

## Geometri Berbasis STEM dalam Pendidikan Calon Guru Matematika: Kajian Literatur Konseptual

### *STEM-Based Geometry in Pre-Service Mathematics Teacher Education: A Conceptual Literature Review*

Duwi Purnama Sidik<sup>1</sup>, Fatqurhohman<sup>\*2</sup>, Siti Rofikoh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitas Brawijaya, Indonesia

<sup>2,3</sup> Universitas Muhammadiyah Jember, Indonesia

\*Corresponding Author. Email: [frohman86@unmuhjember.ac.id](mailto:frohman86@unmuhjember.ac.id)

Received: 15-09-2025

Revised: 02-10-2025

Accepted: 25-10-2025

#### Abstrak

Kompetensi calon guru matematika dalam konteks pembelajaran abad ke-21 menuntut penguasaan numerasi, representasi matematis, dan penalaran spasial yang terintegrasi secara interdisipliner. Kajian ini bertujuan mensintesis literatur mengenai pembelajaran geometri berbasis STEM dalam pendidikan calon guru matematika, mencakup lima dimensi utama: implementasi STEM, desain pembelajaran, pengembangan kompetensi, representasi matematis, serta integrasi dan tantangan. Metode yang digunakan adalah kajian literatur konseptual melalui penelusuran sistematis di Scopus, Web of Science, ERIC, dan Google Scholar terhadap publikasi periode 2020–2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa implementasi STEM yang efektif mensyaratkan ekosistem pedagogis yang komprehensif, desain pembelajaran berbasis proyek yang terstruktur, serta integrasi teknologi visualisasi dinamis untuk mengembangkan kemampuan spasial dan representasi. Tantangan utama meliputi dualisme representasional dan ketegangan antara kreativitas dan rigor matematis. Kajian ini berkontribusi pada kerangka teoretis integratif yang menghubungkan numerasi, spasial, dan pedagogik STEM sebagai landasan penelitian empiris selanjutnya dalam pendidikan matematika.

**Kata Kunci: Pembelajaran Geometri; Representasi Matematis; Kemampuan Spasial; STEM**

The competencies of prospective mathematics teachers in the context of 21st-century learning require the integrated and interdisciplinary mastery of numeracy, mathematical representation, and spatial reasoning. This study aims to synthesize the literature on STEM-based geometry learning in mathematics teacher education, encompassing five main dimensions: STEM implementation, instructional design, competency development, mathematical representation, and integration and challenges. The study employed a conceptual literature review through a systematic search of publications from 2020–2026 in Scopus, Web of Science, ERIC, and Google Scholar. The findings indicate that effective STEM implementation requires a comprehensive pedagogical ecosystem, structured project-based instructional design, and the integration of dynamic visualization technologies to enhance spatial ability and representation skills. Major challenges include representational dualism and the tension between creativity and mathematical rigor. This review contributes an integrative theoretical framework linking numeracy, spatial reasoning, and STEM pedagogy as a foundation for future empirical research in mathematics education.

**Keywords: Geometry Learning; Mathematical Representation; Spatial Ability; STEM**

**How to Cite:** Sidik, D. P., Fatqurhohman, F., & Rofikoh, S. (2025). Geometri Berbasis STEM dalam Pendidikan Calon Guru Matematika: Kajian Literatur Konseptual. *SMARTH: Journal of Mathematics in Education and Learning*, 1(2), 131–144

Copyright ©2026 to the Author (s). Published by CV. Ihsan Cahaya Pustaka  
This is an open access under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



## PENDAHULUAN

Perkembangan pendidikan abad ke-21 menempatkan numerasi sebagai kompetensi kunci yang harus dimiliki calon guru matematika karena berkaitan langsung dengan kemampuan merancang pembelajaran bermakna, memfasilitasi pemahaman konseptual, serta menghubungkan matematika dengan konteks kehidupan nyata (Hackenberg et al., 2021; Van den Kieboom & Groleau, 2022; Pramasdyahsari et al., 2025). Numerasi dalam perspektif kontemporer tidak lagi dipahami sebatas keterampilan komputasional, melainkan sebagai konstruk multidimensi yang mencakup pemahaman konseptual, penalaran matematis, penerapan kontekstual, serta fleksibilitas representasi. Kompetensi tersebut memungkinkan calon guru menafsirkan situasi secara kritis, memberikan justifikasi matematis, dan mengomunikasikan ide secara efektif dalam berbagai konteks pembelajaran (Hackenberg et al., 2021; Rahman et al., 2021; Van den Kieboom & Groleau, 2022). Oleh karena itu, penguatan numerasi calon guru menjadi agenda strategis dalam pendidikan guru matematika yang responsif terhadap tuntutan abad ke-21.

Tuntutan pengembangan numerasi semakin kompleks seiring berkembangnya pendekatan interdisipliner dalam pendidikan, khususnya integrasi Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM). Pendekatan STEM memosisikan matematika sebagai disiplin yang terintegrasi dengan bidang lain melalui aktivitas autentik yang menuntut kreativitas, kolaborasi, dan pemecahan masalah kompleks (Diego-Mantecon et al., 2021; Astutik et al., 2024; Isnawan et al., 2025). Dalam konteks ini, pembelajaran matematika tidak lagi berlangsung secara terisolasi, melainkan melalui pengalaman lintas disiplin yang menuntut koordinasi berbagai bentuk representasi dan penalaran. Tugas geometri berbasis seni, misalnya, mendorong calon guru menggabungkan representasi visual, simbolik, dan kontekstual, sekaligus mengintegrasikan penalaran spasial dengan kreativitas desain (Diego-Mantecon et al., 2021; Pramasdyahsari et al., 2025; Sal'kov, 2021). Integrasi tersebut terbukti memperluas repertoar strategi pemecahan masalah serta meningkatkan keterlibatan dalam pembelajaran matematika yang bermakna (Astutik et al., 2024; Isnawan et al., 2025).

