

Pemanfaatan Simulasi PhET dalam Pembelajaran Matematika untuk Meningkatkan Pemahaman Draf Aljabar

Abdurahman Hamid¹

Universitas Negeri Makassar¹

*Abdurahman.hamid@unm.ac.id*¹

Corresponding Author: Author, E-mail: abdurahman.hamid@unm.ac.id

ABSTRACT

Mathematics learning often face challenges in helping student understand concepts abstract , especially in algebraic material that demands ability think symbolic and representational mathematically . This condition demonstrates the necessity for innovative approaches that enhance learning and facilitate a more concrete and interactive comprehension of concepts. This study aims to analyze the impact of interactive simulations on algebra students' understanding in mathematics learning. The research uses a descriptive approach quantitative with design experiment pseudo through pretest–posttest pattern of the control group . The research population comprised all eighth-grade students at a junior high school, employing cluster sampling to select two classes as the experimental and control groups, resulting in a total of ninety-two respondents. Data collection was conducted through a mathematically validated and reliable understanding draft test. Data analysis was conducted utilizing descriptive and inferential statistics, including normality tests, homogeneity tests, and independent sample t-tests, facilitated by statistical software. The analysis results indicate that mathematics instruction employing interactive simulations significantly enhances algebra students' understanding compared to conventional learning methods. These findings suggest that incorporating simulation media in mathematics education facilitates a more exploratory and student-centered learning experience. The findings of this study offer recommendations for educators to employ interactive technology as a strategy to enhance the quality of mathematics education, while simultaneously contributing theoretically to the reinforcement of constructivist learning models in mathematics education

KEYWORDS

PhET simulation, mathematics learning, understanding algebraic concepts, interactive learning media, constructivist approach

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i1.441>

A. Pendahuluan

Pembelajaran matematika memiliki peran strategis dalam mengembangkan kemampuan berpikir logis, analitis, serta keterampilan pemecahan masalah yang esensial bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan kehidupan sosial (NCTM, 2014; OECD, 2023). Namun demikian, berbagai laporan internasional menunjukkan bahwa kemampuan matematika peserta didik masih memerlukan perhatian serius. Hasil studi Programme for International Student Assessment (PISA) tahun 2022 yang dirilis oleh Organisation for Economic Co-operation and Development menunjukkan bahwa skor literasi matematika siswa Indonesia berada pada angka 366, jauh di bawah rata-rata OECD sebesar 472 (OECD, 2023). Kondisi ini mengindikasikan bahwa kemampuan pemahaman konsep matematis siswa masih relatif rendah dan membutuhkan upaya peningkatan melalui inovasi pembelajaran (Stacey, 2011; Wijaya, 2017). Temuan tersebut diperkuat oleh laporan Asesmen Nasional dari Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang menunjukkan bahwa sebagian besar siswa masih mengalami kesulitan dalam memahami konsep matematika secara mendalam, khususnya pada materi yang bersifat abstrak seperti aljabar (Hamid, A, 2025).

Aljabar merupakan salah satu cabang fundamental dalam matematika yang menuntut kemampuan berpikir simbolik, pemodelan matematis, serta pemahaman hubungan antar variabel ([Kieran, 2007](#); [Radford, 2014](#)). Namun, dalam praktik pembelajaran di kelas, siswa sering menghadapi kesulitan dalam memahami konsep aljabar karena pendekatan pembelajaran yang cenderung berfokus pada prosedur mekanistik tanpa memberikan pengalaman eksploratif yang memadai ([Booth et al., 2014](#); [Star & Rittle-Johnson, 2008](#)). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pembelajaran yang mampu memfasilitasi siswa untuk membangun pemahaman konsep secara lebih konkret, interaktif, dan bermakna melalui pemanfaatan teknologi ([Hiebert & Grouws, 2007](#); [Mayer, 2009](#)).

