

Kemampuan Guru dalam Mengintegrasikan Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) dalam Pengajaran Geometri di Sekolah Menengah Pertama

Sri Yulianti

Pendidikan Matematika, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia; sriyuliyanti@undikma.ac.id

I Ketut Sukarma

Pendidikan Matematika, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia; ketutsukarma@undikma.ac.id

Ade Kurniawan

Pendidikan Matematika, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia;
adekurniawan@undikma.ac.id

Sutarto

Pendidikan Matematika, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia;

Intan Dwi Hastuti*

PGSD, Universitas Muhammadiyah Mataram, Mataram, Indonesia;
intandwihastuti88@ummat.ac.id

Restu Wibawa

Teknologi Pendidikan, Universitas pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia;

Zainuddin Untu

Pendidikan Matematika, Universitas Mulawarman, Indonesia

*Corresponding Author

Info Artikel: Dikirim: Agustus 2024; Direvisi: September 2024; Diterima: Oktober 2024
Cara sitasi: Yulianti, S., Sukarma, I.K., Kurniawan, A., Sutarto, Hastuti, I.D., Wibawa, R. & Untu Zainuddin. (2024). Pengaruh Kemampuan Guru dalam Mengintegrasikan Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) dalam Pengajaran Geometri di Sekolah Menengah Pertama. *JPIIn: Jurnal Pendidik Indonesia*, 7(2), 73-84.

Abstrak. Penelitian ini menyelidiki kemampuan guru matematika sekolah menengah pertama dalam mengintegrasikan Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) ke dalam pengajaran geometri melalui pendekatan deskriptif eksploratif kualitatif yang melibatkan 20 guru. Temuan penelitian mengungkapkan variasi signifikan dalam integrasi TPACK, dengan 20% kategori "Luar Biasa," 50% "Baik," 25% "Cukup," dan 5% "Buruk." Guru dalam kategori "Luar Biasa" memanfaatkan teknologi canggih seperti GeoGebra untuk menciptakan lingkungan pembelajaran interaktif yang meningkatkan pemahaman siswa tentang geometri,

sementara guru dalam kategori "Cukup" dan "Buruk" mengandalkan metode tradisional dengan penggunaan teknologi yang minimal, yang mengungkapkan kesenjangan kompetensi yang signifikan. Penelitian ini menekankan potensi transformasional TPACK dalam meningkatkan keterlibatan siswa dan keterampilan berpikir kritis, serta merekomendasikan pengembangan profesional yang terarah dan dukungan institusional untuk meningkatkan kompetensi guru dan memajukan pendidikan matematika.

Kata kunci: TPACK, Pengajaran Geometri, Pendidikan Matematika, Pelatihan Guru, Integrasi Teknologi.

Abstract. *This study investigates the ability of junior high school mathematics teachers to integrate Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) into geometry instruction through a qualitative exploratory descriptive approach involving 20 teachers. The findings reveal significant variations in TPACK integration, with 20% categorized as "Excellent," 50% as "Good," 25% as "Fair," and 5% as "Poor." Teachers in the "Excellent" category utilized advanced technologies like GeoGebra to create interactive learning environments that enhanced students' understanding of geometry, while those in the "Fair" and "Poor" categories relied on traditional methods with minimal technology use, exposing significant competency gaps. The study underscores TPACK's transformative potential in fostering student engagement and critical thinking, recommending targeted professional development and institutional support to enhance teacher competencies and advance mathematics education.*

Keywords: *TPACK, Geometry Instruction, mathematics education, teacher training, technology integration.*

Pendahuluan

Geometri, sebagai dasar pendidikan matematika, memiliki peran penting karena posisinya yang mendasar dalam memahami konsep matematika lanjutan seperti aljabar dan aritmatika. Aplikasi geometri dalam kehidupan nyata semakin menegaskan relevansinya dalam mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan keterampilan pemecahan masalah yang penting bagi bidang STEM [1], [2]. Namun, tantangan masih ada dalam pemahaman siswa terhadap konsep geometri, terutama dalam memvisualisasikan bentuk tiga dimensi dan sifat-sifatnya, yang sering kali disebabkan oleh sifatnya yang abstrak [3]. Kesulitan ini menyoroti kebutuhan akan metode pengajaran inovatif yang mengintegrasikan pedagogi dan teknologi untuk meningkatkan hasil pembelajaran [2], [4].

