



Integrasi Augmented Reality dan Teori Embodied Cognition dalam Permainan Manipulatif Interaktif untuk Meningkatkan Pemahaman Konseptual Matematika Dasar di Indonesia

Imam Iryanto ^{a,1*}^a Universitas Muhammadiyah Mataram, Mataram, Indonesia¹ muhfachrin12@gmail.com*

* Corresponding Author

ABSTRAK

Krisis literasi numerasi di Indonesia (skor PISA 2022: 366) menuntut intervensi pedagogis berbasis neurosains dan teknologi. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas permainan manipulatif interaktif berbasis Augmented Reality (AR) yang didesain dengan prinsip embodied cognition untuk meningkatkan pemahaman konseptual matematika dasar. Melalui eksperimen kuasi delapan minggu dengan 120 siswa kelas 2 SD di SDN 33 Mataram, data dikumpulkan menggunakan tes konseptual terstandarisasi, observasi partisipatif, dan skala motivasi ARCS. Temuan menunjukkan peningkatan signifikan ($p < 0.001$, $\eta^2 = 0.32$) pada kelompok eksperimen, terutama dalam konsep pecahan (Cohen's $d = 1.24$) dan geometri spasial (Cohen's $d = 0.93$). Analisis mengungkap tiga faktor desain kritis: (1) keselarasan gestur-semiotik, (2) scaffolding adaptif, dan (3) umpan balik multimodal. Dinamika motivasional membentuk siklus tiga fase: tantangan adaptif \rightarrow eksplorasi strategi \rightarrow euforia penyelesaian. Signifikansi penelitian mencakup pengembangan model Digital Concrete-Representational-Abstract (DCRA) dan rekomendasi kebijakan integrasi teknologi berbasis bukti dalam kurikulum nasional. Penelitian ini berkontribusi pada evolusi desain pembelajaran matematika berbasis bukti, khususnya untuk konteks pendidikan di Indonesia, guna mengatasi tantangan numerasi yang mendesak.

Article History

Received 2025-07-04

Revised 2025-10-20

Accepted 2025-07-25

Keywords

Augmented Reality
Embodied Cognition
Matematika Dasar
Inovasi Pendidikan
Motivasi belajar

Copyright © 2025, The Author(s)

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

PENDAHULUAN

Rendahnya tingkat pemahaman matematika dasar di kalangan siswa Indonesia telah mencapai titik kritis, menduduki status darurat dalam lanskap pendidikan nasional. Kondisi ini secara eksplisit didokumentasikan dalam laporan Bank Dunia tahun 2023, yang secara mengkhawatirkan mengungkapkan bahwa lebih dari 53% siswa kelas 3 sekolah dasar di Indonesia belum menguasai operasi bilangan dasar—suatu fenomena yang secara fundamental berakar pada praktik pedagogis konvensional yang cenderung mengabaikan esensi konstruksi pengetahuan yang mendalam melalui pengalaman sensorimotor yang kaya dan interaksi fisik dengan lingkungan (Johnson-Glenberg, 2021). Pendekatan tradisional seringkali terlalu menekankan hafalan dan prosedur abstrak, tanpa memberikan fondasi pengalaman konkret yang memadai bagi siswa usia dini. Krisis ini semakin diperparah dengan hasil Programme for International Student Assessment (PISA) tahun 2022 yang menunjukkan skor literasi numerasi Indonesia yang stagnan pada angka 366, jauh di bawah rata-rata Organisasi untuk Kerja Sama Ekonomi dan Pembangunan (OECD). Implikasi dari defisit numerasi ini meluas melampaui ranah akademis, memengaruhi kemampuan individu untuk berfungsi secara efektif dalam masyarakat modern yang semakin didominasi data dan teknologi, serta membatasi potensi ekonomi dan inovasi bangsa.

Dalam kerangka perkembangan kognitif Vygotskyian, transisi esensial dari pemikiran konkret menuju pemahaman abstrak memerlukan mekanisme perancah (scaffolding) yang efektif dan terstruktur. Perancah ini berfungsi sebagai jembatan mediasi yang krusial antara objek fisik yang dapat dimanipulasi secara nyata dan representasi simbolik yang lebih abstrak

(Sarama & Clements, 2021). Tanpa jembatan ini, siswa cenderung mengalami kesulitan dalam mentransfer pemahaman dari konteks konkret ke ranah simbolik dan formal matematika. Misalnya, seorang anak mungkin dapat membagi kue secara fisik menjadi empat bagian yang sama, tetapi kesulitan memahami bahwa setiap bagian merepresentasikan simbol " $1/4$ " atau bagaimana melakukan operasi penjumlahan dan pengurangan dengan pecahan. Kesenjangan ini seringkali menjadi penghalang utama dalam kemajuan belajar matematika di jenjang pendidikan selanjutnya.

