

PEMANFAATAN GEOGEBRA DALAM PEMBELAJARAN MATEMATIKA: STUDI IMPLEMENTASI PBL DAN TPACK PADA MATERI DIMENSI TIGA

Oleh: Handri Muliadi¹, Anita Adinda²
UIN Syahada Padangsidempuan

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas pemanfaatan GeoGebra dalam pembelajaran matematika berbasis Problem-Based Learning (PBL) dengan pendekatan Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) pada materi geometri dimensi tiga. Subjek penelitian adalah 30 siswa kelas XII IPA dan tiga guru matematika di SMA Negeri 1 Sihapas Barumon, dengan objek penelitian berupa proses pembelajaran matematika menggunakan GeoGebra yang terintegrasi PBL dan TPACK. Metode penelitian menggunakan pendekatan mixed methods dengan desain eksplanatori sequential yang terdiri atas pengumpulan data kuantitatif melalui tes dan angket, serta data kualitatif melalui observasi dan wawancara. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam nilai rata-rata siswa dari 78,5 menjadi 87,2, peningkatan sikap afektif seperti motivasi belajar dan kepercayaan diri, serta peningkatan keterampilan teknis dan kolaboratif siswa. Kesimpulannya, integrasi GeoGebra dalam kerangka PBL dan TPACK secara efektif meningkatkan pemahaman konsep, partisipasi aktif, dan keterampilan abad ke-21 siswa dalam pembelajaran matematika geometri ruang.

Kata kunci: GeoGebra; Problem-Based Learning; TPACK; geometri ruang; SMA Negeri 1 Sihapas Barumon

Abstract

This study aims to evaluate the effectiveness of integrating GeoGebra in mathematics instruction through a Problem-Based Learning (PBL) model supported by the Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) framework in teaching three-dimensional geometry. The research subjects consisted of 30 twelfth-grade science students and three mathematics teachers from SMA Negeri 1 Sihapas Barumon, while the object of the study was the implementation process of GeoGebra-assisted learning. A mixed-methods approach with an explanatory sequential design was employed, combining quantitative data (tests and attitude questionnaires) and qualitative data (observations and structured interviews). The results revealed a significant improvement in students' conceptual understanding, with average test scores increasing from 78.5 to 87.2. Additionally, there was a positive shift in students' affective responses, including enhanced motivation and self-confidence, as well as increased technical and collaborative skills. In conclusion, the integration of GeoGebra within the PBL-TPACK framework effectively enhances spatial reasoning, learning engagement, and 21st-century skills in mathematics education.

Keywords: GeoGebra; Problem-Based Learning; TPACK; three-dimensional geometry; SMA Negeri 1 Sihapas Barumon

1. Pendahuluan

Matematika sebagai mata pelajaran inti pada jenjang Sekolah Menengah Atas (SMA) memegang peranan penting dalam membentuk keterampilan berpikir tingkat tinggi, seperti analisis, sintesis, dan evaluasi. Salah satu cabang penting dalam matematika adalah geometri ruang tiga dimensi, yang menuntut kemampuan representasi spasial tinggi. Namun, data internal SMA Negeri 1 Sihapas Barumon menunjukkan bahwa 65% siswa mengalami kesulitan dalam menyelesaikan soal geometri ruang pada Ulangan Tengah Semester Tahun Ajaran 2023/2024, khususnya terkait perhitungan volume dan jarak titik ke bidang.

Hasil angket sikap menunjukkan bahwa 72% siswa merasa kurang percaya diri dalam mengerjakan soal geometri ruang, yang disebabkan oleh keterbatasan ilustrasi dua dimensi pada buku teks dalam merepresentasikan bentuk tiga dimensi seperti balok, kubus, limas, dan prisma.

Wawancara dengan tiga guru matematika mengungkapkan bahwa keterbatasan fasilitas laboratorium komputer dan kurangnya pelatihan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) menjadi kendala utama dalam mengintegrasikan media pembelajaran visual dan interaktif.

Dalam menghadapi tantangan tersebut, penelitian ini menawarkan penerapan **GeoGebra**, sebuah perangkat lunak matematika dinamis berbasis open-source yang memungkinkan visualisasi dan manipulasi objek geometri 3D secara real-time. Fitur-fitur seperti *foldable grid*, pengukuran otomatis, dan *slider* parameter dapat membantu siswa mengeksplorasi sifat-sifat bangun ruang dengan lebih konkret dan interaktif. Penggunaan GeoGebra diyakini dapat mengatasi miskonsepsi, meningkatkan pemahaman konsep, dan memfasilitasi pembelajaran visual yang selama ini terbatas.

