

PENDAMPINGAN PEMANFAATAN AUGMENTED DAN VIRTUAL REALITY DALAM PEMBELAJARAN UNTUK MENDUKUNG KOMPETENSI TPACK GURU SMA

**Octavina Rizky Utami Putri, Zukhrufurrohmah, Alfiani Athma Putri Rosyadi,
Mohammad Syaifuddin, Dwi Priyo Utomo**

Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Malang
octavina@umm.ac.id

Abstract

Technology is often used as a presentation tool in learning. The alignment of technology, pedagogy, and material content has not been holistically integrated to build student engagement in the classroom. This community service activity aims to support the Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) competency of high school teachers by mentoring the use of Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in learning. This activity was carried out at one of Muhammadiyah high schools in East Java with eight teachers participating. This activity, with a participatory approach, was carried out by providing AR and VR devices, providing practical guidance materials, digital learning training, AR and VR integration workshops, mentoring in preparing AR and VR-based learning plans, and evaluation. Data were collected through questionnaires and interviews that were analyzed quantitatively and qualitatively. The results of the activity showed that 87.50% of teachers gave a positive response to the implementation of the activity and achieved a better understanding of TPACK through the integration of AR and VR in learning. This activity also increased teachers' confidence in designing AR and VR technology-based learning and contributed to the development of educational science by demonstrating that immersive technologies such as AR and VR are effective in supporting interactive, contextual, and student-centered learning.

Keywords: augmented reality, digital learning, teacher mentoring, TPACK, virtual reality.

Abstrak

Teknologi seringkali digunakan sebagai alat untuk presentasi dalam pembelajaran. Keselarasan teknologi, pedagogi, dan konten materi belum terintegrasi secara holistik untuk membangun keterlibatan siswa di kelas. Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan untuk mendukung kompetensi Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) guru SMA melalui pendampingan pemanfaatan Augmented Reality (AR) dan Virtual Reality (VR) dalam pembelajaran. Kegiatan ini dilaksanakan pada salah satu SMA Muhammadiyah di Jawa Timur dengan peserta delapan guru. Kegiatan dengan pendekatan partisipatif ini dilaksanakan dengan tahap penyediaan perangkat AR dan VR, penyediaan bahan panduan praktis, pelatihan pembelajaran digital, workshop integrasi AR dan VR, pendampingan penyusunan perencanaan pembelajaran berbasis AR dan VR, serta evaluasi. Data dikumpulkan melalui angket dan wawancara yang dianalisis secara kuantitatif dan kualitatif. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa 87,50% guru memberikan respon positif terhadap pelaksanaan kegiatan dan mencapai pemahaman TPACK yang lebih baik melalui integrasi AR dan VR dalam pembelajaran. Kegiatan ini juga meningkatkan kepercayaan diri guru dalam merancang pembelajaran berbasis teknologi Ar dan VR serta berkontribusi terhadap pengembangan ilmu pendidikan dengan menunjukkan bahwa teknologi imersif seperti AR dan VR efektif dalam mendukung pembelajaran yang interaktif, kontekstual, dan berpusat pada peserta didik.

Keywords: augmented reality, pembelajaran digital, pendampingan guru, TPACK, virtual reality.

PENDAHULUAN

Teknologi digital memiliki peran penting dalam mendukung strategi pedagogis yang bermakna (Smuts & Smuts, 2021; Varlık et al., 2026). Tantangan utama pendidikan saat ini bukan hanya pada ketersediaan teknologi, namun perlu keseimbangan kemampuan guru dalam memadukan teknologi, pedagogi, dan konten materi secara terpadu melalui kerangka *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) (Dinçer, 2024; Jammeh et al., 2024; Pazilah et al., 2025; Yani et al., 2025). Pada praktik pembelajaran, guru masih memanfaatkan teknologi sebagai media presentasi dan evaluasi sederhana, sehingga belum menciptakan pembelajaran yang interaktif, kontekstual, dan berpusat pada siswa (Chen et al., 2026).