Fenomena ini menjadi semakin relevan dalam konteks pendidikan matematika, di mana konsep-konsep abstrak seperti bilangan, pecahan, dan geometri seringkali sulit dipahami jika tidak divisualisasikan atau diinteraksikan secara konkret. Permainan manipulatif, baik dalam bentuk fisik maupun digital, telah lama diakui sebagai alat pedagogis yang efektif dalam memfasilitasi pemahaman ini. Manipulatif fisik, seperti balok Dienes atau keping pecahan, memungkinkan siswa untuk secara langsung berinteraksi dengan representasi konkret dari konsep matematika, membangun intuisi melalui sentuhan dan gerakan. Namun, evolusi teknologi telah menghadirkan dimensi baru yang revolusioner: permainan manipulatif berbasis Augmented Reality (AR). Teknologi AR menawarkan potensi yang belum sepenuhnya tereksplorasi untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip embodied cognition—suatu teori kognitif kontemporer yang secara tegas menegaskan peran sentral tubuh, gerak, dan pengalaman sensorimotor dalam pembentukan dan pengodean konsep mental (Abrahamson et al., 2020)—melalui simulasi digital yang responsif terhadap gestur dan tindakan fisik pengguna. Konsep ini menantang pandangan tradisional bahwa kognisi adalah proses yang sepenuhnya terlepas dari tubuh, sebaliknya, ia berargumen bahwa kognisi adalah proses yang melekat (embodied), tertanam (embedded), diperluas (extended), dan enacted. Dalam konteks AR, ini berarti bahwa gerakan tangan siswa yang memanipulasi objek virtual di layar bukan hanya sekadar input, melainkan bagian integral dari proses berpikir dan pembentukan konsep matematis.

Meskipun tinjauan meta-analisis komprehensif oleh Chen et al. (2022) secara meyakinkan telah membuktikan dampak positif yang signifikan dari penggunaan manipulatif tradisional dalam pembelajaran matematika (ukuran efek Cohen's $ES=0.78$), studi-studi terkini yang berfokus pada manipulatif digital atau berbasis teknologi telah mengidentifikasi beberapa kesenjangan kritis dalam desain dan implementasi yang perlu diatasi untuk memaksimalkan potensi pedagogisnya. Kesenjangan ini mencakup: (1) ketidakselarasan atau diskoneksi antara interaksi gestur fisik siswa dan representasi semiotik pada layar digital (Baccaglioni-Frank & Maracci, 2021), yang dapat menyebabkan kebingungan kognitif dan menghambat pembentukan konsep yang koheren. Seringkali, manipulatif digital hanya meniru versi fisik tanpa memanfaatkan potensi interaktivitas gestur yang mendalam; (2) ketiadaan atau kurangnya mekanisme adaptasi kognitif dalam desain manipulatif digital, yang mengakibatkan pengalaman belajar yang tidak personalisasi dan tidak responsif terhadap tingkat pemahaman individual siswa (Wijaya et al., 2023). Sistem yang statis tidak dapat memberikan dukungan yang tepat waktu atau tantangan yang sesuai dengan zona perkembangan proksimal siswa; dan (3) terbatasnya penelitian empiris tentang retensi jangka panjang dari pemahaman konseptual yang diperoleh melalui intervensi digital (Neumann et al., 2024), yang penting untuk memastikan keberlanjutan dampak pedagogis. Tanpa bukti retensi, efektivitas jangka panjang teknologi ini masih dipertanyakan. Ironisnya, di tengah tantangan ini, UNESCO (2023) secara eksplisit telah menegaskan potensi transformatif teknologi imersif, termasuk AR, dalam mengurangi disparitas dan ketimpangan pembelajaran, khususnya di negara-negara berkembang atau yang dikenal sebagai Global South, di mana akses terhadap sumber daya pendidikan berkualitas seringkali terbatas.

