



Implementasi dan Pengaruh Kerangka Kerja TPACK dalam Pendidikan Matematika: Sebuah Tinjauan Literatur Sistematis

Raya Djatnika Sudjanta¹, Nurjanah^{2*}

^{1,2} Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

*Corresponding Author: ✉ nurjanah@upi.edu

Submitted: 27 December 2025 | Revised: 01 February 2026 | Accepted: 10 February 2026

Abstrak

Integrasi teknologi dalam pendidikan matematika sering kali terkendala oleh kurangnya kemampuan pengguna teknologi atau keselarasan penggunaan teknologi dengan konten matematika. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi dan efektivitas kerangka kerja *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) terhadap hasil belajar siswa lewat tinjauan literatur dengan protokol PRISMA. Melalui tahapan identifikasi, penyaringan, dan uji kelayakan, penelitian ini menyeleksi 14 artikel dari pangkalan data Scopus yang diterbitkan pada rentang tahun 2015–2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan TPACK paling dominan dilakukan pada domain materi yang memiliki tingkat abstraksi tinggi, seperti Kalkulus dan Geometri. Teknologi visualisasi dinamis, khususnya GeoGebra, dan strategi *Game-Based Learning* menjadi intervensi yang paling sering digunakan. Temuan menegaskan bahwa pembelajaran berbasis TPACK secara konsisten memberikan dampak positif yang signifikan terhadap prestasi akademik, pemahaman konsep, kemampuan berpikir kritis, serta keterlibatan siswa. Studi ini menyimpulkan bahwa keberhasilan integrasi teknologi tidak bergantung pada kecanggihan alat, melainkan pada kemampuan guru dalam merancang pembelajaran yang berpusat pada siswa dengan bantuan teknologi sebagai jembatan kognitif.

Kata Kunci: TPACK, Pendidikan Matematika, Hasil Belajar, Tinjauan Literatur Sistematis, GeoGebra, Pembelajaran Berbasis Permainan

Abstract

The integration of technology in mathematics education is often hindered by users' lack of technological proficiency or the misalignment between technology use and mathematical content. This study aims to evaluate the implementation and effectiveness of the *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) framework on student learning outcomes. Using a *Systematic Literature Review* (SLR) method with the PRISMA protocol. Through the identification, screening, and eligibility assessment phases, this study selected 14 articles from the Scopus database published between 2015 and 2025. The results indicate that TPACK implementation is most dominant in subject domains with high levels of abstraction, such as Calculus and Geometry. Dynamic visualization technologies, particularly GeoGebra, and *Game-Based Learning* strategies are the most frequently used interventions. The findings confirm that TPACK-based learning consistently yields a significant positive impact on academic achievement, conceptual understanding, critical thinking skills, and student engagement. This study concludes that the success of technology integration depends not on the sophistication of the tools, but on the teacher's ability to design student-centered learning with technology serving as a cognitive bridge.

Keywords: TPACK, Mathematics Education, Student Learning Outcomes, Systematic Literature Review, GeoGebra, Game-Based Learning



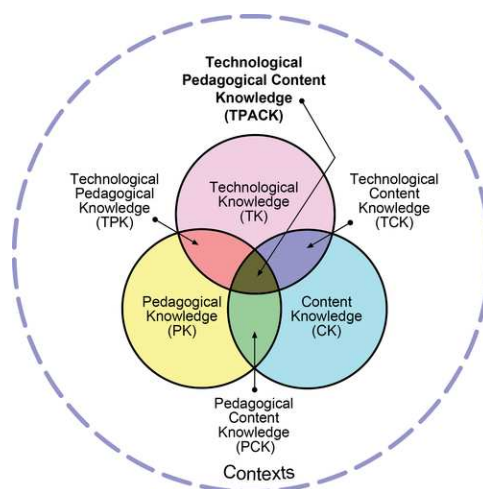
PENDAHULUAN

Teknologi kini telah menjadi bagian yang tak terpisahkan dari hidup semua orang, tak terkecuali siswa. Dengan banyaknya interaksi siswa dengan teknologi, tentu saja pendidikan harus dapat menyesuaikan dan memasukkan penggunaan teknologi ini sebagai bagian penting dari pembangunan pengetahuan matematika mereka (NCTM, 2014). Penggunaan teknologi yang inovatif menunjukkan potensi-potensi besar dalam pengajaran yang dapat membantu siswa yang mengalami ketertinggalan di kelas (OECD, 2019).

Potensi teknologi sangat besar dalam berbagai bidang, salah satunya adalah di bidang pendidikan. Namun penggunaan teknologi tidak dapat diterjemahkan langsung menjadi peningkatan di hasil pembelajaran, guru harus memiliki kemampuan dalam mengoperasikan teknologi dan juga tahu jelas maksud atau tujuan penggunaan teknologi tersebut dalam pembelajaran (OECD, 2019).