Meskipun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa calon guru matematika masih menghadapi kesulitan dalam mentransfer kemampuan numerasi ke situasi non-rutin dan kontekstual. Studi literatur mengindikasikan bahwa calon guru umumnya memiliki kelancaran prosedural, tetapi kurang fleksibel dalam menggunakan representasi serta menerapkan matematika dalam konteks autentik (Fatqurhohman et al., 2025; Van den Kieboom & Groleau, 2022; Rahman et al., 2021). Praktik pembelajaran dalam program pendidikan guru masih cenderung menekankan kecakapan komputasional dibandingkan penalaran integratif dan pemodelan kontekstual. Akibatnya, calon guru mengalami kesulitan ketika harus menghubungkan konsep matematika dengan situasi dunia nyata, terutama dalam tugas lintas disiplin yang menuntut kreativitas dan pemecahan masalah terbuka (Rahman et al., 2021; Fatqurhohman et al., 2025; Diana et al., 2021). Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara kompetensi numerasi yang diharapkan dan praktik pembelajaran yang masih dominan berorientasi prosedural.

Kesenjangan tersebut tidak terlepas dari berbagai faktor yang memengaruhi implementasi pembelajaran interdisipliner. Penelitian menunjukkan bahwa pengalaman calon guru dalam pembelajaran matematika berbasis STEM masih terbatas akibat kesiapan guru yang belum optimal, kurikulum yang kurang fleksibel, serta tantangan dalam merancang dan menilai tugas terintegrasi (Diana et al., 2021; Diego-Mantecon et al., 2021; Isnawan et al., 2025). Selain itu,

integrasi seni dalam pembelajaran matematika memunculkan ketegangan konseptual antara intuisi artistik dan ketepatan matematis yang menuntut koordinasi representasi serta justifikasi matematis yang kuat (Pramasdyahsari et al., 2025; Sal'kov, 2021). Tantangan ini mengindikasikan bahwa calon guru membutuhkan pengalaman belajar yang secara eksplisit melatih kemampuan menyeimbangkan kreativitas dan ketelitian matematis dalam konteks STEAM.

Geometri merupakan domain yang sangat potensial untuk mengembangkan numerasi dalam konteks interdisipliner karena secara inheren melibatkan visualisasi, representasi, dan penalaran spasial. Namun, penelitian pendidikan geometri masih didominasi oleh pendekatan prosedural yang berfokus pada penerapan rumus, bukan pada pemodelan dunia nyata atau eksplorasi kreatif (Fatqurhohman & Firdaus, 2024; Diego-Mantecon et al., 2021; Sal'kov, 2021). Padahal, studi terbaru menunjukkan bahwa integrasi seni dalam pembelajaran geometri dapat meningkatkan kemampuan visualisasi, keterlibatan mahasiswa, serta penalaran matematis kreatif (Pramasdyahsari et al., 2025; Astutik et al., 2024; Fatqurhohman & Firdaus, 2024). Unsur seni seperti pola, simetri, dan desain visual berpotensi menjadikan pembelajaran geometri lebih kontekstual dan bermakna. Meskipun demikian, bukti empiris mengenai bagaimana calon guru mengoordinasikan intuisi artistik dan ketepatan matematis dalam tugas geometri berbasis STEAM masih terbatas (Pramasdyahsari et al., 2025; Diego-Mantecon et al., 2021).

Di sisi lain, perkembangan pendekatan STEM menekankan pentingnya koneksi transdisipliner dalam pendidikan matematika sebagai respons terhadap kebutuhan keterampilan abad ke-21, seperti kreativitas, kolaborasi, dan pemecahan masalah kompleks (Isnawan et al., 2025; Astutik et al., 2024; Diana et al., 2021). Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada implementasi STEM secara umum, tanpa secara spesifik mengkaji bagaimana integrasi lintas disiplin memengaruhi pengembangan kompetensi matematis calon guru. Dengan demikian, terdapat kesenjangan penelitian terkait bagaimana numerasi calon guru berkembang dalam konteks geometri berbasis STEM yang menuntut integrasi penalaran spasial, representasi, dan desain kreatif (Fatqurhohman et al., 2025; Pramasdyahsari et al., 2025).

Kesenjangan tersebut menegaskan urgensi penelitian yang mengkaji numerasi calon guru dalam konteks pembelajaran geometri berbasis STEAM. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana calon guru menalar, memvisualisasikan, dan memberikan justifikasi matematis dalam tugas interdisipliner diperlukan untuk mendukung pengembangan kurikulum pendidikan guru yang relevan dengan tuntutan abad ke-21 (Hackenberg et al., 2021; Isnawan et al., 2025; Diana et al., 2021). Selain itu, kajian konseptual yang komprehensif diperlukan untuk memberikan landasan teoretis bagi pengembangan pedagogi STEM yang efektif dalam pendidikan matematika (Astutik et al., 2024; Diego-Mantecon et al., 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini merupakan kajian literatur konseptual yang mensintesis temuan mengenai pembelajaran geometri berbasis STEM dalam pendidikan calon guru matematika. Kajian ini bertujuan menelaah konseptualisasi pengembangan kompetensi matematis melalui integrasi geometri, representasi matematis, dan desain pembelajaran berbasis STEM. Fokus analisis mencakup posisi kompetensi matematis dalam kerangka STEM, ragam representasi serta pendekatan pembelajaran yang dilaporkan, dan tantangan konseptual maupun pedagogis dalam implementasinya. Hasil kajian diharapkan menghasilkan sintesis teoretis yang komprehensif sebagai landasan bagi pengembangan penelitian empiris selanjutnya.

## METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan conceptual literature review untuk mensintesis temuan terkait geometri berbasis STEM dalam pendidikan calon guru matematika. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian bukan pada pengumpulan data empiris baru, melainkan pengembangan kerangka konseptual yang mengaitkan numerasi, representasi matematis, penalaran spasial, dan kreativitas dalam pembelajaran geometri berbasis STEM. Kajian literatur konseptual memungkinkan analisis kritis terhadap perspektif teoretis dan temuan empiris untuk memetakan hubungan antarkonsep, mengidentifikasi tren, serta menemukan kesenjangan penelitian yang memerlukan kajian lanjutan (Rahman et al., 2021).