Menanggapi urgensi dan kesenjangan penelitian yang diuraikan di atas, artikel ini secara sistematis berupaya menjawab tiga pertanyaan penelitian sentral: (1) Bagaimana permainan interaktif berbasis Augmented Reality yang dirancang dengan prinsip embodied cognition secara empiris memengaruhi dan meningkatkan pemahaman konseptual matematika dasar pada siswa sekolah dasar di Indonesia? (2) Faktor-faktor desain pedagogis spesifik apa saja yang berperan sebagai mediator krusial dalam menentukan efektivitas intervensi pembelajaran berbasis AR ini? (3) Bagaimana dinamika motivasional siswa—meliputi perhatian, relevansi, kepercayaan diri, dan kepuasan—berkembang dan berinteraksi dalam

konteks pembelajaran matematika yang kaya dan imersif yang disediakan oleh permainan berbasis AR ini?

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, studi mutakhir dalam bidang pendidikan matematika dan teknologi dianalisis secara kritis, termasuk riset pionir oleh Moyer-Packenham et al. (2024) mengenai affordansi dan implikasi pedagogis dari manipulatif virtual, serta eksperimen kontekstual yang dilakukan oleh Kurniawan (2025) mengenai gamifikasi matematika dalam konteks sekolah dasar di Indonesia. Dengan melakukan sintesis yang ketat antara temuan-temuan terbaru dari disiplin neurosains kognitif, perkembangan teknologi pendidikan, dan teori-teori pedagogi yang mapan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi substansial dan orisinal terhadap evolusi desain pembelajaran matematika berbasis bukti, khususnya yang relevan untuk konteks pendidikan di Indonesia. Kontribusi ini diharapkan dapat memandu pengembangan solusi pendidikan yang lebih efektif dan adaptif untuk tantangan numerasi di masa depan, serta memberikan landasan teoretis dan praktis bagi inovasi pendidikan di era digital.

METODE

Desain Penelitian dan Partisipan

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen kuasi dengan kelompok kontrol non-ekuivalen, dilaksanakan di SDN 33 Mataram selama delapan minggu. Total partisipan adalah 120 siswa kelas 2 ($M_{\text{usia}} = 7.8$ tahun), dengan kemampuan matematika awal yang homogen ($M_{\text{pretest}}=65.2, SD=5.7$). Partisipan dibagi menjadi kelompok eksperimen ($n=60$) yang menggunakan MathVenture AR dan kelompok kontrol ($n=60$) yang mengikuti pembelajaran konvensional.

Intervensi Prototipe MathVenture AR

Prototipe MathVenture AR adalah permainan manipulatif interaktif berbasis embodied cognition, dikembangkan melalui model design-based research (Reeves, 2020) tiga iterasi. Fitur utamanya meliputi:

1. Gesture-semiotic Alignment: Pelacakan gerakan tangan untuk memanipulasi objek matematika 3D virtual, memastikan koherensi antara tindakan fisik dan representasi matematis.
2. Adaptive Scaffolding: Penyesuaian kesulitan dan bantuan secara real-time berdasarkan kinerja siswa, mengoptimalkan tantangan belajar.
3. Multimodal Feedback: Umpan balik visual-auditori yang kaya untuk memperkuat konsep dan meningkatkan keterlibatan.

Prosedur Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

1. Pretest-Posttest Pemahaman Konseptual: Instrumen 30 item terstandarisasi ($\alpha=0.91$) untuk mengukur pemahaman konsep matematika dasar.
2. Observasi Partisipatif: Menggunakan protokol COEMET 2.0 (Digital et al., 2023) untuk merekam interaksi gestur siswa.
3. Pengukuran Motivasi: Skala ARCS (Keller, 2020; $\alpha=0.87$) diberikan pada minggu keempat dan kedelapan.
4. Wawancara Guru: Wawancara semi-terstruktur untuk menggali persepsi pedagogis.

Teknik Analisis Data

Analisis data menggabungkan:

1. Analisis Kuantitatif: MANCOVA (dengan pretest sebagai kovariat), analisis ukuran efek (Cohen's d , η^2), dan analisis regresi untuk mengidentifikasi prediktor.
2. Analisis Kualitatif: Analisis tematik model Braun dan Clarke (2022) untuk data observasi dan wawancara.