Tantangan dalam pendidikan geometri tidak hanya disebabkan oleh kemampuan kognitif siswa tetapi juga dipengaruhi secara signifikan oleh praktik pengajaran. Metode pengajaran yang tidak efektif, seperti ketergantungan pada teknik tradisional yang tidak interaktif, sering kali gagal melibatkan siswa atau memenuhi kebutuhan pembelajaran individu mereka [5], [6]. Penelitian menunjukkan bahwa praktik-praktik seperti ini

dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara potensi intelektual siswa dan kinerja akademis mereka [7], [8]. Mengatasi tantangan ini memerlukan pergeseran pedagogis menuju integrasi teknologi dan penciptaan lingkungan pembelajaran yang berfokus pada siswa [9], [10].

Untuk mengatasi tantangan pendidikan ini, kerangka Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) memberikan pendekatan yang komprehensif dengan menggabungkan teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten [11], [12]. TPACK menekankan interaksi antara ketiga domain ini, memungkinkan guru untuk menciptakan praktik pengajaran yang menarik dan efektif yang disesuaikan dengan kebutuhan siswa yang beragam [13]. Penelitian menunjukkan bahwa pendidik yang terampil dalam TPACK dapat meningkatkan keterlibatan dan pemahaman siswa dalam matematika, terutama dalam subjek yang kompleks seperti geometri [14], [15].

Alat teknologi, seperti GeoGebra dan aplikasi pendidikan dinamis, telah muncul sebagai sumber daya penting dalam mengatasi kesenjangan pembelajaran dalam geometri [2], [4]. Alat-alat ini memungkinkan visualisasi konsep-konsep geometri abstrak, yang meningkatkan keterlibatan siswa dan pemahaman mereka [11], [16]. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi semacam ini dalam praktik pengajaran dapat meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah di kalangan siswa [13], [8]. Meskipun ada kemajuan ini, integrasi TPACK dalam pengajaran geometri di tingkat sekolah menengah pertama masih belum banyak dieksplorasi.

Pengamatan di sekolah menengah pertama mengungkapkan kurangnya inovasi dalam pengajaran matematika, yang sering kali ditandai dengan metode yang berpusat pada guru dan penggunaan teknologi interaktif yang minimal [5], [7]. Pengetahuan terbatas guru tentang TIK dan keterampilan manajerial mereka semakin membatasi kemampuan mereka untuk menerapkan strategi TPACK yang efektif [17]. Keterbatasan ini menyoroti pentingnya pelatihan guru dan alokasi sumber daya untuk mendukung integrasi TPACK dalam pengajaran geometri.

Meskipun penelitian sebelumnya telah mendokumentasikan manfaat TPACK dalam berbagai konteks pendidikan, sedikit studi yang secara khusus meneliti penerapannya dalam pendidikan geometri di sekolah menengah pertama. Untuk mengatasi kesenjangan ini, penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan kemampuan guru dalam mengintegrasikan TPACK ke dalam pengajaran geometri, dengan fokus pada kompetensi, tantangan, dan dampaknya terhadap hasil pembelajaran

siswa [11], [8]. Dengan menganalisis tingkat integrasi TPACK di antara para guru, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memahami bagaimana strategi pedagogis yang didorong oleh teknologi dapat mengubah praktik pengajaran geometri.