Cabang ilmu matematika dipenuhi oleh konsep-konsep abstrak yang sulit dipahami siswa. Penelitian menunjukkan bahwa siswa kerap mengalami kesulitan dalam memvisualisasikan konsep geometri tiga dimensi, terutama saat menghubungkan representasi 2D dan 3D (Fujita et al., 2020). Dalam beberapa materi, seperti contohnya dalam kalkulus, konsep seperti turunan dan integral sering dianggap terlalu abstrak tanpa bantuan visualisasi yang dinamis (Rolfes et al., 2020). Dalam hal ini, teknologi simulasi interaktif berperan sebagai jembatan yang mampu merepresentasikan konsep abstrak menjadi konsep semi-konkret sehingga menurunkan beban kognitif siswa dan meningkatkan pemahaman siswa (Juandi, 2021). Dalam usaha mengintegrasikan teknologi dengan konten materi (dalam hal ini konsep matematika dalam pendidikan dengan baik, Mishra dan Koehler (2006) memperkenalkan kerangka kerja *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK).

Kerangka kerja *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) yang diperkenalkan oleh Mishra dan Koehler (2006) merupakan kerangka teoretis yang mengintegrasikan tiga domain, yaitu teknologi, pedagogi, dan konten materi. Kerangka ini menjelaskan interaksi yang harus dibangun antara teknologi, pedagogi, dan konten materi demi terciptanya pembelajaran yang efektif. Dalam lingkup pendidikan matematika, kerangka kerja ini memberikan keunggulan karena dapat menjadi pedoman bagi pendidik supaya dapat menggunakan teknologi tidak hanya sebagai pengganti alat tradisional, tetapi juga sebagai



Gambar 1. Kerangka Kerja TPACK

alat bantu yang diharapkan dapat mengelevasi kualitas belajar dan juga pemahaman siswa, misalnya dalam memvisualisasikan konten abstrak yang sulit dilakukan melalui alat tradisional.

Kerangka TPACK Mishra dan Koehler telah tercetus sejak lama dan telah digunakan secara luas, tetapi tinjauan literatur menunjukkan adanya ketimpangan fokus dalam penelitian (Kholid, 2023). Mayoritas studi TPACK berfokus pada pengukuran kompetensi guru, seperti persepsi diri atau efektivitas pelatihan profesional, bukan pada dampaknya terhadap hasil belajar siswa (Fabian et al., 2024; Kholid, 2023). Masih terdapat kelangkaan studi yang mengevaluasi secara langsung pengaruh penerapan TPACK terhadap prestasi matematika siswa dalam konteks pembelajaran (Fabian et al., 2024; Schmid et al., 2024). Padahal, keberhasilan penguasaan TPACK oleh guru semestinya tecermin pada peningkatan performa akademik siswa, bukan hanya pada persepsi guru (Kholid, 2023). Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini dirancang untuk merangkum penelitian-penelitian yang mengukur kompetensi siswa, sekaligus menjawab tiga pertanyaan utama berikut:

1. Topik matematika apa saja yang diajarkan menggunakan kerangka kerja TPACK dalam studi empiris yang berfokus pada hasil belajar siswa?
2. Jenis teknologi apa yang diintegrasikan menggunakan kerangka kerja TPACK dalam pembelajaran matematika?
3. Bagaimana teknologi diintegrasikan menggunakan kerangka kerja TPACK dalam pembelajaran matematika?
4. Bukti-bukti apa yang dilaporkan mengenai efektivitas penerapan TPACK terhadap siswa?

METODE

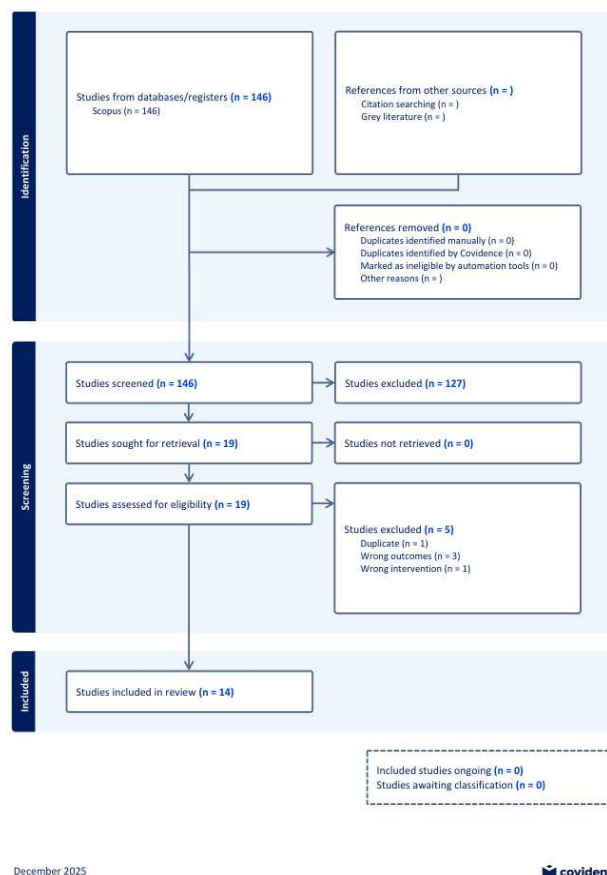
Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menelaah secara menyeluruh efektivitas dan tren penerapan kerangka kerja *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) dalam pembelajaran matematika terhadap hasil belajar siswa. Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan sintesis bukti empiris yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi mengenai dampak intervensi teknologi dalam pendidikan. Prosedur pelaksanaan tinjauan sistematis dalam penelitian ini mengacu pada pedoman standar *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk memastikan validitas dan reliabilitas proses seleksi studi.