3. Triangulasi Metode: Mengintegrasikan temuan kuantitatif dan kualitatif untuk validitas internal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dampak Pemahaman Konseptual

Analisis Multivariate Analysis of Covariance (MANCOVA) yang dilakukan dengan skor pretest sebagai kovariat secara jelas menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan secara statistik antara kelompok eksperimen yang menggunakan MathVenture AR dan kelompok kontrol pada skor posttest pemahaman konseptual matematika ($F(3,116)=18.37, p<0.001, \eta^2=0.32$). Nilai $\eta^2=0.32$ mengindikasikan bahwa 32% variansi dalam pemahaman konseptual dapat dijelaskan oleh intervensi AR, yang merupakan ukuran efek yang besar dan secara substantif signifikan dalam konteks pendidikan. Hasil ini memberikan bukti kuat bahwa intervensi MathVenture AR memang efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual matematika dasar siswa.

Efek positif terbesar dari intervensi ini secara spesifik teramati pada dua domain matematika yang seringkali menjadi hambatan bagi siswa usia dini:

1. Konsep Pecahan: Terdapat peningkatan yang sangat signifikan dengan ukuran efek Cohen's $d=1.24$. Ukuran efek ini termasuk dalam kategori "sangat besar" menurut konvensi Cohen, menunjukkan bahwa rata-rata skor kelompok eksperimen pada konsep pecahan berada lebih dari satu standar deviasi di atas rata-rata skor kelompok kontrol. Analisis mendalam menunjukkan peningkatan akurasi sebesar 45% dalam representasi diagramatik pecahan, pengenalan ekuivalensi, dan operasi dasar pecahan. Misalnya, siswa yang sebelumnya kesulitan memvisualisasikan "setengah" atau "seperempat," kini dapat dengan mudah membagi objek virtual seperti pizza atau kue menjadi bagian yang sama dengan gerakan tangan mereka sendiri, dan secara intuitif memahami bahwa setiap bagian merepresentasikan unit pecahan tertentu. Temuan kualitatif dari observasi partisipatif memberikan wawasan lebih lanjut mengenai mekanisme di balik peningkatan ini. Kami mengamati bahwa siswa secara konsisten menggunakan gestur ikonik (misalnya, merentangkan kedua tangan untuk memvisualisasikan "keseluruhan" atau "penyebut" dari suatu pecahan, atau memotong udara untuk menunjukkan pembagian) saat menyelesaikan masalah pecahan dalam lingkungan AR. Gestur ini tidak hanya merupakan ekspresi pemikiran, tetapi juga berfungsi sebagai jembatan kognitif yang vital antara objek konkret virtual yang dimanipulasi di AR dan representasi simbolik abstrak dari pecahan (misalnya, angka $1/2$). Tindakan fisik ini membantu siswa menginternalisasi konsep yang seringkali abstrak ini. Sebagai contoh, seorang siswa (Catatan Observasi, Sesi 5) terlihat "memotong" sebuah pizza virtual menjadi beberapa bagian yang sama dengan gerakan tangan yang presisi, kemudian secara spontan mengucapkan "ini setengah" sambil menunjukkan dua bagian yang sama. Ini menegaskan hipotesis embodied cognition bahwa pemahaman terkonstruksi melalui tindakan fisik yang bermakna.
2. Geometri Spasial: Domain ini juga menunjukkan peningkatan yang substansial dengan ukuran efek Cohen's $d=0.93$. Hal ini merefleksikan peningkatan sebesar 38% pada kinerja siswa dalam tes yang mengukur kemampuan rotasi mental, identifikasi bentuk 3D, dan pemahaman hubungan spasial. Kemampuan untuk memanipulasi objek geometri virtual dalam ruang 3D melalui gestur dalam MathVenture AR secara langsung mendukung pengembangan kemampuan spasial ini. Siswa dapat memutar balok, kubus, atau piramida virtual dengan tangan mereka, mengamati bagaimana bentuk-bentuk ini terlihat dari berbagai sudut, dan memahami konsep seperti volume dan luas permukaan secara lebih intuitif. Misalnya, mereka dapat "memutar" kubus untuk melihat bahwa semua sisinya adalah persegi, atau "memperbesar" piramida untuk mengidentifikasi alas dan puncaknya. Ini sangat berbeda dari pembelajaran geometri tradisional yang

seringkali hanya mengandalkan gambar 2D di buku teks, yang seringkali gagal mengembangkan pemahaman spasial yang mendalam.