Salah satu SMA Muhammadiyah di Jawa Timur telah memiliki fasilitas teknologi yang memadai dan menerapkan Kurikulum Merdeka. Namun demikian, pemanfaatan teknologi dalam pembelajaran belum optimal, khususnya pada materi yang bersifat abstrak dan memerlukan visualisasi tinggi. Guru juga menghadapi kendala dalam integrasi TPACK secara holistik, khususnya dalam hal menghubungkan aspek teknologi dan strategi pedagogi yang sesuai dengan konten materi yang diajarkan. Seringkali teknologi yang digunakan adalah alat presentasi *PowerPoint*, maupun alat evaluasi *online* seperti *Quizizz* untuk meningkatkan keterlibatan siswa. Akibatnya, pembelajaran menjadi kurang bervariasi, siswa kurang termotivasi, dan memiliki pemahaman yang kurang mendalam. Hal ini memperlihatkan adanya kesenjangan antara penerapan

teknologi yang sudah berjalan dengan peluang pemanfaatan teknologi mutakhir.

Salah satu teknologi mutakhir yang hingga kini belum dimanfaatkan adalah *Augmented Reality* (AR) maupun *Virtual Reality* (VR). Teknologi ini mendorong motivasi belajar siswa serta keterlibatan dalam proses pembelajaran melalui pengalaman belajar yang menarik (Zekeik et al., 2025). Kedua teknologi ini juga memiliki potensi besar dalam meningkatkan pemahaman siswa (AlGerafi et al., 2023; Mondal & Mondal, 2025).

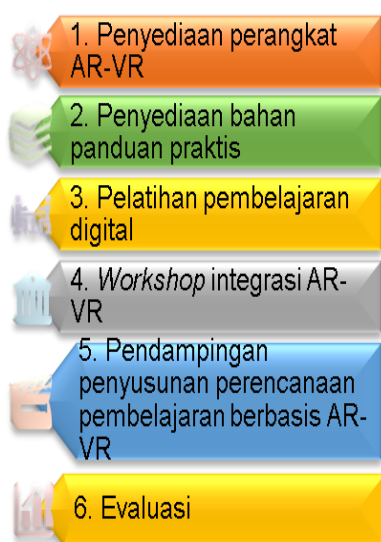
Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan untuk mendukung kompetensi TPACK guru SMA melalui pelatihan dan pendampingan pemanfaatan AR dan VR. Pemanfaatan AR dan VR memfasilitasi pembelajaran yang lebih interaktif, kontekstual, dan berorientasi pada kebutuhan abad ke-21 (Dewi et al., 2025). Dengan demikian, guru diharapkan dapat mengintegrasikan teknologi secara efektif untuk meningkatkan kualitas proses dan hasil pembelajaran

Manfaat jangka pendek kegiatan ini adalah peningkatan kompetensi TPACK guru serta motivasi dan pemahaman siswa (Jamaan et al., 2026). Dalam jangka panjang, kegiatannya ini mendorong budaya inovasi, penguatan pembelajaran digital, dan peningkatan kualitas lulusan yang adaptif terhadap perkembangan teknologi serta siap menghadapi tantangan pendidikan dan dunia kerja (Hu et al., 2023). Oleh sebab itu, kegiatan ini bertujuan untuk mendukung kompetensi *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) guru SMA melalui pendampingan pemanfaatan *Augmented Reality* (AR) dan *Virtual Reality* (VR)

dalam pembelajaran.