Sumber data utama dalam penelitian ini berasal dari pangkalan data Scopus. Pemilihan database ini didasarkan pada jangkauannya yang luas, tak terkecuali dalam bidang pendidikan serta standar kualitas yang ketat untuk menjamin kredibilitas artikel yang akan dianalisis. Penelusuran artikel dilakukan dengan menggunakan string pencarian yang menggabungkan kata kunci terkait kerangka kerja ("TPACK" atau "*Technological Pedagogical Content Knowledge*") dan domain materi ("*Mathematics*"). Proses pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan dalam rentang waktu satu dekade terakhir, yaitu tahun 2015 hingga 2025. Pembatasan ini bertujuan agar temuan yang diperoleh mencerminkan perkembangan teknologi terkini (seperti mobile learning, AR, dan AI) serta tren pedagogis dalam pendidikan matematika.

Untuk memastikan artikel yang akan dianalisis relevan dengan pertanyaan penelitian yang berfokus pada dampak siswa, penelitian ini menetapkan kriteria seleksi. Fokus utama penyaringan ini adalah untuk memisahkan studi yang hanya mengukur kompetensi guru (survei persepsi) dengan studi yang mengukur dampak nyata pada siswa (intervensi/eksperimen).

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria.	Inklusi	Eksklusi
Jenis Dokumen	Artikel Jurnal	<i>Review paper</i> , prosiding konferensi, disertasi
Metode Penelitian	Studi Empiris	Kajian literatur, studi validitas instrumen
Rentang Publikasi Intervensi	Publikasi yang terbit dalam waktu 10 tahun terakhir Penerapan pembelajaran matematika berbasis TPACK di kelas	Publikasi yang terbit di luar waktu 10 tahun terakhir Survei kompetensi TPACK guru atau penelitian lain tanpa implementasi pembelajaran
Aksesibilitas Bahasa	Tersedia teks lengkap Bahasa Inggris	Hanya abstrak atau tidak dapat diakses Bahasa selain Inggris



Gambar 2. Diagram Prisma

Proses seleksi artikel dilakukan dengan bantuan platform Covidence untuk memastikan akurasi penyaringan. Proses ini terdiri dari tiga tahap utama, yaitu identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), dan penilaian kelayakan (*eligibility*). Alur seleksi studi digambarkan dalam Diagram PRISMA di atas.

Pada tahap identifikasi, pencarian awal melalui pangkalan data Scopus lewat *string* pencarian dan juga beberapa kriteria seperti tipe publikasi berupa artikel, akses terbuka, subjek *social sciences*, rentang publikasi 1 dekade, dan Bahasa Inggris memunculkan 146 artikel. Seluruh artikel tersebut kemudian diimpor ke dalam Covidence, dari sini tidak ditemukan duplikasi dokumen.

Tahap selanjutnya adalah penyaringan berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini, sebanyak 127 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan topik, seperti fokus pada mata pelajaran nonmatematika (sains/bahasa) atau karena artikelnya berjenis *review*. Tahap ini menyisakan 19 artikel yang dinilai memiliki potensi untuk ditelaah lebih lanjut. Setelah melalui tahap penyaringan, seluruh artikel yang lolos di tahap ini masuk ke tahap uji kelayakan yang dilakukan dengan membaca keseluruhan teks dari tiap artikel. Dari 19 artikel tersebut, sebanyak 5 artikel dieksklusi dengan alasan spesifik: 1 artikel merupakan sebuah duplikasi dari penelitian lain (sebuah *data note*), 3 artikel memiliki luaran yang tidak sesuai dengan kriteria inklusi, dan 1 artikel memiliki intervensi yang tidak sesuai. Berdasarkan proses seleksi tersebut, diperoleh 14 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dinyatakan layak untuk dianalisis dalam tinjauan sistematis ini.

Data dari 14 artikel diekstraksi dengan memperhatikan informasi mengenai: (1) Identitas studi (penulis, tahun, negara); (2) Karakteristik sampel (jenjang pendidikan, jumlah siswa); (3) Topik matematika yang diangkat; (4) Teknologi dan Pedagogi (jenis alat dan strategi pengajaran); serta (5) Temuan utama terkait hasil belajar siswa.

HASIL PENELITIAN

Dari proses screening 14 artikel yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025 dianalisis dalam tinjauan ini. Secara geografis, studi tersebar di berbagai negara berkembang dan maju, dengan dominasi penelitian dari benua Afrika (Rwanda, Uganda, Ghana) dan Asia (Indonesia dan Qatar), serta beberapa dari Eropa (Italia, Finlandia) dan Amerika Utara (Amerika Serikat dan Kanada). Hal ini mengindikasikan bahwa implementasi TPACK dalam matematika merupakan hal yang relevan dan menjadi daya tarik tersendiri untuk diteliti di berbagai belahan dunia.