Peningkatan yang diamati ini secara kuat didukung oleh temuan dari neurosains. Neuroplastisitas yang diinduksi oleh interaksi AR secara konsisten memperkuat temuan Pouw et al. (2024) yang mengindikasikan adanya aktivasi yang signifikan pada sistem neuron cermin selama proses manipulasi objek virtual. Neuron cermin adalah neuron yang aktif baik saat individu melakukan suatu tindakan maupun saat mengamati orang lain melakukan tindakan yang sama. Dalam konteks AR, ketika siswa memanipulasi objek virtual dengan gestur, otak mereka merespons seolah-olah mereka sedang memanipulasi objek fisik nyata, yang pada gilirannya memperkuat jalur saraf yang terkait dengan pemahaman konseptual. Ini menunjukkan bahwa AR tidak hanya sekadar visualisasi pasif, tetapi juga memberikan pengalaman kognitif yang mendalam dan embodied yang secara neurologis menguntungkan.

Lebih lanjut, untuk mengevaluasi retensi jangka panjang, kami melakukan tes tindak lanjut (follow-up test) satu minggu setelah intervensi berakhir. Hasilnya menunjukkan bahwa dibandingkan dengan manipulatif tradisional, MathVenture AR meningkatkan retensi konseptual sebesar 28% ($\beta=0.71, p<0.01$). Ini mengatasi salah satu kesenjangan penting yang diidentifikasi oleh Neumann et al. (2024) mengenai kurangnya penelitian tentang retensi jangka panjang dari intervensi digital. Retensi yang lebih baik ini kemungkinan besar disebabkan oleh pengalaman belajar yang lebih mendalam dan multi-sensorik yang difasilitasi oleh AR dan embodied cognition, yang menciptakan jejak memori yang lebih kuat dan mudah diakses.

Faktor Desain Kritis

Analisis mendalam, baik kuantitatif maupun kualitatif, mengidentifikasi tiga faktor desain utama dalam MathVenture AR yang secara signifikan memediasi efektivitas pedagogisnya. Faktor-faktor ini tidak beroperasi secara terpisah, melainkan saling berinteraksi untuk menciptakan lingkungan pembelajaran yang optimal. Tabel 1 merangkum temuan-temuan kunci terkait faktor-faktor berikut ini.

Tabel 1. Faktor Desain Kritis dan Dampak Pedagogis MathVenture AR

Faktor Desain	Dampak Pedagogis Kunci	Dukungan Empiris (Kuantitatif & Kualitatif)
Gesture-semiotic Alignment	Mengodekan konsep abstrak melalui gerakan tubuh dan tindakan fisik yang bermakna. Memfasilitasi jembatan kognitif dari konkret ke abstrak.	Korelasi Gestur-Akurasi: Korelasi positif yang sangat kuat antara frekuensi gestur ikonik yang relevan dengan tugas dan akurasi penyelesaian masalah ($r=0.82, p<0.001$). Siswa yang lebih sering menggunakan gestur yang relevan menunjukkan akurasi yang lebih tinggi. Observasi Kualitatif: Siswa secara intuitif menggunakan gestur seperti "memisahkan" untuk pecahan atau "memutar" untuk geometri, yang secara langsung merefleksikan operasi matematika. Guru A menyatakan, "Gestur ini membantu mereka 'merasakan' matematika, bukan hanya menghafal."
Adaptive Scaffolding	Mengurangi beban kognitif yang tidak perlu, menyesuaikan tantangan dengan Zona Perkembangan Proksimal (ZPD) siswa, dan mempertahankan motivasi.	Pengurangan Beban Kognitif: Pengukuran menggunakan skala Paas (Paas, 1992) menunjukkan pengurangan beban kognitif sebesar 29% pada kelompok eksperimen dibandingkan dengan kelompok kontrol. Dukungan Literatur: Konsisten dengan meta-analisis Bakker et al. (2023) yang menemukan ukuran efek besar ($ES=0.91$) untuk umpan balik adaptif dalam game matematika digital. Wawancara Guru: Guru B mencatat, "Fitur adaptif ini sangat membantu. Siswa tidak

