

Analisis Pemanfaatan Teknologi Augmented Reality dalam Proses Pembelajaran Matematika pada Siswa PAUD

Miftah Kusuma Dewi¹, Indasah², Farida Nur Azizah³, Rifka Taufiqur Rofiah⁴, Miftachus Sholikhah⁵, Riana Rahayu⁶, Siti Nurmandriyah⁷

¹IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan miftakusuma978@gmail.com

²IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan indahindasah88@gmail.com

³IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan faridaupdn123@gmail.com

⁴IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan rifkarofiah1@gmail.com

⁵IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan mieft.solikhah@gmail.com

⁶IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan rianarahayu19@gmail.com

⁷IAI Pangeran Diponegoro Nganjuk dan sitinurmandriyah01@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penggunaan teknologi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika bagi siswa pendidikan anak usia dini (PAUD). Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus kualitatif, dengan data dikumpulkan melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi AR secara signifikan meningkatkan minat dan keterlibatan siswa dalam mempelajari konsep matematika seperti angka, bentuk, dan pola. Namun, tantangan seperti waktu persiapan guru yang terbatas dan masalah teknis juga teridentifikasi. Temuan ini menyarankan bahwa AR dapat menjadi media inovatif yang efektif untuk pembelajaran matematika PAUD jika didukung oleh infrastruktur yang memadai dan pelatihan guru yang memadai. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi dalam pendidikan anak usia dini.

Kata Kunci: *Augmented Reality, Matematika, Anak Usia Dini, Media Pembelajaran*

ABSTRACT

This study aims to analyze the use of Augmented Reality (AR) technology in mathematics learning for early childhood education (PAUD) students. The research employed a qualitative case study approach, with data collected through observation, interviews, and documentation. The results indicate that AR technology significantly enhances students' interest and engagement in learning mathematical concepts such as numbers, shapes, and patterns. However, challenges such as limited teacher preparation time and technical issues were identified. The findings suggest that AR can be an effective innovative medium for early childhood mathematics learning when supported by adequate infrastructure and teacher training. This study contributes to the development of technology-based learning media in early childhood education.

Keywords: *Augmented Reality, Mathematics, Early Childhood, Learning Media*

PENDAHULUAN

Pembelajaran matematika di Pendidikan Anak Usia Dini (PAUD) menghadapi berbagai tantangan yang signifikan, terutama terkait dengan sifat konsep matematika yang abstrak dan kurang menarik bagi anak-anak. Banyak anak mengalami kesulitan dalam memahami konsep dasar matematika karena metode pengajaran yang konvensional dan kurang interaktif, sehingga menimbulkan kebosanan dan rendahnya minat belajar (Ncube & Luneta, 2025). Selain itu, keterbatasan media pembelajaran yang sesuai dengan karakteristik anak usia dini juga menjadi hambatan, karena anak-anak lebih mudah memahami konsep melalui pengalaman konkret dan permainan yang menyenangkan (1585, 2023; Budiarti, 2025). Penggunaan media interaktif berbasis teknologi, seperti augmented reality, dapat menjadi solusi inovatif untuk mengatasi masalah ini dengan menggabungkan unsur visual dan aktivitas kreatif yang meningkatkan keterlibatan dan pemahaman matematika anak (Matematika et al., 2024; Munusamy et al., 2025; Pokhrel, 2023)

Namun, tantangan lain yang muncul adalah keterbatasan akses perangkat digital dan kebutuhan pelatihan bagi pendidik agar dapat memanfaatkan teknologi secara efektif dalam pembelajaran (Acharya, 2017; Mutia, 2025). Oleh karena itu, kolaborasi antara sekolah, pengembang teknologi, dan pemerintah sangat penting untuk menyediakan infrastruktur yang memadai dan pelatihan berkelanjutan, sehingga pembelajaran matematika di PAUD dapat menjadi lebih menarik, konkret, dan efektif dalam membangun fondasi matematika yang kuat bagi anak-anak (Hidayati, 2024).

Teknologi Augmented Reality (AR) memiliki potensi besar dalam memvisualisasikan konsep matematika secara interaktif, terutama pada pendidikan anak usia dini (PAUD) yang sering menghadapi kesulitan dalam memahami konsep abstrak matematika. AR menggabungkan dunia nyata dengan elemen virtual secara real-time, sehingga memungkinkan anak-anak untuk melihat dan berinteraksi dengan objek matematika dalam bentuk tiga dimensi yang konkret dan menarik (Criollo-C et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan AR dalam pembelajaran matematika dapat meningkatkan motivasi, keterlibatan, dan pemahaman konsep matematika yang sulit, seperti bentuk geometris dan operasi dasar, dengan cara yang lebih menyenangkan dan mudah dipahami oleh anak-anak (Assawaphum et al., 2024; Ihsan et al., 2017). Selain itu, AR juga dapat mengembangkan kemampuan visual-spasial dan pemahaman konseptual anak melalui pengalaman belajar yang aktif dan interaktif, yang sulit dicapai dengan metode pembelajaran tradisional (Apriza et al., 2024; Demitriadou et al., 2019).

Meskipun demikian, implementasi AR di PAUD masih menghadapi tantangan seperti kebutuhan pelatihan guru, ketersediaan perangkat teknologi, dan integrasi kurikulum yang tepat agar teknologi ini dapat dimanfaatkan secara optimal (Harson et al., 2025; Kaźmierczak et al., 2025; Volioti et al., 2023). Dengan dukungan infrastruktur dan pelatihan yang memadai, AR berpotensi menjadi media pembelajaran yang efektif untuk membangun fondasi matematika yang kuat dan menyenangkan bagi siswa PAUD (Prídavková, 2023; R et al., 2024).

Kajian penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam pendidikan anak usia dini (PAUD) semakin berkembang dan memberikan dampak positif pada proses pembelajaran. AR memungkinkan penyajian materi pembelajaran secara interaktif dan kontekstual, sehingga dapat meningkatkan motivasi, perhatian, dan pemahaman konsep anak-anak yang cenderung abstrak dan sulit dipahami dengan metode tradisional (Citariyani et al., 2025; Nirmala et al., 2024). Studi pada tahun 2015 mengungkapkan bahwa mainan edukatif berbasis AR mampu meningkatkan interaksi anak dengan materi pembelajaran, meskipun perlu didukung dengan pembelajaran kolaboratif agar hasil kognitif lebih optimal.

Selain itu, penelitian di berbagai negara menunjukkan bahwa AR dapat digunakan untuk mengajarkan berbagai bidang, termasuk matematika, bahasa, dan literasi awal, dengan hasil yang mendorong peningkatan kemampuan belajar dan keterlibatan siswa (Chen & Chan, 2019; Redondo et al., 2019; Yilmaz, 2016). Namun, beberapa tantangan seperti keterbatasan infrastruktur, akses teknologi, dan pelatihan guru masih menjadi hambatan utama dalam implementasi AR secara luas di PAUD (Masmuzidin & Aziz, 2018; Petrlik et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian terdahulu menekankan pentingnya pengembangan aplikasi AR yang sesuai kurikulum, peningkatan dukungan teknologi, dan pelatihan berkelanjutan bagi pendidik agar teknologi ini dapat dimanfaatkan secara maksimal dalam meningkatkan kualitas pembelajaran matematika di PAUD.

Penelitian tentang implementasi teknologi Augmented Reality (AR) dalam pendidikan anak usia dini (PAUD) menunjukkan adanya kesenjangan signifikan antara kondisi ideal dan realita di lapangan. Secara ideal, AR diharapkan mampu menghadirkan pembelajaran yang interaktif, kontekstual, dan menyenangkan sehingga dapat meningkatkan pemahaman konsep matematika secara visual dan praktis bagi anak-anak PAUD (Naida et al., 2024; Shaaban & Mohamed, 2023). Namun, realita menunjukkan bahwa implementasi AR masih terkendala oleh berbagai faktor, seperti keterbatasan infrastruktur teknologi, akses perangkat yang belum merata, serta kurangnya pelatihan guru yang memadai untuk mengoptimalkan penggunaan AR dalam pembelajaran (Adhe et al., 2025; Urooj & Khan, 2024).

Selain itu, ketergantungan yang berlebihan pada teknologi tanpa dukungan pedagogis yang tepat dapat mengurangi efektivitas pembelajaran dan menimbulkan tantangan baru dalam pengelolaan kelas (Pan et al., 2021; "The Contemporary Orientation of AR in Early Childhood Education," 2019). Studi lain juga menyoroti bahwa meskipun AR dapat meningkatkan keterlibatan dan motivasi belajar anak, kurangnya integrasi kurikulum yang sesuai dan dukungan kebijakan pendidikan menjadi hambatan utama dalam pemanfaatan teknologi ini secara luas di PAUD (He et al., 2022; Lestari et al., 2024). Oleh karena itu, untuk menjembatani kesenjangan ini diperlukan strategi implementasi yang komprehensif, termasuk peningkatan infrastruktur, pelatihan berkelanjutan bagi guru, pengembangan aplikasi AR yang relevan dengan kurikulum PAUD, serta dukungan kebijakan yang kuat agar potensi AR dalam pembelajaran matematika dapat terealisasi secara optimal.