Dari segi jenjang pendidikan yang dibahas dalam tiap artikel, sampel penelitian mencakup seluruh spektrum pendidikan formal, mulai dari Sekolah Dasar (SD) hingga Perguruan Tinggi. Hal yang unik terjadi di salah satu penelitian yang menjadikan siswa dari *Teacher Training College* (TTC) (setara dengan Sekolah Pendidikan Guru (SPG) di Indonesia) sebagai subjek penelitian. Lebih lengkapnya rincian informasi dari tiap artikel yang dipilih untuk dianalisis bersamaan dengan jawaban dari pertanyaan penelitian peneliti disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Penelitian 14 Artikel

No.	Judul Artikel	Nama Penulis dan Negara	Hasil
1.	Pre-service mathematics teachers' learning and teaching of activity-based lessons supported with spreadsheets	Agyei & Voogt (2014) (Ghana)	Topik: Aljabar (Fungsi Kuadrat & Trigonometri) Strategi: Activity-Based Learning menggunakan spreadsheets (Excel).

			Pengaruh: Siswa menjadi lebih aktif dalam pembelajaran dan dapat melakukan eksplorasi secara mandiri dalam menentukan pola matematika tertentu
2.	Realistic mathematics learning model based on Mandailing culture assisted by TPACK	Ahmad et al. (2025) (Indonesia)	<p>Topik: Bilangan (Aritmatika)</p> <p>Strategi: RME etnomatematis (Budaya Mandailing) berbantuan video</p> <p>Pengaruh: Meningkatkan kemampuan berpikir kritis matematis siswa.</p>
3.	Serious Games in High School Mathematics Lessons: An Embedded Case Study in Europe	Barbieri et al. (2021) (Eropa)	<p>Topik: Aljabar (Persamaan Linear)</p> <p>Strategi: Serious Game ("Clash of Wizardry") untuk latihan soal.</p> <p>Pengaruh: Meningkatkan motivasi siswa dan tidak membuat siswa mudah menyerah serta memperkuat kemampuan aljabar anak</p>
4.	Application of interactive software in classrooms: a case of GeoGebra in learning geometry	Batiibwe (2024) (Uganda)	<p>Topik: Geometri (Konstruksi & Sudut)</p> <p>Strategi: Active Learning dengan bantuan GeoGebra.</p> <p>Pengaruh: Skor prestasi kelompok eksperimen lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol</p>
5.	From Distance Learning to Integrated Digital Learning: A Fuzzy Cognitive Analysis Focused on Engagement, Motivation, and Participation During COVID-19 Pandemic	Capone & Lepore (2022) (Italia)	<p>Topik: Kalkulus & Aljabar Linear</p> <p>Strategi: Integrated Digital Learning menggunakan platform adaptif & GeoGebra AR.</p> <p>Pengaruh: Menjaga keterlibatan dan motivasi siswa walaupun pembelajaran dilakukan dalam masa pandemi (di bawah stress)</p>
6.	Implementing a Flipped Learning Approach With TPACK in Grades 6 to 9	Delanoy et al. (2024) (Kanada)	<p>Topik: Matematika Umum</p> <p>Strategi: Flipped Learning menggunakan video interaktif (Edpuzzle).</p>

			Pengaruh: Meningkatkan efisiensi waktu kelas untuk diskusi dan siswa merasa puas dan memiliki kebebasan belajar
7.	Implications of using reflective pedagogy and integrating technology in Rwandan teacher training to improve mathematics proficiency	Habiyaremye et al. (2024) (Rwanda)	<p>Topik: Matematika Lanjut (Teacher Training)</p> <p>Strategi: <i>Reflective Pedagogy</i> berbantuan platform <i>E-learning</i>.</p> <p>Pengaruh: Peningkatan signifikan pada <i>math proficiency</i> dan kemampuan refleksi diri mahasiswa.</p>
8.	E-didactics design of differential calculus based on TPACK to overcome learning obstacles for mathematics pre-service Teachers	Meika et al. (2025) (Indonesia)	<p>Topik: Kalkulus (Limit & Turunan)</p> <p>Strategi: E-Didactics menggunakan Flipbooks interaktif & Video.</p> <p>Pengaruh: Mengatasi hambatan belajar dan meningkatkan pemahaman</p>
9.	Impacts of Professional Development and Implementation Fidelity on Online Middle School Mathematics: A Quasi-Experimental Quantitative Study	Meylani et al. (2025) (USA/Turkiye)	<p>Topik: Kurikulum Matematika K-12</p> <p>Strategi: Online Project-Based Learning via platform NOLE.</p> <p>Pengaruh: Prestasi siswa kelompok eksperimen lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol dalam waktu yang konsisten</p>
10.	Potentials and limitations of GeoGebra in teaching and learning limits and continuity of functions at selected senior four Rwandan secondary schools	Munyaruhengeri et al. (2023) (Rwanda)	<p>Topik: Kalkulus (Limit & Kontinuitas)</p> <p>Strategi: Visualisasi grafik fungsi menggunakan GeoGebra.</p> <p>Pengaruh: Meningkatkan pengetahuan konseptual siswa</p>
11.	Enhancing Mathematics Achievement: A Game-Based Learning Intervention	Naccache et al. (2025) (Qatar)	<p>Topik: Aljabar & Geometri (Sudut)</p> <p>Strategi: Game-Based Learning menggunakan perangkat lunak edukasi.</p>