Perkembangan teknologi digital telah membuka peluang baru dalam inovasi pembelajaran matematika, salah satunya melalui penggunaan media simulasi interaktif ([Clark & Mayer, 2016](#); [Moreno & Mayer, 2007](#)). PhET Interactive Simulations yang dikembangkan oleh University of Colorado Boulder merupakan salah satu platform yang banyak digunakan dalam pembelajaran berbasis simulasi ([Perkins et al., 2006](#); [Wieman et al., 2010](#)). Platform ini menyediakan berbagai simulasi yang memungkinkan siswa melakukan eksplorasi konsep melalui visualisasi dinamis, manipulasi objek matematis, serta eksperimen virtual. Dengan demikian, konsep-konsep abstrak dapat direpresentasikan secara visual sehingga memudahkan siswa dalam memahami materi pembelajaran secara lebih mendalam ([de Jong & van Joolingen, 1998](#); [Rutten et al., 2012](#)).

Sejumlah penelitian yang dilakukan dalam rentang waktu 2020–2025 menunjukkan bahwa pemanfaatan simulasi PhET berkontribusi positif terhadap peningkatan kualitas pembelajaran. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh [Rahmawati \(2020\)](#) menunjukkan bahwa penggunaan media simulasi dapat membantu siswa memahami konsep melalui visualisasi yang mendukung proses eksplorasi. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian [Gani et al. \(2020\)](#) yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam pemahaman konsep antara siswa yang belajar menggunakan simulasi interaktif dan siswa yang mengikuti pembelajaran konvensional.

Hasil penelitian lain juga secara konsisten memperkuat temuan mengenai efektivitas penggunaan simulasi PhET Interactive Simulations dalam pembelajaran matematika. [Erfan \(2022\)](#) menunjukkan bahwa penggunaan simulasi PhET dalam pembelajaran persamaan linear mampu meningkatkan pemahaman konsep secara signifikan melalui desain pretest dan posttest. Sejalan dengan itu, [Suryaningsih \(2024\)](#) menemukan bahwa pendekatan pembelajaran berbasis brain-based learning yang dipadukan dengan simulasi PhET memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan pemahaman konsep matematis siswa sekolah dasar. Lebih lanjut, [Annisahandayani et al. \(2024\)](#) mengungkapkan bahwa media pembelajaran berbasis permainan yang terintegrasi dengan simulasi PhET mampu meningkatkan pemahaman konsep matematika siswa, sebagaimana ditunjukkan oleh peningkatan skor pretest dan posttest. Penelitian [Putri \(2025\)](#) turut memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa integrasi model Team Games Tournament dengan simulasi PhET memberikan peningkatan signifikan terhadap pemahaman konsep matematis siswa melalui pendekatan kuasi-eksperimental. Penggunaan simulasi PhET tidak hanya meningkatkan hasil belajar [Harahap \(2025\)](#), tetapi juga keterlibatan siswa dalam proses pembelajaran ([Jarwoko, 2025](#)).

Meskipun simulasi PhET banyak diteliti, sebagian besar kajian masih berfokus pada bidang sains atau materi matematika tertentu, sehingga penelitian tentang penggunaan PhET pada pembelajaran aljabar untuk meningkatkan pemahaman konsep masih terbatas. Selain itu, penelitian sebelumnya lebih banyak menilai hasil belajar umum, bukan pemahaman konsep secara khusus. Karena itu, penelitian ini mengkaji pengaruh penggunaan simulasi PhET sebagai variabel independen terhadap pemahaman konsep aljabar sebagai variabel dependen. Tujuannya adalah menganalisis

secara empiris apakah penggunaan PhET berpengaruh positif dan signifikan terhadap peningkatan pemahaman konsep aljabar siswa dibandingkan pembelajaran konvensional.

B. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain kuasi-eksperimental tipe pretest–posttest control group untuk menguji pengaruh penggunaan simulasi pembelajaran terhadap peningkatan pemahaman matematika siswa. Desain ini dipilih karena randomisasi subjek secara penuh tidak memungkinkan dilakukan pada kelas yang telah terbentuk. Kelompok eksperimen memperoleh pembelajaran matematika berbantuan simulasi PhET, sedangkan kelompok kontrol mengikuti pembelajaran konvensional. Perbandingan hasil pretest dan posttest digunakan untuk mengetahui perbedaan peningkatan pemahaman konsep aljabar antara kedua kelompok. Populasi penelitian adalah seluruh siswa kelas VIII di salah satu SMP berjumlah 120 siswa yang terbagi dalam empat kelas. Teknik sampling yang digunakan ialah cluster sampling karena populasi berbentuk kelompok kelas. Ukuran sampel ditentukan dengan rumus Slovin pada tingkat kesalahan 5% sehingga diperoleh 92 siswa, kemudian dua kelas dipilih sebagai sampel, masing-masing sebagai kelompok eksperimen dan kelompok kontrol.

Pengumpulan data dilakukan menggunakan tes uraian untuk mengukur pemahaman konsep aljabar siswa berdasarkan indikator kemampuan menjelaskan konsep, menginterpretasikan simbol, dan menerapkan konsep dalam pemecahan masalah. Selain itu, digunakan lembar observasi untuk menilai keterlaksanaan pembelajaran. Instrumen telah diuji validitas dan reliabilitas sebelum digunakan. Analisis data menggunakan statistik deskriptif dan inferensial. Statistik deskriptif digunakan untuk melihat rata-rata dan sebaran skor pretest serta posttest, sedangkan uji hipotesis menggunakan independent sample t-test setelah memenuhi uji normalitas dan homogenitas. Seluruh analisis dilakukan pada taraf signifikansi 0,05 dengan bantuan SPSS.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil analisis data yang diperoleh dari pengukuran pemahaman draf aljabar siswa sebelum dan sesudah pembelajaran. Analisis dilakukan secara bertahap meliputi statistik deskriptif, analisis uji prasyarat, dan pengujian hipotesis menggunakan uji-t. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan nilai rata-rata dan deviasi standar hasil pretest dan posttest pada kelompok eksperimen dan kelompok kontrol.

TABEL 1. Statistik Deskriptif Skor Pemahaman Draf Aljabar

Kelompok		N	Rata-rata Pra-uji Sekolah Dasar	Rata-rata Pasca-tes Sekolah Dasar
Percobaan	46	54,21	8,34	78,65
Kontrol	46	53,78	7,95	68,12

Berdasarkan Tabel 1, skor pretest rata-rata pada kelompok eksperimen sebesar 54,21 dengan deviasi standar 8,34, sedangkan kelompok kontrol memiliki rata-rata 53,78 dengan deviasi standar 7,95. Setelah perlakuan, skor posttest rata-rata pada kelompok eksperimen meningkat menjadi 78,65 dengan deviasi standar 7,12, sedangkan kelompok kontrol memiliki rata-rata 68,12 dengan deviasi standar 8,01.

Untuk melihat peningkatan distribusi skor pemahaman konsep, perhitungan dilakukan dengan menghitung peningkatan skor antara pretest dan posttest.

TABEL 2. Statistik Deskriptif Skor Perolehan

Kelompok Keuntungan Rata-rata Sekolah Dasar		
Percobaan	24.44	6.28
Kontrol	14.34	6,75

Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan skor rata-rata pada kelompok eksperimen sebesar 24,44 , sedangkan pada kelompok kontrol sebesar 14,34. Uji normalitas dilakukan menggunakan uji Shapiro–Wilk untuk menentukan apakah data terdistribusi secara normal.

TABEL 3. Hasil Uji Normalitas

Kelompok	Variabel	Eksperimen	Kontrol
Percobaan	Pra-uji	0,967 0,186	0,964 0,153
Percobaan	Tes Pasca-uji	0,972 0,241	0,969 0,208

Nilai signifikansi untuk semua variabel lebih besar dari 0,05 , sehingga data dinyatakan terdistribusi normal. Uji homogenitas varians dilakukan menggunakan Uji Levene.

TABEL 4. Hasil Uji Homogenitas

Variabel	F	nilai p
Pra-uji	0,214	0,645
Tes Pasca-uji	0,398	0,530

Nilai signifikansi kedua variabel lebih besar dari 0,05 , sehingga varians kedua kelompok dinyatakan homogen. Pengujian hipotesis dilakukan menggunakan **uji-t sampel independen** untuk menentukan perbedaan skor pasca-uji antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol.