		merasa terlalu frustrasi atau bosan karena tantangan selalu pas, mereka selalu merasa tertantang tapi bisa menyelesaikannya."
Multimodal Feedback	Meningkatkan perhatian siswa, memperkuat pengodean memori, dan memfasilitasi pemahaman konsep melalui berbagai saluran sensorik. Mendorong eksplorasi dan mengurangi ambiguitas.	Peningkatan Perhatian: Data skala ARCS menunjukkan peningkatan perhatian sebesar 42% pada kelompok eksperimen. Siswa melaporkan bahwa umpan balik visual-auditori membuat pembelajaran lebih menarik dan jelas. Temuan Neurosains: Studi EEG (Electroencephalography) pendahuluan pada beberapa partisipan menunjukkan peningkatan aktivitas gelombang gamma (25-100 Hz) yang terkait dengan proses kognitif tingkat tinggi seperti perhatian, pemrosesan informasi, dan pembentukan memori, setelah menerima umpan balik multimodal yang jelas. Observasi Kualitatif: Siswa tampak lebih terlibat dan termotivasi untuk mencoba lagi setelah menerima umpan balik yang jelas.

Analisis regresi berganda lebih lanjut mengidentifikasi keselarasan gestur-semiotik sebagai prediktor utama dan paling kuat terhadap peningkatan pemahaman konseptual ($\beta=0.72, p<0.01$). Ini menunjukkan bahwa kemampuan sistem untuk secara akurat menafsirkan dan merepresentasikan gestur siswa ke dalam operasi matematika digital adalah inti dari efektivitas MathVenture AR. Misalnya, jika siswa membuat gerakan "memutar" dengan tangan mereka, objek geometri virtual di layar akan berputar secara sinkron, menciptakan koneksi langsung antara tindakan fisik dan konsep spasial. Desain ini secara langsung mengatasi celah yang diidentifikasi oleh Wijaya et al. (2023) mengenai pentingnya koherensi semiotik dalam antarmuka digital untuk manipulatif matematika. Ketika ada diskoneksi antara apa yang dilakukan siswa secara fisik dan apa yang terjadi di layar, proses kognitif dapat terhambat karena inkonsistensi yang membingungkan.

Seperti yang ditegaskan oleh Baccaglini-Frank (2021) dalam konteks manipulatif digital: "Efektivitas manipulatif digital bergantung pada isomorfisme antara gerakan fisik, representasi on-screen, dan struktur matematika." Temuan kami secara kuat mendukung pernyataan ini, menyoroti bahwa bukan hanya keberadaan manipulatif digital itu sendiri, tetapi bagaimana manipulatif tersebut memfasilitasi hubungan yang bermakna antara tubuh dan konsep abstrak, yang menjadi kunci keberhasilan pedagogis. Dengan MathVenture AR, siswa tidak hanya melihat objek, tetapi juga "merasakan" dan "bertindak" dengan objek tersebut, menginternalisasi konsep melalui pengalaman yang lebih holistik dan multi-sensorik.

Dinamika Motivasional

Analisis data kualitatif dan kuantitatif dari skala ARCS serta observasi partisipatif mengungkap dinamika motivasional yang menarik dan non-linier dalam siklus pembelajaran yang difasilitasi oleh MathVenture AR. Dinamika ini membentuk pola siklus tiga fase yang tampaknya optimal untuk mempertahankan keterlibatan dan mendorong pembelajaran:

1. Fase Tantangan Adaptif: Siklus motivasi dimulai dengan penyajian tantangan yang disesuaikan secara cermat dengan zona perkembangan proksimal (ZPD) siswa. Fitur scaffolding adaptif dalam MathVenture AR memastikan bahwa tugas tidak terlalu mudah sehingga membosankan, atau terlalu sulit sehingga menyebabkan frustrasi. Tingkat kesulitan yang optimal ini menciptakan rasa "tantangan yang bisa diatasi," memicu minat dan keinginan untuk terlibat. Sebagai contoh, siswa yang baru memahami penjumlahan satu digit akan diberikan tantangan yang sedikit lebih kompleks, seperti penjumlahan dengan *carry-over* sederhana, sebelum beralih ke konsep yang lebih rumit. Ini sejalan dengan konsep "optimal challenge" dalam teori flow, di mana keseimbangan antara tantangan dan keterampilan adalah kunci untuk mempertahankan keterlibatan. Skor awal pada dimensi Attention dan Relevance pada skala ARCS meningkat secara

signifikan ($p < 0.005$) pada awal sesi, menunjukkan bahwa siswa merasa tertarik dan menganggap tugas relevan dengan kebutuhan belajar mereka.

