasti dan dibandingkan, tetapi standard yang terlalu preskriptif berisiko menjadi lambat berbanding perubahan teknologi. Oleh itu, standard perlu menentukan kompetensi teras sambil membenarkan kandungan teknologi dikemas kini secara fleksibel.

Secara keseluruhan, pendidikan tinggi telah bergerak ke arah pembelajaran multidisiplin, projek dan standard profesional, tetapi keberkesanan masih bergantung pada tahap hubungan dengan persekitaran kerja sebenar. Jurang utama bukan ketiadaan kursus tenaga boleh baharu, sebaliknya ketidakselarasan antara kandungan, pengalaman praktikal, penilaian kompetensi dan perubahan industri. Hal ini mewujudkan rasional untuk mengintegrasikan prinsip STEM dan TVET secara lebih sengaja dalam reka bentuk kurikulum.

Integrasi STEM dalam pendidikan tenaga boleh baharu

STEM menyediakan asas konseptual untuk memahami hubungan antara fenomena saintifik dan prestasi sistem tenaga. Fizik menerangkan penukaran tenaga, elektromagnetisme dan termodinamik; kimia menyokong kefahaman elektrokimia, bahan, pemangkinan dan penyimpanan tenaga; matematik membolehkan pemodelan dan analisis; manakala kejuruteraan menghubungkan pengetahuan tersebut kepada reka bentuk dan pengoptimuman (Drikakis & Dbouk, 2022). Dalam pendidikan tenaga boleh baharu, integrasi ini penting kerana satu sistem jarang dapat difahami melalui satu disiplin sahaja. Sebagai contoh, pembelajaran sel fuel hidrogen memerlukan pemahaman tindak balas elektrokimia, pengangkutan cas, penukaran tenaga, reka bentuk komponen dan prestasi sistem. Namun, kurikulum tradisional masih kerap menyampaikan disiplin secara terpisah, sekali gus menyukarkan pelajar membina hubungan antara teori dan aplikasi (Abdurrahman et al., 2022).

Inquiry-based learning, *problem-based learning* (PBL) dan *project-based learning* (PjBL/PrBL) menjadi strategi utama untuk mengatasi pemisahan tersebut. (Azis et al., 2023) menggunakan STEM-integrated PjBL melalui simulasi kincir angin di sekolah menengah dan menunjukkan kesesuaian pendekatan berpusatkan pelajar bagi topik tenaga boleh baharu. (Saovakhon & Akatimagool, 2023) membangunkan simulasi sistem sel suria melalui fasa analisis, reka bentuk, pembangunan dan penilaian, dengan penilaian pakar serta maklum balas pengguna menunjukkan penerimaan yang tinggi. Kedua-dua pendekatan memindahkan pelajar daripada penerima maklumat kepada penyiasat yang perlu menghubungkan pemboleh ubah, data dan keputusan reka bentuk.

Bahan pembelajaran dan makmal kos rendah turut memperluas kemungkinan pelaksanaan. (Komarudin et al., 2025) membangunkan bahan STEM bagi pelajar gred 10 yang menggabungkan isu tenaga, sumber boleh baharu, aktiviti dan penilaian, manakala (Yordanov et al., 2023) membangunkan makmal jauh kos rendah yang diselaraskan dengan sukatan pelajaran sekolah menengah. DESSERT pula menggunakan modul penyimpanan dan tenaga terma untuk meningkatkan literasi tenaga serta minat STEM dalam kalangan pelajar yang kurang terwakili (Aldeman et al., 2024). Pendekatan ini penting dari perspektif ekuiti kerana ia menunjukkan bahawa pembelajaran pengalaman tidak semestinya memerlukan makmal berskala besar. Walau bagaimanapun, kit atau makmal jauh hanya berkesan jika tugas mendorong penaaakulan, bukan sekadar mengikuti prosedur.

Integrasi STEM juga berkembang daripada penguasaan konsep kepada pembangunan kompetensi teknologi baharu. Kumar et al. (2024) menunjukkan minat pelajar terhadap program tenaga hijau berkaitan dengan prospek kerjaya dan keperluan kemahiran praktikal dalam teknologi baharu. Azhari et al. (2023) pula menghubungkan pendidikan vokasional, elektrokimia dan tenaga boleh baharu melalui modul STEM, sementara Chiou et al. (2020) menggabungkan PjBL dengan VR dalam pendidikan pembuatan tenaga hijau sehingga pelajar membangunkan model tiga dimensi, kerja berpasukan dan kemahiran penyelesaian masalah. Perbandingan ini memperlihatkan evolusi pedagogi STEM: daripada eksperimen untuk memahami prinsip, kepada reka bentuk untuk menyelesaikan masalah, seterusnya kepada penciptaan persekitaran digital yang menyerupai amalan kejuruteraan.

PBL dan PjBL amat relevan kerana masalah tenaga sebenar bersifat terbuka dan memerlukan kompromi. Tugas seperti mereka bentuk mikrogrid bagi komuniti luar bandar menuntut pertimbangan sumber, penukaran tenaga, penyimpanan, kos dan kebolehpercayaan; projek turbin angin atau sistem biofuel pula memerlukan reka bentuk, eksperimen, prototaip dan kerja berpasukan. Literatur melaporkan peningkatan pemikiran kritis, penglibatan dan pembelajaran antara disiplin melalui pendekatan ini (Hanif et al., 2019; Rizki & Suprpto, 2024), manakala projek seperti kereta solar, reka bentuk turbin angin dan eksperimen sel fuel memberikan konteks aplikasi yang jelas (Vasconcelos et al., 2022; Isabekov & Sadyrova, 2018; Rizki et al., 2024). Pertandingan seperti Solar Decathlon, Shell Eco-Marathon dan Hydrogen Horizon Automotive Challenge menambah dimensi inovasi, keusahawanan dan interaksi industri (David Olanrewaju Olutimehin et al., 2024; Bendig et al., 2025; Baghi et al., 2021).

Namun, kekuatan pedagogi pengalaman juga membawa kos pelaksanaan. Infrastruktur makmal, peralatan, masa projek, latihan guru dan penilaian hasil kompleks menjadi halangan (Solano et al., 2023; Diquito et al., 2024). Lebih penting, kejayaan sesuatu projek tidak semestinya membuktikan bahawa pelajar telah menguasai konsep atau kompetensi yang boleh dipindahkan kepada situasi baharu. Banyak kajian menilai persepsi, kepuasan atau peningkatan jangka pendek; bukti longitudinal tentang pemindahan kemahiran ke pendidikan lanjut dan pekerjaan masih terhad. Oleh itu, agenda penyelidikan STEM perlu beralih daripada soalan sama ada PBL/PjBL menarik minat pelajar kepada soalan bagaimana reka bentuk projek, scaffolding, penilaian dan konteks teknologi menghasilkan kompetensi yang tahan lama.

Sintesis ini menunjukkan bahawa sumbangan utama STEM ialah membina pemikiran integratif yang diperlukan untuk memahami sistem tenaga. Walau bagaimanapun, STEM sahaja tidak mencukupi apabila objektif pendidikan melibatkan pemasangan, pentauliahan, penyelenggaraan dan pematuhan keselamatan. Di sinilah TVET menjadi pelengkap penting: ia menukar pengetahuan dan penyelesaian masalah kepada prestasi teknikal yang boleh diperhatikan dan dinilai.

TVET dan pembangunan tenaga kerja tenaga boleh baharu

TVET mempunyai kedudukan strategik dalam peralihan tenaga kerana sebahagian besar pekerjaan sektor tenaga bersih memerlukan kompetensi teknikal yang berkait secara langsung dengan pemasangan, operasi, penyelenggaraan, pemeriksaan dan penyelesaian masalah. Literatur menempatkan TVET sebagai penyumbang kepada pembangunan kemahiran, pertumbuhan ekonomi dan pencapaian SDG 7 serta SDG 8 (Ogur, 2023; Harun et al., 2021). Berbanding program akademik yang lazimnya memberi penekanan kepada prinsip dan analisis, TVET mengutamakan kebolehan melakukan tugas mengikut spesifikasi dan standard. Perbezaan ini bukan pertentangan; ia menunjukkan bahawa sistem tenaga memerlukan spektrum kompetensi daripada penyelidikan dan reka bentuk hingga operasi lapangan.