METODE

Metode kegiatan pengabdian kepada masyarakat yang digunakan adalah pendekatan partisipatif (Mallory, 2024), yakni guru dilibatkan secara aktif dalam seluruh tahapan kegiatan. Subjek kegiatan terdiri atas delapan guru pada salah satu SMA Muhammadiyah di Jawa Timur. Prosedur pelaksanaan pengabdian dilakukan melalui beberapa tahapan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1: Prosedur Pelaksanaan

Gambar 1 merepresentasikan prosedur pelaksanaan kegiatan yang terdiri atas enam tahap utama untuk mengatasi keterbatasan TPACK dan inovasi pembelajaran guru. Tahap pertama, sebagai persiapan, tim menentukan perangkat AR dan VR yang sesuai dengan kebutuhan pembelajaran di SMA. Persiapan ini dilanjutkan *Focus Group Discussion* untuk menyusun bahan panduan penggunaan AR dan VR agar mudah dipahami dan dapat digunakan secara praktis oleh guru.

Inti kegiatan ini adalah pelatihan pembelajaran berbasis teknologi dan *workshop* integrasi AR dan VR dalam pembelajaran di SMA. Setelah itu, pendampingan penyusunan perencanaan pembelajaran berbasis AR dan VR dilakukan sehingga guru memiliki panduan pembelajaran dengan mengintegrasikan TPACK.

Evaluasi dilakukan untuk mengetahui ketercapaian kegiatan pengabdian kepada masyarakat dalam mendukung kompetensi TPACK Guru SMA. Instrumen untuk bahan evaluasi meliputi angket dan pedoman wawancara. Angket yang diberikan dikemas dalam *Google Form* dengan memuat 3 komponen sebagaimana pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Evaluasi

No	Komponen	Indikator
1	Refleksi Pengalaman Mengikuti Kegiatan	a. Menilai keterlaksanaan pendampingan AR dan VR. b. Menilai kesesuaian pendampingan AR dan VR dengan kebutuhan pembelajaran guru.
2	Peningkatan Pemahaman TPACK	a. Menganalisis pemahaman terhadap konsep TPACK. b. Menganalisis kemampuan mengintegrasikan TPACK dalam perancangan pembelajaran.
3	Dampak terhadap Praktik Pembelajaran	Mengevaluasi dampak penggunaan AR dan VR terhadap inovasi pembelajaran dan keterlibatan belajar.

Tabel 1 merepresentasikan komponen dan indikator evaluasi pada angket untuk mengukur ketercapaian kegiatan dalam mendukung kompetensi TPACK guru. Data angket dianalisis secara kuantitatif untuk memperoleh

persentase ketercapaian serangkaian kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Hasil angket diselaraskan dengan hasil wawancara. Triangulasi teknik ini dilakukan agar mendapatkan data yang mendalam dan terpercaya (Nowell et al., 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kegiatan pengabdian kepada masyarakat dianalisis berdasarkan enam tahap pelaksanaan yang telah dirancang dengan pendekatan partisipatif.

Penyediaan Perangkat AR dan VR

Pemanfaatan teknologi mutakhir penting dilakukan untuk mendukung kompetensi TPACK guru. Salah satu teknologi mutakhir yang dapat digunakan untuk mendukung kompetensi TPACK guru dalam merancang maupun mengimplementasikan pembelajaran berbasis teknologi yakni *Augmented Reality* (AR) dan *Virtual Reality* (VR) menjadi rekomendasi dalam. Perangkat yang disediakan meliputi *smartphone* dengan spesifikasi yang mendukung AR dan VR dan aplikasinya. *VR-box* juga disiapkan untuk memudahkan penggunaan teknologi VR, seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *VR-box*

Pada Gambar 1, alat *VR-box* dilengkapi dengan *remote control* untuk memudahkan guru dalam mengoperasikan aplikasi tanpa harus menyentuh layar *smartphone*. *Remote*

control ini memudahkan guru dalam memilih menu, mengatur navigasi, serta berinteraksi dengan objek virtual.