Penelitian mengenai pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika pada siswa PAUD bertujuan untuk menganalisis proses implementasi, faktor pendukung dan penghambat, serta dampak yang dihasilkan dari penggunaan teknologi ini. Proses pemanfaatan AR dalam pembelajaran PAUD melibatkan pengembangan aplikasi yang interaktif dan kontekstual, yang dirancang sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik anak usia dini agar dapat menyampaikan konsep matematika secara visual dan menyenangkan, sehingga meningkatkan motivasi dan keterlibatan belajar anak (AlAli & Al-Barakat, 2024; Walat & Warchol, 2024). Faktor pendukung utama meliputi ketersediaan infrastruktur teknologi yang memadai, pelatihan guru yang berkelanjutan, serta dukungan kebijakan pendidikan yang mendorong integrasi teknologi dalam kurikulum PAUD (Ha et al., 2024; Ulferts et al., 2019).

Sebaliknya, faktor penghambat yang sering ditemukan adalah keterbatasan akses perangkat AR, kurangnya kesiapan guru dalam mengoperasikan teknologi, serta ketidaksesuaian materi AR dengan kurikulum yang berlaku, yang dapat mengurangi efektivitas pembelajaran (Cappelen et al., 2020; Huizen & Plantenga, 2018). Dampak positif dari pemanfaatan AR terlihat dari peningkatan kemampuan kognitif, motivasi belajar, dan pemahaman konsep matematika secara lebih konkret dan menyenangkan bagi anak-anak PAUD (Khalfaoui et al., 2020; McCoy et al., 2017). Namun, untuk mencapai hasil optimal, diperlukan strategi implementasi yang holistik, termasuk pengembangan aplikasi AR yang relevan, pelatihan guru yang intensif, serta dukungan infrastruktur dan kebijakan yang memadai agar teknologi ini dapat berkontribusi secara signifikan dalam proses pembelajaran matematika di PAUD (Egert et al., 2020; Von Suchodoletz et al., 2023).

Studi kasus mendalam tentang integrasi teknologi Augmented Reality (AR) dalam kurikulum matematika PAUD merupakan pendekatan yang relatif baru dan inovatif dalam pendidikan anak usia dini. AR menawarkan pengalaman pembelajaran yang interaktif dan imersif,

yang dapat membantu anak-anak memahami konsep matematika secara lebih konkret dan menyenangkan dibandingkan metode tradisional (Susanto & Nurtamam, 2024). Integrasi AR dalam kurikulum PAUD tidak hanya melibatkan penggunaan aplikasi atau media digital, tetapi juga memerlukan penyesuaian materi pembelajaran agar sesuai dengan tahap perkembangan kognitif anak serta pelatihan guru untuk mengoptimalkan pemanfaatan teknologi (Flavin et al., 2025; Sung et al., 2023).

Studi kasus yang mendalam memungkinkan pengamatan langsung terhadap proses implementasi, termasuk tantangan seperti keterbatasan akses perangkat, kesiapan guru, dan dukungan infrastruktur yang masih belum merata di berbagai lembaga PAUD (Alkouri & Wardat, 2025). Selain itu, penelitian meta-analisis menunjukkan bahwa integrasi objek virtual dalam AR memiliki efek positif yang signifikan terhadap pencapaian matematika siswa, menegaskan potensi AR sebagai alat pembelajaran yang efektif jika diintegrasikan dengan baik dalam kurikulum (Ccanto et al., 2025; Ng et al., 2022). Dengan pendekatan studi kasus, dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor pendukung dan penghambat, serta dampak nyata AR terhadap motivasi, keterlibatan, dan pemahaman konsep matematika pada anak PAUD, sehingga memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan kebijakan dan praktik pembelajaran berbasis teknologi di masa depan (Elmalı et al., 2025; Sungwa & Pembe, 2025).

METODE PENELITIAN

A. Pendekatan Penelitian

Pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus sangat tepat digunakan untuk menganalisis pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam proses pembelajaran matematika pada siswa PAUD karena memungkinkan peneliti menggali secara mendalam pengalaman, persepsi, dan dinamika yang terjadi selama implementasi AR dalam konteks nyata pembelajaran anak usia dini. Studi kasus kualitatif memberikan ruang untuk memahami proses pembelajaran secara holistik, termasuk interaksi antara guru, siswa, dan teknologi AR, serta faktor pendukung dan penghambat yang muncul di lapangan. Metode pengumpulan data yang umum digunakan dalam studi kasus kualitatif meliputi observasi partisipatif, wawancara mendalam dengan guru dan siswa, serta dokumentasi penggunaan media AR dalam pembelajaran, sehingga data yang diperoleh kaya dan kontekstual.

Analisis data dilakukan secara tematik dengan mengidentifikasi pola-pola yang muncul dari transkrip wawancara dan catatan observasi, yang kemudian dikaitkan dengan teori pembelajaran dan teknologi pendidikan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang efektivitas dan tantangan pemanfaatan AR (Akbar et al., 2025; Alibraheim et al., 2023). Studi kasus kualitatif juga memungkinkan peneliti untuk mengeksplorasi dampak penggunaan AR terhadap motivasi, keterlibatan, dan pemahaman konsep matematika pada siswa PAUD secara mendalam, yang sulit diukur hanya dengan pendekatan kuantitatif (Fadilasari & Nugraheni, 2025; Haas et al., 2021; Koparan et al., 2023). Dengan demikian, pendekatan ini sangat sesuai untuk memberikan gambaran rinci dan nuansa yang kaya mengenai bagaimana AR dapat diintegrasikan secara efektif dalam kurikulum matematika PAUD serta faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilannya.

B. Partisipan

Penelitian melibatkan dua kelompok partisipan utama: siswa dan guru.

Tabel 1. Karakteristik Partisipan Penelitian

Jenis Partisipan	Jumlah	Usia	Kriteria Pemilihan	Peran dalam Penelitian
Siswa Kelompok B	30-32 anak	5-6 tahun	Memiliki kemampuan mengenal geometri rendah hingga sedang; diambil dari 2 kelas berbeda untuk kelompok eksperimen dan kontrol.	Mengikuti pembelajaran menggunakan media AR; mengikuti pre-test dan post-test.
Guru Kelas	2 orang	-	Pengajar di PAUD X; bersedia menjadi fasilitator dan observer.	Melaksanakan pembelajaran dengan AR; mengisi angket; diwawancara untuk mendapatkan data kualitatif.

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian mengenai pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam proses pembelajaran matematika pada siswa PAUD, khususnya kelompok B usia 5-6 tahun di PAUD X, menggunakan dua metode utama yaitu observasi proses pembelajaran dan wawancara mendalam dengan guru. Observasi dilakukan secara partisipatif dan sistematis selama sesi pembelajaran berlangsung, dengan fokus pada interaksi siswa dengan media AR, respons siswa terhadap materi matematika yang disajikan, serta peran guru dalam memfasilitasi penggunaan teknologi tersebut. Observasi ini bertujuan untuk menangkap secara langsung dinamika pembelajaran, tingkat keterlibatan siswa, serta kendala yang muncul selama proses pembelajaran berbasis AR (Anggara et al., 2020; Dinayusadewi & Agustika, 2020).

Wawancara mendalam dengan guru dilakukan untuk menggali perspektif guru mengenai efektivitas AR dalam mendukung pemahaman konsep matematika, tantangan yang dihadapi dalam implementasi teknologi, serta strategi yang digunakan untuk mengoptimalkan pembelajaran (Angraini et al., 2022; Wu et al., 2024a). Wawancara ini bersifat semi-terstruktur sehingga memungkinkan guru untuk memberikan jawaban yang kaya dan mendalam, sekaligus memberikan ruang bagi peneliti untuk mengeksplorasi isu-isu yang muncul selama observasi (Hidajat, 2023; Koumpouros, 2024). Kombinasi kedua teknik ini memberikan data kualitatif yang komprehensif, mencakup aspek kognitif, afektif, dan teknis dalam penggunaan AR di kelas PAUD.

Data hasil observasi dan wawancara kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola-pola utama terkait pemanfaatan AR, seperti peningkatan motivasi belajar, pemahaman konsep matematika, serta hambatan teknis dan pedagogis yang dihadapi guru dan siswa (Pujiastuti et al., 2025; Purba & Silitonga, 2021). Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa observasi dan wawancara mendalam merupakan metode efektif untuk mengevaluasi penggunaan teknologi interaktif dalam pendidikan anak usia dini (Gusteti et al., 2025; Kounlaxay et al., 2021).

D. Analisis Data

Model analisis data Miles dan Huberman sangat relevan untuk penelitian kualitatif yang mengkaji pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam proses pembelajaran matematika pada siswa PAUD. Model ini terdiri dari tiga tahap utama yaitu reduksi data, penyajian data, dan

verifikasi data yang saling berkesinambungan untuk menghasilkan temuan yang valid dan bermakna.