Latihan PV memberikan contoh yang jelas. TVET boleh melatih pelajar dalam pemasangan panel, pendawaian, pengukuran, keselamatan dan penyelenggaraan. Trainer kit sistem solar 40 Wp dilaporkan meningkatkan kompetensi pelajar (Haryudo et al., 2023), manakala kit Solar Cell Off-Grid berasaskan PjBL memberi pengalaman penyelesaian masalah dalam sistem sebenar (Haryudo et al., 2022). Projek crowdsourcing PV pula melibatkan pelajar dalam pembangunan dan pembinaan sistem yang digunakan untuk suapan grid atau kegunaan institusi (Alattar et al., 2022). Ketiga-tiga pendekatan mempunyai tahap autentisiti yang berbeza: trainer kit menawarkan persekitaran terkawal, PjBL menambah keputusan reka bentuk, manakala projek institusi mendekati tanggungjawab sistem sebenar. Susunan bertahap seperti ini berpotensi membentuk laluan latihan daripada simulasi asas kepada kompetensi tempat kerja.

Walau bagaimanapun, model latihan praktikal sangat sensitif terhadap sumber. Peralatan tenaga boleh baharu cepat berubah, dan institusi yang tidak mampu menaik taraf makmal berisiko melatih pelajar menggunakan konfigurasi yang tidak lagi mencerminkan industri (Haryudo et al., 2023). Projek GSS-VET menekankan platform latihan yang lebih fleksibel dan disesuaikan dengan keperluan pelatih (Katsamaki et al., 2021). Implikasinya ialah TVET tidak seharusnya bergantung sepenuhnya pada pembelian perkakasan terkini. Gabungan trainer modular, makmal jauh, simulasi dan penempatan industri boleh mengurangkan kos sambil mengekalkan pendedahan kepada teknologi semasa.

Model dual Jerman sering dirujuk kerana menghubungkan pembelajaran institusi dengan latihan berasaskan syarikat (Pavlova, 2019; Yang & Dong, 2024; Remington, 2018). Kekuatan model ini ialah pembahagian tanggungjawab antara institusi dan industri, sekali gus membolehkan kemahiran dinilai dalam konteks kerja sebenar. Namun, pemindahan model tersebut ke negara lain bukan proses salin dan tampal. Remington (2018) menunjukkan bahawa pelaksanaan di luar konteks Eropah Jermanik tidak selalu berjaya, kerana keberkesannya bergantung pada struktur industri, insentif majikan, tadbir urus dan budaya latihan. Oleh itu, prinsip yang lebih mudah dipindahkan ialah perkongsian tanggungjawab, kurikulum bersama, penempatan berstruktur dan pensijilan kompetensi, bukannya bentuk institusi tertentu.

China dan India menunjukkan peranan dasar berskala nasional. Program TVET yang disokong kerajaan digunakan untuk memenuhi pertumbuhan sektor solar dan angin, sementara *Skill Council for Green Jobs di India* bekerjasama dengan institusi dan industri dalam pembangunan pensijilan (Mathur et al., 2022). Di China, reformasi TVET dan program peningkatan kemahiran digunakan untuk menangani ketidakpadanan antara pendidikan dan keperluan majikan (Tang & Shi, 2017). Kajian di Gansu turut menilai kebolegunaan model dua landasan Jerman dalam konteks kemiskinan, latihan guru, standard kualiti, kerjasama perusahaan dan latihan industri (Postiglione & Tang, 2019). Kes-kes ini menunjukkan bahawa TVET berkesan apabila pendidikan kemahiran disokong oleh ekosistem dasar dan permintaan pekerjaan, bukan apabila kursus dibangunkan secara terasing.

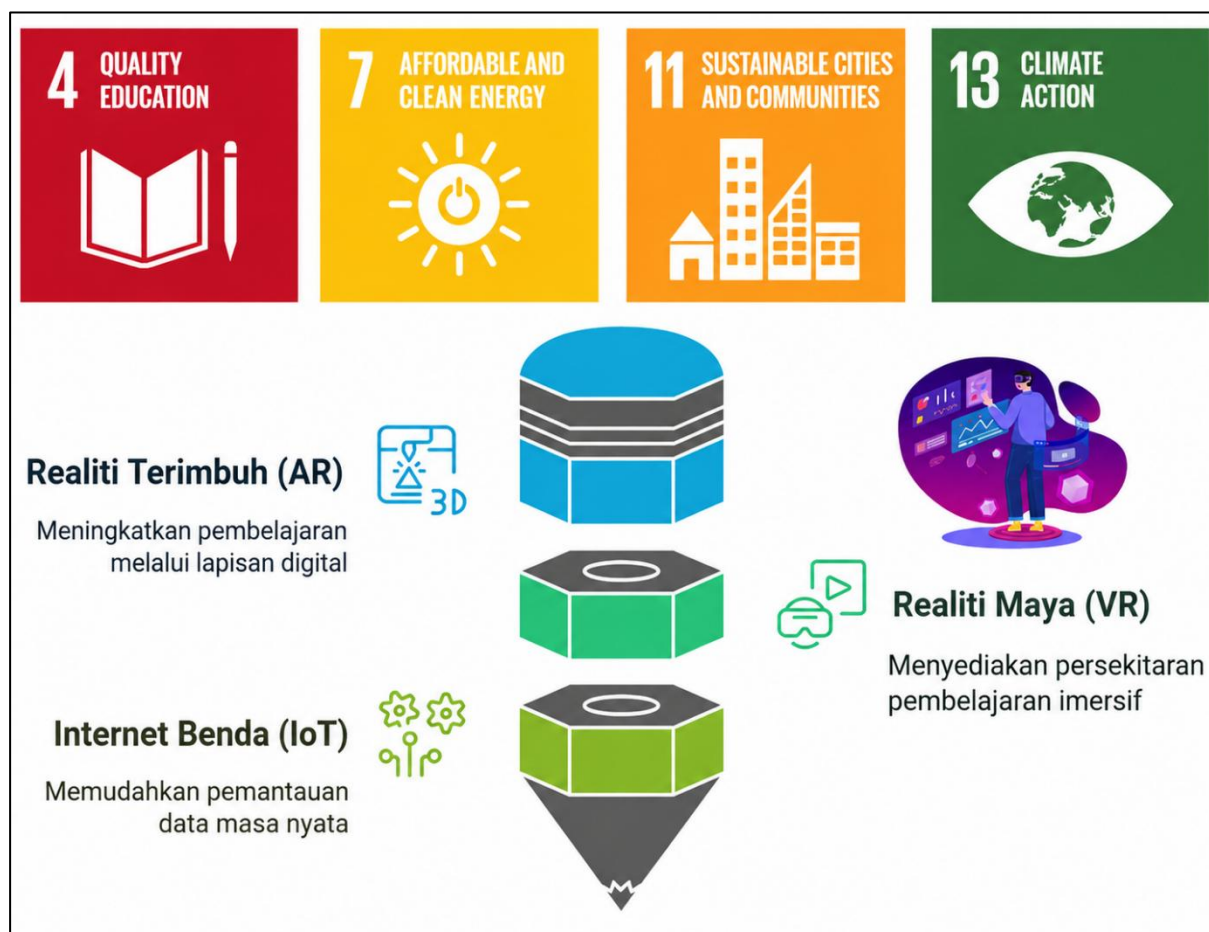
Di negara membangun, fungsi TVET mempunyai dimensi tambahan: ia boleh menyokong akses tenaga dan pembangunan komuniti. Kerjasama institusi TVET dengan syarikat solar di Kenya untuk melatih juruteknik sistem luar grid menunjukkan bagaimana latihan kemahiran boleh menyumbang serentak kepada pekerjaan dan akses tenaga (Lee, 2009). Namun, konteks sebegini juga berhadapan kekangan pembiayaan, peralatan dan infrastruktur. Maka, ukuran kejayaan TVET tidak wajar terhadap kepada bilangan graduan atau sijil; ia perlu menilai kebolehan graduan melaksanakan tugas dengan selamat, mengekalkan sistem, menyelesaikan kerosakan dan menyesuaikan diri dengan teknologi baharu.