Ketersediaan perangkat AR dan VR memungkinkan guru untuk melakukan eksplorasi langsung terhadap penggunaan teknologi dalam pembelajaran, sehingga tidak hanya memahami konsep secara teoritis, tetapi juga memperoleh pengalaman praktis. Hal ini relevan dengan kegiatan lainnya yang menunjukkan bahwa penyediaan perangkat AR dan VR menjadi komponen utama untuk mendukung kesiapan guru dalam mengintegrasikan teknologi pada pembelajaran yang dikembangkan (Han et al., 2025; Mystakidis et al., 2021). Hal ini bertujuan agar guru dapat memahami integrasi teknologi dalam strategi pedagogis dan konten materi yang merupakan inti dari penguatan kompetensi TPACK (Rinla et al., 2025). Oleh sebab itu, tahap pertama ini menjadi langkah awal dalam mendukung kompetensi TPACK guru secara kontekstual dan bermakna.

Penyediaan Bahan Panduan Praktis

Penyediaan bahan panduan pemanfaatan AR dan VR menjadi salah satu solusi strategis untuk mendukung peningkatan kompetensi guru dalam mengintegrasikan teknologi mutakhir ke dalam pembelajaran. Bahan panduan digunakan sebagai panduan praktis yang berisi penjelasan dasar mengenai konsep *Augmented Reality* (AR) dan *Virtual Reality* (VR), mekanisme kerja keduanya, serta potensi penerapannya dalam berbagai mata pelajaran. Bahan panduan memuat aplikasi yang digunakan, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Aplikasi pada Panduan Digital AR

Gambar 2 merepresentasikan aplikasi AR yang relevan dengan pembelajaran SMA disiapkan, seperti *GeoGebra 3D Calculator*, *AR Antomy*, *Planets AR*, *AR Zoo*, serta *3D modeling apps*. Demikian pula aplikasi VR, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Aplikasi pada Panduan Digital VR

Gambar 3 merepresentasikan aplikasi *spatial* dan *youtube* digunakan untuk mendukung teknologi VR dalam pembelajaran di SMA.

Secara keseluruhan, panduan digital pemanfaatan AR dan VR disusun sebagai referensi praktis bagi guru dalam menerapkan teknologi imersif di kelas. Panduan ini memuat penjelasan konsep dasar AR dan VR, langkah-langkah penggunaan aplikasi, contoh skenario pembelajaran, serta prinsip integrasi teknologi dengan strategi pedagogi dan konten materi. Demikian pula pada kegiatan serupa sebelumnya, panduan seperti ini telah dimanfaatkan oleh guru sebagai sumber belajar mandiri dan acuan dalam mengembangkan pembelajaran berbasis teknologi secara berkelanjutan (Lane &

Havens-Hafer, 2023; Nikou et al., 2022).

Pelatihan Pembelajaran Digital

Pelatihan pembelajaran digital dilaksanakan di salah satu SMA Muhammadiyah di Jawa Timur yang dihadiri oleh delapan guru. Kegiatan ini merupakan tahap awal implementasi program pengabdian yang bertujuan memperkuat kompetensi TPACK guru dalam merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi pembelajaran berbasis teknologi secara terintegrasi.

Tim pengabdian memberikan pelatihan pembelajaran digital yang berfokus pada perancangan hingga evaluasi pembelajaran berbasis digital, sebagaimana pada Gambar 4.



Gambar 4. Pelatihan Pembelajaran Digital

Materi pelatihan ini mencakup konsep dasar pembelajaran digital, prinsip perencanaan pembelajaran berbasis teknologi, pemilihan media digital yang relevan dengan tujuan pembelajaran, serta strategi evaluasi pembelajaran berbasis digital yang mendukung ketercapaian kompetensi siswa. Guru dibimbing untuk memahami bagaimana teknologi dapat dimanfaatkan secara pedagogis, tidak hanya sebagai alat presentasi, tetapi sebagai sarana untuk meningkatkan keterlibatan siswa dan kualitas proses pembelajaran. Diskusi interaktif dilakukan untuk mengaitkan materi pelatihan dengan praktik pembelajaran yang selama ini telah diterapkan oleh guru di kelas.