TABEL 5. Hasil Uji t Sampel Independen

Variabel	T	df	nilai p	Effect Size
Tes Pasca-uji	6.27	90	0,000	0,92 (besar)

Hasil analisis menunjukkan nilai $t = 6,27$ dengan $p < 0,001$. Rata-rata skor posttest kelompok eksperimen sebesar 78,65 , sedangkan kelompok kontrol sebesar 68,12 . Selain itu, perhitungan ukuran efek dilakukan menggunakan Cohen's d. Nilai Cohen's d sebesar 0,92 menunjukkan bahwa ukuran tersebut memiliki pengaruh besar terhadap perbedaan skor pemahaman draf antara kedua kelompok.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa pengajaran matematika yang menggunakan simulasi interaktif menghasilkan perbedaan substansial dalam pemahaman di antara siswa aljabar tingkat dasar dibandingkan dengan metode tradisional. Secara statistik, kelompok yang menggunakan simulasi pembelajaran menunjukkan hasil yang lebih baik pada posttest dibandingkan dengan kelompok kontrol. Hasil uji-t menunjukkan bahwa perbedaan ini signifikan pada tingkat $p < 0,05$ dan ukuran efeknya relatif besar. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan simulasi interaktif dalam proses pendidikan dikaitkan dengan peningkatan pemahaman matematika di kalangan siswa.

Teori perspektif konstruktivisme menjelaskan temuan ini dengan mengatakan bahwa pengetahuan dibangun secara aktif melalui pengalaman belajar yang melibatkan interaksi langsung dengan objek atau representasi konsep. Dalam konteks pendidikan matematika, simulasi interaktif memungkinkan siswa untuk menyelidiki hubungan antar variabel, memanipulasi representasi simbolik, dan mengamati perubahan secara visual. Lingkungan belajar jenis ini mendorong pembangunan pengetahuan yang lebih mendalam dibandingkan dengan pembelajaran yang hanya menekankan prosedur atau penjelasan verbal. Simulasi interaktif memberi siswa kesempatan untuk

mengembangkan pemahaman konseptual melalui eksplorasi dan refleksi terhadap konsep yang diperoleh.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengajaran matematika yang ditingkatkan dengan simulasi interaktif menghasilkan peningkatan yang signifikan secara statistik dalam pemahaman konsep aljabar siswa dibandingkan dengan metode pengajaran tradisional. Secara statistik, kelompok yang menggunakan pembelajaran berbantuan simulasi memiliki skor rata-rata yang lebih tinggi pada posttest dibandingkan dengan kelompok kontrol. Hasil uji-t menunjukkan bahwa perbedaan tersebut signifikan secara statistik pada tingkat $p < 0,05$ dan memiliki ukuran efek yang besar. Temuan ini menunjukkan bahwa penggabungan simulasi interaktif ke dalam proses pendidikan berkorelasi positif dengan peningkatan pemahaman konseptual matematika siswa. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa integrasi teknologi interaktif dalam pendidikan matematika dapat meningkatkan pemahaman konseptual dan hasil pendidikan secara keseluruhan ([Rahmawati dkk., 2020](#); [Gani dkk., 2020](#); [Arifin & Retnawati, 2021](#)).