Sumber data mencakup artikel jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi internasional, dan artikel konseptual yang relevan dengan pendidikan matematika, STEM, pendidikan calon guru, geometri, representasi matematis, dan penalaran spasial. Penelusuran dilakukan secara sistematis melalui Scopus, Web of Science, ERIC, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci berbasis operator Boolean: (“*STEAM education*” OR “*integrated STEM*”) AND (“*geometry education*” OR “*geometry learning*”) AND (“*pre-service mathematics teachers*” OR “*prospective mathematics teachers*”) AND (“*integration in mathematics*”). Penelusuran literatur dilakukan secara sistematis untuk memastikan cakupan sumber yang komprehensif dan transparan. Namun, penelitian ini tidak mengikuti protokol systematic literature review (SLR) secara penuh karena tujuan utama kajian adalah pengembangan sintesis konseptual, bukan evaluasi kualitas metodologis studi atau sintesis bukti empiris secara kuantitatif. Rentang publikasi difokuskan pada periode 2020–2026 guna memastikan keterkinian literatur sesuai perkembangan riset STEAM dan pendidikan calon guru.

Literatur diseleksi melalui kriteria inklusi–eksklusi agar proses kajian transparan dan dapat diaudit. Artikel yang dipertahankan membahas STEM dalam pendidikan matematika, pendidikan calon guru, atau pembelajaran geometri serta mengkaji numerasi, representasi matematis, penalaran spasial, atau integrasi seni. Publikasi harus berupa studi empiris, kajian literatur, atau artikel konseptual pada jurnal/prosiding bereputasi dan tersedia dalam teks lengkap berbahasa Inggris atau Indonesia. Artikel non-relevan, opini tanpa peer review, atau tanpa kontribusi konseptual dikeluarkan (Diana et al., 2021).

Analisis dilakukan melalui empat tahap: penyaringan judul dan abstrak; ekstraksi data terkait tujuan, desain, kerangka teoretis, dan temuan; analisis tematik kualitatif melalui open coding; serta sintesis konseptual untuk mengidentifikasi pola, hubungan antarkonsep, dan kesenjangan penelitian. Kredibilitas dijaga melalui dokumentasi sistematis, triangulasi sumber, dan konsistensi kategorisasi tematik (Rahman et al., 2021). Hasil kajian diharapkan menjadi landasan teoretis bagi riset empiris dan pengembangan kurikulum pendidikan calon guru matematika berbasis STEAM.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelusuran literatur mengidentifikasi artikel yang relevan dengan fokus STEM dalam pendidikan matematika, mencakup integrasi dan desain pembelajaran, geometri, kompetensi calon guru, representasi matematis, serta kemampuan spasial. Sumber yang dianalisis merupakan publikasi periode 2020–2026 yang diperoleh melalui Scopus, Web of Science, ERIC, dan Google Scholar. Secara umum, literatur menegaskan bahwa pendekatan STEM dipandang strategis untuk memperkuat numerasi, kemampuan representasi, dan kompetensi pedagogis melalui pembelajaran kontekstual lintas disiplin. Namun, penelitian yang secara

simultan mengaitkan pendidikan calon guru, geometri, representasi matematis, dan desain pembelajaran dalam satu kerangka STEM masih terbatas. Oleh karena itu, pemetaan literatur diperlukan untuk memberikan gambaran sistematis sekaligus menjadi dasar pengembangan sintesis konseptual penelitian ini. Tabel berikut merangkum artikel kunci berdasarkan penulis, tahun, tema/topik penelitian, hasil.kontribusi penelitian.

**Tabel 1.** Kajian Literatur Integrasi Pembelajaran STEM

Penulis (Tahun)	Tema/Topik	Temuan
Diana et al. (2021)	Tantangan implementasi STEM dalam pembelajaran matematika	Implementasi STEM di Indonesia masih terhambat masalah sistemik, yakni rendahnya literasi STEM guru, keterbatasan fasilitas, serta ketidaksinkronan kurikulum. Kondisi ini menegaskan urgensi intervensi terpadu melalui penguatan kompetensi guru, penyediaan infrastruktur pendukung, dan penyesuaian kurikulum agar implementasi STEM dapat berjalan efektif dan berkelanjutan.
Diego-Mantecon et al. (2021)	Evaluasi pembelajaran proyek STEAM dalam matematika	Implementasi STEAM-PBL matematika berlangsung secara gradual dan dipengaruhi oleh latar keilmuan guru: cenderung menghindari proyek transdisipliner dan kurang mengeksplorasi kedalaman materi, sehingga lingkungan formatif berbasis diskusi mendukung peningkatan tuntutan kognitif serta identitas matematis. Melalui kombinasi pengajaran tradisional dan interdisipliner, direkomendasikan strategi kurikulum masa depan.
Rahman et al. (2021)	Praktik pembelajaran matematika berbasis STEM	Pendidikan STEM diposisikan sebagai strategi transformatif untuk menjawab tantangan masa depan melalui inovasi pembelajaran matematika. Implementasinya berfokus pada penguatan kompetensi abad ke-21, pengembangan desain instruksional, dan eksekusi STEM yang sistematis. Praktik utama mencakup berpikir kritis, kolaborasi, pembelajaran berbasis proyek, integrasi teknologi, serta dukungan berkelanjutan dan skalabilitas penerapan.
Sal'kov (2021)	Kualitas pendidikan geometri dalam berbagai pendekatan pembelajaran	Integrasi perangkat lunak grafis tanpa pelatihan awal terbukti menghambat penyelesaian masalah geometri, karena waktu belajar mahasiswa lebih banyak tersita untuk adaptasi teknis daripada penguatan pemahaman konseptual. Kondisi ini menurunkan efektivitas pembelajaran ketika kesiapan teknis tidak dibangun sejak awal. Oleh karena itu, diperlukan kurikulum bertahap yang menempatkan literasi perangkat lunak sebagai fondasi sebelum penerapan komputasi geometri di pendidikan tinggi.
Van den Kieboom & Groleau (2022)	Perencanaan pembelajaran diferensiasi oleh	Kemampuan calon guru matematika dalam merencanakan diferensiasi pembelajaran masih berada pada tahap berkembang, dengan dominasi pada aspek