Cabaran utama TVET ialah ketidakselarasan temporal: teknologi industri berubah lebih pantas daripada kitaran semakan kurikulum. Kekurangan dana, peralatan lapuk dan kerangka kurikulum yang tidak seragam terus dilaporkan (Pirzada et al., 2022). Penyelesaian yang lebih mampan ialah kurikulum berasaskan kompetensi teras dengan modul teknologi yang boleh dikemas kini, pensijilan mikro, latihan semula pengajar, perkongsian peralatan dengan industri dan apprenticeship. Dengan cara ini, TVET boleh bertindak sebagai jambatan dinamik antara pengetahuan pendidikan dan prestasi pekerjaan, bukan sekadar laluan latihan alternatif.

Teknologi baharu: AR, VR dan IoT sebagai pengantara pembelajaran

AR, VR dan IoT menawarkan mekanisme untuk memperluas pembelajaran pengalaman apabila akses kepada sistem tenaga sebenar terhad. AR menindihkan maklumat digital pada persekitaran fizikal, membolehkan pelajar memeriksa model tiga dimensi atau komponen secara interaktif (Hassan et al.,

2023). VR membina persekitaran imersif seperti ladang angin atau kemudahan hidrogen, manakala IoT menghubungkan pembelajaran dengan data masa nyata daripada sensor dan sistem tenaga (Voinea et al., 2023; Moradi et al., 2019). Nilai pedagoginya berbeza: AR menyokong visualisasi berasaskan objek, VR menyokong pengalaman ruang dan prosedur, manakala IoT menyokong analitik, pemantauan dan keputusan berasaskan data. Hubungan antara teknologi AR, VR dan IoT dengan pendidikan tenaga boleh baharu serta sumbangannya terhadap pembelajaran interaktif dan agenda pembangunan mampan diringkaskan dalam Rajah 2.



Rajah 2: Peranan AR, VR dan IoT dalam memperkasa pendidikan tenaga boleh baharu melalui pembelajaran interaktif, peningkatan penglibatan pelajar dan sokongan terhadap SDG 4, 7, 11 dan 13.

Dalam topik yang sukar diperhatikan secara langsung, teknologi imersif boleh mengurangkan abstraksi. VR digunakan untuk menggambarkan proses kompleks dan latihan sistem seperti sel fuel, turbin angin dan PV (Frank et al., 2021), sementara AR membolehkan manipulasi model dan parameter (Sendari et al., 2020). Simulasi PV boleh menguji kesan sudut, teduhan dan orientasi tanpa mengubah pemasangan fizikal; VR turbin angin pula membolehkan pelajar mengalami prosedur pemeriksaan pada ketinggian dalam persekitaran bebas risiko (Cranmer et al., 2020). Kelebihan ini sangat relevan kepada TVET kerana latihan awal boleh dilaksanakan sebelum pelajar berinteraksi dengan peralatan mahal atau berbahaya.

IoT melengkapkan AR/VR dengan menjadikan data sebagai objek pembelajaran. Makmal berasaskan IoT membolehkan pelajar menjejak penggunaan tenaga, menilai prestasi, mengenal pasti anomali dan memahami penyelenggaraan ramalan (Moradi et al., 2019). Ini mengubah pendidikan tenaga daripada pembelajaran tentang peranti kepada pembelajaran tentang sistem siber-fizikal. Kecekapan sedemikian semakin relevan kepada grid pintar dan pengurusan tenaga, tetapi memerlukan literasi data, komunikasi rangkaian dan keselamatan digital yang mungkin belum menjadi sebahagian daripada kurikulum tradisional.

Batas utama ialah kos perkakasan dan perisian, penyelenggaraan, keperluan komputer berprestasi, internet, serta kompetensi pendidik (Dwivedi et al., 2022). Jurang digital menjadikan paradoks yang perlu diberi perhatian: teknologi yang berpotensi meningkatkan akses juga boleh memperbesar ketidaksamaan jika hanya institusi berkemampuan mampu menggunakannya. Oleh itu, penyelesaian kos rendah, platform sumber terbuka, aplikasi mudah alih dan makmal jauh perlu diberi keutamaan. Martin dan Chebak (2016), Kumara et al. (2022) serta Tobarra et al. (2014) menunjukkan potensi makmal maya atau jauh sebagai alternatif kepada infrastruktur fizikal penuh.

Secara kritikal, keberkesanan teknologi tidak patut diukur melalui novelty atau keterujaan pengguna semata-mata. Persoalan yang lebih penting ialah sama ada AR/VR meningkatkan pemahaman, ketepatan prosedur, keselamatan atau pemindahan kemahiran; dan sama ada IoT meningkatkan kebolehan mentafsir data serta membuat keputusan. Penyelidikan masa hadapan memerlukan perbandingan dengan kaedah konvensional, penilaian retensi jangka panjang dan analisis kos-keberkesanan. Teknologi digital paling bernilai apabila ia melengkapi, bukan menggantikan, eksperimen fizikal dan pengalaman tempat kerja. Berdasarkan sintesis literatur yang dibincangkan, **Jadual 1** membandingkan peranan, pendekatan pembelajaran, kompetensi, kekuatan dan keterbatasan STEM, TVET dan teknologi baharu dalam pendidikan tenaga boleh baharu serta mengenal pasti jurang utama yang masih memerlukan perhatian.

Jadual 1: Perbandingan peranan STEM, TVET dan teknologi baharu dalam pendidikan tenaga boleh baharu

Dimensi	STEM	TVET	Teknologi Baharu
Peranan utama	Asas konseptual dan analitikal	Kompetensi praktikal dan pekerjaan	Pengayaan digital dan pengalaman
Pendekatan	PBL, PjBL, inquiry learning	Hands-on, trainer kit, apprenticeship	AR, VR, IoT, remote lab
Kompetensi	Pemikiran sistem, reka bentuk, penyelesaian masalah	Pemasangan, operasi, penyelenggaraan, keselamatan	Simulasi, visualisasi, pemantauan masa nyata
Kekuatan	Integrasi multidisiplin	Relevan kepada industri	Fleksibel, selamat dan scalable
Keterbatasan	Boleh kekal terlalu teoritikal	Kos peralatan dan keusangan teknologi	Infrastruktur dan jurang digital
Kajian representatif	(Azis et al., 2023), (Wiyono et al., 2024), (Aldeman et al., 2024), (Chiou et al., 2020)	(Haryudo et al., 2023) (Postiglione & Tang, 2019)	(Voinea et al., 2023) (Hazarika & Rahmati, 2023)
Jurang utama	Bukti pemindahan kemahiran jangka panjang terhadap	Kurikulum ketinggalan daripada industri	Bukti longitudinal dan kos-keberkesanan terhadap

Cabaran sistemik dan jurang pelaksanaan

Cabaran yang dikenal pasti merentasi STEM, TVET dan teknologi digital saling berkaitan. Pertama, kekurangan pembiayaan menghadkan akses kepada makmal, peralatan tenaga dan platform AR/VR (Plett, 2024). Kesan ini lebih ketara di negara membangun, di mana institusi mungkin menggunakan peralatan lama dan mempunyai capaian internet yang tidak stabil. Literatur turut menunjukkan bahawa sebahagian program pengajian berkaitan tenaga masih tertumpu pada bahan api fosil, dengan hanya sekitar 32% didedikasikan kepada tenaga boleh baharu dalam analisis yang dirujuk oleh manuskrip asal (Vakulchuk & Overland, 2024). Ini menunjukkan bahawa isu pembiayaan bukan sekadar pembelian peralatan, tetapi juga upaya institusi mengalihkan struktur akademik kepada bidang baharu.