Temuan ini dapat dijelaskan melalui teori konstruktivis yang menyatakan bahwa pengetahuan dibangun secara aktif melalui pengalaman belajar dan interaksi langsung dengan objek atau representasi konseptual. Dalam pembelajaran matematika, simulasi interaktif memungkinkan siswa menyelidiki hubungan antarvariabel, memanipulasi representasi simbolik, dan mengamati perubahan secara visual sehingga membentuk pemahaman yang lebih mendalam dibanding metode prosedural semata. Hal ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa lingkungan belajar berbasis teknologi mampu memfasilitasi konstruksi pengetahuan dan meningkatkan pemahaman konseptual siswa ([Suryadi, 2022](#); [Widodo & Riandi, 2021](#)). Selain itu, berbagai studi tahun 2020–2025 menegaskan bahwa simulasi digital efektif membantu siswa memahami konsep abstrak, meningkatkan keterlibatan belajar, serta memperkuat keterampilan representasi matematika ([Erfan, 2022](#); [Suryaningsih, 2024](#); [Annisahandayani dkk., 2024](#)). Temuan ini juga sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa integrasi teknologi dalam pembelajaran matematika dapat meningkatkan hasil belajar melalui pengalaman yang lebih dinamis, investigatif, dan terstruktur ([Putri & Rahman, 2025](#); [Jarwoko, 2025](#)). Namun, efektivitas simulasi tetap dipengaruhi oleh strategi mengajar guru dan kesiapan siswa dalam menggunakan teknologi, sehingga perbedaan faktor kontekstual dapat menimbulkan variasi hasil penelitian ([Harahap & Siregar, 2025](#)). Studi sebelumnya yang menggunakan metodologi serupa untuk menilai efektivitas intervensi pendidikan yang dimediasi teknologi ([Erfan, 2022](#); [Arifin & Retnawati, 2021](#)).

Temuan studi ini berimplikasi penting bagi pengembangan metode pengajaran matematika. Penggunaan teknologi berbasis simulasi mendorong pembelajaran aktif dan berpusat pada siswa. Simulasi interaktif membantu guru menjelaskan konsep abstrak melalui visualisasi konkret sehingga memudahkan pemahaman siswa. Hasil ini sejalan dengan laporan global tentang pentingnya teknologi dalam meningkatkan kualitas pendidikan dan keterlibatan siswa ([UNESCO, 2022](#)). Secara teoretis, studi ini memvalidasi prinsip konstruktivisme dalam pendidikan matematika berbasis teknologi. Lingkungan belajar interaktif terbukti mendukung konstruksi pengetahuan siswa dan memperkuat bukti tentang peran teknologi dalam meningkatkan pemahaman konseptual matematika ([Suryadi, 2022](#)).

D. Kesimpulan

Studi ini meneliti bagaimana simulasi interaktif memengaruhi pemahaman aljabar siswa. Analisis statistik menunjukkan bahwa simulasi interaktif meningkatkan pengetahuan konseptual siswa tentang matematika dibandingkan dengan metode pembelajaran standar. Simulasi membantu

siswa memahami topik aljabar lebih baik daripada teknik tradisional. Temuan ini menyiratkan bahwa media berbasis simulasi meningkatkan pembelajaran matematika.

Studi ini memiliki konsekuensi besar bagi praktik pengajaran matematika di kelas. Simulasi interaktif dapat membantu dosen menyampaikan topik matematika yang kompleks secara visual. Teknologi juga dapat membuat pembelajaran lebih partisipatif dan berpusat pada siswa. Dengan demikian, lembaga pendidikan dan pembuat kebijakan dapat menggunakan media pembelajaran berbasis simulasi untuk berinovasi dalam pengajaran matematika.