			Pengaruh: Meningkatkan prestasi akademik dan disposisi positif siswa terhadap matematika
12.	Students' collaboration in technology-enhanced reciprocal peer tutoring	Oikarinen et al. (2022) (Finlandia)	<p>Topik: Geometri & Matematika Dasar</p> <p>Strategi: Reciprocal Peer Tutoring berbantuan GeoGebra.</p> <p>Pengaruh: Siswa mampu berkolaborasi dan menunjukkan keterampilan berbicara dan mengajar saat menjadi tutor sebaya.</p>
13.	Effectiveness of TPACK-Based Multimodal Digital Teaching Materials for Mathematical Critical Thinking Ability	Setyo et al. (2023) (Indonesia)	<p>Topik: Geometri Analitik</p> <p>Strategi: Bahan ajar Multimodal (Teks, Video, Kuis Interaktif).</p> <p>Pengaruh: Meningkatkan kemampuan berpikir matematis siswa</p>
14.	Effects of Interactive Mathematics Software on Grade-5 Learners' Performance	Uwineza et al. (2023) (Rwanda)	<p>Topik: Aritmatika (Pecahan & Bilangan Bulat)</p> <p>Strategi: Drill & Practice menggunakan Interactive Math Software.</p> <p>Pengaruh: Prestasi akademik siswa yang menggunakan perangkat lunak lebih baik dibandingkan dengan yang menggunakan metode tradisional</p>

PEMBAHASAN

Topik Matematika yang Diajarkan Menggunakan Kerangka Kerja TPACK

Dari seluruh artikel yang ditinjau, topik matematika yang diangkat dalam penelitian jenisnya lumayan beragam. Dengan mengelompokkan tiap topik ke dalam sebuah domain besar, yaitu kalkulus, geometri, aljabar, dan matematika umum, didapatkan informasi seperti yang sudah ditunjukkan pada tabel sebelumnya

Temuan dari artikel yang dianalisis menunjukkan bahwa topik-topik matematika yang dipilih dalam implementasi TPACK memiliki karakteristik khusus, yaitu potensi representasi yang tinggi untuk mengubah konsep matematika dari yang asalnya nampak abstrak menjadi lebih konkret. Pada materi dasar seperti bilangan bulat, pecahan, dan aritmetika, teknologi memberikan sarana visualisasi yang krusial untuk mempermudah pemahaman operasional lewat ilustrasi. Sebagai contoh, penggunaan Interactive Mathematics (IM) software pada siswa sekolah dasar dalam memvisualisasikan garis bilangan dan posisi angka negatif, nol, dan

positif, yang seringkali sulit dipahami tanpa ilustrasi digital yang tepat (Uwineza et al., 2023). Hal serupa ditemukan dalam penggunaan Serious Games yang mengajarkan operasi aljabar dasar seperti persamaan linear $a + x = b$ atau $a/x = b$ dikaitkan dengan narasi dan tantangan interaktif, sehingga siswa dapat memanipulasi variabel secara langsung dalam suasana yang bermakna dan menyenangkan (Barbieri et al., 2021).

Untuk topik yang lebih kompleks seperti kalkulus, geometri, dan aljabar, teknologi yang diimplementasikan lewat TPACK digunakan untuk menangani sifat materi yang sangat visual dan dinamis. Konsep-konsep dalam kalkulus, khususnya limit dan kontinuitas fungsi, memerlukan visualisasi perubahan yang erat sekali kaitannya dengan sangat kecil atau tak hingga, sebuah proses yang jika hanya mengandalkan papan tulis konvensional akan memakan waktu dan kurang akurat atau kurang mudah dibayangkan (Munyaruhengeri et al., 2023). Penggunaan desain e-didaktis berbasis TPACK juga terbukti mampu mengatasi hambatan belajar pada kalkulus diferensial dengan menyediakan representasi grafis yang dapat berubah secara langsung sesuai perubahan parameter (Meika et al., 2025).

Dalam bidang geometri, baik geometri analitik maupun geometri ruang, teknologi seperti GeoGebra memainkan peran dalam membantu pembelajaran topik-topik seperti rotasi bentuk geometri, sifat-sifat bangun ruang, dan teorema lingkaran yang memerlukan kemampuan spasial yang tinggi. Temuan menunjukkan bahwa visualisasi dinamis memungkinkan siswa mengeksplorasi properti geometris secara mandiri, yang seyogyanya sangat sulit diajarkan secara efektif jika guru hanya terbatas pada gambar statis di papan tulis (Kabuye Batiibwe, 2024; Setyo et al., 2023). Selain itu, integrasi spreadsheet dalam pengajaran statistik dan pola bilangan memungkinkan siswa melakukan eksplorasi data secara cepat, yang mendukung transisi dari pemahaman prosedural menuju pemahaman konseptual yang lebih dalam (Agyei & Voogt, 2014). Secara keseluruhan, pemilihan topik-topik ini dalam kerangka TPACK didasarkan pada kebutuhan untuk menjembatani kesenjangan antara teori abstrak dan visualisasi konkret demi meningkatkan literasi dan kemampuan berpikir kritis matematis siswa (Ahmad et al., 2024).