Sejumlah penelitian mendukung efektivitas GeoGebra dalam pembelajaran geometri ruang. Nasrulloh dan Sugandi (2023) menyatakan bahwa bahan ajar geometri dimensi tiga berbasis GeoGebra terbukti valid, praktis, dan efektif dalam meningkatkan kemampuan pemecahan masalah siswa. Supriyadi dkk. (2023) melaporkan bahwa penggunaan GeoGebra meningkatkan kemampuan penalaran matematis siswa hingga 94,9%. Fajriadi dkk. (2022) juga mengembangkan *GeoGebra Book* berbasis model ADDIE yang dinilai sangat baik dari sisi desain dan mendapat respons positif dari siswa. Sementara itu, Widyastiti dkk. (2024) mencatat adanya peningkatan hasil belajar dari 42,37% menjadi 56,59% setelah siklus pembelajaran berbasis GeoGebra.

Sebagai pelengkap pendekatan teknologi, model pembelajaran Problem-Based Learning (PBL) dipilih karena mendorong siswa aktif memecahkan masalah nyata. PBL merupakan model pembelajaran yang menempatkan masalah kontekstual sebagai titik awal untuk mengeksplorasi pengetahuan, membangun pemahaman, dan mengembangkan keterampilan berpikir kritis (Hmelo-Silver, 2004). Menurut Rahmawati dan Yunita (2020), model ini mencakup lima tahapan utama: (1) orientasi terhadap masalah, (2) pengorganisasian siswa dan identifikasi masalah, (3) investigasi mandiri dan kelompok, (4) pengembangan dan presentasi solusi, serta (5) analisis dan evaluasi proses pembelajaran.

PBL memiliki sejumlah keunggulan dalam pembelajaran matematika, antara lain: 1) Meningkatkan kemampuan pemecahan masalah (problem-solving) karena siswa terbiasa menganalisis dan mencari solusi atas persoalan nyata yang kompleks dan terbuka (Rusman, 2017); 2) Mendorong kolaborasi dan komunikasi, karena proses penyelesaian masalah dilakukan secara berkelompok dan menuntut diskusi aktif antarsiswa (Arends, 2012); 3) Meningkatkan keterampilan metakognitif, karena siswa terlatih merefleksikan proses berpikir dan strategi yang digunakan selama investigasi (Hmelo-Silver, 2004); 4) Meningkatkan motivasi belajar siswa, karena permasalahan yang disajikan biasanya relevan dengan konteks kehidupan nyata mereka sehingga meningkatkan keterlibatan dan rasa memiliki terhadap proses belajar (Savery, 2006); 5) Membangun daya tahan belajar (learning endurance) karena pembelajaran bersifat aktif, bermakna, dan menuntut keterlibatan berkelanjutan dari siswa (Rusman, 2017).

Dalam konteks lokal, penerapan PBL difokuskan pada studi kasus seperti perencanaan lahan pertanian terasering, yang memerlukan perhitungan volume tangki, luas bidang miring, dan sudut kemiringan—membuat geometri ruang terasa lebih relevan dan bermakna bagi siswa. GeoGebra digunakan sebagai media bantu eksploratif, memungkinkan siswa memvisualisasikan dan memanipulasi bentuk ruang secara interaktif selama proses penyelesaian masalah. Penggabungan PBL dengan GeoGebra tidak hanya mendorong keterlibatan aktif, tetapi juga memperkuat koneksi antara pengetahuan konseptual dan aplikasi nyata dalam kehidupan sehari-hari.

Agar integrasi antara konten, pedagogi, dan teknologi dapat dilakukan secara optimal, penelitian ini menggunakan kerangka Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) yang dikembangkan oleh Mishra dan Koehler (2006). TPACK menggabungkan tiga domain pengetahuan utama: 1) Content Knowledge (CK): penguasaan konsep bangun ruang tiga dimensi, 2) Pedagogical Knowledge (PK): penerapan strategi PBL, dan 3) Technological Knowledge (TK): penggunaan GeoGebra untuk mendukung pembelajaran.

Interseksi ketiganya menghasilkan desain pembelajaran yang bermakna, efektif, dan berbasis teknologi. Utami dan Firman (2019) menunjukkan bahwa guru dengan kompetensi TPACK tinggi lebih kreatif dalam menyusun aktivitas pembelajaran digital, sehingga mendorong partisipasi aktif siswa.