	calon guru matematika	konten dan lingkungan serta pertimbangan kesiapan siswa. Namun, diperlukan penguatan dukungan pedagogis untuk mengintegrasikan latar belakang budaya siswa agar perencanaan pembelajaran menjadi lebih adaptif, kontekstual, dan bermakna secara holistik.
Fonseca, & Henriques (2023)		Integrasi GeoGebra pada calon guru matematika meningkatkan pemahaman mendalam, mencakup visualisasi dinamis, koneksi antarrepresentasi, dan penalaran matematis, menjadikan kerangka analitis kontribusi DGS. Tugas eksploratif terbukti sebagai strategi didaktik inovatif yang mendorong pembelajaran matematika bermakna, kontekstual, dan berkelanjutan pada pendidikan tinggi calon guru secara efektif dan reflektif.
Astutik et al. (2024)	Pengembangan bahan ajar geometri PJBL-STEM berbantuan teknologi	Pengembangan bahan ajar e-book matematika berbasis PjBL-STEM berbantuan Geometry Calculator menunjukkan efektivitas sebagai media digital yang adaptif, kontekstual, dan berkelanjutan dalam pembelajaran matematika, sekaligus menegaskan inovasi pembelajaran abad 21 yang secara signifikan mendorong peningkatan keterampilan berpikir tingkat tinggi
Dilling et al. (2024)	Co-design pembelajaran matematika dengan teknologi digital	Teacher Design Teams dalam proyek DigiMath4Edu yang melibatkan calon guru dan guru berpengalaman efektif mengembangkan kompetensi digital dalam pembelajaran matematika melalui kolaborasi perencanaan pelaksanaan dan refleksi. Terdapat pembagian peran yang jelas memperkuat profesionalisasi keduanya. Namun temuan bersifat kontekstual berbasis self-report sehingga generalisasi terbatas dan memerlukan penelitian lanjutan.
Pramasdyahsari et al. (2025)	Numerasi calon guru melalui geometri STEAM terintegrasi seni	Integrasi seni dalam STEAM memperkuat penalaran spasial, visualisasi, dan komunikasi matematis serta meningkatkan keterlibatan belajar calon guru matematika. Kreativitas menjadi jembatan pemahaman konsep, namun memunculkan dualisme representasional berupa kesulitan mengoordinasikan representasi visual, simbolik, dan numerik. Diperlukan scaffolding pedagogis untuk menyeimbangkan kreativitas dan rigor matematis, menegaskan koordinasi representasi sebagai kontribusi penting.
Isnawan et al. (2025)	Sintesis penelitian STEAM+X dalam pendidikan matematika	Integrasi geometri dengan teknologi digital-fisik seperti GeoGebra, AR/VR, dan 3D printing dalam pendidikan guru masih terbatas secara geografis dan pada konten tertentu. Kondisi ini menunjukkan perlunya perluasan penelitian pada konteks budaya, jenjang pendidikan, dan topik matematika yang lebih beragam. STEAM+X berpotensi sebagai pendekatan transdisipliner yang mengontekstualisasikan matematika secara historis,

		kultural, dan aplikatif, sekaligus menuntut desain pembelajaran yang lebih inklusif dan bermakna.
Fitriawan, et al. (2026)	Pengembangan pembelajaran geometri terintegrasi STEM	Pengembangan bahan ajar Geometri Analitik berbasis STEM yang terintegrasi visualisasi digital dan e-learning melalui GeoGebra, PhET, Maple, Tinkercad, serta proyek rekayasa terbukti meningkatkan hasil belajar, penalaran spasial, dan pemahaman konseptual mahasiswa. Temuan ini menegaskan efektivitas pembelajaran inovatif berbasis teknologi dalam menjawab tuntutan Industri 4.0 dan Society5.0 di pendidikan tinggi global.

Berdasarkan tabel literatur, kajian STEM dalam pendidikan matematika memperlihatkan perkembangan bertahap dari isu implementasi hingga penguatan desain pembelajaran dan kompetensi calon guru. Studi awal mengungkap kendala implementasi STEM dalam pembelajaran geometri, seperti keterbatasan literasi pedagogis guru, kesiapan teknologi, dan ketidaksesuaian kurikulum yang menghambat efektivitas pembelajaran (Diana et al., 2021; Sal'kov, 2021). Tahap berikutnya menunjukkan pergeseran ke inovasi desain pembelajaran melalui diferensiasi, co-design, dan integrasi teknologi digital yang menempatkan guru serta calon guru sebagai aktor utama dalam pembelajaran kontekstual (Van den Kieboom & Groleau, 2022; Dilling et al., 2024; Astutik et al., 2024). Kajian mutakhir menekankan penguatan kompetensi matematis calon guru, khususnya numerasi, representasi, dan penalaran spasial melalui integrasi STEM berbasis teknologi dan pendekatan kreatif, meskipun masih terdapat tantangan dalam koordinasi representasi matematis (Pramasdyahsari et al., 2025; Fonseca & Henriques, 2023). Secara keseluruhan, literatur menunjukkan pergeseran dari implementasi menuju integrasi konseptual yang lebih kompleks, sehingga diperlukan sintesis untuk menghubungkan geometri, representasi, penalaran spasial, dan desain pembelajaran dalam pendidikan calon guru matematika.

## 1. Implementasi STEM dalam Pendidikan Matematika

Implementasi STEM dalam pendidikan matematika diposisikan sebagai strategi transformasional untuk mengontekstualisasikan konsep melalui pemecahan masalah autentik lintas disiplin. Namun, implementasinya masih menghadapi hambatan struktural berupa rendahnya literasi STEM guru, keterbatasan infrastruktur, dan ketidaksinkronan kurikulum dengan tuntutan integrasi (Diana et al., 2021; Rahman et al., 2021). Kondisi ini menegaskan bahwa keberhasilan implementasi sangat bergantung pada kesiapan pedagogis guru dalam mengintegrasikan teknologi, pedagogi, dan konten melalui kerangka TPACK (Lachner et al., 2021; Tondeur et al., 2020), serta penguatan kompetensi digital yang memastikan integrasi teknologi berlangsung bermakna dan berkelanjutan (García-Martín & García-Peñalvo, 2025). Sejalan dengan itu, pengembangan profesional berkelanjutan dan kolaborasi desain pembelajaran terbukti meningkatkan kesiapan implementasi STEM (Dilling et al., 2024; Tondeur et al., 2020). Dengan demikian, penguatan kapasitas guru menjadi fondasi utama sebelum inovasi kurikulum dan teknologi dapat diimplementasikan secara konsisten dan sistemik.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, implementasi STEM menuntut pembelajaran berbasis proyek, kolaborasi, dan integrasi teknologi untuk mengembangkan keterampilan abad ke-21, khususnya berpikir kritis dan pemecahan masalah (Rahman et al., 2021; Cheng et al., 2024).