Temuan dari penelitian ini tidak hanya menyoroti praktik terbaik di kalangan pendidik yang terampil tetapi juga mengidentifikasi area yang memerlukan intervensi yang ditargetkan. Ini termasuk program pengembangan profesional dan peningkatan sumber daya untuk mendukung guru dalam mengatasi hambatan dalam implementasi TPACK [17], [9]. Pada akhirnya, penelitian ini menekankan potensi transformasional TPACK dalam menciptakan lingkungan pembelajaran interaktif yang berfokus pada siswa, memastikan bahwa semua siswa dapat mengakses dan mendapatkan manfaat dari pendidikan geometri berkualitas tinggi.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif dengan pendekatan deskriptif eksploratif untuk menyelidiki kemampuan guru sekolah menengah pertama dalam mengintegrasikan Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) ke dalam pengajaran geometri. Sifat kualitatif dari penelitian ini sangat sesuai untuk mengeksplorasi interaksi yang kompleks antara teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten dalam konteks pendidikan, karena memungkinkan pemeriksaan mendalam tentang praktik, keyakinan, dan tantangan guru [18], [19].

Penelitian ini dilakukan dengan fokus pada sepuluh guru matematika dari sekolah menengah pertama negeri di Kota Mataram. Partisipan ini dipilih secara purposif untuk mewakili pengalaman dan tingkat keterampilan yang beragam dalam mengintegrasikan teknologi dalam pengajaran geometri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi bagaimana guru-guru ini menggabungkan alat teknologi, strategi pedagogis, dan konten matematika untuk memberikan pengajaran geometri yang efektif. Fokus ini pada interaksi dinamis antara ketiga komponen TPACK sejalan dengan penelitian sebelumnya tentang pengembangan profesional dalam integrasi teknologi [12], [20].

Untuk mengumpulkan data, digunakan kombinasi observasi kelas dan wawancara. Selama sesi pengajaran, lembar observasi terstruktur digunakan untuk mengevaluasi kinerja guru, dan praktik pengajaran direkam menggunakan perekam suara dan handycam. Metode ini memungkinkan analisis mendetail tentang integrasi teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten oleh guru. Data observasi kemudian diubah menjadi skor numerik yang mewakili kemampuan TPACK setiap guru, suatu proses yang telah

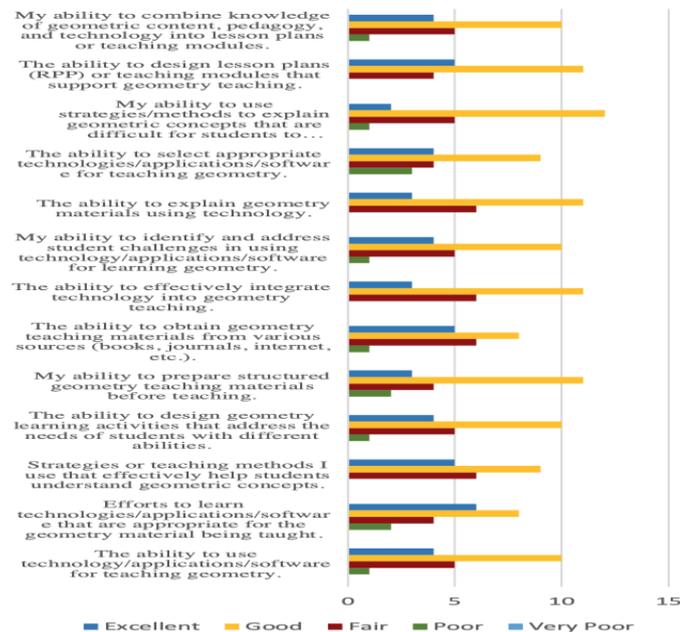
divalidasi dalam penelitian sebelumnya tentang kompetensi guru [9], [21]. Selain itu, wawancara semi-terstruktur dilakukan setelah observasi untuk lebih mengeksplorasi strategi, refleksi, dan tantangan yang dihadapi guru dalam menerapkan TPACK pada pengajaran geometri.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini mengkaji kemampuan 20 guru matematika sekolah menengah pertama dalam mengintegrasikan Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) ke dalam pengajaran geometri. Data dikumpulkan melalui observasi, rekaman video, dan wawancara. Guru-guru dikategorikan dalam empat level kompetensi—Luar Biasa, Baik, Cukup, dan Buruk—berdasarkan indikator-indikator tertentu. Temuan penelitian mengungkapkan variasi signifikan dalam kemampuan guru dalam mengintegrasikan TPACK.