Kedua, latihan pendidik dan reka bentuk kurikulum sering ketinggalan berbanding teknologi. Pengajar TVET mungkin kurang pendedahan kepada aplikasi industri (Shehzad et al., 2023), sementara tenaga akademik daripada disiplin tradisional tidak semestinya mempunyai latihan khusus dalam sistem tenaga boleh baharu. Keadaan ini boleh menghadkan upaya institusi untuk mengemas kini kandungan selari dengan perkembangan teknologi dan amalan industri. Akibatnya, kandungan boleh

tertumpu pada teknologi matang sedangkan industri bergerak kepada hidrogen, penyimpanan termaju, grid pintar dan bioenergi (Zhang et al., 2023). Program pembangunan profesional perlu menggabungkan latihan teknologi, pedagogi pengalaman dan penempatan industri supaya pendidik dapat memahami bukan sahaja bagaimana teknologi berfungsi tetapi bagaimana ia digunakan dalam konteks kerja.

Ketiga, ketidaksamaan akses mempunyai dimensi geografi dan digital. Institusi di negara berpendapatan tinggi lebih berkemungkinan memiliki makmal moden, alat digital dan kursus berorientasikan industri, sedangkan institusi berpendapatan rendah mungkin kekurangan infrastruktur asas (Apergis et al., 2022). Makmal bergerak, pusat e-pembelajaran berkuasa solar dan latihan jarak jauh boleh mengurangkan jurang, tetapi penyelesaian tersebut perlu dinilai dari segi kebolehgunaan, kos operasi dan sokongan teknikal. Akses kepada kandungan tanpa akses kepada eksperimen, mentor dan pengiktirafan kompetensi masih belum menyamai pendidikan berkualiti.

Keempat, jurang industri–akademia kekal sebagai isu merentas semua tema. Program universiti boleh terlalu teoritikal (Thomas et al., 2008; Lucas et al., 2018), sementara institusi TVET tanpa hubungan langsung dengan industri mempunyai peluang internship, apprenticeship dan penempatan kerja yang terhad (Omar & Kamaruzaman, 2024). Kos peralatan latihan turut menyukarkan usaha mendekati persekitaran industri (Impram et al., 2020; Pouresmaeli et al., 2023). Integrasi pensijilan industri, projek autentik dan latihan tempat kerja dicadangkan untuk merapatkan jurang (Ahmed et al., 2024). Walau bagaimanapun, kerjasama industri perlu melampaui sumbangan peralatan; industri perlu terlibat dalam pemetaan kompetensi, reka bentuk penilaian dan maklum balas kurikulum.

Keseluruhan bukti menunjukkan bahawa masalah pendidikan tenaga boleh baharu bukan berpunca daripada satu komponen yang lemah, tetapi daripada fragmentasi sistem. STEM, TVET, teknologi digital, akreditasi dan industri sering berkembang melalui inisiatif berasingan. Justeru, pembaharuan yang hanya menambah satu makmal VR, satu kursus PV atau satu internship tidak semestinya menyelesaikan jurang kompetensi. Keperluan sebenar ialah seni bina pendidikan yang menghubungkan komponen tersebut secara berurutan dan dapat dinilai.

Perbandingan antara inisiatif pendidikan tinggi turut memperlihatkan bahawa pembelajaran autentik mempunyai beberapa bentuk dan tidak semuanya menghasilkan jenis kompetensi yang sama. Projek pemasangan sistem sebenar seperti yang dilaporkan di ECSU (Rawat et al., 2023) memberikan pendedahan kepada konfigurasi, pengukuran dan keputusan teknikal, sedangkan program antarabangsa seperti FLEAP (Kerzmann et al., 2016) menambah perspektif budaya dan sistem tenaga. Projek capstone (Husanu et al., 2017) pula menuntut pelajar menggabungkan pengetahuan teknikal dengan pengurusan projek dan komunikasi. Justeru, kurikulum yang matang seharusnya tidak memilih satu pedagogi sebagai penyelesaian tunggal, tetapi membina urutan pengalaman daripada eksperimen terkawal, projek reka bentuk, aplikasi sistem sebenar hingga interaksi dengan industri. Urutan ini juga memudahkan penilaian perkembangan kompetensi secara progresif.

Aspek akreditasi perlu dibaca secara kritikal dalam konteks tersebut. Penjajaran kepada ABET, NABCEP atau kerangka Bologna (Phillips et al., 2014) dapat memperjelas hasil pembelajaran dan meningkatkan kebolehbandingan program, tetapi pematuhan standard tidak semestinya menjamin pengalaman pembelajaran yang autentik. Program boleh memenuhi dokumentasi hasil pembelajaran tanpa menyediakan pendedahan mencukupi kepada kegagalan sistem, ketidakpastian data atau kekangan operasi yang lazim dalam industri. Oleh itu, standard dan akreditasi paling berkesan apabila digabungkan dengan bukti prestasi pelajar melalui demonstrasi kemahiran, portfolio projek dan penilaian tempat kerja.

Dalam konteks STEM, satu isu yang memerlukan perhatian ialah hubungan antara kedalaman disiplin dengan integrasi antara disiplin. Penggabungan fizik, kimia, matematik dan kejuruteraan boleh memperkayakan pemahaman, tetapi integrasi yang terlalu awal tanpa asas disiplin yang mencukupi boleh menyebabkan pembelajaran menjadi dangkal. Sebaliknya, pengajaran disiplin secara terasing terlalu lama menyukarkan pelajar melihat hubungan sistem. Reka bentuk kurikulum yang lebih seimbang boleh menggunakan konsep teras sebagai asas sebelum memperkenalkan masalah tenaga yang memerlukan sintesis. Dengan demikian, projek bukan sekadar aktiviti menarik tetapi menjadi ruang untuk menguji dan menghubungkan konsep yang telah dibina.

Bukti daripada kajian-kajian PBL dan PjBL (Azis et al., 2023) juga menunjukkan kepelbagaian konteks peserta, daripada sekolah menengah hingga mahasiswa kejuruteraan. Hal ini menyokong potensi pedagogi pengalaman merentas tahap pendidikan, tetapi menghadkan generalisasi langsung antara tahap. Aktiviti yang sesuai untuk meningkatkan literasi tenaga di sekolah tidak semestinya

mencukupi untuk melatih jurutera atau juruteknik. Oleh itu, hasil pembelajaran perlu dibezakan mengikut tahap: kesedaran dan konsep asas pada peringkat awal, reka bentuk dan analisis pada pendidikan tinggi, serta ketepatan prosedur dan kompetensi pekerjaan dalam TVET. Penyelidikan masa hadapan perlu melaporkan tahap kompetensi dengan lebih eksplisit supaya keberkesanan intervensi dapat dibandingkan secara bermakna.

Bagi TVET, hubungan dengan industri bukan sahaja menyediakan tempat latihan, tetapi juga menjadi mekanisme pembaharuan kurikulum. Apabila industri terlibat dalam mengenal pasti tugas kritikal, teknologi yang sedang digunakan dan kesilapan yang lazim berlaku di tempat kerja, kandungan latihan boleh disusun berdasarkan masalah sebenar. Ini sangat penting dalam bidang seperti PV dan hidrogen yang mempunyai keperluan keselamatan, standard dan diagnostik khusus. Walau bagaimanapun, kebergantungan berlebihan kepada satu syarikat boleh mengecilkan kurikulum kepada teknologi atau prosedur proprietari. Perkongsian yang lebih sihat melibatkan beberapa pemain industri dan mengekalkan asas teori serta kompetensi yang boleh dipindahkan antara majikan.