GeoGebra sebagai perangkat lunak berbasis 3D menyediakan berbagai fitur unggulan, seperti: 1) Konstruksi visual interaktif dari bangun ruang seperti balok, prisma, limas, dan kerucut; 2) Manipulasi objek 3D secara real-time untuk meningkatkan pemahaman spasial; 3) Slider parameter untuk melihat efek perubahan panjang sisi, tinggi, atau sudut kemiringan terhadap volume; 4) Pengukuran otomatis untuk menghitung panjang, sudut, dan volume secara akurat; 5) Keterkaitan antara aljabar dan visualisasi geometri (dual coding), yang memperkuat pemahaman konseptual; 6) Lembar kerja digital dan kolaboratif melalui GeoGebra Classroom; 7) Akses terbuka dan komunitas global, yang memungkinkan berbagi dan adaptasi sumber belajar.

Arifyan dan Santoso (2021) menunjukkan bahwa penggunaan GeoGebra meningkatkan keterampilan visualisasi spasial siswa hingga 25% dan mengurangi miskonsepsi. Rahmawati dan Yunita (2020) juga melaporkan bahwa 87% siswa merasa lebih percaya diri menghadapi soal volume dan sudut ruang setelah berlatih menggunakan GeoGebra.

Dengan menggabungkan TPACK, PBL, dan GeoGebra, diharapkan tercipta pembelajaran geometri ruang tiga dimensi yang tidak hanya interaktif, tetapi juga kontekstual, menyenangkan, dan mampu meningkatkan pemahaman serta motivasi belajar siswa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed methods deskriptif dengan desain eksplanatori sequential. Desain ini memungkinkan peneliti mengintegrasikan data kuantitatif dan kualitatif guna memperoleh pemahaman yang utuh dan mendalam mengenai efektivitas pembelajaran matematika berbasis GeoGebra dalam kerangka Problem-Based Learning (PBL) dan Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK). Desain eksplanatori sequential diawali dengan pengumpulan dan analisis data kuantitatif, yang kemudian diikuti oleh eksplorasi data kualitatif untuk menjelaskan hasil secara lebih rinci. Pendekatan ini sangat relevan untuk studi pendidikan yang mengevaluasi implementasi teknologi dan pendekatan pedagogis inovatif di ruang kelas (Creswell & Plano Clark, 2018; Utami & Firman, 2019).

Subjek penelitian ini adalah 30 siswa kelas XII IPA SMA Negeri 1 Sihapas Barumun tahun pelajaran 2023/2024. Selain itu, tiga guru matematika dan enam siswa dipilih secara purposive sampling untuk mengikuti wawancara mendalam (Sugiyono, 2022). Sekolah ini dipilih karena memiliki fasilitas komputer dasar, akses internet yang terbatas, dan guru yang telah mengikuti pelatihan dasar Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Observasi pembelajaran dilakukan selama empat kali pertemuan.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi: (1) Tes Pengetahuan yang terdiri dari 30 soal pilihan ganda mengenai volume, jarak titik ke bidang, dan hubungan sudut dalam bangun ruang. Tes ini telah divalidasi oleh ahli matematika dengan reliabilitas Cronbach's alpha sebesar 0,82, yang menunjukkan tingkat reliabilitas tinggi (Arikunto, 2019). (2) Angket Sikap berisi 20 item skala Likert yang mengukur persepsi siswa terhadap pembelajaran matematika, penggunaan teknologi, dan pendekatan PBL, dengan validitas konten yang diverifikasi oleh dosen ahli pendidikan matematika (Azwar, 2016). (3) Lembar Observasi Keterampilan, yang dirancang untuk menilai kolaborasi, pemanfaatan teknologi, dan dokumentasi kerja kelompok siswa. Lembar ini menggunakan skala 1–4 dan memiliki konsistensi antarpemilai (Inter-Rater Reliability/IRR sebesar 0,78) (Miles, Huberman, & Saldaña, 2014). (4) Pedoman Wawancara Terstruktur, yang memuat 10 pertanyaan terbuka untuk menggali pengalaman belajar siswa dan guru terkait penggunaan GeoGebra serta penerapan PBL.