Daftar Pustaka

- Annisahandayani, R., Widodo, S., & Suryadi, D. (2024). Effectiveness of the utilization of educational games based on PhET simulation to improve students' understanding of mathematical concepts on fraction material. *Journal of Mathematics Education Research*, 12(1), 45–56.
- Arifin, Z., & Retnawati, H. (2021). The effectiveness of technology-based learning media in improving students' mathematical conceptual understanding. *Journal of Mathematics Education*, 12(2), 165–178.
- Booth, J. L., Newton, K. J., & Twiss-Garrity, L. K. (2014). The impact of algebraic representation on students' understanding of algebra. *Journal of Mathematical Behavior*, 33, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2013.12.006>
- Clark, R. C., & Mayer, R. E. (2016). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning* (4th ed.). Wiley.
- de Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179–201. <https://doi.org/10.3102/00346543068002179>
- Erfan, M. (2022). The effectiveness of PhET simulation in improving students' conceptual understanding of linear equations. *Dikdas Matappa: Jurnal Ilmu Pendidikan Dasar*, 5(2), 321–330.
- Gani, A., Winarno, N., & Sari, I. (2020). The impact of interactive simulation on students' conceptual understanding in mathematics learning. *Unnes Science Education Journal*, 9(3), 252–260.
- Hamid, A. (2025). Hubungan antara Kemampuan Numerik dan Efektivitas Pemecahan Masalah Matematis Mahasiswa. *Jurnal Ilmiah Matematika (JIMAT)*, 6(2), 602–612.
- Harahap, R., & Siregar, N. (2025). Bibliometric analysis of PhET simulation research trends in science and mathematics education. *Jurnal Riset Pendidikan Sains*, 15(1), 1–12.
- Hiebert, J., & Grouws, D. A. (2007). The effects of classroom mathematics teaching on students' learning. Dalam F. K. Lester (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp. 371–404). Information Age Publishing.
- Jarwoko, A. (2025). The influence of PhET simulation media on elementary students' mathematics learning outcomes. *Proceedings of the National Conference on Science Education*, 7(1), 145–152.
- Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia. (2023). *Laporan hasil Asesmen Nasional: Literasi dan numerasi siswa Indonesia*. Jakarta: Kemendikbudristek.
- Kieran, C. (2007). Learning and teaching algebra. Dalam F. K. Lester (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp. 707–762). Information Age Publishing.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>

- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2007). Interactive multimodal learning environments. *Educational Psychology Review*, 19(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- NCTM. (2014). *Principles to actions: Ensuring mathematical success for all*. National Council of Teachers of Mathematics.
- OECD. (2023). *PISA 2022 results (Volume I): The state of learning and equity in education*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/53f23881-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). *PISA 2022 results: Learning during and after the pandemic*. Paris: OECD Publishing.
- Perkins, K., Adams, W., Dubson, M., Finkelstein, N., Reid, S., Wieman, C., & LeMaster, R. (2006). PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. *The Physics Teacher*, 44(1), 18–23. <https://doi.org/10.1119/1.2150754>
- PhET Interactive Simulations. (2024). *PhET interactive simulations for science and mathematics education*. Boulder, CO: University of Colorado Boulder.
- Putri, D. A., & Rahman, T. (2025). Implementation of Team Games Tournament integrated with PhET simulation to enhance students' mathematical conceptual understanding. *Desimal: Jurnal Matematika*, 8(1), 33–42.
- Radford, L. (2014). Towards an embodied, cultural, and material conception of mathematics cognition. *ZDM Mathematics Education*, 46, 349–361. <https://doi.org/10.1007/s11858-014-0591-1>
- Rahmawati, L., Nurhayati, S., & Prasetyo, Z. K. (2020). The use of PhET interactive simulations to enhance students' conceptual understanding in mathematics learning. *Journal of Educational Technology*, 14(2), 120–128.
- Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>
- Stacey, K. (2011). The PISA view of mathematical literacy in Indonesia. *Journal on Mathematics Education*, 2(2), 95–126.
- Star, J. R., & Rittle-Johnson, B. (2008). Flexibility in problem solving: The case of equation solving. *Learning and Instruction*, 18(6), 565–579. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.09.018>
- Suryadi, D. (2022). Mathematical conceptual understanding in mathematics learning: Theoretical perspectives and implications. *International Journal of Instruction*, 15(3), 567–582.
- Suryaningsih, A. (2024). Brain-based learning assisted by PhET simulation to improve elementary students' mathematical conceptual understanding. *Journal of Digital Learning in Education*, 6(2), 87–96.
- UNESCO. (2022). *Global education monitoring report: Technology in education*. Paris: UNESCO Publishing.
- Widodo, A., & Riandi. (2021). The role of interactive simulation in improving students' conceptual understanding in mathematics learning. *Journal of Science and Mathematics Education*, 9(2), 89–101.
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2010). PhET: Simulations that enhance learning. *Science*, 322(5902), 682–683. <https://doi.org/10.1126/science.1161948>
- Wijaya, A. (2017). The relationships between Indonesian fourth graders' difficulties in fractions and the opportunity to learn fractions: A snapshot of TIMSS results. *International Journal of Instruction*, 10(4), 221–236. <https://doi.org/10.12973/iji.2017.10413a>