Meski demikian, integrasi lintas disiplin masih berlangsung gradual karena guru cenderung membatasi eksplorasi STEAM pada domain konseptual yang familiar (Diego-Mantecon et al., 2021). Perkembangan mutakhir menunjukkan perluasan menuju kerangka STEAM+X yang mengontekstualisasikan matematika secara historis, kultural, dan aplikatif (Isnawan et al., 2025). Dalam konteks ini, integrasi teknologi visualisasi digital terbukti meningkatkan penalaran spasial, pemahaman konseptual, serta sikap terhadap matematika (Fitriawan et al., 2026; Saha et al., 2021). Secara keseluruhan, implementasi STEM yang berkelanjutan menuntut ekosistem terpadu yang mencakup kebijakan, kompetensi guru, kurikulum adaptif, infrastruktur teknologi, dan kolaborasi lintas lembaga.

## **2. Desain Pembelajaran Berbasis STEM**

Perancangan pembelajaran berbasis STEM menuntut pendekatan sistematis yang menekankan aktivitas autentik serta integrasi lintas disiplin yang koheren. Astutik et al. (2024) menunjukkan bahwa e-book matematika berbasis Project-Based Learning (PjBL)–STEM berbantuan Geometry Calculator efektif meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi sebagai media digital adaptif. Temuan ini diperkuat oleh Fatqurhohman et al. (2025) yang menegaskan bahwa kolaborasi berbasis teknologi dalam integrasi STEM mendorong berpikir kritis. Implikasinya, desain berbasis proyek menuntut guru menyusun urutan tugas yang secara bertahap mengaitkan konsep matematika dengan konteks rekayasa dan teknologi, sekaligus memastikan keselarasan tujuan matematis, kompleksitas proyek, dan scaffolding pedagogis yang memadai.

Penguatan desain STEM juga berkembang melalui model co-design yang melibatkan kolaborasi calon guru dan guru berpengalaman. Dilling et al. (2024) menunjukkan Teacher Design Teams mampu meningkatkan kompetensi pedagogis melalui siklus perencanaan, implementasi, dan refleksi bersama, sejalan dengan bukti bahwa integrasi teknologi memperkuat pengembangan TPACK calon guru (Lachner et al., 2021; Tondeur et al., 2020). Selain itu, diferensiasi pembelajaran yang mempertimbangkan kesiapan, minat, dan latar budaya siswa terbukti krusial (Van den Kieboom & Groleau, 2022; Hackenberg et al., 2021). Integrasi teknologi digital semakin menegaskan urgensi desain yang reflektif dan terencana: e-learning dan visualisasi digital meningkatkan pemahaman konseptual serta penalaran spasial (Fitriawan et al., 2026; Saha et al., 2021; Yohannes & Chen, 2023), meskipun literasi teknologi bertahap tetap diperlukan agar penggunaan perangkat lunak tidak kontraproduktif (Sal'kov, 2021; García-Martín & García-Peñalvo, 2025).

## **3. Pengembangan Kompetensi Calon Guru Matematika**

Desain pembelajaran berbasis STEM menuntut perencanaan yang sistematis, autentik, dan koheren antardisiplin. Astutik et al. (2024) menunjukkan bahwa e-book PjBL-STEM berbantuan Geometry Calculator efektif sebagai media digital adaptif untuk mendorong berpikir tingkat tinggi. Sejalan dengan itu, pembelajaran STEM perlu dirancang melalui tugas proyek yang bertahap, kontekstual, dan selaras dengan tujuan matematis agar matematika berfungsi sebagai sarana penalaran, bukan sekadar prosedur (Rahman et al., 2021; Diego-Mantecon et al., 2021). Karena itu, desain STEM yang kuat mensyaratkan scaffolding pedagogis yang jelas, pemilihan konteks yang bermakna, dan urutan aktivitas yang mengaitkan konsep, teknologi, dan rekayasa secara proporsional.

Pada level pengembangan profesional, model co-design memperkuat kualitas rancangan pembelajaran. Dilling et al. (2024) membuktikan bahwa Teacher Design Teams mampu mengembangkan kompetensi pedagogis calon guru melalui siklus perencanaan, implementasi, dan refleksi bersama. Temuan ini sejalan dengan pentingnya TPACK dan kompetensi digital sebagai fondasi desain instruksional STEM yang efektif (Lachner et al., 2021; Tondeur et al., 2020; García-Martín & García-Peñalvo, 2025). Dalam konteks penggunaan GeoGebra dan perangkat digital, desain pembelajaran juga perlu mempertimbangkan kesiapan teknis dan persepsi guru agar teknologi benar-benar mendukung pemahaman konseptual (Yildiz & Arpaci, 2024; Yohannes & Chen, 2023).

Selain itu, desain STEM yang inklusif harus responsif terhadap keragaman kesiapan, minat, dan latar belakang siswa (Van den Kieboom & Groleau, 2022). Fitriawan et al. (2026) menunjukkan bahwa integrasi visualisasi digital dan e-learning meningkatkan penalaran spasial, tetapi Sal'kov (2021) mengingatkan bahwa tanpa pelatihan teknis awal, teknologi justru dapat menghambat pembelajaran. Dengan demikian, desain STEM yang optimal menuntut integrasi pedagogik reflektif, sekuensi teknologi yang terencana, dan tugas autentik yang mendorong penalaran matematis mendalam.

#### 4. Representasi Matematis dan Kemampuan Spasial

Representasi matematis dan kemampuan spasial merupakan fondasi kognitif utama dalam pembelajaran geometri berbasis STEM. Representasi matematis mencakup ekspresi visual, simbolik, numerik, dan verbal yang berfungsi sebagai sarana konstruksi makna dan komunikasi ide matematis (Fatqurhohman et al., 2025; Chen et al., 2025). Dalam konteks STEAM, koordinasi multi-representasi menjadi semakin kompleks karena melibatkan integrasi representasi artistik dan matematis secara simultan (Isnawan et al., 2025). Namun, penelitian menunjukkan munculnya dualisme representasional pada calon guru, yaitu kesulitan mengoordinasikan berbagai representasi dalam satu tugas geometri terintegrasi (Pramasdyahsari et al., 2025). Temuan ini menegaskan bahwa kemampuan representasi tidak berkembang secara otomatis melalui aktivitas STEAM, melainkan memerlukan scaffolding eksplisit dan desain tugas yang terstruktur (Hackenberg et al., 2021).