Distribusi Kompetensi TPACK

Distribusi integrasi TPACK di antara para guru adalah sebagai berikut: Luar Biasa: 20% (4 guru), Baik: 50% (10 guru), Cukup: 25% (5 guru), dan Buruk: 5% (1 guru). Tidak ada guru yang dikategorikan sebagai Sangat Buruk.



Gambar 1. Jumlah guru yang mengintegrasikan TPACK dalam pengajaran geometri

Guru dalam Kategori Luar Biasa

Guru dalam kategori ini menunjukkan kompetensi luar biasa dalam mengintegrasikan TPACK ke dalam pengajaran geometri. Mereka memanfaatkan teknologi canggih seperti GeoGebra untuk meningkatkan pemahaman siswa tentang transformasi geometri, memungkinkan visualisasi dinamis dari translasi, rotasi, dan refleksi. Guru-guru ini juga

menggunakan presentasi PowerPoint interaktif yang dilengkapi dengan animasi dan grafik untuk mendukung pemahaman bentuk tiga dimensi.

Komitmen mereka terhadap pengembangan profesional terlihat melalui partisipasi aktif dalam pelatihan, seminar, dan pembelajaran mandiri. Kemampuan mereka beradaptasi dengan penggunaan berbagai teknologi, termasuk Microsoft Teams untuk diskusi kelompok online dan Kahoot! untuk kuis interaktif secara langsung. Selain itu, mereka merancang aktivitas pembelajaran inovatif, seperti permainan berbasis teknologi untuk memperkenalkan konsep geometri yang kompleks, seperti garis sejajar dan sudut.

Perencanaan pelajaran oleh guru-guru ini bersifat komprehensif, mengandalkan berbagai sumber daya seperti buku teks, jurnal, dan modul online. Mereka menunjukkan kemampuan yang tajam dalam memenuhi kebutuhan siswa yang beragam dengan menyesuaikan pendekatan untuk tingkat kemampuan yang berbeda. Misalnya, siswa yang lebih maju mengeksplorasi masalah yang menantang menggunakan GeoGebra, sementara siswa yang kurang mahir mendapatkan manfaat dari demonstrasi yang dibimbing di papan tulis.

Guru dalam Kategori Baik

Kelompok ini menunjukkan kemampuan yang moderat dalam mengintegrasikan TPACK. Mereka secara efektif menggunakan teknologi dasar seperti PowerPoint, video pendidikan YouTube, dan visualisasi geometri statis. Meskipun mereka menunjukkan inisiatif untuk mengeksplorasi teknologi seperti GeoGebra, penggunaannya masih dalam tahap eksplorasi, membutuhkan pelatihan lebih lanjut untuk aplikasi yang lebih canggih.

Strategi pengajaran mereka merupakan campuran dari ceramah, diskusi, dan bantuan visual. Animasi sederhana sering digunakan untuk menjelaskan geometri tiga dimensi, meskipun interaktivitas metode ini terbatas dibandingkan dengan kategori Luar Biasa. Perencanaan pelajaran mereka terstruktur tetapi sangat bergantung pada materi yang sudah ada sebelumnya, dengan sedikit integrasi elemen teknologi.

Guru dalam Kategori Cukup dan Buruk

Guru dalam kategori Cukup menunjukkan keterampilan dasar dalam mengintegrasikan TPACK, terutama dengan menggunakan alat dasar seperti PowerPoint untuk presentasi statis. Upaya mereka untuk menggabungkan aplikasi canggih seperti GeoGebra terhambat oleh keterampilan teknis yang terbatas dan kurangnya rasa percaya diri. Sementara itu, guru dalam

kategori Buruk sangat bergantung pada metode tradisional seperti papan tulis dan buku teks, menunjukkan kompetensi yang minimal dalam integrasi teknologi.