Pelatihan pembelajaran digital ini menjadi langkah awal yang efektif dalam memperkuat kompetensi TPACK guru (Bakri et al., 2021). Integrasi teknologi, pedagogi, dan konten pembelajaran secara terpadu mendorong pemahaman guru secara holistik bahwa teknologi tidak hanya berfungsi sebagai alat presentasi, melainkan sebagai sarana untuk meningkatkan keterlibatan dan kualitas belajar siswa (Arvind, 2024). Hal ini membuka peluang penerapan pembelajaran yang lebih inovatif, kontekstual, dan bermakna (Küing & Brovelli, 2025).

Workshop Integrasi AR dan VR

Workshop diawali dengan pengenalan teknologi AR dan VR. Kegiatan ini dilakukan untuk memberikan pemahaman dasar kepada guru mengenai konsep, jenis, dan karakteristik AR dan VR, serta potensi pemanfaatannya dalam pembelajaran berbasis TPACK. Tim pengabdian menyampaikan presentasi interaktif yang menjelaskan perbedaan AR dan VR, contoh penerapannya dalam pendidikan, serta manfaatnya dalam memvisualisasikan konsep abstrak dan menciptakan pengalaman belajar yang lebih imersif dan kontekstual.

Pada sesi praktik, guru diperkenalkan dengan perangkat keras dan perangkat lunak AR dan VR yang relatif mudah diakses dan diaplikasikan dalam konteks sekolah. Tim pengabdian melakukan demonstrasi penggunaan aplikasi edukasi AR dan VR, mulai dari tahap instalasi, pengoperasian, hingga contoh penerapan dalam skenario pembelajaran. Guru diberikan kesempatan untuk mencoba langsung penggunaan teknologi tersebut dengan pendampingan intensif dari tim pengabdian yang direpresentasikan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Workshop* Integrasi AR dan VR

Kegiatan *workshop* integrasi AR dan VR dilakukan untuk meningkatkan kepercayaan diri guru dalam menggunakan teknologi baru serta mengurangi hambatan teknis yang sering menjadi kendala dalam inovasi pembelajaran.

Selama kegiatan berlangsung, tim pengabdian memberikan bimbingan langsung, memfasilitasi diskusi, serta menjawab berbagai pertanyaan guru terkait aspek teknis maupun pedagogis. Pihak mitra turut berperan aktif dalam memfasilitasi kegiatan, baik melalui penyediaan ruang kelas maupun laboratorium yang tersedia. Demikian pula kegiatan yang telah dilakukan Ugli et al. (2025) dan Villanueva et al. (2020) menunjukkan bahwa kolaborasi dalam *workshop* tidak hanya meningkatkan pemahaman dan keterampilan guru, tetapi juga membangun komitmen bersama antara tim pengabdian dan mitra untuk mendukung penerapan pembelajaran berbasis AR dan VR secara berkelanjutan di lingkungan sekolah.

Pendampingan penyusunan perencanaan pembelajaran berbasis AR dan VR

Pendampingan penyusunan perangkat pembelajaran berbasis AR dan VR dilakukan sebagai tindak lanjut dari kegiatan pelatihan dan *workshop*. Pendampingan penyusunan perangkat

pembelajaran berbasis AR dan VR fokus pada penguatan TPACK guru dalam mengintegrasikan teknologi dalam pedagogi dan konten matematika sehingga penggunaan teknologi tidak hanya digunakan sebagai alat presentasi materi tetapi juga sebagai sarana pengembangan berpikir kritis dan pemahaman yang lebih mendalam.