Perbandingan negara juga menunjukkan bahawa kejayaan TVET berkait dengan struktur institusi. Jerman mempunyai tradisi perkongsian firma-sekolah yang kukuh (Pavlova, 2019), India menggunakan badan kemahiran untuk menghubungkan latihan dengan sektor pekerjaan (Mathur et al., 2022), manakala China menggunakan reformasi vokasional bagi menangani ketidakpadanan tenaga kerja (Tang & Shi, 2017). Dalam konteks yang mempunyai industri tenaga boleh baharu yang masih kecil, pendekatan yang sama mungkin tidak dapat dilaksanakan sepenuhnya. Negara tersebut boleh menggunakan konsortium industri, pusat latihan serantau atau makmal bersama sebagai mekanisme perantaraan. Oleh itu, pemindahan amalan terbaik perlu berasaskan fungsi yang hendak dicapai, bukannya meniru struktur institusi secara literal.

Teknologi digital pula perlu diposisikan berdasarkan tahap fidelity yang diperlukan. Bagi pengenalan konsep, model AR mudah alih mungkin memadai untuk menunjukkan struktur dan aliran tenaga. Bagi latihan prosedur berisiko, VR yang lebih imersif boleh memberi nilai tambahan kerana pelajar boleh mengulang urutan tindakan tanpa bahaya. Bagi analisis prestasi, IoT dan makmal jauh lebih sesuai kerana pelajar perlu mentafsir data sebenar. Pemadanan teknologi dengan objektif pembelajaran ini boleh mengelakkan pembaziran apabila institusi membeli peralatan canggih yang tidak digunakan secara pedagogi. Ia juga membuka peluang kepada reka bentuk blended laboratory yang menggabungkan simulasi sebelum eksperimen fizikal dan analisis data selepas eksperimen.

Satu jurang penting dalam literatur teknologi pendidikan ialah kekurangan analisis kos-keberkesanan. Banyak kajian menekankan peningkatan penglibatan atau penerimaan pengguna (Frank et al., 2021), tetapi institusi perlu membuat keputusan berdasarkan kos perkakasan, pembangunan kandungan, latihan staf, penyelenggaraan dan jangka hayat platform. Penyelesaian digital mungkin lebih murah daripada makmal fizikal bagi sesetengah topik, tetapi tidak bagi semua kompetensi. Sebagai contoh, VR boleh melatih urutan penyelenggaraan tetapi tidak sepenuhnya menggantikan kemahiran menggunakan alat, tork, sambungan elektrik atau pemeriksaan fizikal. Oleh itu, bukti masa hadapan perlu membandingkan kombinasi fizikal-digital yang optimum, bukan mempertentangkan pembelajaran maya dengan pembelajaran sebenar.

Cabaran ekuiti juga perlu diperluas daripada persoalan akses internet kepada persoalan akses kepada keseluruhan ekosistem pembelajaran. Pelajar mungkin mempunyai akses kepada video, simulasi atau kursus terbuka, tetapi masih kekurangan mentor, bahan eksperimen, penilaian kompetensi dan laluan kepada pensijilan. Inisiatif makmal jauh dan sumber terbuka (Kumara et al., 2022) mempunyai potensi tinggi apabila disepadukan dengan fasilitasi tempatan dan mekanisme pengiktirafan. Dengan itu, digitalisasi boleh menjadi strategi perluasan peluang, bukannya pengganti murah kepada pendidikan praktikal yang berkualiti.

Akhir sekali, literatur menunjukkan keperluan mengubah ukuran kejayaan pendidikan tenaga boleh baharu. Pengetahuan kandungan dan kepuasan pelajar penting tetapi tidak mencukupi. Penilaian yang lebih komprehensif perlu merangkumi kebolehan mentafsir data, mereka bentuk penyelesaian, melaksanakan prosedur dengan selamat, mengenal pasti kegagalan, bekerja dalam pasukan dan menyesuaikan pengetahuan kepada teknologi baharu. Pada tahap sistem, indikator boleh merangkumi kadar penempatan kerja, maklum balas majikan, pencapaian pensijilan dan keupayaan graduan mengikuti latihan lanjutan. Peralihan kepada indikator kompetensi ini akan membantu menentukan sama ada integrasi STEM, TVET dan teknologi benar-benar menyumbang kepada kesiapsiagaan tenaga kerja, bukan sekadar memperkayakan pengalaman bilik darjah. Berdasarkan cabaran sistemik yang

dikenal pasti, **Jadual 2** merumuskan keterbatasan semasa, jurang utama serta hala tuju strategik yang diperlukan bagi memperkukuh integrasi STEM, TVET dan teknologi baharu dalam pendidikan tenaga boleh baharu.

Jadual 2: Cabaran, jurang dan hala tuju strategik dalam pendidikan tenaga boleh baharu

Cabaran utama	Keterbatasan semasa	Jurang utama	Hala tuju strategik
Fragmentasi kurikulum	STEM, TVET dan pembelajaran digital sering dibangunkan secara berasingan	Tiada laluan kompetensi yang mengintegrasikan teori, amali dan digital	Membangunkan kurikulum modular dan bersepadu berasaskan kompetensi
Kos dan infrastruktur	Akses kepada makmal, peralatan tenaga boleh baharu dan teknologi AR/VR tidak seragam	Pendedahan praktikal berbeza mengikut kapasiti institusi	Memanfaatkan kit modular, makmal jauh, simulasi dan perkongsian fasiliti
Kompetensi pendidik	Pendedahan kepada teknologi baharu, industri dan pedagogi digital masih terhad	Keupayaan pendidik berkembang lebih perlahan daripada perubahan teknologi	Pembangunan profesional berterusan dan penempatan industri
Jurang digital	Akses kepada internet, peranti dan platform digital tidak seimbang	Teknologi digital berpotensi memperluas ketidaksamaan pendidikan	Platform kos rendah, sumber terbuka dan pembelajaran digital yang inklusif
Jurang industri–akademia	Kandungan pendidikan tidak sentiasa sejajar dengan amalan industri	Kompetensi graduan kurang divalidasi dalam persekitaran kerja sebenar	Kurikulum bersama industri, internship, apprenticeship dan pensijilan profesional
Penilaian keberkesanan	Banyak kajian menumpukan persepsi dan hasil pembelajaran jangka pendek	Bukti longitudinal tentang pemindahan kompetensi dan kebolehpasaran masih terhad	Penilaian berasaskan kompetensi, kajian longitudinal dan maklum balas majikan

KERANGKA INTEGRASI STEM-TVET-TEKNOLOGI UNTUK PENDIDIKAN TENAGA BOLEH BAHARU

Berdasarkan sintesis literatur, artikel ini mencadangkan kerangka integrasi empat lapisan: asas STEM, aplikasi TVET, pengayaan digital dan pengesahan industri. Lapisan pertama membina pemahaman saintifik, matematik, pemikiran sistem dan keupayaan reka bentuk. Lapisan kedua menukar pengetahuan tersebut kepada kompetensi praktikal melalui trainer kit, makmal, PBL/PjBL, pemasangan, pengukuran dan penyelenggaraan. Lapisan ketiga menggunakan AR, VR, IoT, simulasi dan makmal jauh untuk memperluas pengalaman, menyediakan latihan berulang dan menghubungkan pelajar kepada data sebenar. Lapisan keempat memastikan kompetensi diuji melalui projek autentik, internship, apprenticeship, standard profesional atau pensijilan industri.

Kerangka ini berbeza daripada model yang melihat STEM dan TVET sebagai laluan selari. Dalam model integratif, pelajar bergerak secara iteratif antara memahami, melakukan, mensimulasikan, menganalisis dan mengesahkan. Sebagai contoh, topik PV boleh bermula dengan konsep semikonduktor dan penukaran tenaga, diikuti reka bentuk serta pengukuran sistem mini, simulasi kesan teduhan, pemasangan sebenar dan akhirnya penilaian berdasarkan standard industri. Bagi sel fuel, pelajar boleh menghubungkan elektrokimia dan termodinamik dengan pemasangan stack, diagnostik prestasi, visualisasi digital serta prosedur keselamatan. Oleh itu, teknologi pembelajaran tidak berada di hujung kurikulum sebagai tambahan, tetapi menyokong peralihan antara teori dan amali.