Diskusi

Temuan dari penelitian ini menyoroti variasi signifikan dalam kompetensi guru dalam mengintegrasikan Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) ke dalam pengajaran geometri, dengan menekankan dampak penting dari perbedaan ini terhadap keterlibatan siswa dan pemahaman mereka. Guru dalam kategori "Luar Biasa" menunjukkan integrasi TPACK yang luar biasa, menciptakan lingkungan pembelajaran interaktif dan menarik yang memanfaatkan alat canggih seperti GeoGebra dan multimedia interaktif. Praktik ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kompetensi TPACK yang tinggi memungkinkan guru untuk mendorong pemahaman konseptual yang lebih dalam dan motivasi di kalangan siswa [12], [22]. Sebaliknya, kategori "Cukup" dan "Buruk" mencerminkan perjuangan yang terkait dengan kompetensi TPACK yang rendah, seperti ketergantungan pada metode tradisional dan penggunaan teknologi yang terbatas, yang dapat menghambat minat dan pemahaman siswa [19], [23].

Implikasi Variasi Kompetensi TPACK

Guru dengan kompetensi TPACK yang tinggi menunjukkan kemampuan luar biasa dalam mengintegrasikan teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten secara mulus. Penggunaan alat dinamis dan metode interaktif mereka menciptakan lingkungan pembelajaran yang menarik di mana siswa dapat mengeksplorasi konsep-konsep geometri melalui aktivitas praktis dan visualisasi. Sebagai contoh, penggunaan GeoGebra untuk mendemonstrasikan transformasi geometri memberikan manfaat nyata dengan memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan dan memanipulasi konsep-konsep abstrak secara dinamis. Temuan ini mengonfirmasi penelitian yang menekankan efektivitas TPACK yang terintegrasi dengan baik dalam mempromosikan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah siswa [13], [24].

Sebaliknya, guru-guru dalam kategori "Cukup" dan "Buruk" menghadapi hambatan signifikan, seperti keterampilan teknis yang terbatas, kurangnya rasa percaya diri, dan paparan yang minimal terhadap teknologi pendidikan. Keterbatasan-keterbatasan ini membatasi kemampuan mereka untuk memberikan pelajaran yang interaktif dan menarik, yang sering kali mengarah pada pendekatan yang berpusat pada guru yang tidak dapat

memenuhi kebutuhan siswa yang beragam. Kesenjangan yang diamati menyoroti perlunya intervensi yang ditargetkan untuk mendukung guru dengan kompetensi TPACK yang lebih rendah, karena integrasi yang tidak efektif dapat menyebabkan keterlibatan siswa yang berkurang dan pemahaman yang terbatas [19], [23].

Mengatasi Tantangan dalam Integrasi TPACK

Untuk mengatasi tantangan yang dihadapi oleh guru dengan kompetensi TPACK yang lebih rendah, program pengembangan profesional yang berfokus pada aplikasi praktis teknologi dalam pengajaran sangat diperlukan. Lokakarya yang menawarkan pengalaman langsung dengan alat seperti GeoGebra dapat secara signifikan meningkatkan rasa percaya diri dan keterampilan teknis guru. Penelitian sebelumnya mendukung efektivitas program semacam ini dalam meningkatkan kemampuan guru untuk mengintegrasikan teknologi secara efektif ke dalam pedagogi mereka [2], [3]. Pendekatan pembelajaran kolaboratif dalam program-program ini juga dapat memperkuat kompetensi guru dengan membentuk komunitas praktik di mana pendidik berbagi praktik terbaik dan sumber daya [1], [8].