Penelitian dilaksanakan melalui empat tahap. Tahap pertama adalah persiapan, yang mencakup validasi dan uji coba instrumen, pelatihan GeoGebra untuk guru, dan sosialisasi kegiatan kepada siswa. Tahap kedua adalah fase kuantitatif, di mana siswa mengikuti pre-test

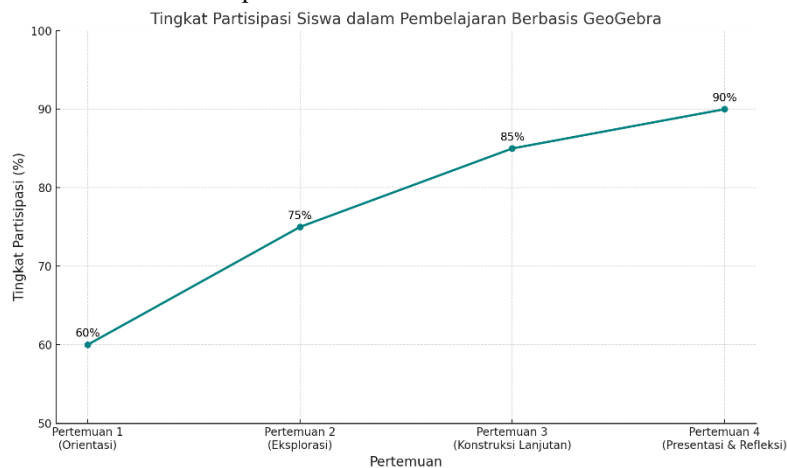
dan angket awal, dilanjutkan dengan pembelajaran berbasis PBL yang terintegrasi dengan GeoGebra selama empat pertemuan, kemudian diakhiri dengan post-test dan angket akhir. Tahap ketiga adalah fase kualitatif, berupa observasi pembelajaran pada setiap sesi, khususnya saat kegiatan eksplorasi dan presentasi kelompok, serta wawancara terhadap guru dan siswa terpilih. Tahap terakhir adalah analisis data, yang dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dianalisis dengan statistik deskriptif dan uji-t berpasangan (paired t-test) dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ untuk mengukur peningkatan hasil belajar secara signifikan (Santoso, 2021). Sementara itu, data kualitatif dianalisis melalui reduksi data, kategorisasi tematik, dan triangulasi untuk menjamin keabsahan hasil (Miles et al., 2014).

Validitas isi semua instrumen diperoleh dari hasil review ahli di bidang pendidikan matematika dan teknologi pembelajaran, sedangkan reliabilitas tes dan angket diuji menggunakan Cronbach's alpha, serta konsistensi antarpemilai untuk lembar observasi. Validitas temuan kualitatif dijamin melalui teknik member checking, peer debriefing, dan dokumentasi artefak siswa seperti LKPD dan model GeoGebra (Lincoln & Guba, 1985). Keseluruhan metode ini disusun untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dapat saling melengkapi, sehingga memberikan gambaran yang komprehensif terhadap implementasi model pembelajaran berbasis GeoGebra dalam meningkatkan mutu pembelajaran matematika.

3. Hasil dan Pembahasan Hasil

Analisis hasil penelitian dilakukan secara terintegrasi antara data kuantitatif dan kualitatif untuk memberikan pemahaman mendalam terkait dampak pemanfaatan GeoGebra dalam PBL berbasis TPACK.

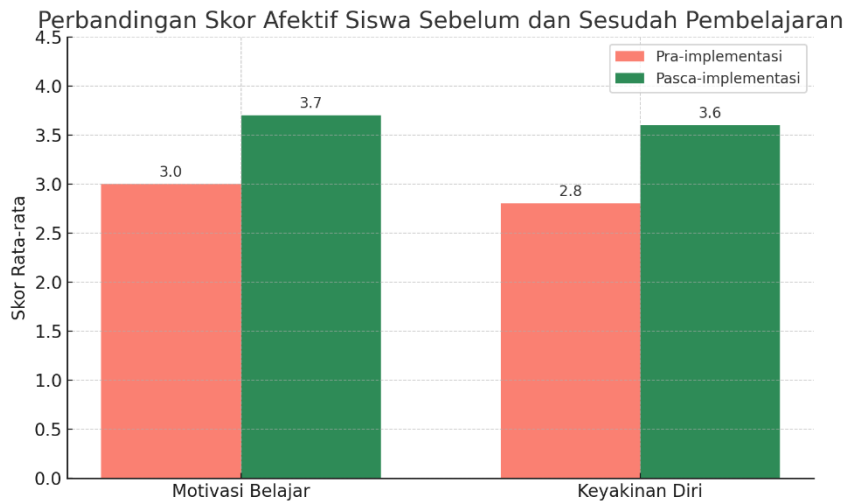
Berikut adalah diagram garis yang menunjukkan peningkatan partisipasi siswa selama empat pertemuan pembelajaran berbasis GeoGebra. Setiap pertemuan menunjukkan tren kenaikan yang signifikan, mulai dari 60% pada orientasi hingga 90% saat presentasi dan refleksi. Diagram ini menggambarkan perkembangan keterlibatan siswa seiring dengan meningkatnya penguasaan mereka terhadap antarmuka dan fitur GeoGebra.