Pada tahap reduksi data, peneliti melakukan seleksi, pemfokusan, penyederhanaan, dan transformasi data mentah yang diperoleh dari observasi, wawancara, dan dokumen menjadi bentuk yang lebih ringkas dan terorganisir, sehingga memudahkan proses analisis selanjutnya. Reduksi ini penting untuk mengelola data yang besar dan kompleks, serta menyoroti informasi yang paling relevan terkait bagaimana AR digunakan dalam pembelajaran matematika di PAUD, termasuk aspek motivasi, pemahaman konsep, dan kendala teknis (Ahmad & Junaini, 2020; Cahyono et al., 2020; Syawaludin et al., 2019).

Tahap kedua adalah penyajian data, di mana data yang telah direduksi disusun dalam bentuk yang sistematis seperti tabel, matriks, grafik, atau narasi deskriptif yang memudahkan pemahaman pola dan hubungan antar variabel. Penyajian ini memungkinkan peneliti dan pembaca untuk melihat gambaran utuh proses pembelajaran dengan AR, termasuk interaksi siswa dengan media, peran guru, dan respons siswa terhadap materi matematika. Penyajian data yang baik juga mendukung interpretasi yang lebih mendalam dan memfasilitasi penarikan kesimpulan yang akurat (Bulut & Ferri, 2023; Zhang et al., 2022).

Tahap terakhir adalah verifikasi data atau penarikan kesimpulan dan verifikasi, yang bertujuan memastikan keabsahan dan kredibilitas temuan penelitian. Proses ini melibatkan pengecekan ulang data melalui triangulasi sumber data (observasi, wawancara, dokumen), teknik, dan teori untuk menghindari bias dan meningkatkan keandalan hasil. Verifikasi juga dapat dilakukan dengan melakukan diskusi dengan informan, peer debriefing, atau audit trail untuk memastikan bahwa interpretasi data benar-benar mencerminkan realitas di lapangan. Dalam konteks penelitian AR di PAUD, verifikasi ini penting untuk memastikan bahwa temuan mengenai efektivitas dan tantangan penggunaan AR dalam pembelajaran matematika benar-benar valid dan dapat dipertanggungjawabkan (Palanci & Turan, 2021; Wulandani et al., 2022).

Model Miles dan Huberman memberikan kerangka kerja yang sistematis dan terstruktur untuk menganalisis data kualitatif dalam penelitian pendidikan berbasis teknologi, sehingga sangat cocok untuk mengkaji fenomena kompleks seperti integrasi AR dalam pembelajaran matematika PAUD. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menangkap dinamika pembelajaran secara holistik, mulai dari proses interaksi siswa dengan teknologi hingga refleksi guru terhadap penggunaan media AR. Dengan demikian, hasil analisis dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan media pembelajaran AR yang efektif dan sesuai dengan kebutuhan anak usia dini (Pahmi et al., 2023; Saputro et al., 2024; Syafril et al., 2021).



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Proses Pemanfaatan AR dalam Pembelajaran Matematika

Pemanfaatan Teknologi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika untuk anak usia dini terbukti efektif dalam meningkatkan motivasi, pemahaman konsep abstrak, dan hasil belajar siswa. Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai hasil penelitian tentang proses pemanfaatan AR, yang dijabarkan ke dalam tiga tahapan utama: persiapan, implementasi, dan evaluasi.

1. Tahapan Persiapan

Tahap persiapan merupakan fondasi yang critical dalam memastikan keberhasilan implementasi AR. Penelitian pada tahun 2024 menunjukkan bahwa persiapan yang matang, yang dalam studinya menggunakan model pengembangan ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation), berkontribusi langsung pada kevalidan dan kepraktisan media AR yang dihasilkan (Kramarenko et al., 2019; Nasir et al., 2023). Tahap analisis kebutuhan mengungkap bahwa media konvensional seringkali kurang optimal, sehingga diperlukan inovasi yang dapat memvisualisasikan konsep abstrak matematika, seperti bangun ruang, menjadi lebih nyata (Novaliendry et al., 2022).

- a. Perancangan dan Pengembangan Media AR: Pada tahap perancangan, aspek User-Centered Design menjadi prinsip utama untuk memastikan media sesuai dengan karakteristik anak usia dini. Pengembangan aplikasi AR sering mengadopsi model seperti Multimedia Development Life Cycle (MDLC) yang melibatkan integrasi gambar, suara, video, dan animasi untuk menciptakan pengalaman belajar yang imersif (Algerafi et al., 2023). Penelitian pada tahun 2023 menyatakan, pengembangan "AR Book Math" yang dirancang khusus untuk materi bangun ruang. Hasil validasi ahli terhadap produk ini sangat tinggi, dengan skor 95,1% dari ahli materi dan 91,67% dari ahli media, yang mengkategorikannya sebagai media "Sangat Layak" untuk digunakan dalam pembelajaran (Chang et al., 2025).

- b. **Penyiapan Infrastruktur dan Guru:** Persiapan juga mencakup penyediaan infrastruktur teknis, seperti smartphone atau tablet dengan aplikasi AR yang telah diinstal, serta marker atau buku sebagai pemicu tampilan objek 3D (Putri et al., 2025). Selain itu, pelatihan bagi guru sangat penting agar mereka dapat berperan sebagai fasilitator yang efektif selama proses pembelajaran berlangsung (Pellas et al., 2019).

2. Tahapan Implementasi

Implementasi AR dalam kelas PAUD secara umum berlangsung dalam suasana yang dinamis dan penuh antusiasme. Penelitian tindakan kelas yang dilakukan terhadap 32 anak usia dini membuktikan bahwa media AR berhasil menciptakan lingkungan belajar yang menarik dan memotivasi siswa (Farooq et al., 2022; Lai & Cheong, 2022).

- a. **Peningkatan Motivasi dan Perhatian:** Pada studi tersebut, motivasi belajar anak mengalami peningkatan yang signifikan dari siklus I ke siklus II. Jumlah anak dengan motivasi "sangat baik" meningkat dari 0 anak menjadi 13 anak. Peneliti mencatat bahwa AR berhasil menarik perhatian anak dan menumbuhkan rasa semangat belajar, yang merupakan komponen kunci dalam pembelajaran anak usia dini (Fan et al., 2020).
- b. **Interaksi Langsung dengan Konsep Abstrak:** Dalam konteks matematika, AR memungkinkan anak untuk berinteraksi langsung dengan objek 3D seperti kubus, balok, dan bola. Mereka dapat memutar, memperbesar, dan mengamati bangun ruang dari berbagai sudut pandang secara real-time. Pengalaman sensorimotor ini membantu mengkonkretkan konsep geometri yang sebelumnya abstrak bagi anak (İslim et al., 2024; Rossano et al., 2020). Proses pembelajaran berubah dari teacher-centered menjadi student-centered, di mana anak secara aktif mengeksplorasi materi.
- c. **Peran Guru dalam Implementasi:** Selama implementasi, guru bertindak sebagai pemandu yang mendemonstrasikan cara menggunakan aplikasi, memberikan instruksi, dan memfasilitasi diskusi. Observasi guru dalam penelitian seringkali mengungkapkan peningkatan keterlibatan (engagement), keceriaan, dan keingintahuan anak-anak (Chahartangi et al., 2025; Kazanidis et al., 2021; Lampropoulos et al., 2022).

3. Tahapan Evaluasi

Evaluasi dilakukan untuk mengukur keefektifan media AR, baik dari segi pencapaian akademik maupun respon pengguna (siswa dan guru).

- a. **Keefektifan dalam Meningkatkan Hasil Belajar:** Penelitian quasi-eksperimen di tingkat sekolah dasar, yang relevan untuk melihat dampak kognitif, membuktikan bahwa media AR signifikan dalam meningkatkan hasil belajar. Kelompok eksperimen yang menggunakan AR menunjukkan rata-rata nilai post-test sebesar 82,06, lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol yang menggunakan metode konvensional (76,19) (Henne et al., 2024; Tuli & Mantri, 2020). Analisis statistik (uji t-test) menghasilkan nilai signifikansi $0,000 < 0,05$, yang mengonfirmasi bahwa peningkatan tersebut memang disebabkan oleh intervensi media AR. Dalam penelitian lain, peningkatan nilai pre-test ke post-test untuk materi volume bangun ruang mencapai 71,43%, yang dikategorikan sebagai "Sangat Efektif" (Member & Mohan, 2025).

- b. Respon Positif dari Siswa dan Guru: Dari sisi kepraktisan, angket respon menunjukkan bahwa media AR mendapat tanggapan yang sangat positif. Pada penelitian Fitriani dkk., angket respon siswa untuk uji coba kelompok kecil mencapai 88,9% (sangat praktis) dan penilaian dari guru sebesar 82% (praktis). Guru melaporkan bahwa media AR membuat pembelajaran lebih interaktif dan membantu menjelaskan materi yang sulit (Nainggolan et al., 2018; Wong et al., 2024).