Kerangka juga memerlukan tiga mekanisme sokongan. Pertama, kurikulum perlu modular dan dikemas kini secara berkala bersama industri. Kedua, pembangunan profesional pendidik perlu merangkumi teknologi tenaga, pedagogi dan literasi digital. Ketiga, penilaian perlu beralih daripada penguasaan kandungan semata-mata kepada bukti kompetensi, termasuk penyelesaian masalah, ketepatan prosedur, interpretasi data, keselamatan, kerja berpasukan dan adaptasi. Akreditasi seperti ABET, standard industri dan sistem pemindahan kredit boleh digunakan sebagai rujukan, tetapi perlu disesuaikan dengan konteks tempatan (Weissman & Laflin, 2006).

Dari perspektif akses, kerangka ini tidak mengandaikan semua institusi mempunyai kemudahan yang sama. Institusi berkemampuan boleh menggunakan makmal fizikal dan immersive VR secara intensif, manakala institusi dengan sumber terhad boleh menggabungkan kit modular, simulasi sumber terbuka, makmal jauh dan perkongsian fasiliti. Prinsipnya ialah kesetaraan hasil pembelajaran, bukan keseragaman perkakasan. Pendekatan ini penting bagi mengelakkan standardisasi global daripada menjadi model yang hanya sesuai untuk sistem pendidikan berpendapatan tinggi.

Pada peringkat tadbir urus, universiti, TVET, kerajaan dan industri perlu berfungsi sebagai rangkaian, bukannya entiti berasingan. Literatur menunjukkan bahawa kerjasama ini boleh menyokong pembangunan kurikulum, internship, penyelidikan, pensijilan dan pemindahan teknologi (Zhou et al., 2023). Organisasi antarabangsa seperti UNESCO dan IRENA juga berpotensi menyokong kerangka kompetensi yang boleh disesuaikan mengikut keperluan tenaga negara (Basri et al., 2021). Walau bagaimanapun, standard global perlu cukup fleksibel untuk mengambil kira perbezaan sumber tenaga, pasaran kerja, tahap pembangunan industri dan kapasiti institusi.

Dalam konteks Malaysia, kerangka empat lapisan ini boleh dikontekstualisasikan melalui Dasar Tenaga Negara 2022–2040, Pelan Hala Tuju Peralihan Tenaga Negara (NETR) dan Dasar TVET Negara 2030. Dasar Tenaga Negara menempatkan modal insan dan keupayaan sebagai pemudah cara peralihan tenaga, termasuk perancangan tenaga kerja jangka panjang serta pengukuhan kemahiran digital, analitik, automasi dan teknologi termaju (Kementerian Ekonomi. (2022). NETR memperincikan keperluan taksonomi kemahiran hijau, perancangan strategik penawaran–permintaan tenaga kerja, program upskilling dan reskilling, pengukuhan program TVET dan pendidikan tertiar bagi sektor hijau, serta literasi tenaga di institusi pendidikan (Kementerian Ekonomi. (2023).

Selari dengan itu, Dasar TVET Negara 2030 menekankan program TVET yang responsif, fleksibel dan inklusif serta penjajaran latihan dengan keperluan industri (Kementerian Pendidikan Tinggi. (2024). Implikasi dasarnya ialah lapisan asas STEM dan pengayaan digital perlu dipetakan kepada kompetensi hijau yang jelas, aplikasi TVET perlu menggunakan modul yang boleh dikemas kini mengikut teknologi sektor tenaga, manakala pengesahan industri perlu diperkukuh melalui projek autentik, penempatan industri, pensijilan mikro dan standard kompetensi. Pelaksanaan sedemikian memerlukan penyelarasan antara institusi pendidikan tinggi, penyedia TVET, agensi tenaga dan industri supaya kerangka ini berfungsi sebagai laluan pembangunan kompetensi nasional, bukan sekadar intervensi pedagogi pada peringkat institusi. Kerangka yang dicadangkan perlu dilihat sebagai hipotesis reka bentuk yang memerlukan pengesahan empirikal. Kajian masa hadapan boleh membandingkan program yang menggunakan integrasi empat lapisan dengan program konvensional dari segi pencapaian konsep, kompetensi praktikal, literasi digital, retensi, kebolehpasaran dan kos. Kajian longitudinal juga diperlukan untuk menentukan sama ada kelebihan pembelajaran kekal selepas graduasi. Dengan pengesahan sedemikian, kerangka dapat berkembang daripada sintesis konseptual kepada model pendidikan yang mempunyai bukti keberkesanan.

IMPLIKASI, PELUANG DAN HALA TUJU MASA HADAPAN

Implikasi pertama ialah keperluan memperkukuh perkongsian antara institusi pendidikan, kerajaan dan industri. Kurikulum bersama, projek industri, internship dan perkongsian fasiliti boleh mengurangkan kelewatan antara perubahan teknologi dengan kandungan pendidikan (Tong, 2024). Kerajaan pula boleh menggunakan geran, insentif dan dasar untuk mengurangkan risiko penglibatan industri, khususnya bagi institusi kecil. Kejayaan perkongsian harus dinilai melalui hasil pelajar dan keberlanjutan hubungan, bukan hanya bilangan memorandum persefahaman.

Implikasi kedua ialah pembangunan sumber terbuka dan digital toolkit. Makmal maya, makmal jauh, simulasi PV, model turbin angin dan platform latihan boleh meningkatkan skala pendidikan apabila peralatan fizikal terhad (Tobarra et al., 2014). Namun, sumber terbuka memerlukan standard kualiti, sokongan teknikal dan reka bentuk penilaian. Masa hadapan juga membuka ruang kepada simulasi berasaskan AI, analitik pembelajaran dan sistem adaptif, tetapi teknologi ini perlu diuji berdasarkan nilai pedagogi dan etika penggunaan data, bukan semata-mata kerana kebaruannya.

Implikasi ketiga ialah standardisasi yang fleksibel. Kandungan teras boleh merangkumi prinsip solar, angin, hidrogen, bioenergi dan penyimpanan; kemahiran praktikal pula melibatkan reka bentuk, pemasangan, operasi dan penyelenggaraan; manakala kompetensi merentas bidang merangkumi pengurusan tenaga, keselamatan, data, dasar dan keusahawanan (Jennings, 2009). Namun, setiap negara perlu menyesuaikan penekanan mengikut campuran tenaga dan struktur pekerjaan. Standard yang baik harus menentukan apa yang graduan mampu lakukan, bukannya menetapkan satu silibus yang seragam.

Akhirnya, integrasi STEM, TVET dan teknologi perlu disokong oleh budaya pembelajaran sepanjang hayat. Perubahan pesat dalam penyimpanan tenaga, hidrogen, digitalisasi dan grid pintar bermaksud kompetensi semasa boleh menjadi lapuk dalam tempoh yang singkat (Gowrie Vinayan et al., 2020). Pensijilan mikro, upskilling dan reskilling perlu menjadi sebahagian daripada ekosistem pendidikan tenaga, termasuk untuk graduan sedia ada dan tenaga pengajar. Ini mengubah pendidikan tenaga boleh baharu daripada program sekali tamat kepada sistem pembangunan kompetensi yang berterusan.

KESIMPULAN

Pendidikan tenaga boleh baharu merupakan komponen strategik dalam peralihan kepada ekonomi rendah karbon kerana teknologi hanya dapat digunakan secara meluas apabila terdapat tenaga kerja yang mampu memahami, memasang, mengoperasikan, menilai dan menambah baik sistem. Ulasan ini menunjukkan bahawa STEM, TVET dan teknologi baharu menyumbang fungsi yang berbeza tetapi saling melengkapi. STEM membina asas saintifik dan pemikiran penyelesaian masalah; TVET membangunkan kecekapan praktikal dan kesiapsiagaan kerja; manakala AR, VR dan IoT memperluas visualisasi, simulasi, latihan selamat dan pembelajaran berasaskan data.