Gambar 1. Diagram Garis Peningkatan Partisipasi Siswa

Perubahan ini menegaskan proses adaptasi yang efektif dan peningkatan kemandirian belajar siswa seiring waktu.

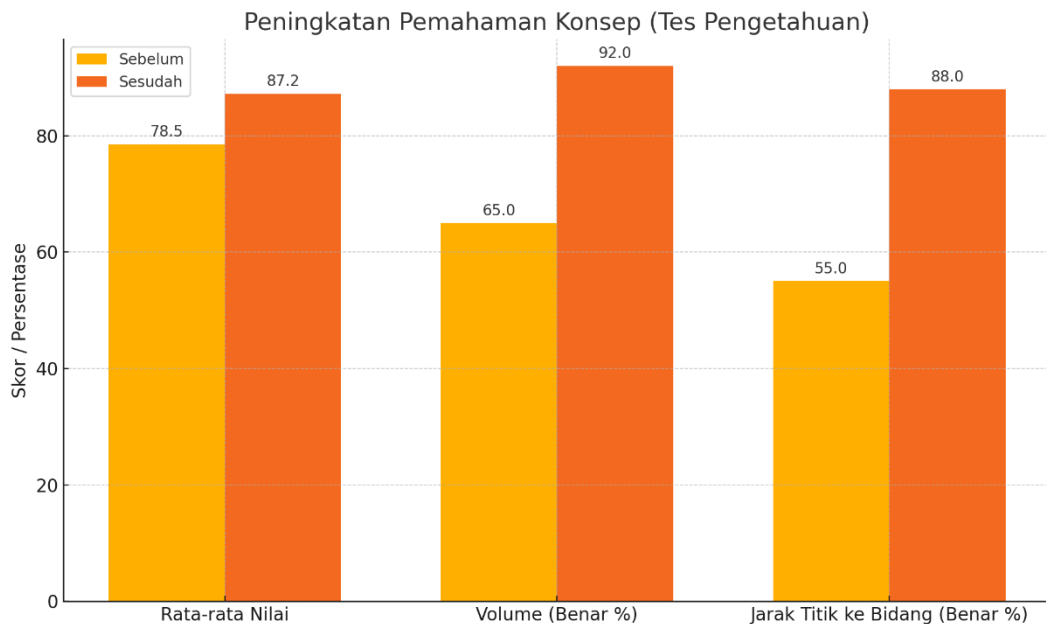
Angket sikap yang diisi sebelum dan sesudah pembelajaran menunjukkan pergeseran yang signifikan pada aspek afektif. Berikut adalah diagram batang yang memperlihatkan perubahan signifikan pada aspek afektif siswa sebelum dan sesudah pembelajaran berbasis GeoGebra: Motivasi Belajar meningkat dari rata-rata skor 3,0 menjadi 3,7; Keyakinan Diri meningkat dari 2,8 menjadi 3,6.



Gambar 2. Daigram sikap positif siswa terhadap pembelajaran geometri ruang

Hal ini menunjukkan adanya penguatan sikap positif siswa terhadap pembelajaran geometri ruang. Selain itu, sebanyak **85% siswa menyatakan minat untuk eksplorasi mandiri dengan GeoGebra** di luar jam pelajaran, yang mengindikasikan potensi pembelajaran berkelanjutan.

Berikut adalah diagram batang yang menunjukkan peningkatan pemahaman konsep berdasarkan hasil tes pengetahuan sebelum dan sesudah intervensi pembelajaran berbasis GeoGebra: 1) Rata-rata nilai meningkat dari 78,5 menjadi 87,2; 2) Persentase jawaban benar pada soal volume naik dari 65% menjadi 92%; 3) Persentase jawaban benar pada soal jarak titik ke bidang meningkat dari 55% menjadi 88%.