Table 1. Ringkasan Hasil Validasi dan Efektivitas Media AR dalam Beberapa Penelitian

Aspek yang Diukur	Hasil Penelitian (dalam Persentase/Kategori)	Konteks Penelitian
Validasi Ahli Materi	95,1% (Sangat Layak)	Pengembangan AR Book Math untuk bangun ruang .
Validasi Ahli Media	91,67% (Sangat Layak)	Pengembangan AR Book Math untuk bangun ruang .
Kepraktisan (Respon Guru)	82% (Praktis)	Pengembangan media AR untuk matematika kelas IV SD .
Kepraktisan (Respon Siswa)	88,9% (Sangat Praktis)	Pengembangan media AR untuk matematika kelas IV SD .
Peningkatan Hasil Belajar (N-Gain)	71,43% (Sangat Efektif)	Implementasi AR Book Math pada materi volume .
Peningkatan Motivasi Belajar	Dari 0 anak menjadi 13 anak pada kriteria "Sangat Baik"	Penelitian Tindakan Kelas pada 32 anak usia dini

B. Faktor Pendukung dan Penghambat

Implementasi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika di PAUD didukung oleh kemampuannya yang efektif, namun juga dihadapkan pada tantangan seperti kesiapan teknologi dan pedagogis (Mardian et al., 2023; Mubarok, 2021).

Table 2. Faktor Pendukung dan Penghambat Implementasi Augmented Reality dalam Pembelajaran Matematika di PAUD

Kategori	Faktor	Deskripsi dan Dampak
Faktor Pendukung	Meningkatkan Motivasi dan Minat Belajar	AR menciptakan pengalaman belajar yang menyenangkan dan mirip permainan, yang sangat efektif untuk anak usia dini. Hal ini meningkatkan antusiasme, semangat, dan rasa senang anak dalam belajar matematika.
	Memvisualisasikan Konsep Abstrak	Teknologi AR dapat menampilkan objek matematika (seperti bangun ruang) dalam bentuk 3D yang interaktif. Ini membantu mengkonkretkan konsep yang abstrak, sehingga memudahkan pemahaman anak.
	Mendorong Pembelajaran yang Berpusat pada Anak	Dengan AR, anak dapat secara aktif mengeksplorasi materi belajar secara mandiri dan dalam kelompok. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip pembelajaran yang memandang anak sebagai subjek aktif.
	Mendukung Pembelajaran Berdiferensiasi	AR memungkinkan guru untuk mengakomodasi berbagai gaya belajar dan tingkat kemampuan anak dalam satu kelas. Guru dapat menyiapkan materi dan soal dengan tingkat kesulitan yang berbeda menggunakan teknologi yang sama.
Faktor Penghambat	Keterbatasan Infrastruktur dan Akses	Tidak semua sekolah atau anak memiliki akses ke perangkat pendukung (seperti smartphone atau tablet) dengan spesifikasi

		yang memadai dan koneksi internet yang stabil. Hal ini dapat memperlebar kesenjangan digital.
	Kesiapan dan Kompetensi Guru	Guru memerlukan pelatihan khusus untuk dapat mengoperasikan aplikasi AR dan mengintegrasikannya ke dalam rencana pembelajaran dengan efektif. Tanpa pelatihan, pemanfaatan AR tidak akan mencapai tujuan pembelajaran utama.
	Kebutuhan Pengembangan Konten	Membuat aplikasi dan materi AR yang berkualitas memerlukan keahlian teknis (seperti pemodelan 3D dan pemrograman) serta waktu yang tidak sedikit. Metode seperti Multimedia Development Life Cycle (MDLC) dapat digunakan, namun prosesnya kompleks.
	Potensi Gangguan dan Distraksi	Meski bersifat menghibur, elemen yang terlalu "gamifikasi" berpotensi mengalihkan perhatian anak dari tujuan pembelajaran matematika yang sebenarnya jika tidak dirancang dengan baik.

C. Dampak AR terhadap Minat dan Engagement AR

Teknologi Augmented Reality (AR) membawa dampak transformasional dalam pembelajaran, terutama dengan kemampuannya mengubah materi yang abstrak menjadi pengalaman interaktif. Pada siswa PAUD, dampak ini terlihat sangat nyata dalam peningkatan minat, motivasi, dan keterlibatan aktif selama proses belajar.

1. Peningkatan Minat dan Motivasi Belajar

Berdasarkan penelitian, AR berhasil menarik minat belajar anak usia dini dengan menciptakan pengalaman belajar yang menyenangkan dan mirip permainan (game-like experience) (Saki et al., 2025). Visualisasi objek matematika, seperti bentuk geometri tiga dimensi, yang muncul di lingkungan nyata melalui layar gadget menciptakan keajaiban dan rasa ingin tahu yang tinggi pada anak (Einsthendi et al., 2024). Anak-anak tidak lagi melihat matematika sebagai pelajaran yang sulit dan membosankan, melainkan sebagai sebuah aktivitas eksplorasi yang seru.

Penelitian pada tahun 2023 menegaskan bahwa AR memiliki efek positif terhadap keterlibatan peserta didik, karena menawarkan pengalaman belajar yang mendalam (immersive) dan merangsang (Sari & Rosnelly, n.d.). Minat belajar mereka meningkat karena adanya elemen interaktif yang membuat mereka menjadi bagian aktif dari proses pembelajaran, bukan hanya penerima informasi yang pasif. Penelitian di PAUD di Peru juga melaporkan bahwa penggunaan AR sebagai strategi pembelajaran mampu meningkatkan pencapaian kompetensi belajar hingga 80% pada tingkat yang diharapkan dan 20% pada tingkat unggul, menandakan peningkatan minat dan keterlibatan yang berdampak pada hasil belajar (Drljević et al., 2022).

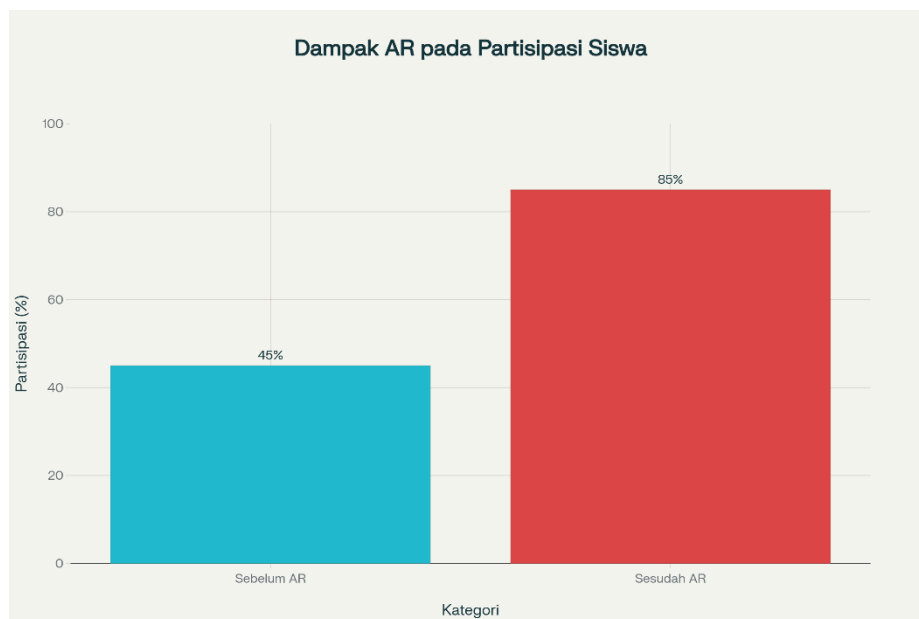
2. Peningkatan Keterlibatan Aktif

Keterlibatan siswa (student engagement) adalah indikator kunci keberhasilan pembelajaran. Penelitian literatur oleh Einsthendi dkk. menyimpulkan bahwa AR meningkatkan keterlibatan peserta didik dan meningkatkan hasil pembelajaran secara keseluruhan (Setyaningsih et al., 2024). Dalam konteks pembelajaran matematika di PAUD, keterlibatan ini dapat diamati dari beberapa perilaku:

- a. Partisipasi Aktif: Anak-anak lebih bersemangat untuk menjawab pertanyaan dan menyelesaikan tantangan matematika yang disajikan melalui AR.

- b. Interaksi Langsung: Anak dapat memutar, memperbesar, dan memanipulasi objek matematika 3D. Interaksi sensorimotor ini membuat konsep abstrak menjadi lebih konkret dan mudah dipahami.
- c. Kemandirian Belajar: Aplikasi AR yang dapat disesuaikan dengan tingkat kemampuan individu memungkinkan setiap anak belajar sesuai dengan kecepatannya sendiri, sehingga meningkatkan rasa percaya diri dan keterlibatan mereka dengan materi (Chao & Chang, 2018).

Untuk merepresentasikan data tersebut secara visual, berikut adalah grafik yang menggambarkan peningkatan partisipasi siswa sebelum dan sesudah penggunaan AR.



Gambar 2. Grafik Peningkatan Partisipasi Siswa Sebelum dan Sesudah Penggunaan AR

Pembahasan

Integrasi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika di PAUD menemukan pijakan teoretis yang kuat dalam karya perintis perkembangan kognitif, Jean Piaget dan Lev Vygotsky. Keunikan AR terletak pada kemampuannya untuk secara simultan memenuhi prinsip-prinsip pembelajaran dari kedua teori ini.

A. Teori Perkembangan Kognitif Piaget (Tahap Praoperasional)

Anak usia 5-6 tahun, menurut klasifikasi Piaget, berada pada tahap praoperasional. Ciri utama tahap ini adalah pemikiran yang masih bersifat egosentris dan kemampuan untuk berpikir secara simbolis, namun terbatas pada pengalaman yang konkret (Ridlwaniyyah et al., 2025). Mereka belum mampu memahami logika yang sepenuhnya abstrak.