Kemampuan spasial meliputi visualisasi, rotasi mental, dan manipulasi objek, menjadi komponen krusial dalam pembelajaran geometri digital. Integrasi teknologi seperti GeoGebra, augmented reality, dan visualisasi dinamis terbukti meningkatkan koneksi antarrepresentasi dan penalaran matematis (Fonseca & Henriques, 2023; Kramarenko et al., 2023; Yohannes & Chen, 2023). Sejumlah studi menunjukkan bahwa penggunaan GeoGebra secara konsisten meningkatkan kemampuan spasial, pemahaman konsep, serta sikap terhadap matematika (Saha et al., 2021; Wijaya et al., 2022; Aliu et al., 2025). Meski demikian, integrasi teknologi tanpa pelatihan awal justru dapat menghambat pembelajaran karena beban kognitif teknis meningkat (Sal'kov, 2021). Oleh sebab itu, literasi teknologi perlu diposisikan sebagai prasyarat pedagogis (Yildiz & Arpaci, 2024).

Dalam konteks tugas lintas disiplin, fleksibilitas representasional menjadi indikator penting identitas matematis siswa (Fatqurhohman & Firdaus, 2024). Lingkungan belajar terdiferensiasi menunjukkan variasi signifikan dalam cara siswa berrepresentasi (Chen et al., 2025), sehingga guru perlu merancang tugas yang mendorong refleksi visualisasi dan dialog matematis (Zhang et al., 2025). Secara keseluruhan, pengembangan representasi matematis dan kemampuan spasial menuntut desain pedagogis yang secara deliberatif mengintegrasikan

teknologi visualisasi, diferensiasi pembelajaran, dan eksplorasi multi-representasi sebagai dasar penalaran geometri yang mendalam.

## 5. Integrasi dan Tantangan Pembelajaran STEM

Integrasi pembelajaran STEM dalam pendidikan matematika menawarkan potensi transformatif sekaligus memunculkan tantangan konseptual dan praktis yang kompleks. Pendekatan STEAM memungkinkan matematika terhubung dengan sains, teknologi, rekayasa, dan seni melalui konteks autentik yang meningkatkan keterlibatan dan pemahaman bermakna siswa (Isnawan et al., 2025; Astutik et al., 2024). Namun, implementasi berbasis proyek sering menghadapi ketegangan epistemologis antara kedalaman konten matematika dan tuntutan transdisiplinartitas (Diego-Mantecon et al., 2021). Guru matematika kerap menghindari kompleksitas lintas disiplin karena dianggap melampaui batas keilmuan mereka, sehingga integrasi STEM berisiko bersifat superfisial. Kondisi ini menegaskan perlunya kurikulum yang secara eksplisit mendefinisikan peran matematika dalam ekosistem pembelajaran transdisiplin serta didukung penguatan kompetensi pedagogis berbasis TPACK (Lachner et al., 2021; Tondeur et al., 2020).

Tantangan lain berkaitan dengan koordinasi antara kreativitas dan rigor matematis dalam tugas geometri berbasis STEAM. Sebagian calon guru menekankan ekspresi artistik dengan mengorbankan ketepatan matematis, sementara sebagian lain mempertahankan presisi kalkulasi namun minim kreativitas (Pramasdyahsari et al., 2025). Ketidakseimbangan ini menunjukkan bahwa kreativitas dan rigor belum dipahami sebagai dimensi komplementer dalam pembelajaran matematika. Keterbatasan pedagogis guru dalam merancang tugas autentik memperparah kondisi tersebut (Diana et al., 2021). Oleh karena itu, pengembangan scaffolding yang terstruktur, asesmen autentik, serta integrasi teknologi visualisasi menjadi strategi penting untuk menyeimbangkan kedua dimensi (Saha et al., 2021; Yohannes & Chen, 2023).

Selain tantangan konseptual, implementasi STEM menghadapi hambatan struktural yang signifikan. Penelitian STEAM+X masih terbatas secara geografis dan konten sehingga generalisasi temuan sulit dilakukan (Isnawan et al., 2025). Studi co-design juga bersifat kontekstual dan memerlukan validasi empiris lebih luas (Dilling et al., 2024). Skalabilitas implementasi STEM menuntut dukungan sistemik berkelanjutan melalui kebijakan kurikulum, pengembangan profesional guru, dan kolaborasi lintas lembaga (Rahman et al., 2021; García-Martín & García-Peñalvo, 2025). Dengan demikian, penguatan ekosistem pendidikan menjadi prasyarat utama keberlanjutan inovasi pembelajaran STEM.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi STEM dalam pendidikan matematika merupakan pergeseran paradigmatik dari pembelajaran prosedural menuju pengalaman belajar autentik, kontekstual, dan transdisipliner. Pembelajaran geometri berbasis STEM terbukti berkontribusi simultan terhadap penguatan numerasi, kemampuan spasial, dan representasi matematis calon guru, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kesiapan pedagogis, kurikulum yang adaptif, serta dukungan infrastruktur teknologi yang memadai. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi tidak semata ditentukan oleh adopsi teknologi, melainkan oleh kualitas desain pembelajaran berbasis proyek yang terstruktur, scaffolding yang sistematis, serta kolaborasi reflektif antara calon guru dan guru berpengalaman. Dalam kerangka tersebut, matematika bertransformasi dari disiplin prosedural menjadi wahana

penalaran, pemodelan, dan pemecahan masalah yang relevan dengan tuntutan pembelajaran abad ke-21.