Selain itu, dukungan institusional memegang peran penting dalam memberdayakan guru untuk mengintegrasikan TPACK ke dalam praktik pengajaran mereka. Sekolah dapat memfasilitasi akses ke sumber daya teknologi, menyediakan program pembimbingan yang terstruktur, dan mendorong partisipasi dalam pengembangan profesional berkelanjutan. Strategi-strategi ini sangat penting untuk menjembatani kesenjangan kompetensi yang diamati pada guru dari kategori "Cukup" dan "Buruk".

Dampak Jangka Panjang dari Integrasi TPACK yang Efektif

Manfaat jangka panjang dari integrasi TPACK yang efektif melampaui hasil pembelajaran di kelas, memengaruhi kompetensi matematika keseluruhan siswa dan keterampilan berpikir kritis mereka. Guru dengan kompetensi TPACK yang kuat tidak hanya meningkatkan pemahaman siswa tentang konsep-konsep geometri tetapi juga mempersiapkan mereka untuk tantangan matematika lanjutan dan pemecahan masalah di dunia nyata [25], [24]. Dengan memfasilitasi keterampilan berpikir tingkat tinggi melalui lingkungan pembelajaran yang interaktif dan berbasis teknologi, guru-guru ini berkontribusi pada pengembangan tenaga kerja masa depan yang dilengkapi dengan kemampuan analitis dan inovatif.

Selain itu, integrasi TPACK berpotensi untuk merevolusi pendidikan matematika dengan mempromosikan pendekatan pembelajaran

konstruktivis. Siswa yang terlibat dalam pengajaran berbasis TPACK lebih cenderung mengembangkan pemahaman yang lebih dalam tentang konsep-konsep matematika melalui partisipasi aktif dan eksplorasi [26]. Hasil-hasil ini menyoroti potensi transformasional TPACK dalam mengatasi keterbatasan metode pengajaran tradisional dan membuka jalan untuk praktik pendidikan yang lebih efektif dan inklusif.

Rekomendasi untuk Kebijakan dan Praktik

Temuan dari penelitian ini menekankan perlunya pendekatan multifaset untuk mendukung integrasi TPACK dalam pengajaran geometri. Pembuat kebijakan harus memprioritaskan program pengembangan profesional yang mencakup aspek teknis dan pedagogis dari TPACK. Selain itu, alokasi sumber daya untuk infrastruktur teknologi dan akses ke alat pendidikan harus ditingkatkan untuk memastikan bahwa semua guru dapat mengimplementasikan strategi TPACK secara efektif. Sekolah juga harus mendorong pembelajaran kolaboratif di antara pendidik, menciptakan budaya perbaikan berkelanjutan dan inovasi dalam praktik pengajaran.

Dengan menangani area-area kritis ini, para pemangku kepentingan pendidikan dapat menciptakan lingkungan yang mendukung di mana guru dari semua tingkat kompetensi dapat meningkatkan integrasi TPACK mereka, yang pada akhirnya akan memberi manfaat pada pengalaman dan hasil pembelajaran siswa. Penerapan strategi-strategi ini akan berkontribusi pada tujuan yang lebih luas untuk memajukan pendidikan matematika dan mempersiapkan siswa untuk sukses di dunia yang semakin didorong oleh teknologi.

Simpulan

Penelitian ini mengeksplorasi integrasi Pengetahuan Pedagogis Konten Teknologi (TPACK) oleh guru matematika sekolah menengah pertama dalam pengajaran geometri, mengungkapkan perbedaan signifikan dalam tingkat kompetensi. Guru dalam kategori "Luar Biasa", yang mencakup 20% dari sampel, menunjukkan keterampilan canggih, menggunakan alat seperti GeoGebra untuk menciptakan pelajaran interaktif yang meningkatkan pemahaman siswa tentang konsep geometri dan mendorong keterampilan berpikir kritis. Sebaliknya, 25% dan 5% guru termasuk dalam kategori "Cukup" dan "Buruk", di mana ketergantungan pada metode tradisional dan penggunaan teknologi minimal membatasi efektivitas pengajaran mereka, menyoroti kesenjangan kritis dalam aplikasi TPACK.