Jenis Teknologi yang Diintegrasikan Lewat Kerangka Kerja TPACK

Jenis teknologi yang diintegrasikan dalam pembelajaran matematika melalui kerangka TPACK menunjukkan keragaman yang mencakup dari perangkat lunak spesifik mata pelajaran, platform lingkungan belajar digital, sampai media interaktif berbasis permainan. Teknologi yang paling dominan ditemukan adalah perangkat lunak bertipe dynamic geometry software (DGS), khususnya GeoGebra. Penggunaan GeoGebra sangat menonjol dalam topik geometri dan kalkulus karena kemampuannya untuk memanipulasi objek matematis secara langsung yang memungkinkan siswa melakukan eksplorasi mandiri terhadap sifat-sifat geometri dan perilaku fungsi (Kabuye Batiibwe, 2024; Munyaruhengeri et al., 2023). Selain itu, teknologi yang umum digunakan oleh orang-orang seperti spreadsheet juga diintegrasikan sebagai alat belajar materi statistik dan pola bilangan, di mana kerangka TPACK membantu guru mengubah alat pengolah data ini menjadi instrumen pedagogis yang kuat untuk membangun pemahaman konseptual (Agyei & Voogt, 2014).

Tren signifikan lainnya adalah penggunaan Game-Based Learning (GBL) atau Serious Games. Penelitian menunjukkan pemanfaatan perangkat lunak khusus seperti Test Survey for Students (TSFS) di Qatar (Naccache et al., 2025) dan proyek E-Magic di Eropa (Barbieri et

al., 2021) yang menggunakan elemen permainan untuk mengajarkan aljabar. Integrasi permainan ini tidak hanya berfungsi sebagai media penyampaian konten, tetapi sebagai lingkungan belajar imersif yang dirancang untuk meningkatkan keterlibatan siswa dan mengurangi kecemasan matematika. Di jenjang pendidikan dasar, Interactive Mathematics (IM) Software digunakan sebagai alat bantu visualisasi yang sinkron dengan kurikulum berbasis kompetensi, membantu transisi siswa dari pemikiran konkret ke simbolis (Uwineza et al., 2023).

Selain perangkat lunak spesifik, artikel lain juga menyoroti penggunaan platform pembelajaran daring interaktif. Novel Online Learning Environment (NOLE) digunakan untuk menyediakan kurikulum matematika yang terstruktur di tingkat sekolah menengah, lengkap dengan animasi dan model 3D interaktif (Meylani et al., 2025). Sementara itu, penggunaan platform e-learning adaptif memungkinkan personalisasi jalur belajar siswa berdasarkan respons mereka, yang sangat krusial dalam menjaga kontinuitas pembelajaran selama masa transisi dari pembelajaran jarak jauh ke pembelajaran digital terintegrasi (Capone & Lepore, 2022). Terakhir, teknologi pendukung kolaborasi seperti alat tulis dan gambar digital dalam *Technology-enhanced Reciprocal Peer Tutoring* (RPT) memungkinkan interaksi matematis antar siswa menjadi lebih eksplisit melalui dokumentasi digital proses berpikir mereka (Oikarinen et al., 2022). Secara keseluruhan, teknologi yang dipilih dalam kerangka TPACK berfungsi sebagai "instrumen kognitif" yang tidak hanya menggantikan media fisik, tetapi memperluas kapasitas siswa dalam bereksperimen dan berkolaborasi dalam konteks matematis.

Cara Integrasi Teknologi dalam Pembelajaran Matematika

Pembelajaran matematika yang menggunakan teknologi dengan kerangka kerja TPACK memiliki cara tersendiri dalam mengintegrasikan teknologi-teknologi yang ada dengan pembelajaran matematika yang akan dilakukan. Dari tinjauan yang dilakukan, ciri khusus yang dapat terasa dari pengintegrasian teknologi dalam pembelajaran matematika ini adalah pergeseran fokus dalam pembelajaran yang awalnya *teacher-centered* menjadi *student-centered*. Berikut akan dijelaskan secara lebih lanjut apa saja strategi atau ciri pengajaran yang mengintegrasikan teknologi:

- *Active Learning & Exploration*: Guru menggunakan teknologi untuk memfasilitasi siswa dalam menemukan konsep melalui eksplorasi.
- *Flipped Learning*: Siswa mempelajari konten dasar melalui video di rumah, sehingga waktu di kelas digunakan untuk pemecahan masalah yang lebih kompleks.
- *Reflective Pedagogy*: Menggunakan data dari teknologi untuk merefleksikan proses belajar dan memberikan umpan balik.