Walaupun banyak inisiatif menunjukkan hasil positif, literatur masih terfragmentasi. Cabaran pembiayaan, peralatan, latihan pendidik, jurang digital, kurikulum yang lambat dikemas kini dan hubungan industri yang lemah mengehadkan keberkesanan. Lebih penting, bukti keberkesanan sering tertumpu pada hasil jangka pendek seperti kepuasan atau peningkatan pengetahuan, sedangkan bukti longitudinal tentang pemindahan kompetensi dan kebolehpasaran masih diperlukan. Oleh itu, kemajuan seterusnya memerlukan penilaian yang lebih kukuh terhadap apa yang berfungsi, untuk siapa, dalam konteks apa dan pada kos berapa.

Kerangka integrasi empat lapisan yang dicadangkan asas STEM, aplikasi TVET, pengayaan digital dan pengesahan industri menawarkan asas untuk menyusun pendidikan tenaga boleh baharu secara lebih koheren. Pelaksanaannya perlu disokong oleh kurikulum modular, pembangunan profesional pendidik, standard kompetensi, sumber terbuka dan perkongsian industri. Dengan pendekatan ini, pendidikan tenaga boleh baharu berpotensi bergerak daripada koleksi kursus dan teknologi yang terpisah kepada ekosistem pembelajaran yang responsif, inklusif dan berorientasikan kompetensi, sekali gus menyokong SDG 4, SDG 7, SDG 8 dan SDG 13 serta pembangunan tenaga kerja hijau masa hadapan.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas sokongan kewangan melalui Geran Translasi UKM-TR2025-007.

RUJUKAN

- Abdurrahman, A., Maulina, H., Nurulsari, N., Sukamto, I., Umam, A. N., & Mulyana, K. M. (2022). Impacts of Integrating Engineering Design Process into Stem Makerspace on Renewable Energy Unit to Foster Students' System Thinking Skills. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4257526>
- Abo-Khalil, A. G. (2024). Integrating sustainability into higher education challenges and opportunities for universities worldwide. *Heliyon*, 10(9), e29946. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29946>
- Alattar, K., Al Ali, A., Alnuaimi, H., Alghfeli, M., Arra, A., & Udawatta, L. (2022). Enhancing Hands-on Skills of Undergraduates via Crowdsourcing of Solar PV Energy Production. *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2022*. <https://doi.org/10.1109/ASET53988.2022.9734857>
- Aldeman, M., Mathias, J., Darcy, D. A., Elms, C. J., Quinn, K. M., & Andracki, D. (2024). Designing Equitable STEM Education Modules with Renewable Energy Technologies. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, Portland. <https://doi.org/10.18260/1-2--47141>
- Aldeman, C. (2024). Where Are All the Special Educators? Schools employ more special education teachers than ever. So why is there a shortage?. *Education Next*, 24(4), 38.
- Apergis, N., Polemis, M., & Soursou, S. E. (2022). Energy poverty and education: Fresh evidence from a panel of developing countries. *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105430>
- Azis, K. R., Handayani, R. D., & Lesmono, A. D. (2023). The Implementation of STEM-Integrated Project-Based Learning Model on Renewable Energy Topic Through a Windmill Simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2623(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2623/1/012017>
- Basri, S., Umaira Zakaria, S., & Kamarudin, S. K. (2021). Review on Alternative Energy Education in Malaysia. *Jurnal Kejuruteraan*, 33(3), 461–472. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33\(3\)-08](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(3)-08)
- Blazquez, J., Fuentes-Bracamontes, R., Bollino, C. A., & Nezamuddin, N. (2018). The renewable energy policy Paradox. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1–5. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.002>
- Chiou, R., Fegade, T., Wu, Y. C., Tseng, T. L. B., Mauk, M. G., & Husanu, I. N. C. (2020). Project-based learning with implementation of virtual reality for green energy manufacturing education. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2020, 1142. <https://doi.org/10.18260/1-2--35098>
- Cranmer, A., Ericson, J. D., Ebers Broughel, A., Bernard, B., Robicheaux, E., & Podolski, M. (2020). Worth a thousand words: Presenting wind turbines in virtual reality reveals new opportunities for social acceptance and visualization research. *Energy Research and Social Science*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101507>
- da Silva Damasceno, A. J., Souza, R. C. R., & Cavaliero, C. K. N. (2022). Experiences of Sustainable Energy Development Within Federal Higher Education Institutions in the Amazon: The Case of the State of Amazonas. In *World Sustainability Series* (pp. 267–283). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04764-0_15
- Drikakis, D., & Dbouk, T. (2022). The Role of Computational Science in Wind and Solar Energy: A Critical Review. In *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15249609>
- Fernandes Teixeira, J. C., Ferreira Da Silva, J., & Flores, P. (2007). Development of mechanical engineering curricula at the University of Minho. *European Journal of Engineering Education*, 32(5), 539–549. <https://doi.org/10.1080/03043790701433210>

- Frank, K., Gardner, A. E., Ciobanescu Husanu, I. N., Chiou, R. Y., & Ruane, R. (2021). GREEN STEM: VIRTUAL REALITY RENEWABLE ENERGY LABORATORY FOR REMOTE LEARNING. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-73778>
- Gilmour, B. (2022). An award winning approach to education relating to renewable energies. *2022 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications: Renewable and Sustainable Energy Systems, Hybrid Transportation Systems, Energy Transition, and Energy Security, EFEA 2022 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EFEA56675.2022.10063830>
- Gowrie Vinayan, Harikirishanan, D., & Siow May Ling. (2020). Upskilling and Reskilling the Workforce via Industry Driven Technical and Vocational Education and Training: Strategies to Initiate Industry/Institution Partnership in Malaysia. *Journal of Economic Info*, 7(2), 94–103. <https://doi.org/10.31580/JEI.V7I2.1438>
- Haryudo, S. I., Ismayati, E., & Baskoro, F. (2022). Development of Training Kit for Solar Cell Off-Grid System based on Project-Based Learning to Improve Learning Outcomes. *2022 5th International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering: The Future of Electrical Engineering, Informatics, and Educational Technology Through the Freedom of Study in the Post-Pandemic Era, ICVEE 2022 - Proceeding*. <https://doi.org/10.1109/ICVEE57061.2022.9930122>
- Haryudo, S. I., Wiyono, A., Kartini, U. T., Baskoro, F., & Rohman, M. (2023). Development of the Solar Cell on-grid System 40wp as a Learning Tool for Renewable Energy. *2023 6th International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering: Integrating Scalable Digital Connectivity, Intelligence Systems, and Green Technology for Education and Sustainable Community Development, ICVEE 2023 - Proceeding*. <https://doi.org/10.1109/ICVEE59738.2023.10348313>
- Hazarika, A., & Rahmati, M. (2023). Towards an Evolved Immersive Experience: Exploring 5G- and Beyond-Enabled Ultra-Low-Latency Communications for Augmented and Virtual Reality. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23073682>
- Husanu, I. N. C., Ertekin, Y., Chiou, R., & Mauk, M. G. (2017). The Contribution of Capstone Projects in Green/Renewable Energy Areas to Growth of the Engineering Curriculum in Global Sustainable Development. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2017-June*. <https://doi.org/10.18260/1-2--28951>
- Jafarinejad, S., Beckingham, L. E., Kathe, M., & Henderson, K. (2021). The Renewable Energy (RE) Industry Workforce Needs: RE Simulation and Analysis Tools Teaching as an Effective Way to Enhance Undergraduate Engineering Students' Learning. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11727*, 13(21), 11727. <https://doi.org/10.3390/SU132111727>
- Jennings, P. (2009). New directions in renewable energy education. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.005>
- Kandpal, T. C., & Broman, L. (2014). Renewable energy education: A global status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 300–324. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.02.039>
- Katsamaki, A., Markaki, M. E., Mavromatakis, F., Apostolaki, M., & Karapidakis, E. (2021). GSS-VET Project. Vocational Education and Training Process to Develop Working Skills for Technicians in Geothermal, Solar-Thermal and Photovoltaic Installations. *Proceedings of the 2021 30th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering, EAEEIE 2021*. <https://doi.org/10.1109/EAEEIE50507.2021.9530957>
- Kementerian Ekonomi. (2022). *Dasar Tenaga Negara 2022–2040*. (2022).
- Kementerian Ekonomi. (2023). *National energy transition roadmap*. (2023.).
- Kementerian Pendidikan Tinggi. (2024). *Dasar TVET Negara 2030*. (2024).
- Kerzmann, T. L., McAndrew, C. J., Slis, K., French, M. E., & Maione, K. (2016). Educational evaluation of a faculty-led education abroad program in renewable energy. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2016-June*. <https://doi.org/10.18260/P.26889>
- Komarudin, K., Akhsan, H., & Wiyono, K. (2025). Preliminary Study of E-modul Based on Ethnoscience Lake Ranau to Improve Literacy skills of Students on Renewable Energy Topic. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(3), 1183–1193.