Temuan ini menyoroti pentingnya intervensi yang ditargetkan untuk mengatasi kesenjangan ini, seperti program pengembangan profesional yang

menyediakan pelatihan langsung dan mendorong pembelajaran kolaboratif di antara pendidik. Dukungan institusional, termasuk akses ke teknologi canggih dan pembimbingan, sangat penting untuk mempersiapkan guru dalam mengintegrasikan TPACK secara efektif. Dengan mengatasi tantangan ini, penelitian ini menekankan potensi transformasional TPACK dalam meningkatkan baik hasil pembelajaran jangka pendek maupun kompetensi jangka panjang siswa dalam matematika, serta membangun dasar untuk praktik pendidikan yang lebih baik dan kesuksesan siswa di era digital.

Daftar Pustaka

- [1] T. Dhurumraj, S. Ramaila, F. Raban, and A. Ashruf, "Broadening educational pathways to STEM education through online teaching and learning during COVID-19: Teachers' perspectives," *J. Baltic Sci. Educ.*, vol. 19, no. 6A, pp. 1055–1067, 2020. <http://doi.org/10.33225/jbse/20.19.1055>
- [2] I. Marange, "Teaching Euclidean geometry with GeoGebra: Perceptions for in-service mathematics teachers," *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 19, no. 12, art. em2367, 2023. <http://doi.org/10.29333/ejmste/13861>
- [3] I. Saralar, M. İşıksal-Bostan, and D. Akyüz, "The evaluation of a pre-service mathematics teacher's TPACK: A case of 3D shapes with GeoGebra," *Int. J. Technol. Math. Educ.*, vol. 25, no. 2, pp. 3–21, 2018. http://doi.org/10.1564/tme_v25.2.01
- [4] M. Batiibwe, "Application of interactive software in classrooms: A case of GeoGebra in learning geometry in secondary schools in Uganda," *Discover Educ.*, vol. 3, no. 1, 2024. <http://doi.org/10.1007/s44217-024-00291-8>
- [5] J. Harron, Y. Jin, A. Hillen, L. Mason, and L. Siegel, "Maker math: Exploring mathematics through digitally fabricated tools with K–12 in-service teachers," *Mathematics*, vol. 10, no. 17, art. 3069, 2022. <http://doi.org/10.3390/math10173069>
- [6] A. Leendert, M. Doorman, P. Drijvers, J. Pel, and J. Steen, "Teachers' skills and knowledge in mathematics education for braille readers," *Technol. Knowl. Learn.*, vol. 27, no. 4, pp. 1171–1192, 2021. <http://doi.org/10.1007/s10758-021-09525-2>
- [7] M. Said, A. Leendert, P. Drijvers, and M. Doorman, "Teaching geometry with digital tools: A systematic review," *Technol. Knowl. Learn.*, vol. 33, no. 2, pp. 145–160, 2023. <http://doi.org/10.1007/s44217-023-00487-3>
- [8] C. Rakes et al., "Teaching mathematics with technology: TPACK and effective teaching practices," *Educ. Sci.*, vol. 12, no. 2, art. 133, 2022. <http://doi.org/10.3390/educsci12020133>
- [9] N. Mansour, "Factors impacting science and mathematics teachers' competencies and self-efficacy in TPACK for PBL and STEM," *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 20, no. 5, art. em2442, 2024. <http://doi.org/10.29333/ejmste/14467>
- [10] N. Mansour, "Science and mathematics teachers' integration of TPACK in STEM subjects in Qatar: A structural equation modeling study," *Educ. Sci.*, vol. 14, no. 10, art. 1138, 2024. <http://doi.org/10.3390/educsci14101138>
- [11] M. Li, "Unravelling the dynamics of technology integration in mathematics education: A structural equation modelling analysis of TPACK components,"