Pada kegiatan ini, guru didampingi dalam penyusunan perangkat pembelajaran secara sistematis. Pendampingan ini fokus pada pemilihan model dan strategi pembelajaran yang relevan, bagaimana AR dan VR dapat diintegrasikan dalam rancangan pembelajaran, serta penyusunan instrumen penilaian berbasis teknologi yang sesuai. Selain itu, pendampingan ini juga menekankan pada keserasian antara karakteristik materi, penggunaan AR dan VR, serta kebutuhan belajar siswa, sehingga siswa dapat belajar dengan melibatkan berkesadaran, bermakna, menyenangkan, dan berpusat pada peserta didik. Oleh sebab itu, pemanfaatan teknologi AR dan VR secara terstruktur dengan prinsip pedagogi yang baik, para guru dapat memberikan pengalaman belajar yang menari dan lebih efektif dalam menghadapi tantangan pendidikan modern (Idkhan et al., 2025; Jiang et al., 2025; Yadav, 2025).

Evaluasi

Hasil evaluasi berdasarkan angket dan wawancara menunjukkan bahwa guru memberikan respon positif terhadap serangkaian kegiatan pendampingan. Guru menyampaikan bahwa penggunaan AR dan VR mendorong inovasi pembelajaran serta mendukung kompetensi TPACK. Hasil angket menunjukkan bahwa



Gambar 6. Evaluasi Pengalaman Mengikuti Kegiatan

Gambar 6 merepresentasikan bahwa 87,50% dapat mengikuti serangkaian kegiatan dengan baik dan sangat baik. Para guru menyampaikan bahwa pemanfaatan AR dan VR berbasis TPACK berjalan dengan terstruktur, materi yang disampaikan dapat dipahami, dan sesuai dengan kebutuhan guru. Guru juga menyatakan adanya peningkatan pemahaman TPACK, seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Peningkatan Pemahaman TPACK

Peningkatan pemahaman TPACK dirasakan oleh 87,50% guru seperti pada Gambar 7. Guru menyatakan bahwa dapat memahami materi dengan baik, mengaitkan teknologi dengan pedagogi dan materi, lebih percaya diri dalam merancang pembelajaran berbasis teknologi, serta memanfaatkan AR dan VR merancang pembelajaran.

Hasil evaluasi terhadap praktik pembelajaran menunjukkan bahwa 100%

guru percaya bahwa integrasi AR dan VR berpotensi meningkatkan keterlibatan siswa secara aktif dalam pembelajaran, seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Dampak terhadap Praktik Pembelajaran

Guru menyatakan bahwa kegiatan pendampingan ini dapat meningkatkan inovasi pembelajaran, serta meningkatkan motivasi guru untuk menerapkan AR dan VR dalam pembelajaran di kelas.

Secara umum, guru dapat memahami konsep pembelajaran digital dan peran AR serta VR dalam mendukung pembelajaran berbasis TPACK. Namun demikian, guru memberikan saran agar kegiatan ini dapat berkelanjutan secara spesifik mendampingi pada setiap mata pelajaran. Temuan ini sejalan dengan hasil kegiatan sebelumnya yang menekankan pentingnya pendampingan praktis dalam meningkatkan kompetensi TPACK guru (Chen et al., 2025; Top et al., 2021).

SIMPULAN

Pendampingan pemanfaatan *Augmented Reality* dan *Virtual Reality* dalam pembelajaran berhasil dalam mendukung kompetensi TPACK guru SMA. Guru mengalami peningkatan pemahaman, keterampilan, serta sikap positif terhadap inovasi pembelajaran berbasis teknologi menggunakan AR