Penerapan TPACK terbukti mengubah peran siswa dari penerima pasif menjadi pembelajar aktif. Dalam studi Agyei & Voogt (2014) dan Oikarinen et al. (2022), teknologi memungkinkan siswa untuk melakukan eksplorasi, pengujian hipotesis, dan bahkan saling mengajar (peer tutoring). Strategi pedagogis seperti *Game-Based Learning* (Naccache et al., 2025) dan *Flipped Learning* (Delanoy et al., 2024) menunjukkan bahwa teknologi memberikan ruang bagi siswa untuk belajar sesuai kecepatan mereka sendiri atau terpersonalisasi yang pada akhirnya meningkatkan kemandirian dan rasa kepemilikan terhadap proses belajar.

Dampak Integrasi Teknologi dengan Kerangka TPACK dalam Pembelajaran Matematika

Bukti empiris dari 14 studi menunjukkan dampak yang konsisten positif, baik pada aspek kognitif maupun afektif. Temuan penelitian ini mengonfirmasi bahwa integrasi teknologi yang dipandu oleh kerangka TPACK lumayan konsisten dalam mereduksi beban kognitif siswa pada materi abstrak serta memberikan peningkatan baik dari segi kepuasan, maupun hasil belajar siswa. Studi Munyaruhengeri et al. (2023) dan Meika et al. (2025) pada topik kalkulus menunjukkan bahwa teknologi visualisasi (seperti GeoGebra) berfungsi sebagai scaffolding yang mengubah konsep abstrak (limit/kontinuitas) menjadi objek semi-konkret yang dapat dimanipulasi siswa.

Perlu diperhatikan bahwa dalam beberapa artikel disebutkan betapa pentingnya peran guru dalam membimbing siswa ketika pembelajaran sebab teknologi tidak sepenuhnya dapat menerjemahkan konten abstrak matematis sesuai dengan fakta yang diinginkan. Misalnya pada salah satu penelitian dijelaskan bahwa GeoGebra memiliki kelemahan dalam menunjukkan suatu grafik itu tidak kontinu karena grafik yang muncul akan berbentuk sama dengan grafik yang kontinu (Munyaruhengeri et al., 2023). Ada laporan juga dari salah satu calon guru yang harus mengajarkan statistik melalui spreadsheet bahwa mereka mengalami kesulitan dalam memilih rumus yang benar untuk diajarkan (Agyei dan Voogt, 2014). Hal ini sejalan dengan prinsip TPACK di mana teknologi bukan sekadar alat presentasi pengganti papan tulis saja, melainkan alat representasi konten yang berarti harus dikuasai dengan sangat baik oleh pengajar (*Technological Content Knowledge/TCK*).

Salah satu temuan menarik lainnya adalah konsistensi efektivitas TPACK di berbagai konteks negara. Baik di negara maju dengan infrastruktur mapan (Kanada, Italia) maupun negara berkembang (Rwanda, Uganda, Indonesia), intervensi berbasis TPACK terbukti meningkatkan hasil belajar. Studi Batiibwe (2024) di Uganda dan Uwineza et al. (2023) di Rwanda secara spesifik menyoroti bahwa pelatihan guru yang intensif dalam TPACK (bukan hanya pelatihan teknis alat) adalah kunci keberhasilan implementasi teknologi di lingkungan sekolah dengan sumber daya terbatas.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil tinjauan sistematis, dapat disimpulkan bahwa kerangka kerja TPACK memiliki peran vital dalam meningkatkan kualitas pembelajaran matematika. Penerapan TPACK terbukti paling efektif pada materi yang sangat abstrak, seperti Kalkulus dan Geometri, di mana teknologi berfungsi sebagai alat kognitif untuk visualisasi. Keberhasilan ini tidak lepas dari pergeseran strategi pembelajaran yang lebih berpusat pada siswa (*student-centered*), seperti penggunaan GeoGebra untuk eksplorasi dan game-based learning untuk motivasi. Secara keseluruhan, bukti empiris menunjukkan bahwa intervensi berbasis TPACK berdampak positif signifikan terhadap peningkatan prestasi akademik, kemampuan berpikir kritis, serta keterlibatan siswa dalam pembelajaran matematika. Disarankan bagi guru untuk mulai mengintegrasikan teknologi interaktif pada topik yang sulit divisualisasikan atau direpresentasikan. Selain itu penelitian juga direkomendasikan untuk memperluas kajian pada kinerja kerangka kerja TPACK jika diasosiasikan dengan model pembelajaran tertentu guna mengukur model terbaik yang dapat meningkatkan pemahaman siswa.