- <https://doi.org/10.29303/JPPIPA.V11I3.10653>
- Kumara, K. J. C., Galappaththi, U. I. K., & Baduge, S. (2022). Developments of A Remote Online Wind Laboratory Experimental Setup for Repository MOOCs. *2022 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications: Renewable and Sustainable Energy Systems, Hybrid Transportation Systems, Energy Transition, and Energy Security, EFEA 2022 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EFEA56675.2022.10063803>
- Lee, J. (2009). Partnerships with industry for effective and efficient implementation of TVET. *International Journal of Vocational Education and Training*.
- Liu, W., Zhang, X., & Feng, S. (2019). Does renewable energy policy work? Evidence from a panel data analysis. *Renewable Energy*, 135, 635–642. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.12.037>
- Mac-Lean, C., Vargas, L., & Reyes, C. (2020). Renewable Energy at Chilean Universities: Is it Possible? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012028>
- Mathur, A., Sharan, M., Chakraborty, S., & Mullick, S. (2022). *Technical and Vocational Education and Training: Examining Changing Conditions in India*. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022015031>
- Moradi, J., Shahinzadeh, H., Nafisi, H., Marzband, M., & Gharehpetian, G. B. (2019). Attributes of Big Data Analytics for Data-Driven Decision Making in Cyber-Physical Power Systems. *2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems, IPAPS 2020*. <https://doi.org/10.1109/IPAPS49326.2019.9069391>
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2023). Advances in renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 219, 119377. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119377>
- Pastor, R., Tobarra, L., Robles-Gómez, A., Cano, J., Hammad, B., Al-Zoubi, A., Hernández, R., & Castro, M. (2020). Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.100>
- Pavlova, M. (2019). Emerging environmental industries: impact on required skills and TVET systems. *International Journal of Training Research*. <https://doi.org/10.1080/14480220.2019.1639276>
- Phillips, W. B., Sullivan, W. S., Aron, R., Cherif, A. H., & Fortun, S. (2014). A renewable energy specialization in an electronics engineering technology curriculum. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2014. <https://doi.org/10.18260/1-2--19990>
- Pirzada, G., Muhammad, D. Y., & Mahmood, D. A. (2022). Assessment Challenges Faced by Technical Vocational Education (TVET) Stakeholders in Pakistan: Stakeholders' Perspectives. *Research Journal of Social Sciences and Economics Review*, 3(4), 17–26. [https://doi.org/10.36902/RJSSER-VOL3-ISS4-2022\(17-26\)](https://doi.org/10.36902/RJSSER-VOL3-ISS4-2022(17-26))
- Plett, E. (2024). Technical Solutions Towards Effective Renewable Energy Engineering Education. *2024 ASEE Midwest Section Conference Proceedings*, 18. <https://doi.org/10.18260/1-2-1115-49375>
- Popp, D., Vona, F., Grégoire-Zawilski, M., & Marin, G. (2024). The Next Wave of Energy Innovation: Which Technologies? Which Skills? *Https://Doi.Org/10.1086/728292*, 18(1), 45–65. <https://doi.org/10.1086/728292>
- Postiglione, G., & Tang, M. (2019). International experience in TVET-industry cooperation for China's poorest province. *International Journal of Training Research*, 17(sup1), 131–143. <https://doi.org/10.1080/14480220.2019.1629730>
- Rawat, K. S., Elahi, M., & Kumar, B. (2023). Education and Training Program to Improve Preparedness and Increased Access to Energy Workforce for Engineering Technology Graduates. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.18260/1-2--43224>
- Saovakhon, S., & Akatimagool, S. (2023). Solar Cell System Simulation for Renewable Energy Learning Innovation. *8th International STEM Education Conference, ISTEM-Ed 2023 - Proceedings*, Ayutthaya. <https://doi.org/10.1109/iSTEM-Ed59413.2023.10305747>
- Saunders, M., & Machell, J. (2000). Understanding emerging trends in higher education curricula and work connections. *Higher Education Policy*, 13(3), 287–302. [https://doi.org/10.1016/S0952-8733\(00\)00013-1/METRICS](https://doi.org/10.1016/S0952-8733(00)00013-1/METRICS)
- Seetharaman, A., Sandanaraj, L. L., Moorthy, M. K., & Saravanan, A. S. (2016). Enterprise

- framework for renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1368–1381. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.127>
- Sendari, S., Jiono, M., Diantoro, M., Puspitasari, P., Suryanto, H., & Nur, H. (2020). Augmented reality for introducing fuel cell as electrochemical energy conversion on vocational school. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. <https://doi.org/10.3991/IJIM.V14I12.15573>
- Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2022). Cost–benefit comparison of fuel cell–based and battery-based renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(2), 1736–1755. <https://doi.org/10.1002/ER.7291>
- Tang, N., & Shi, W. (2017). Youth Employment and Technical and Vocational Education and Training (TVET) in China. *Technical and Vocational Education and Training*, 24, 269–283. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47856-2_14
- Tobarra, L., Ros, S., Hernandez, R., Pastor, R., Robles-Gomez, A., Cammero, A. C., & Castro, M. (2014). Low-cost remote laboratories for renewable energy in distance education. *Proceedings of 2014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV 2014*. <https://doi.org/10.1109/REV.2014.6784235>
- Tong, P. (2024). Building a Sustainable Future: The Role of Industry-Education Integration in Vocational Training. *Education Insights*, 1(3), 1–7. <https://doi.org/10.70088/FJSM3J57>
- Vakulchuk, R., & Overland, I. (2024). The failure to decarbonize the global energy education system: Carbon lock-in and stranded skill sets. *Energy Research and Social Science*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103446>
- Voinea, G. D., Gîrbacia, F., Duguleană, M., Boboc, R. G., & Gheorghe, C. (2023). Mapping the Emergent Trends in Industrial Augmented Reality. In *Electronics (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/electronics12071719>
- Weissman, J. M., & Laflin, K. (2006). Trends in practitioner training for the renewable energy trades. *American Solar Energy Society - Solar 2006: 35th ASES Annual Conf., 31st ASES National Passive Solar Conf., 1st ASES Policy and Marketing Conf., ASME Solar Energy Division Int. Solar Energy Conference*, 2, 973–977.
- Wiyono, K., Zulkardi, Madang, K., Suhery, T., Yusup, M., Effendi, ... & Shahrill, M. (2024, April). The preliminary prototype of learning material based on STEM framework in renewable energy topic. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3052, No. 1, p. 020053). AIP Publishing LLC.
- Yordanov, T., Mihailov, N., & Gabrovska-Evstatieva, K. (2023, June). Low-cost remote lab on renewable energy sources with a focus on STEM education. In *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)* (pp. 1-5). IEEE.
- Zabihian, F. (2016). Introduction of renewable energy to high school students in a summer camp: Hands-on experimental approach. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2016-June*. <https://doi.org/10.18260/P.25463>
- Zhou, Y., Liu, Z., Wang, M., Dong, R. K., & Yue, X. G. (2023). Evaluating the impacts of education and digitalization on renewable energy demand behaviour: new evidence from Japan. *Economic Research-Ekonomika Istrazivanja*. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2164033>