dan VR. Kegiatan ini berkontribusi pada peningkatan kualitas pembelajaran dan dapat direplikasi pada sekolah lain dengan karakteristik yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Malang melalui Program Pengabdian kepada Masyarakat skema Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat (PKM) dengan nomor E.2.a/276.10/RPK/UMM/2025 yang telah memberikan dukungan pendanaan dalam pelaksanaan kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- AlGerafi, M. A. M., Zhou, Y., Oubibi, M., & Wijaya, T. T. (2023). Unlocking the Potential: A Comprehensive Evaluation of Augmented Reality and Virtual Reality in Education. *Electronics (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/electronics12183953>
- Arvind, T. (2024). Leveraging technology for enhanced connectedness and student engagement. In *Sustainable Development, Humanities, and Social Sciences for Society 5.0* (pp. 233–258). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7989-9.ch0013>
- Bakri, F., Permana, H., Fitriani, W., Ambarwulan, D., & Mulyati, D. (2021). The development of 21st century skills and competence in service teacher through TPACK training workshop. In N. H., F. R., I. W., B. E., B. F., P. T.B., & M. D. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2320).

- American Institute of Physics Inc.
<https://doi.org/10.1063/5.0037612>
- Chen, C.-H., Fei, H.-Y., & Tsai, C.-C. (2026). Hierarchical analysis of in-service teachers' barriers to technology-integrated instruction: A review of 2000–2024 publications. *Computers and Education*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105509>
- Chen, J., He, X., Yin, H., Ning, Y., Wijaya, T. T., & Liu, J. (2025). Growing in organisations: The multifaceted effects of organisational support on teachers' digital literacy. *British Educational Research Journal*, 51(6), 2810–2836. <https://doi.org/10.1002/berj.4202>
- Dewi, N. R., Amelia, R. N., Aji, S., Arifudin, R., Damayanti, T., Semarang, U. N., Informatika, T., & Semarang, U. N. (2025). Optimalisasi Kompetensi Pedagogi Guru MTs Assalaam Kota Kartasura melalui Inovasi Model Pembelajaran untuk Meningkatkan Literasi Siswa. 3(2), 66–75.
- Dinçer, S. (2024). Bridging the gap in technology integration in education: An examination of science teachers' competencies and needs. *Journal of Turkish Science Education*, 21(4), 620–634. <https://doi.org/10.36681/TUSED.2024.033>
- Han, L., Zhou, S., Luan, C., Ren, X., & Liu, F. (2025). Optimization and Application of Civil Engineering Practice Teaching Mode Based on VR/AR Technology. *Proceedings of 2025 International Conference on AI-Enabled Education*, AIEE 2025, 373–376. <https://doi.org/10.1145/3768421.3768485>
- Hu, C.-C., Yeh, H.-C., & Chen, N.-S. (2023). Teacher development in robot and IoT knowledge, skills, and attitudes with the use of the TPACK-based Support-Stimulate-Seek approach. *Interactive Learning Environments*, 31(9), 5811–5830. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.2019058>
- Idkhan, A. M., Baharuddin, F. R., Aminuddin, A., Hidayat, A., Setialaksana, W., & Amiruddin, A. (2025). Bridging virtual learning and workforce readiness: the mediating role of virtual experience in vocational education. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, 1–20. <https://doi.org/10.1108/HESWB-L-02-2025-0067>
- Jamaan, E. Z., Rosha, M., & Amalita, N. (2026). Effectiveness of Implementing TPACK-Based Digital Worksheets on Students' Numeracy Literacy Abilities. In Y. null, H. Y., D. M.P., S. S., S. R., R. R., & R. N.A. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3389, Issue 1). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/5.0318881>
- Jammeh, A. L. J., Karegeya, C., & Ladage, S. (2024). Application of technological pedagogical content knowledge in smart classrooms: views and its effect on students' performance in chemistry. *Education and Information Technologies*, 29(8), 9189–9219.