- a. Visualisasi Konkret untuk Pemikiran Simbolis: Matematika, dengan konsep seperti bentuk geometri, pada dasarnya bersifat abstrak. Media konvensional (gambar 2D di buku) memaksa anak untuk melakukan abstraksi yang mungkin belum sepenuhnya mampu mereka lakukan. Di sinilah AR berperan penting. Teknologi ini mengubah

simbol-simbol abstrak tersebut menjadi objek tiga dimensi yang nyata dan dapat diinteraksi, sehingga menjembatani kesenjangan antara pemikiran simbolis anak dan sifat abstrak matematika. Sebuah studi menemukan bahwa media AR efektif dalam meningkatkan keterlibatan siswa dan memfasilitasi pemahaman konsep matematika karena menyajikannya dalam bentuk yang lebih dapat dipahami (Zhen & Liu, 2024).

- b. Mengurangi Egosentrisme melalui Perspektif Beragam: Sebuah aplikasi AR yang memungkinkan anak untuk memutar, memperbesar, dan mengamati sebuah kubus dari berbagai sudut pandang, secara halus mengajarkan mereka bahwa sebuah objek dapat terlihat berbeda dari berbagai perspektif. Pengalaman ini membantu mengurangi pemikiran egosentris dengan menunjukkan bahwa terdapat sudut pandang lain selain miliknya sendiri (Madanipour & Cohnsen, 2019).

B. Teori Konstruktivisme Sosial Vygotsky (Zona Perkembangan Proksimal - ZPD)

Vygotsky menekankan bahwa pembelajaran adalah proses sosial. Konsep kuncinya, Zona Perkembangan Proksimal (ZPD), didefinisikan sebagai jarak antara tingkat perkembangan aktual (yang dapat dilakukan anak sendiri) dan tingkat perkembangan potensial (yang dapat dicapai dengan bantuan orang dewasa atau teman sebaya yang lebih mampu) (Zhao et al., 2023).

- a. Guru sebagai Fasilitator yang Terlibat Aktif: Dalam konteks AR, guru bukan hanya operator teknologi, melainkan mediator yang crucial. Guru membimbing anak untuk mengeksplorasi objek AR, mengajukan pertanyaan pemandu (scaffolding), dan menghubungkan penemuan virtual dengan dunia nyata. Pola interaksi ini menciptakan lingkungan di mana pembelajaran terjadi dalam ZPD setiap anak. Peran guru untuk menciptakan lingkungan belajar yang tidak mengancam dan memediasi pembelajaran ini sangat vital untuk memastikan otak anak siap menerima informasi baru (Zhu et al., 2017).
- b. Konteks Sosial untuk Berbagi Penemuan: Pengalaman belajar dengan AR secara inherent bersifat kolaboratif. Anak-anak secara natural akan saling menunjukkan, bertanya, dan menjelaskan penemuan mereka tentang objek AR yang mereka lihat. Interaksi sosial ini, dimana pengetahuan dikonstruksi bersama, merupakan realisasi praktis dari konstruktivisme sosial Vygotsky (Oranç & Küntay, 2019).

C. Teori Pembelajaran Bruner (Mode Enaktif, Ikonik, dan Simbolis)

Jerome Bruner mengusulkan tiga mode representasi pengetahuan: enaktif (belajar melalui tindakan dan gerak), ikonik (belajar melalui gambar dan visual), dan simbolis (belajar melalui bahasa dan simbol) (Rahman et al., 2024). AR unik karena dapat mengintegrasikan ketiga mode ini dalam satu platform.

- a. Integrasi Tiga Mode Representasi: Seorang anak dapat menggerakkan tabletnya untuk menangkap marker (enaktif), melihat objek geometri 3D yang muncul di layar (ikonik), dan kemudian mendengar guru menjelaskan nama serta sifat-sifat objek tersebut sambil menunjuk pada simbol tulisan "KUBUS" (simbolis). Integrasi multimodal ini memfasilitasi pemahaman yang lebih dalam dan kuat karena melibatkan berbagai saluran indera dan kognisi.

D. Implikasi Praktis dan Keunikan Temuan

Implikasi praktis dari temuan ini sangat luas. Pertama, penggunaan AR dalam pembelajaran PAUD dapat meningkatkan kualitas pembelajaran matematika dengan cara yang menyenangkan dan menarik, sehingga dapat mengatasi masalah kurangnya motivasi dan perhatian anak. Kedua, guru perlu mendapatkan pelatihan khusus untuk mengoptimalkan penggunaan AR sebagai media pembelajaran, termasuk pemilihan aplikasi yang sesuai dengan karakteristik perkembangan anak dan integrasi AR dalam kurikulum yang ada. Ketiga, pengembangan aplikasi AR harus mempertimbangkan aspek usability dan keamanan agar ramah anak dan mudah digunakan, serta mendukung interaksi sosial yang produktif antara guru, siswa, dan orang tua (Rahmaniar & Salim, 2021).

Keunikan lain dari pemanfaatan AR adalah kemampuannya untuk menggabungkan pembelajaran matematika dengan konteks dunia nyata, seperti yang ditunjukkan oleh platform EDU-MAT COPERNICUS yang mengintegrasikan data satelit dan narasi interaktif untuk meningkatkan pemahaman matematika dan geosains pada siswa sekolah dasar (Korenova et al., 2019). Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan siswa tetapi juga memperluas wawasan mereka tentang aplikasi matematika dalam kehidupan sehari-hari dan ilmu pengetahuan. Hal ini menunjukkan potensi AR sebagai alat pembelajaran yang tidak hanya efektif secara kognitif tetapi juga relevan secara kontekstual dan multidisipliner.

KESIMPULAN

Pemanfaatan teknologi Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran matematika pada anak usia dini terbukti efektif meningkatkan keterlibatan (engagement) dan pemahaman konsep matematika secara signifikan. AR menghadirkan pengalaman belajar yang interaktif dan kontekstual, sehingga siswa lebih termotivasi dan aktif dalam proses pembelajaran, yang mendukung pemahaman konsep matematika yang seringkali abstrak menjadi lebih konkret dan mudah dipahami. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan AR, terutama berbasis perangkat mobile, mampu meningkatkan partisipasi siswa dan membuat pembelajaran matematika menjadi lebih menyenangkan dan bermakna, sesuai dengan kebutuhan perkembangan kognitif anak usia dini. Namun, keberhasilan implementasi AR sangat bergantung pada dukungan infrastruktur yang memadai dan pelatihan guru yang intensif agar mereka mampu mengintegrasikan teknologi ini secara efektif dalam proses pembelajaran. Pelatihan guru terbukti meningkatkan pemahaman dan keterampilan mereka dalam menggunakan AR, sehingga dapat mengatasi tantangan teknis dan pedagogis yang muncul selama implementasi.

Rekomendasi untuk penelitian lanjutan mencakup pengembangan studi jangka panjang yang mengevaluasi dampak AR terhadap hasil belajar dan perkembangan kognitif anak secara berkelanjutan, serta eksplorasi strategi pelatihan guru yang lebih efektif dan berkelanjutan. Penelitian juga disarankan untuk memperluas cakupan studi ke berbagai konteks sosial dan budaya guna memahami adaptasi dan efektivitas AR dalam lingkungan pembelajaran yang beragam.

REFERENSI

- 1585, L. (2023). USE OF REALIA MEDIA TO IMPROVE CHILDREN'S MATHEMATICS LEARNING OUTCOMES IN PAUD PERMATA IMAN. *Jurnal Bocil: Journal of Childhood Education, Development and Parenting*. <https://doi.org/10.28926/bocil.v1i2.984>