Lebih lanjut, kreativitas dan rigor matematis bukan dikotomi, melainkan dimensi komplementer yang harus dikoordinasikan secara deliberatif melalui pengalaman belajar yang dirancang secara cermat. Pengembangan kemampuan representasi dan spasial terbukti optimal melalui pemanfaatan teknologi visualisasi dinamis yang memediasi koneksi antarrepresentasi dan memperdalam penalaran geometri. Namun, persistensi dualisme representasional dan ketegangan epistemologis pada calon guru mengindikasikan perlunya kurikulum pendidikan guru yang secara eksplisit menumbuhkan koordinasi representasi, refleksi pedagogis, dan fleksibilitas instruksional. Secara konseptual, penelitian ini menawarkan kerangka integratif yang memposisikan numerasi, representasi, kemampuan spasial, dan desain pembelajaran STEM sebagai sistem yang saling menopang, sekaligus menegaskan urgensi sinergi kebijakan, pengembangan profesional berkelanjutan, dan kolaborasi lintas lembaga guna memastikan keberlanjutan implementasi STEM dalam pendidikan matematika.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan sejawat dan para penelaah (peer reviewers) atas masukan konstruktif serta saran berharga yang berkontribusi dalam meningkatkan kualitas dan ketelitian naskah ini. Penelitian ini sepenuhnya didanai secara mandiri oleh penulis tanpa dukungan pendanaan dari institusi maupun lembaga eksternal mana pun.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aliu, E. R., Jusufi Zenku, T., Iseni, E., & Rexhepi, S. (2025). The advantage of using GeoGebra in the understanding of vectors and comparison with the classical method. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 20(1), em0824. <https://doi.org/10.29333/iejme/16007>
- Astutik, I. D., Pramasdyahsari, A. S., & Setyawati, R. D. (2024). Development of PJBL-STEM Based Ebooks Assisted by Geometry Calculator to Foster Students' Critical Thinking Ability. *Jurnal Matematika Kreatif-Inovatif*, 15(1), 69–82. <https://doi.org/10.15294/eddrkj25>
- Awaji, B. M., Khalil, I., & Al-Zahrani, A. (2025). A bibliometrics study of two decades of GeoGebra research in mathematics education. *Journal of Educational and Social Research*, 15(1), 130–150. <https://doi.org/10.36941/jesr-2025-0011>
- Bhagat, K. K., Chang, C.-Y., & Huang, R. (2017). Integrating GeoGebra with TPACK in improving pre-service mathematics teachers' professional development. In *Proceedings of the IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies* (pp. 313–314). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2017.9>
- Bilousova, L. I., Gryzun, L. E., Lytvynova, S. H., & Pikalova, V. V. (2022). Modelling in GeoGebra in the context of holistic approach realization in mathematical training of pre-service specialists. In *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology* (pp. 499–510). <https://doi.org/10.5220/0010925700003364>
- Chen, W. L., Chen, X. L., Darmawan, P., & Fatqurhohman, F. (2025). Evaluation of junior high school students' representation skills in differentiated learning. *SMARTH: Journal of Mathematics Education and Learning*, 1(2), 63–76.

- Cheng, Q., Zhang, S., Shi, Q., & Shen, J. (2024). Comparing STEM and non-STEM teachers' self-efficacy in multicultural classrooms: Insights from TALIS 2018 U.S. data. *Journal for STEM Education Research*, 8, 303–329. <https://doi.org/10.1007/s41979-024-00126-z>
- Dahal, N., Pant, B. P., Shrestha, I. M., & Manandhar, N. K. (2022). Use of GeoGebra in teaching and learning geometric transformation in school mathematics. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(8), 65–78. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i08.29575>
- Diana, N., Turmudi, & Yohannes. (2021). Analysis of teachers' difficulties in implementing STEM approach in learning: A study literature. *Journal of Physics: Conference Series*, 1806(1), 012219. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1806/1/012219>
- Dilling, F., Witzke, I., Hornberger, K., & Trgalova, J. (2024). Co-designing teaching with digital technologies: A case study on mixed pre-service and in-service mathematics teacher design teams. *ZDM–Mathematics Education*, 56(4), 667–680. <https://doi.org/10.1007/s11858-024-01623-6>
- Diego-Mantecon, J.-M., Prodromou, T., Lavicza, Z., Blanco, T. F., & Ortiz-Laso, Z. (2021). An attempt to evaluate STEAM project-based instruction from a school mathematics perspective. *ZDM–Mathematics Education*, 53(5), 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/s11858-021-01303-9>
- Drushlyak, M. G., Semenikhina, O. V., Proshkin, V. V., Kharchenko, S. Y., & Lukashova, T. D. (2021). Methodology of formation of modeling skills based on a constructive approach (on the example of GeoGebra). *CTE Workshop Proceedings*, 8, 458–472. <https://doi.org/10.55056/cte.300>
- Fatimah, A. T. (2019). The creativity of pre-service mathematics teachers in designing GeoGebra-assisted mathematical task. *Journal of Physics: Conference Series*, 1280(4), 042026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1280/4/042026>
- Fatqurhohman, F., & Firdaus, H. P. (2024). Analysis of imperfection of mathematical identity in problem-solving. *Matematika dan Pembelajaran*, 12(2), 166–182. <https://doi.org/10.33477/mp.v12i2.8193>
- Fatqurhohman, F., Malini, A. N., & Mendyas, F. (2025). Mathematical representations of students with dyscalculia in differentiated learning environments: A conceptual review. *SMARTH: Journal of Mathematics Education and Learning*, 1(1), 37–50.
- Fatqurhohman, F., Murniasih, T. R., Anwar, R. B., & Halim, F. A. (2025). The role of UbD in developing students' mathematical problem-solving skills: A literature review. *RESET: Review of Education, Science, and Technology*, 1(1), 29–42. <https://doi.org/10.66031/reset.v1i1.18>
- Fatqurhohman, F., Syam, H., Puspasari, R., Niam, F., & Surur, A. M. (2025). STEM digital collaboration to enhance critical thinking skills of secondary school students: A literature review. *JINEA: Journal of Innovation in Education and Learning*, 1(1), 37–50. <https://doi.org/10.66031/jinea.112025.8>
- Fonseca, V. G. d., & Henriques, A. C. C. B. (2023). Pre-service mathematics teachers using GeoGebra to learn about instantaneous rate of change. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 54(4), 534–556. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2021.1958942>
- Fitriawan, D., Siregar, N., Hartoyo, A., & Sulistyowati, E. (2026). Developing STEM integrated analysis geometry learning materials through digital visualization and e-