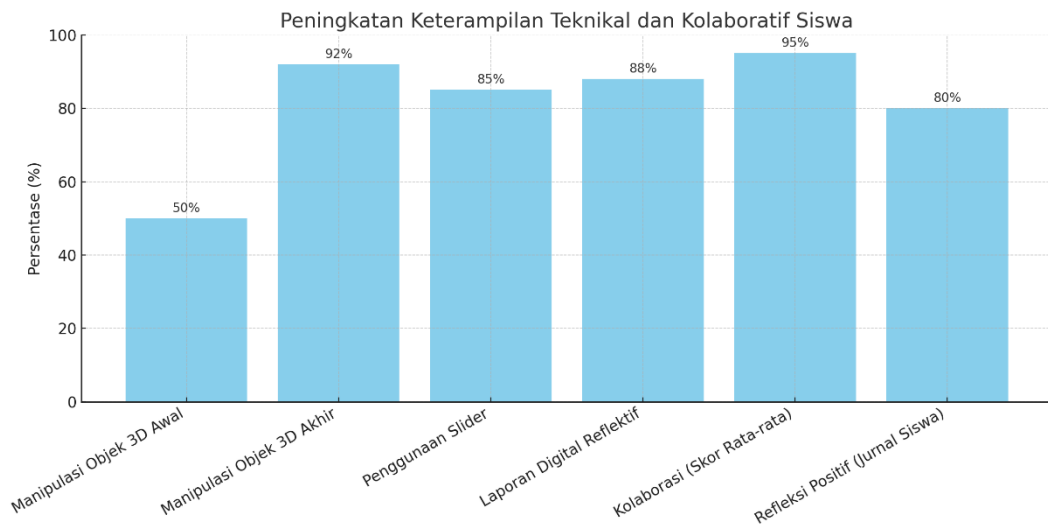


Gambar 3. Daigram Peningkatan Pemahaman Konsep Siswa

Diagram ini memperkuat hasil uji statistik bahwa pembelajaran berbasis GeoGebra dalam pendekatan PBL secara signifikan meningkatkan pemahaman siswa terhadap konsep geometri ruang.

Temuan ini mengonfirmasi kontribusi GeoGebra dalam memfasilitasi pemahaman prosedural dan konseptual, sebagaimana dilaporkan Rahmawati & Yunita (2020).

Keterampilan teknis dan kolaboratif siswa selama pembelajaran matematika berbasis GeoGebra dan TPACK. Berikut adalah diagram batang yang menunjukkan peningkatan keterampilan teknis dan kolaboratif siswa. Masing-masing batang merepresentasikan persentase capaian pada aspek-aspek utama seperti manipulasi teknologi, dokumentasi, kolaborasi, dan refleksi selama proses pembelajaran menggunakan GeoGebra.



Gambar 3. Digram Keterampilan Teknis Dan Kolaboratif Siswa Selama Pembelajaran Matematika Berbasis GeoGebra dan TPACK

Kemampuan manipulasi objek 3D meningkat dari 50% menjadi 92%, sementara 85% siswa mampu menggunakan fitur slider untuk eksplorasi bentuk secara dinamis. Sebanyak 88% kelompok menyusun dokumentasi pembelajaran yang lengkap dan reflektif, serta kolaborasi antarsiswa mencapai efektivitas tinggi dengan estimasi 95%. Selain itu, 80% siswa menunjukkan kemampuan refleksi yang baik melalui jurnal, menandakan pemahaman mendalam dan tanggung jawab kolektif terhadap proses belajar. Peningkatan ini mencerminkan keberhasilan integrasi teknologi dalam mengembangkan keterampilan abad ke-21.

Hasil wawancara mendalam mengungkap beberapa insight penting terkait penerapan GeoGebra dalam pembelajaran berbasis PBL-TPACK. Dari sudut pandang guru, GeoGebra dinilai mampu mempersingkat waktu dalam visualisasi konsep geometri serta mempermudah pemantauan pemahaman siswa secara individu melalui fitur dashboard aktivitas. Siswa berkemampuan tinggi merasa tertantang untuk mengeksplorasi lebih jauh, khususnya dalam memodifikasi parameter slider untuk mensimulasikan berbagai bentuk bangun ruang, menunjukkan adanya dorongan eksploratif. Sementara itu, siswa berkemampuan rendah menyatakan bahwa tutorial video dan dukungan tutor sebaya sangat membantu mereka dalam mengurangi kecemasan terhadap penggunaan teknologi, sekaligus meningkatkan motivasi belajar. Pendekatan PBL yang berpadu dengan kerangka TPACK telah menciptakan ruang belajar yang mendorong siswa untuk berperan aktif sebagai peneliti, sehingga meningkatkan rasa memiliki (ownership) terhadap proses pembelajaran mereka.

Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak pemanfaatan GeoGebra dalam pembelajaran berbasis Problem-Based Learning (PBL) dengan pendekatan TPACK terhadap partisipasi, sikap, pemahaman konsep, serta keterampilan teknis dan kolaboratif siswa. Data diperoleh secara kuantitatif melalui angket dan tes, serta secara kualitatif melalui observasi dan wawancara mendalam, sehingga memungkinkan analisis yang komprehensif.

Peningkatan Partisipasi Siswa. Data menunjukkan adanya peningkatan partisipasi siswa secara signifikan selama empat pertemuan, dari 60% pada tahap orientasi hingga 90% saat presentasi dan refleksi. Hal ini menunjukkan bahwa siswa mengalami proses adaptasi teknologi yang positif, di mana keterampilan menggunakan GeoGebra meningkat seiring waktu. Temuan ini mendukung pendapat Pramudita & Hidayat (2019) bahwa pembelajaran dengan bantuan teknologi dapat meningkatkan keterlibatan aktif siswa, terutama ketika disertai strategi PBL yang menekankan peran aktif siswa dalam menemukan solusi.

Perubahan Sikap Afektif Siswa. Hasil angket sikap menunjukkan adanya pergeseran positif, dengan rata-rata motivasi belajar meningkat dari 3,0 menjadi 3,7 dan keyakinan diri dari 2,8 menjadi 3,6. Hal ini mengindikasikan bahwa GeoGebra tidak hanya berperan sebagai alat bantu visualisasi, tetapi juga mendorong sikap positif terhadap matematika, khususnya pada materi geometri ruang. Penelitian oleh Rahmawati & Yunita (2020) menunjukkan hasil serupa, di mana pemanfaatan GeoGebra meningkatkan minat dan kepercayaan diri siswa dalam belajar matematika.

Peningkatan Pemahaman Konsep. Rata-rata nilai siswa meningkat dari 78,5 menjadi 87,2, dengan peningkatan signifikan pada aspek volume dan jarak titik ke bidang. Ini menunjukkan bahwa GeoGebra membantu siswa dalam mengonstruksi pemahaman konsep secara lebih konkret dan visual, sesuai dengan karakteristik geometri ruang yang bersifat spasial. Hasil ini konsisten dengan temuan Widyastuti (2021), yang menyatakan bahwa penggunaan GeoGebra dalam pembelajaran geometri meningkatkan pemahaman konseptual dan mengurangi miskonsepsi.

Keterampilan Teknikal dan Kolaboratif. Peningkatan keterampilan teknis seperti manipulasi objek 3D (dari 50% menjadi 92%) dan penggunaan slider (85%), serta keterampilan kolaboratif seperti penyusunan dokumentasi (88%) dan efektivitas kerja kelompok (95%), menunjukkan bahwa pendekatan TPACK berhasil mengintegrasikan aspek teknologi, pedagogik, dan konten secara efektif. Ini sejalan dengan pernyataan Mishra & Koehler (2006) bahwa keberhasilan integrasi teknologi dalam pendidikan bergantung pada keterpaduan ketiga aspek tersebut.

Temuan Kualitatif dari Wawancara. Wawancara dengan guru dan siswa memperkuat data kuantitatif. Guru menyatakan bahwa GeoGebra mempermudah visualisasi konsep dan membantu dalam pemantauan pemahaman siswa. Siswa berkemampuan tinggi merasa tertantang untuk mengeksplorasi lebih jauh, sementara siswa berkemampuan rendah merasa terbantu dengan tutorial dan dukungan teman sebaya. Ini menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis GeoGebra inklusif dan adaptif terhadap perbedaan kemampuan siswa. Selain itu, pendekatan PBL yang diterapkan memberi ruang bagi siswa untuk berperan sebagai peneliti muda, sehingga meningkatkan rasa memiliki dan tanggung jawab terhadap proses belajar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi GeoGebra dengan pendekatan Problem-Based Learning (PBL) dalam kerangka TPACK secara signifikan meningkatkan kualitas pembelajaran matematika, khususnya pada materi geometri ruang tiga dimensi. Temuan utama meliputi peningkatan pemahaman konsep, motivasi belajar, keterampilan abad 21, dan kemandirian dalam penggunaan teknologi. Implementasi model ini juga membantu guru dalam merancang pembelajaran yang terstruktur, kontekstual, dan bermakna.