- Educ. Inf. Technol.*, vol. 29, no. 17, pp. 23687–23715, 2024. <http://doi.org/10.1007/s10639-024-12805-w>
- [12] A. Urbina and D. Polly, “Examining elementary school teachers’ integration of technology and enactment of TPACK in mathematics,” *Int. J. Inf. Learn. Technol.*, vol. 34, no. 5, pp. 439–451, 2017. <http://doi.org/10.1108/ijilt-06-2017-0054>
- [13] “Effectiveness of TPACK-Based Multimodal Digital Teaching Materials for Mathematical Critical Thinking Ability,” *J. Educ. Math. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 187–202, 2023. <http://doi.org/10.1007/s13394-024-00491-3>
- [14] A. Promwongsai, “Investigating the effectiveness of TPACK and TGT in enhancing histogram learning achievement among eighth-grade students,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Stud.*, vol. 6, no. 4, pp. 1015–1022, 2023. <http://doi.org/10.53894/ijriss.v6i4.2232>
- [15] U. Hanifah, “Technology, pedagogy, and content knowledge in mathematics education: A systematic literature review,” *J. Educ. Learn.*, vol. 19, no. 1, pp. 579–586, 2025. <http://doi.org/10.11591/edulearn.v19i1.21816>
- [16] M. Li, “Development and validation of the secondary mathematics teachers’ TPACK scale: A study in the Chinese context,” *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 19, no. 11, art. em2350, 2023. <http://doi.org/10.29333/ejmste/13671>
- [17] M. Mailizar, M. Hidayat, and W. Artika, “The effect of demographic variables on mathematics teachers’ TPACK: Indonesian context,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1882, no. 1, art. 012041, 2021. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012041>
- [18] S. Hennessey, M. Olofson, M. Swallow, and J. Downes, *Evolving Pedagogy and Practice*, IGI Global, 2015, pp. 577–603. <http://doi.org/10.4018/978-1-4666-8403-4.ch022>
- [19] A. Kafyulilo, P. Fisser, J. Pieters, and J. Voogt, “ICT use in science and mathematics teacher education in Tanzania: Developing technological pedagogical content knowledge,” *Australas. J. Educ. Technol.*, vol. 31, no. 4, 2015. <http://doi.org/10.14742/ajet.1240>
- [20] M. Meletiou-Mavrotheris, “Sustaining teacher professional learning in STEM: Lessons learned from an 18-year-long journey into TPACK-guided professional development,” *Educ. Sci.*, vol. 14, no. 4, art. 402, 2024. <http://doi.org/10.3390/educsci14040402>
- [21] R. Weinhandl, S. Thrainer, Z. Lavicza, T. Houghton, and M. Hohenwarter, “Providing online STEM workshops in times of isolation,” *SN Soc. Sci.*, vol. 1, no. 6, 2021. <http://doi.org/10.1007/s43545-021-00110-z>
- [22] M. Özüdoğru and F. Özüdoğru, “Technological pedagogical content knowledge of mathematics teachers and the effect of demographic variables,” *Contemp. Educ. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–24, 2019. <http://doi.org/10.30935/cet.512515>
- [23] T. Uygun, A. Sendur, R. Dere, and B. Özçakır, “Development of TPACK with Web 2.0 tools: Design-based study,” *Eur. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 11, no. 3, pp. 445–465, 2023. <http://doi.org/10.30935/scimath/12907>
- [24] W. Yanuarto, “Mathematics education in the digital age: How to foster higher-order thinking skills?,” *Int. J. Eval. Res. Educ.*, vol. 12, no. 4, pp. 2045, 2023. <http://doi.org/10.11591/ijere.v12i4.24494>

- [25] Y. Yurniwati and E. Utomo, "The synthesis of qualitative evidence-based learning by design model to improve TPACK of prospective mathematics teacher," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2157, no. 1, art. 012044, 2022. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2157/1/012044>
- [26] "TPACK competence of mathematics education students in designing constructivist learning," *J. Math. Educ.*, vol. 33, no. 3, pp. 145–160, 2024. <http://doi.org/10.1007/s44217-024-00543-1>