- Acharya, B. (2017). *Factors Affecting Difficulties in Learning Mathematics by Mathematics Learners*. 6, 8. <https://doi.org/10.11648/j.ijeeedu.20170602.11>
- Adhe, K. R., Safitri, D. G. L., Malaikosa, Y. M. L., Simatupang, N. D., & Fauziddin, M. (2025). Enhancing Children's Critical Thinking through an Augmented Reality Application: A Digital Solution for Early Childhood Education. *Golden Age: Jurnal Ilmiah Tumbuh Kembang Anak Usia Dini*. <https://doi.org/10.14421/jga.2025.2025.102-14>
- Ahmad, N., & Junaini, S. N. (2020). Augmented Reality for Learning Mathematics: A Systematic Literature Review. *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, 15, 106–122. <https://doi.org/10.3991/ijet.v15i16.14961>
- Akbar, A., Herman, T., Suryadi, D., Mursalim, .., Alman, .., Putra, E. D., & Blegur, J. (2025). Integrating Augmented Reality in Mathematics Learning to Improve Critical Thinking Skills of Elementary School Students. *Emerging Science Journal*. <https://doi.org/10.28991/esj-2025-09-02-014>
- AlAli, R. M., & Al-Barakat, A. A. (2024). Impact of Augmented Reality-Based Learning on Preparing Children for Creative Reading Skills in Childhood Education Stage. *Forum for Linguistic Studies*. <https://doi.org/10.30564/fls.v6i5.7161>
- Algerafi, M., Zhou, Y., Oubibi, M., & Wijaya, T. T. (2023). Unlocking the Potential: A Comprehensive Evaluation of Augmented Reality and Virtual Reality in Education. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics12183953>
- Alibraheim, E., Hassan, H., & Soliman, M. (2023). Efficacy of educational platforms in developing the skills of employing augmented reality in teaching mathematics. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13669>
- Alkouri, Z., & Wardat, Y. (2025). Digital integration in preschool math: Assessing the efficacy of a structured curriculum in classroom settings. *International Electronic Journal of Mathematics Education*. <https://doi.org/10.29333/iejme/16662>
- Anggara, M., Azizah, N., & Kustiawan, I. (2020). Utilization of augmented reality technology as a learning media for early childhood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 850. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/850/1/012001>
- Angraini, L. M., Alzaber, A., Sari, D. P., Yolanda, F., & Muhammad, I. (2022). IMPROVING MATHEMATICAL CRITICAL THINKING ABILITY THROUGH AUGMENTED REALITY-BASED LEARNING. *AKSIOMA: Jurnal Program Studi Pendidikan Matematika*. <https://doi.org/10.24127/ajpm.v11i4.5968>
- Apriza, B., Suprpto, I., & Mahendra, Y. (2024). The Influence of Augmented Reality-Based Learning Media on the Understanding of Mathematical Concepts in Elementary School Children. *West Science Interdisciplinary Studies*. <https://doi.org/10.58812/wsis.v2i03.694>
- Assawaphum, A., Premthaisong, S., & Chaipidech, P. (2024). Does Interactive Augmented Reality Enhance Primary Students' Geometric Understanding and Visual-Spatial Skills in Mathematics Learning? *International Conference on Computers in Education*. <https://doi.org/10.58459/icce.2024.4987>
- Budiarti, E. (2025). Enhancing Early Childhood Mathematics Learning through Interactive Educational Technology: A Case Study of Digital Batik. *Assyfa Learning Journal*. <https://doi.org/10.61650/alj.v3i1.184>
- Bulut, M., & Ferri, R. B. (2023). A systematic literature review on augmented reality in mathematics education. *European Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.30935/scimath/13124>
- Cahyono, A., Sukestiyarno, Y., Asikin, M., Miftahudin, M., Ahsan, M., & Ludwig, M. (2020). LEARNING MATHEMATICAL MODELLING WITH AUGMENTED REALITY MOBILE MATH TRAILS PROGRAM: HOW CAN IT WORK? *Journal on Mathematics Education*. <https://doi.org/10.22342/jme.11.2.10729.181-192>
- Cappelen, A., List, J., Samek, A., & Tungodden, B. (2020). The Effect of Early-Childhood Education on Social Preferences. *Journal of Political Economy*, 128, 2739–2758. <https://doi.org/10.1086/706858>
- Ccanto, F. F., Vargas, I. M., Acero-Zapaza, I. M., Zamata-Choque, H. W., Morales, L. G., Meza-Chaupis, Y., & Flores-Lira, J.-G. (2025). Computational Thinking in Preschoolers. *Journal of Posthumanism*. <https://doi.org/10.63332/joph.v5i7.2825>
- Chahartangi, F., Zarifsanaiey, N., Mehrabi, M., & Ghoochani, B. (2025). Integrating augmented reality virtual patients into healthcare training: A scoping review of learning design and technical requirements. *PLOS One*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324740>
- Chang, C.-T., Wen-Hung, W.-H., & Semwaiko, G. S. (2025). Evaluating the Impact of Augmented Reality on Learning Outcomes in K-12 Special Education: A Systematic Review. *European Journal of Educational Research*. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.14.4.1167>
- Chao, W.-H., & Chang, R.-C. (2018). Using Augmented Reality to Enhance and Engage Students in Learning Mathematics. *Advances in Social Sciences Research Journal*. <https://doi.org/10.14738/assrj.512.5900>

- Chen, R., & Chan, K. K. (2019). Using Augmented Reality Flashcards to Learn Vocabulary in Early Childhood Education. *Journal of Educational Computing Research*, 57, 1812–1831. <https://doi.org/10.1177/0735633119854028>
- Citariani, N. M., Agustini, K., Sudhata, G. W., Suartama, K., & Sudarma, K. (2025). Exploring The Future of Early Childhood Education: Research Trends and Implementation of Augmented Reality. *Jurnal Paedagogy*. <https://doi.org/10.33394/jp.v12i3.15581>
- Criollo-C, S., Guerrero-Arias, A., Guaña-Moya, J., Samala, A., & Luján-Mora, S. (2024). Towards Sustainable Education with the Use of Mobile Augmented Reality in Early Childhood and Primary Education: A Systematic Mapping. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16031192>
- Demitriadou, E., Stavroulia, K.-E., & Lanitis, A. (2019). Comparative evaluation of virtual and augmented reality for teaching mathematics in primary education. *Education and Information Technologies*, 25, 381–401. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09973-5>
- Dinayusadewi, N. P., & Agustika, G. N. S. (2020). Development Of Augmented Reality Application As A Mathematics Learning Media In Elementary School Geometry Materials. *Journal of Education Technology*. <https://doi.org/10.23887/jet.v4i2.25372>
- Drljević, N., Botički, I., & Wong, L. (2022). Investigating the different facets of student engagement during augmented reality use in primary school. *Br. J. Educ. Technol.*, 53, 1361–1388. <https://doi.org/10.1111/bjet.13197>
- Egert, F., Dederer, V., & Fukkink, R. (2020). The impact of in-service professional development on the quality of teacher-child interactions in early education and care: A meta-analysis. *Educational Research Review*. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.100309>
- Einsthendi, A. D., Rasyid, M. I. A., & Wicaksono, J. B. (2024). Augmented Reality: Impact on student engagement and learning. *Hipkin Journal of Educational Research*, 1(2), 239–250. <https://doi.org/https://doi.org/10.64014/hipkin-jer.v1i2.22>
- Elmalı, F., Özdemir, O., & Şanal, S. Ö. (2025). Are we catching up - Teaching Mathematics with Technology in Early Childhood Classrooms. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi*. <https://doi.org/10.29299/kefad.1551416>
- Fadilasari, E., & Nugraheni, N. (2025). Development of Assemblr Edu Learning Media based on Augmented Reality to Improve Elementary School Students' Mathematics Problem Solving Ability. *Jurnal Kependidikan: Jurnal Hasil Penelitian Dan Kajian Kepustakaan Di Bidang Pendidikan, Pengajaran Dan Pembelajaran*. <https://doi.org/10.33394/jk.v11i1.14831>
- Fan, M., Antle, A., & Warren, J. (2020). Augmented Reality for Early Language Learning: A Systematic Review of Augmented Reality Application Design, Instructional Strategies, and Evaluation Outcomes. *Journal of Educational Computing Research*, 58, 1059–1100. <https://doi.org/10.1177/0735633120927489>
- Farooq, S., Rahman, H., Raza, S., Raees, M., & Jung, S. K. (2022). Designing Gamified Application: An Effective Integration of Augmented Reality to Support Learning. *IEEE Access*, 10, 121385–121394. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3221473>
- Flavin, E., Hwang, S., & Flavin, M. (2025). Augmented Reality for Mathematics Achievement: A Meta-Analysis of Main and Moderator Effects. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-025-10546-x>
- Gusteti, M., Musdi, E., Dewata, I., & Rasli, A. (2025). A Ten-Year Bibliometric Study on Augmented Reality in Mathematical Education. *European Journal of Educational Research*. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.14.3.723>
- Ha, N. T. N., Tham, M., & Hurley, P. (2024). Process Quality in Early Childhood Education and Care in Australia: A Systematic Literature Review. *Early Childhood Education Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10643-024-01735-4>
- Haas, B., Kreis, Y., & Lavicza, Z. (2021). Case Study on Augmented Reality, Digital and Physical Modelling with Mathematical Learning Disabilities Students in an Elementary School in Luxembourg. *International Journal for Technology in Mathematics Education*. https://doi.org/10.1564/tme_v28.3.02
- Harson, S., U, H. K., Palakkal Mohamed, Varma A., Prasad, K., Verma, H., & Professor, Dr. V. (2025). Challenges in Learning with Traditional Alphabet & Math Puzzle Sets. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. <https://doi.org/10.55041/isjem02705>
- He, S., Fan, M., & Liu, Z. (2022). Research on the Design and Effect of Early Childhood Education Games Supported by AR Technology. *2022 International Symposium on Educational Technology (ISET)*, 183–185. <https://doi.org/10.1109/iset55194.2022.00046>