- learning platforms. *Al-Jabar: Jurnal Pendidikan Matematika*, 17(1), 89–105. <https://doi.org/10.24042/ajpm.v17i1.29388>
- García-Martín, J., & García-Peñalvo, F. J. (2025). Digital competence in STEM teacher training: A systematic review of technology integration models. *Computers & Education: Artificial Intelligence*, 8, 100321. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100321>
- Hackenberg, A. J., Creager, M., & Eker, A. (2021). Teaching practices for differentiating mathematics instruction for middle school students. *Mathematical Thinking and Learning*, 23(3), 95–124. <https://doi.org/10.1080/10986065.2020.1731656>
- Hardianti, A., Fatqurhohman, F., & Juliastuti, I. A. (2025). Penerapan model problem based learning berbantuan Geogebra untuk meningkatkan hasil belajar siswa. *Media Pendidikan Matematika*, 13(1), 75–84. <https://doi.org/10.33394/mpm.v13i1.15439>
- Havelkova, V. (2013). GeoGebra in teaching linear algebra. In *Proceedings of the European Conference on e-Learning* (pp. 581–589).
- Isnawan, M. G., Pochulu, M. D., García-García, J., Alsulami, N. M., & Sudirman, S. (2025). STEAM+X in mathematics education: A systematic literature review. *Journal of Mathematics Instruction, Social Research and Opinion*, 4(2), 465–480. <https://doi.org/10.58421/misro.v4i2.451>
- Kasiram, M., & Muhassanah, N. (2024). Integrating GeoGebra in Indonesian secondary mathematics classrooms: Challenges and opportunities. *Mathematics Education Research Journal*, 36(2), 589–610. <https://doi.org/10.1007/s13394-023-00452-1>
- Kramarenko, T. H., Pylypenko, O. S., & Moiseienko, M. V. (2023). Enhancing mathematics education with GeoGebra and augmented reality. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Augmented Reality in Education* (pp. 117–126). <https://ceur-ws.org/Vol-3844/paper03.pdf>
- Kramarenko, T. H., Pylypenko, O. S., & Muzyka, I. O. (2020). Application of GeoGebra in stereometry teaching. *CTE Workshop Proceedings*, 7, 705–718. <https://doi.org/10.55056/cte.418>
- Lachner, A., Fabian, A., Franke, U., Preiß, J., Jacob, L., Fuhrer, C., Küchler, U., Paravicini, W., Randler, C., & Thomas, P. (2021). Fostering pre-service teachers' technological pedagogical content knowledge (TPACK): A quasi-experimental field study. *Computers & Education*, 174, 104304. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104304>
- Marange, I. Y., & Tatira, B. (2024). Gender dynamics in GeoGebra integration: In-service mathematics teachers' development. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 20(5), em2457. <https://doi.org/10.29333/EJMSTE/14629>
- Munyaruhengeri, J. P. A., Umugiraneza, O., Ndagijimana, J. B., & Hakizimana, T. (2025). Exploring teachers' perceptions of GeoGebra's usefulness for learning limits and continuity. *Social Sciences & Humanities Open*, 11, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101412>
- Olsson, J., & Granberg, C. (2019). Dynamic software, task solving with or without guidelines, and learning outcomes. *Technology, Knowledge and Learning*, 24(3), 419–436. <https://doi.org/10.1007/s10758-018-9352-5>
- Rahman, N. A., Rosli, R., Rambely, A. S., & Halim, L. (2021). Mathematics teachers' practices of STEM education: A systematic literature review. *European Journal of Educational Research*, 10(3), 1541–1559. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.10.3.1541>

- Sal'kov, N. (2021). Quality of geometric education in various approaches to teaching methods. *Geometry & Graphics*, 8(4), 47–60. <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2021-8-4-47-60>
- Saidi, S., Suryowati, E., Sholihah, U., & Fatqurhohman, F. (2025). Literature review on the role of school principals in the society 5.0: strategies and future challenges. *RESET: Review of Education, Science, and Technology*, 1(1), 55–64. <https://doi.org/10.66031/reset.v1i1.20>
- Saha, R. A., Ayub, A. F. M., & Tarmizi, R. A. (2021). The effects of GeoGebra on students' achievement and attitude in learning mathematics: A meta-analysis. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 52(7), 1003–1020. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2020.1831053>
- Said, N. N., & Darmawan, D. (2023). GeoGebra-based learning to enhance mathematical reasoning and motivation among Indonesian high school students. *International Journal of Instruction*, 16(3), 421–438. <https://doi.org/10.29333/iji.2023.16323a>
- Salleh, F. M., & Mat, N. (2024). TPACK development among pre-service teachers through GeoGebra-integrated lesson study. *Journal of Technology and Science Education*, 14(1), 112–127. <https://doi.org/10.3926/jotse.2267>
- Şimşek, M., & Yazici, N. (2021). Examining the digital learning material preparation competencies of pre-service mathematics teachers. *Participatory Educational Research*, 8(3), 323–350. <https://doi.org/10.17275/per.21.68.8.3>
- Tondeur, J., Scherer, R., Siddiq, F., & Baran, E. (2020). Enhancing pre-service teachers' technological pedagogical content knowledge (TPACK): A mixed-method study. *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 319–350. <https://doi.org/10.1007/s11423-019-09692-1>
- Van den Kieboom, L. A., & Groleau, S. V. (2022). Pre-service teacher planning for differentiation of instruction in mathematics classrooms. *Educational Studies in Mathematics*, 111(2), 225–252. <https://doi.org/10.1007/s10649-022-10149-1>
- Wijaya, T. T., Purnama, Y., & Sulistiawati, R. (2022). The use of GeoGebra to improve students' spatial ability in Indonesian vocational schools. *Journal of Physics: Conference Series*, 2215(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2215/1/012032>
- Yildiz, E., & Arpaci, I. (2024). Understanding pre-service mathematics teachers' intentions to use GeoGebra: The role of technological pedagogical content knowledge. *Education and Information Technologies*, 29, 18817–18838. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12614-1>
- Yohannes, A., & Chen, H.-L. (2023). GeoGebra in mathematics education: A systematic review. *Interactive Learning Environments*, 31(10), 5682–5697. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.2016861>
- Zhang, Y., Xin, J. J., Yu, Z., Liu, Y., Zhao, W., Li, N., Li, Y., & Chen, G. (2025). Enhancing preservice teachers' use of dialogic teaching and dynamic visualizations in mathematics classes. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-025-10558-7>