DAFTAR PUSTAKA

- Agyei, D. D., & Voogt, J. M. (2014). Pre-service mathematics teachers' learning and teaching of activity-based lessons supported with spreadsheets. *Technology, Pedagogy and Education*, 23(1), 39–54. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2014.928648>
- Ahmad, M., Pricilia, G. M., & Elindra, R. (2025). Realistic mathematics learning model based on Mandailing culture assisted by TPACK: Model development study to develop critical thinking skills. *Perspectives of Science and Education*, 68(3), 282–296. <https://doi.org/10.32744/pse.2025.3.18>
- Barbieri, G. G., Barbieri, R., & Capone, R. (2021). Serious games in high school mathematics lessons: An embedded case study in Europe. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(5), em1963. <https://doi.org/10.29333/ejmste/10857>
- Batiibwe, M. S. K. (2024). Application of interactive software in classrooms: A case of GeoGebra in learning geometry in secondary schools in Uganda. *Discover Education*, 3, Article 179. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00291-8>
- Baye, M. G., Adula, S. B., & Wondaferahu, G. (2021). Implementing GeoGebra integrated with multi-teaching methods to enhance students' conceptual understanding of limits. *International Journal of Instruction*, 14(1), 163–178.
- Capone, R., & Lepore, M. (2022). From distance learning to integrated digital learning: A fuzzy cognitive analysis focused on engagement, motivation, and participation during COVID-19 pandemic. *Technology, Knowledge and Learning*, 27, 1259–1289. <https://doi.org/10.1007/s10758-021-09571-w>
- Delanoy, N., El-Hacha, J., Miller, M., & Brown, B. (2024). Implementing a flipped learning approach with TPACK in grades 6 to 9. *Canadian Journal of Learning and Technology*, 50(1). <https://doi.org/10.21432/cjlt28065>
- Fabian, A. P., et al. (2024). A systematic review and meta-analysis of TPACK-based mathematics learning interventions. *Education and Information Technologies*.
- Fujita, T., Kondo, Y., Kumakura, H. et al. Spatial reasoning skills about 2D representations of 3D geometrical shapes in grades 4 to 9. *Math Ed Res J* 32, 235–255 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13394-020-00335-w>
- Habiyaremye, H. T., Ntivuguruzwa, C., & Ntawiha, P. (2024). Implications of using reflective pedagogy and integrating technology in Rwandan teacher training to improve mathematics proficiency. *Cogent Education*, 11(1), 2428574. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2428574>
- Juandi, D., Kusumah, Y. S., & Tamur, M. (2021). A meta-analysis of the effect of GeoGebra on students' mathematical abilities. *Heliyon*, 7(6), e07205.
- Kholid, M. N. (2023). A systematic literature review of technological pedagogical content knowledge (TPACK) in mathematics education. *Jurnal Elemen*, 9(1), 30–49.
- Meika, I., Sartika, N. S., Sujana, A., Jarinah, J., Hakim, Z., Windiarti, I. S., & Hendra, H. (2025). E-didactics design of differential calculus based on TPACK to overcome learning obstacles for mathematics pre-service teachers. *Infinity Journal*, 14(3), 733–752. <https://doi.org/10.22460/infinity.v14i3.p733-752>
- Meylani, R., Bitter, G. G., & Legacy, J. M. (2025). Impacts of professional development and implementation fidelity on online middle school mathematics: A quasi-experimental quantitative study. *Turkish Online Journal of Distance Education-TOJDE*, 26(2), 90–119.

- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017–1054.
- Munyaruhengeri, J. P. A., Umugiraneza, O., Ndagijimana, J. B., & Hakizimana, T. (2023). Potentials and limitations of GeoGebra in teaching and learning limits and continuity of functions at selected senior four Rwandan secondary schools. *Cogent Education*, 10(2), 2238469. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2238469>
- Naccache, H., Altae, M., & Barham, A. (2025). Enhancing mathematics achievement: A game-based learning intervention in Qatar. *Educational Process: International Journal*, 18, e2025481. <https://doi.org/10.22521/edupij.2025.18.481>
- National Council of Teachers of Mathematics. (2000). *Principles and standards for school mathematics*. Reston, VA: Author.
- NCTM. (2014). *Principles to Actions: Ensuring Mathematical Success for All*. National Council of Teachers of Mathematics.
- Oikarinen, R. M., Oikarinen, J. K., Havu-Nuutinen, S., & Pöntinen, S. (2022). Students' collaboration in technology-enhanced reciprocal peer tutoring as an approach towards learning mathematics. *Education and Information Technologies*, 27, 7519–7548. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10799-3>
- OECD. (2019). *OECD Skills Outlook 2019: Thriving in a Digital World*. OECD Publishing.
- Rolfes T, Roth J and Schnotz W (2020) Learning the Concept of Function With Dynamic Visualizations. *Front. Psychol.* 11:693. doi: 10.3389/fpsyg.2020.00693
- Schmid, M., Brianza, E., Mok, S. Y., & Petko, D. (2024). Running in circles: A systematic review of reviews on technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & education*, 214, 105024.
- Setyo, A. A., Pomalato, S. W., Hulukati, E. P., Machmud, T., & Djafri, N. (2023). Effectiveness of TPACK-based multimodal digital teaching materials for mathematical critical thinking ability. *International Journal of Information and Education Technology*, 13(10), 1604–1608. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2023.13.10.1968>
- Uwineza, I., Uworwabayeho, A., & Yokoyama, K. (2023). Effects of interactive mathematics software on grade-5 learners' performance. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 22(1), 166–190. <https://doi.org/10.26803/ijlter.22.1.10>