- Henne, A., Syskowski, S., Krug, M., Möhrke, P., Thoms, L., & Huwer, J. (2024). How to Evaluate Augmented Reality Embedded in Lesson Planning in Teacher Education. *Education Sciences*. <https://doi.org/10.3390/educsci14030264>
- Hidajat, F. A. (2023). Augmented reality applications for mathematical creativity: a systematic review. *Journal of Computers in Education*, 1–50. <https://doi.org/10.1007/s40692-023-00287-7>
- Hidayati, A. (2024). PENGENALAN BERHITUNG MATEMATIKA PADA ANAK USIA DINI DI RA NURUL JADID. *AL IHSAN: Jurnal Pendidikan Islam Anak Usia Dini*. <https://doi.org/10.69552/alihsan.v5i1.2497>
- Huizen, T., & Plantenga, J. (2018). Do children benefit from universal early childhood education and care? A meta-analysis of evidence from natural experiments. *Economics of Education Review*. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2018.08.001>
- Ihsan, A., Munawir, M., & Amir, F. (2017). *Learning Media Of Mathematical Operations In Early Childhood Based Augmented Reality*. 1, 19–22. <https://consensus.app/papers/learning-media-of-mathematical-operations-in-early-ihsan-munawir/3d24de4e08965b7292c3277eb190ba5a/>
- İslim, Ö. F., Namlı, Ş., Sevim, N., Özçakır, B., & Lavicza, Z. (2024). Augmented Reality in Mathematics Education: A Systematic Review. *Participatory Educational Research*. <https://doi.org/10.17275/per.24.52.11.4>
- Kazanidis, I., Pellas, N., & Christopoulos, A. (2021). A Learning Analytics Conceptual Framework for Augmented Reality-Supported Educational Case Studies. *Multimodal Technol. Interact.*, 5, 9. <https://doi.org/10.3390/mti5030009>
- Kaźmierczak, R., Grunwald, G., Skowroński, R., Kaźmierczak, L., & Kowalczyk, C. (2025). Augmented reality tools for mathematics and geoscience education. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02090-z>
- Khalifaoui, A., García-Carrión, R., & Villardón-Gallego, L. (2020). A Systematic Review of the Literature on Aspects Affecting Positive Classroom Climate in Multicultural Early Childhood Education. *Early Childhood Education Journal*, 49, 71–81. <https://doi.org/10.1007/s10643-020-01054-4>
- Koparan, T., Dinar, H., Koparan, E., & Haldan, Z. S. (2023). Integrating Augmented Reality into Mathematics Teaching and Learning and Examining Its Effectiveness. *Thinking Skills and Creativity*. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2023.101245>
- Korenova, L., Lavicza, Z., & Veress-Bágyi, I. (2019). Augmented Reality Applications in Early Childhood Education. *Augmented Reality in Educational Settings*. https://doi.org/10.1163/9789004408845_005
- Koumpouros, Y. (2024). Revealing the true potential and prospects of augmented reality in education. *Smart Learn. Environ.*, 11, 2. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00288-0>
- Kounlaxay, K., Shim, Y.-T., Kang, S., Kwak, H.-Y., & Kim, S. (2021). Learning Media on Mathematical Education based on Augmented Reality. *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, 15, 1015–1029. <https://doi.org/10.3837/tiis.2021.03.011>
- Kramarenko, T., Pylypenko, O., & Zaselskiy, V. (2019). *Prospects of using the augmented reality application in STEM-based Mathematics teaching*. 130–144. <https://doi.org/10.31812/educdim.v53i1.3843>
- Lai, J. W., & Cheong, K. (2022). Educational Opportunities and Challenges in Augmented Reality: Featuring Implementations in Physics Education. *IEEE Access*, PP, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3166478>
- Lampropoulos, G., Keramopoulos, E., Diamantaras, K., & Evangelidis, G. (2022). Augmented Reality and Gamification in Education: A Systematic Literature Review of Research, Applications, and Empirical Studies. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app12136809>
- Lestari, S., Eldina, R., Sumartha, D., & Apipah, N. (2024). Implementation of Augmented Reality to Enhance Alphabet Letter Understanding at Paud Bintang Jonggol. *International Journal Software Engineering and Computer Science (IJSECS)*. <https://doi.org/10.35870/ijsecs.v4i1.2179>
- Madanipour, P., & Cöhrssen, C. (2019). Augmented reality as a form of digital technology in early childhood education. *Australasian Journal of Early Childhood*, 45, 13–15. <https://doi.org/10.1177/1836939119885311>
- Mardian, Z., Defit, S., & Sumijan. (2023). Implementasi Augmented Reality Berbasis Android sebagai Media Pembelajaran Matematika Dimensi Tiga. *Jambura Journal of Informatics (JJI)*, 5(1), 30–44. <https://doi.org/10.37905/jji.v5i1.19361>
- Masmuzidin, M., & Aziz, N. A. (2018). The Current Trends of Augmented Reality in Early Childhood Education. *The International Journal of Multimedia & Its Applications*, 10, 47–58. <https://doi.org/10.5121/ijma.2018.10605>
- Matematika, P. P., Gumilar, E. B., Permatasari, K. G., Stai, & Blora, M. (2024). Application of Games-Based Mathematics Learning in the Preschool-Elementary Transition. *Journal of Insan Mulia Education*. <https://doi.org/10.59923/joinme.v2i1.78>

- McCoy, D., Yoshikawa, H., Ziol-Guest, K., Duncan, G., Schindler, H., Magnuson, K., Yang, R., Koepp, A., & Shonkoff, J. (2017). Impacts of Early Childhood Education on Medium- and Long-Term Educational Outcomes. *Educational Researcher*, 46, 474–487. <https://doi.org/10.3102/0013189x17737739>
- Member, I. K. G. S., & Mohan, U. (2025). An Augmented Reality Framework for Education: Deep Learning Integration and Impact Evaluation. *IEEE Access*, 13, 56067–56084. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3551656>
- Mubarok, R. A. (2021). Perancangan Apliaksi Edukasi Pengenalan Alfabet Berbasis Augmented Reality menggunakan Metode Multimedia Development Life Cycle. *Jurnal Algoritma*, 18(2), 614–623. <https://doi.org/https://doi.org/10.33364/ALGORITMA/V.18-2.979>
- Munusamy, T., Yatim, M. H. M., & Suhaimi, S. Bin. (2025). Challenges in Teaching and Learning Mathematics among Remedial Students. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v15-i3/23976>
- Mutia, I. (2025). Exploring Students' Challenges in Understanding Mathematical Concepts. *Psychology and Education: A Multidisciplinary Journal*. <https://doi.org/10.70838/pemj.421006>
- Naida, R., Berezovska, L., Bulgakova, O., Kravets, N., & Savchenkova, M. (2024). INTEGRATING INNOVATIVE PEDAGOGICAL TECHNOLOGIES INTO EARLY CHILDHOOD EDUCATION TRAINING PROGRAMS: *Conhecimento & Diversidade*. <https://doi.org/10.18316/rcd.v16i41.11551>
- Nainggolan, E. R., 3rd, H. A., Rangga, A., & Nalendra, A. (2018). The Implementation of Augmented Reality as Learning Media in Introducing Animals for Early Childhood Education. *2018 6th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/citsm.2018.8674350>
- Nasir, N., Ibrahim, A. B., Asmadi, M. S., Pandyan, M., Jie, L. L., & Hussin, M. S. Z. (2023). Augmented Reality Learning in Mathematics Education: Systematic Literature Review. *International Journal of Education, Science, Technology, and Engineering (IJESTE)*. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijeste-0602.581>
- Ncube, M., & Luneta, K. (2025). Addressing mathematics learning challenges through concept-based instruction. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*. <https://doi.org/10.31129/lumat.12.4.2319>
- Ng, A., Kewalramani, S., & Kidman, G. (2022). Integrating and navigating STEAM (inSTEAM) in early childhood education: An integrative review and inSTEAM conceptual framework. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. <https://doi.org/10.29333/ejmste/12174>
- Nirmala, B., Solihatin, E., & Sukardjo, Moch. (2024). Augmented Reality in Early Childhood Education: Trends, Practices, and Insights from a Literature Review. *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, 18, 50–67. <https://doi.org/10.3991/ijim.v18i22.50337>
- Novaliendry, D., Saltriadi, K. S., Mahyuddin, N., Sriwahyuni, T., & Ardi, N. (2022). Development of Interactive Media Based on Augmented Reality for Early Childhood Learning Around the Home. *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, 16, 4–20. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i24.34501>
- Oranç, C., & Küntay, A. (2019). Learning from the real and the virtual worlds: Educational use of augmented reality in early childhood. *Int. J. Child Comput. Interact.*, 21, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2019.06.002>
- Pahmi, S., Hendriyanto, A., Sahara, S., Muhaimin, L. H., Kuncoro, K. S., & Usodo, B. (2023). Assessing the Influence of Augmented Reality in Mathematics Education: A Systematic Literature Review. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. <https://doi.org/10.26803/ijlter.22.5.1>
- Palancı, A., & Turan, Z. (2021). How Does the Use of the Augmented Reality Technology in Mathematics Education Affect Learning Processes?: A Systematic Review. *Uluslararası Eğitim Programları ve Öğretim Çalışmaları Dergisi*. <https://doi.org/10.31704/ijocis.2021.005>
- Pan, Z., López, M. F., Li, C., & Liu, M. (2021). Introducing augmented reality in early childhood literacy learning. *Research in Learning Technology*. <https://doi.org/10.25304/rlt.v29.2539>
- Pellas, N., Fotaris, P., Kazanidis, I., & Wells, D. (2019). Augmenting the learning experience in primary and secondary school education: a systematic review of recent trends in augmented reality game-based learning. *Virtual Reality*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0347-2>
- Petrlík, I., Mayhuasca, J., Rodriguez, C., Coveña, J., & Esparza, R. (2022). Mobile Augmented Reality applied as a learning strategy for early childhood education students. *International Journal of Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.36224/ijes.150103>
- Pokhrel, M. (2023). Challenges Toward Learning Mathematics. *Shikshya Sandesh*. <https://doi.org/10.3126/ss.v6i1.63094>