- <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12158-w>
- Jiang, H., Zhu, D., Chugh, R., Turnbull, D., & Jin, W. (2025). Virtual reality and augmented reality-supported K-12 STEM learning: trends, advantages and challenges. *Education and Information Technologies*, 30(9), 12827–12863. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13210-z>
- Küng, J., & Brovelli, D. (2025). The impact of teacher training on the evaluation and selection of STEM augmented reality applications and TPACK self-assessment. *Frontiers in Psychology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1657028>
- Lane, B., & Havens-Hafer, C. (2023). Teaching the Teachers with Immersive Technology: Preparing the Next Generation of Educators at Ithaca College. In *Immersive Education: Designing for Learning* (pp. 153–170). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18138-2_10
- Mallory, D. B. (2024). Participatory Action Research. In *Elgar Encyclopedia of Organizational Psychology* (pp. 468–474). Edward Elgar Publishing Ltd. <https://doi.org/10.4337/9781803921761.00093>
- Mondal, H., & Mondal, S. (2025). Adopting augmented reality and virtual reality in medical education in resourcelimited settings: constraints and the way forward. *Advances in Physiology Education*, 49(2), 503–507. <https://doi.org/10.1152/advan.00027.2025>
- Mystakidis, S., Fragkaki, M., & Filippousis, G. (2021). Ready teacher one: Virtual and augmented reality online professional development for K-12 school teachers. *Computers*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/computers10100134>
- Nikou, S. A., Perifanou, M., & Economides, A. A. (2022). Towards a Teachers' Augmented Reality Competencies (TARC) Framework. In A. M.E. & T. T. (Eds.), *Lecture Notes in Networks and Systems: Vol. 411 LNNS* (pp. 203–212). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96296-8_19
- Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic Analysis: Striving to Meet the Trustworthiness Criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.1177/1609406917733847>
- Pazilah, F. N., Hashim, H., Yunus, M. M., & Rafiq, K. R. M. (2025). Innovating TESL Education: A Preliminary Rasch Analysis of Digital Pedagogy in the Modified TPACK Framework. In U. L. & L. D. (Eds.), *Communications in Computer and Information Science: Vol. 2551 CCIS* (pp. 106–114). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98003-9_9
- Rinla, C., Bongkotphet, T., & Chaiyasith, W. C. (2025).

- Science Teachers' Perceptions of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK): A Case Study of Opportunity Expansion School in Chaiyaphum. *Suranaree Journal of Social Science*, 19(1). <https://doi.org/10.55766/sjss-1-2025-252259>
- Smuts, C., & Smuts, H. (2021). Computer Integrated Education Evaluation: A Case Study. In H. Y., L. C., & R. T. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 13117 LNCS (pp. 439–449). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91540-7_45
- Top, E., Baser, D., Akkus, R., Akayoglu, S., & Gurer, M. D. (2021). Secondary school teachers' preferences in the process of individual technology mentoring. *Computers and Education*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104030>
- Ugli, E. B. S., Vincy, V. G. B. S., Lakshmikantham, B., & Kizi, M. N. T. (2025). Enhancing pedagogical practice through immersive technology with the transformation of classrooms with AR. In S. J. (Ed.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3306, Issue 1). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/5.0275886>
- Varlık, S., Varlık, F., & Karakuş, M. (2026). Empowering Teachers: How Digital Tools Are Transforming Online Learning and Personalised Learning. *European Journal of Education*, 61(1). <https://doi.org/10.1111/ejed.70543>
- Villanueva, A., Zhu, Z., Liu, Z., Pepler, K., Redick, T., & Ramani, K. (2020). Meta-AR-App: An Authoring Platform for Collaborative Augmented Reality in STEM Classrooms. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376146>
- Yadav, S. (2025). Revolutionizing classroom learning with Advanced Technology: Harnessing Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) for immersive education. In *Blending Human Intelligence With Technology in the Classroom* (pp. 223–246). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0771-8.ch010>
- Yani, A., Mulyadi, A., & Setiawan, B. (2025). Applying Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) framework to geography online learning: What can teachers do? *Cogent Education*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2482395>
- Zekeik, H., Chahbi, M., Sefian, M. L., & Bakkali, I. (2025). Augmented reality and virtual reality in education: A systematic narrative review on benefits, challenges, and applications. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(9). <https://doi.org/10.29333/ejmste/16830>