Secara keseluruhan, model PBL-TPACK-GeoGebra terbukti efektif dalam:

- Meningkatkan hasil belajar dan ketercapaian KKM,
- Mengembangkan sikap positif dan minat eksploratif siswa terhadap matematika,
- Menumbuhkan kolaborasi, literasi digital, dan kemandirian belajar,
- Memberikan pengalaman belajar yang relevan dengan konteks dunia nyata.

5. Saran

Saran dari hasil penelitian ini ditujukan kepada beberapa pihak. Bagi guru dan sekolah, disarankan untuk melaksanakan pelatihan rutin guna meningkatkan pemahaman guru terhadap

penerapan kerangka TPACK serta penguasaan aplikasi GeoGebra. Selain itu, penting untuk mendorong kolaborasi antarguru dalam mengembangkan dan berbagi modul pembelajaran digital yang inovatif dan kontekstual. Bagi pengembang kurikulum, diharapkan dapat mengintegrasikan penggunaan teknologi seperti GeoGebra ke dalam kurikulum secara sistematis, terutama pada topik-topik visual seperti geometri. Pengembang juga disarankan untuk menyediakan panduan implementasi model PBL berbasis TPACK secara nasional agar dapat diterapkan secara luas di berbagai jenjang dan daerah. Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk melakukan studi jangka panjang guna mengukur keberlanjutan dampak model ini terhadap pemahaman konsep dan motivasi siswa. Penelitian juga perlu dilakukan di berbagai sekolah dengan latar belakang yang beragam untuk menguji skalabilitas dan adaptabilitas model ini. Selain itu, pengembangan model serupa untuk topik matematika lain seperti aljabar, fungsi, dan statistik juga menjadi rekomendasi penting guna memperluas penerapan pendekatan ini dalam pembelajaran matematika.

Daftar Pustaka

- Arends, R. I. (2012). *Learning to Teach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Arikunto, S. (2019). *Prosedur Penelitian: Suatu Pendekatan Praktik*. Rineka Cipta.
- Azwar, S. (2016). *Reliabilitas dan Validitas*. Pustaka Pelajar.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Fajriadi, D., Priyadi, R., & Rahayu, D. V. (2022). Pengembangan media pembelajaran GeoGebra Book materi dimensi tiga. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 7(2), 453–466. <https://doi.org/10.25157/teorema.v7i2.8813>
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235–266.
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic Inquiry*. SAGE Publications.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017–1054.
- Nasrulloh, M., & Sugandi, A. I. (2023). Pengembangan bahan ajar materi geometri dimensi tiga dengan menggunakan pendekatan saintifik berbantuan GeoGebra. *JPMI (Jurnal Pembelajaran Matematika Inovatif)*, 6(4), 1747–1756.
- Rahmawati, I., & Yunita, W. (2020). Problem-based learning untuk meningkatkan kemampuan pemecahan masalah matematis dengan bantuan GeoGebra. *Jurnal Pendidikan Matematika dan Sains*, 8(1), 33–41.
- Rusman. (2017). *Model-Model Pembelajaran: Mengembangkan Profesionalisme Guru*. Rajawali Pers.
- Santoso, S. (2021). *Menguasai Statistik dengan SPSS 26*. Elex Media Komputindo.
- Savery, J. R. (2006). Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 1(1), 9–20.
- Supriyadi, T., Hidayat, W., & Pratiwi, W. (2023). Pengaruh media GeoGebra terhadap kemampuan penalaran matematis. *Jurnal Didaktik Matematika*, 10(2), 112–120.
- Utami, I., & Firman, H. (2019). Hubungan kompetensi TPACK guru dan aktivitas belajar digital. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 7(1), 23–34.
- Widyastiti, M., Yanti, Y., Sumarsa, A., & Durrotul Faizah, L. (2024). Utilization of GeoGebra application as learning media in learning the three-dimensional to increase students' interest in learning. *Hipotenusa: Journal of Mathematical Society*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.18326/hipotenusa.v6i1.815>