- Prídavková, A. (2023). MODELLING OF ELEMENTARY MATHEMATICAL CONCEPTS USING AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY IN PRIMARY EDUCATION. *EDULEARN Proceedings*. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2023.1893>
- Pujiastuti, E., Sugiman, S., & Pambudi, M. (2025). Promoting Mathematics Problem-Solving Ability in Gamification Integration Using Augmented Reality. *European Journal of Educational Research*. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.14.2.645>
- Purba, D. E. R., & Silitonga, P. (2021). Learning and Playing in Early Childhood with Augmented Reality Technology. *Telematika*. <https://doi.org/10.31315/telematika.v18i3.5569>
- Putri, A. A., H, N., & Taris, L. (2025). Development an Augmented Reality-Based Mathematics Application to Improve Junior High School Students' Comprehension of Mathematical Concepts. *Teknodika*. <https://doi.org/10.20961/teknodika.v23i1.97035>
- R, P. K., S, R. K., K, S., & J, P. K. (2024). Interactive Teaching Learning in Kindergarten Education: Augmented Reality as a Digital Tool. *Proceedings of the International Conference on Advancements in Materials, Design and Manufacturing for Sustainable Development, ICAMDMS 2024, 23-24 February 2024, Coimbatore, Tamil Nadu, India*. <https://doi.org/10.4108/eai.23-2-2024.2347042>
- Rahman, F. N. R., Rahman, T., & Mulyana, E. (2024). Designing Augmented Reality-Based Learning Media for Facilitating Early Childhood's Naturalistic Intelligence. *Jurnal Tarbiyah Dan Ilmu Keguruan Borneo*. <https://doi.org/10.21093/jtikborneo.v5i2.7125>
- Rahmaniar, S., & Salim. (2021). Development of Augmented Reality-Based Learning Media in Early Childhood Learning. *SEA-CECCEP*. <https://doi.org/10.70896/seacecep.v2i01.16>
- Redondo, B., Cózar-Gutiérrez, R., González-Calero, J., & Ruiz, R. S. (2019). Integration of Augmented Reality in the Teaching of English as a Foreign Language in Early Childhood Education. *Early Childhood Education Journal*, 48, 147–155. <https://doi.org/10.1007/s10643-019-00999-5>
- Ridlwaniyyah, N., Zaenuri, & Walid. (2025). Efektivitas Media Pembelajaran Berbasis Augmented Reality Terhadap Kemampuan Berpikir Kritis Siswa Mata Pelajaran Matematika. *PRISMA, Prosiding Seminar Nasional Matematika*, 8, 242–247.
- Rossano, V., Lanzilotti, R., Cazzolla, A., & Roselli, T. (2020). Augmented Reality to Support Geometry Learning. *IEEE Access*, 8, 107772–107780. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3000990>
- Saki, S., Usodo, B., & Santosa, E. B. (2025). Effectiveness of augmented reality application on critical thinking skills of elementary school students based on learning interest. *Jurnal JPSD (Jurnal Pendidikan Sekolah Dasar)*. <https://doi.org/10.26555/jpsd.v12i1.a30760>
- Saputro, T. V. D., Purnasari, P., Lumbantobing, W. L., & Sadewo, Y. (2024). Augmented Reality for Mathematics Learning: Could We Implement It in Elementary School? *Mosharafa: Jurnal Pendidikan Matematika*. <https://doi.org/10.31980/mosharafa.v13i1.1984>
- Sari, E. N., & Rosnelly, R. (n.d.). Penerapan Augmented Reality Pada Pembelajaran Matematika Berbasis Android. *J. Mach Learn. Data Anal.*, 2(1), 45–50.
- Setyaningsih, D. A., As-Salamah, S. F., Setiyani, E. D., & Fakhriyana, D. (2024). Augmented reality in influencing interest in learning mathematics. *Union: Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika*. <https://doi.org/10.30738/union.v12i1.16536>
- Shaaban, T., & Mohamed, A. (2023). Exploring the effectiveness of augmented reality technology on reading comprehension skills among early childhood pupils with learning disabilities. *Journal of Computers in Education*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s40692-023-00269-9>
- Sung, J., Lee, J. Y., & Chun, H. (2023). Short-term effects of a classroom-based STEAM program using robotic kits on children in South Korea. *International Journal of STEM Education*, 10, 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00417-8>
- Sungwa, R., & Pembe, A. (2025). Mapping the Integration of Digital Technology in Mathematics Learning for Children with Disabilities in Inclusive Early Childhood Education: A Bibliometric Study. *International Journal on Studies in Education*. <https://doi.org/10.46328/ijonse.350>
- Susanto, R., & Nurtamam, M. (2024). Development of AR-Based Educational Games for Mathematics Learning in Elementary Schools. *Journal of Computer Science Advancements*. <https://doi.org/10.70177/jscs.v2i5.1325>
- Syafri, S., Asril, Z., Engkizar, E., Zafirah, A., Agusti, F., & Sugiharta, I. (2021). Designing prototype model of virtual geometry in mathematics learning using augmented reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 1796. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1796/1/012035>

- Syawaludin, A., Gunarhadi, G., Rintayati, P., Prof., T. T., & Dr., T. T. (2019). Development of Augmented Reality-Based Interactive Multimedia to Improve Critical Thinking Skills in Science Learning. *International Journal of Instruction*. <https://doi.org/10.29333/iji.2019.12421a>
- The Contemporary Orientation of AR in Early Childhood Education. (2019). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. <https://doi.org/10.35940/ijitee.l1124.10812s19>
- Tuli, N., & Mantri, A. (2020). Evaluating Usability of Mobile-Based Augmented Reality Learning Environments for Early Childhood. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37, 815–827. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1843888>
- Ulferts, H., Wolf, K., & Anders, Y. (2019). Impact of Process Quality in Early Childhood Education and Care on Academic Outcomes: Longitudinal Meta-Analysis. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13296>
- Urooj, S., & Khan, M. (2024). The use of AR for the Development of Early Childhood Education: Little Learner App for Alphabets, Colors, and Poem learning. 2024 *International Conference on IT and Industrial Technologies (ICIT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/icit63607.2024.10859802>
- Volioti, C., Orovas, C., Sapounidis, T., Trachanas, G., & Keramopoulos, E. (2023). Augmented Reality in Primary Education: An Active Learning Approach in Mathematics. *Comput.*, 12, 207. <https://doi.org/10.3390/computers12100207>
- Von Suchodoletz, A., Lee, D., Henry, J., Tamang, S., Premachandra, B., & Yoshikawa, H. (2023). Early childhood education and care quality and associations with child outcomes: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285985>
- Walat, W., & Warchoł, T. (2024). Preliminary identification of the potential of using MIEM in the context of stimulating the development of selected cognitive processes of students in early childhood education. *Studia z Teorii Wychowania*. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4425>
- Wong, J. Y., Azam, A., Cao, Q., Huang, L., Xie, Y., Winkler, I., & Cai, Y. (2024). Evaluations of Virtual and Augmented Reality Technology-Enhanced Learning for Higher Education. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics13081549>
- Wu, J. A., Sandjaja, T. A., & Kurniawan, Y. (2024). Augmented Reality Revolution in Early Childhood Year and Elementary Learning: Systematic Literature Review. 2024 *IEEE 6th Symposium on Computers & Informatics (ISCI)*, 60–65. <https://doi.org/10.1109/iscic62787.2024.10668146>
- Wulandani, C., Putri, M. A., Pratiwi, R. I., & Sulong, K. (2022). Implementing Project-Based Steam Instructional Approach in Early Childhood Education in 5.0 Industrial Revolution Era. *Indonesian Journal of Early Childhood Educational Research (IJECEER)*. <https://doi.org/10.31958/ijecer.v1i1.5819>
- Yilmaz, R. (2016). Educational magic toys developed with augmented reality technology for early childhood education. *Comput. Hum. Behav.*, 54, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.07.040>
- Zhang, J., Li, G., Huang, Q., Feng, Q., & Luo, H. (2022). Augmented Reality in K–12 Education: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Literature from 2000 to 2020. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14159725>
- Zhao, X., Ren, Y., & Cheah, K. (2023). Leading Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) in Education: Bibliometric and Content Analysis From the Web of Science (2018–2022). *SAGE Open*, 13. <https://doi.org/10.1177/21582440231190821>
- Zhen, X., & Liu, J. (2024). *Early Childhood Apps Design with Augmented Reality for Learning*. 211–220. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76815-6_15
- Zhu, Y., Yang, X., & Wang, S. J. (2017). Augmented Reality Meets Tangibility: A New Approach for Early Childhood Education. *EAI Endorsed Trans. Creative Technol.*, 4. <https://doi.org/10.4108/eai.5-9-2017.153059>