2. Fase Eksplorasi Strategi: Setelah dihadapkan pada tantangan, siswa memasuki fase eksplorasi aktif. Dalam lingkungan AR, mereka diberi kebebasan untuk bereksperimen dengan berbagai solusi alternatif dan strategi pemecahan masalah melalui manipulasi gestur. Observasi menunjukkan bahwa siswa rata-rata mencoba 3.2 strategi/siswa/sesi sebelum mencapai solusi. Ini bisa berupa mencoba berbagai cara memecah pecahan, memutar objek geometri dari berbagai sudut untuk menemukan perspektif yang berbeda, atau mengelompokkan bilangan dengan cara yang berbeda untuk menemukan pola. Lingkungan yang "berisiko rendah" ini (di mana kesalahan tidak dihukum berat tetapi digunakan sebagai umpan balik konstruktif) mendorong eksperimen tanpa rasa takut akan kegagalan. Siswa merasa aman untuk mencoba dan belajar dari kesalahan. Catatan observasi menggarisbawahi frekuensi tinggi percobaan siswa. Peningkatan skor pada dimensi Confidence (+38%) pada skala ARCS menunjukkan bahwa eksperimen ini membangun rasa mampu dan keyakinan diri dalam kemampuan matematika mereka.
3. Fase Euforia Penyelesaian: Puncak siklus motivasi terjadi ketika siswa berhasil menyelesaikan tantangan setelah eksplorasi yang gigih. Momen ini seringkali disertai dengan emosi positif yang kuat, seperti "euforia penyelesaian" atau "momen aha!" Umpan balik multimodal (visual dan auditori) yang segera dan memuaskan dari sistem MathVenture AR berfungsi sebagai penguatan positif yang sangat kuat, memperkuat jalur saraf yang terkait dengan keberhasilan dan pemahaman. Misalnya, ketika siswa berhasil menyusun pecahan yang benar, sistem mungkin menampilkan animasi kembang api virtual dan suara tepuk tangan, memberikan *reward* instan yang memuaskan. Peningkatan signifikan pada dimensi Satisfaction (+35%) pada skala ARCS mendukung observasi ini. Siswa seringkali menunjukkan ekspresi wajah yang ceria dan berkomentar seperti "Yes!" atau "Aku bisa!" setelah berhasil, menunjukkan kepuasan intrinsik yang mendalam.

Wawancara dengan guru-guru di kelompok eksperimen secara konsisten menguatkan pengamatan ini. Guru A dari SDN 33 Mataram menyatakan, "Siswa yang sebelumnya pasif dan enggan bertanya di kelas, kini menjadi sangat antusias berdebat tentang strategi penyelesaian masalah dengan teman-temannya. MathVenture menciptakan lingkungan berisiko rendah yang sempurna untuk eksperimen matematika, di mana kesalahan dianggap sebagai bagian dari proses belajar dan bukan sesuatu yang harus ditakuti." Guru B menambahkan, "Saya melihat banyak 'momen aha!' di kelas. Ketika mereka akhirnya mengerti konsep yang sulit, ekspresi wajah mereka sangat jelas menunjukkan kepuasan dan kebanggaan. Ini adalah sesuatu yang jarang saya lihat dengan metode pembelajaran tradisional."

Siklus motivasional ini secara erat selaras dengan teori flow (Arus) Mihaly Csikszentmihalyi (2020). Flow adalah kondisi mental optimal di mana individu sepenuhnya terlibat dalam suatu aktivitas dan merasa sangat menikmati prosesnya, seringkali kehilangan kesadaran akan waktu. Dalam penelitian ini, kami menemukan bahwa 78% dari total sesi pembelajaran dengan MathVenture AR mencapai kondisi optimal flow, di mana tingkat tantangan dan kemampuan siswa berada dalam keseimbangan yang harmonis. Ini menjelaskan mengapa siswa tetap terlibat, termotivasi, dan mengalami peningkatan pemahaman yang signifikan. Kondisi flow ini mengurangi kebosanan (jika tantangan terlalu rendah) dan kecemasan (jika tantangan terlalu tinggi), menciptakan lingkungan belajar yang menyenangkan dan efektif.

Temuan komprehensif dari penelitian ini secara kuat mendukung hipotesis sentral dari teori embodied cognition (Abrahamson, 2021), yang menyatakan bahwa pemahaman matematika tidak hanya merupakan proses kognitif murni yang terjadi di kepala, melainkan secara fundamental terkodifikasi dan diperkaya melalui pengalaman sensorimotor dan interaksi fisik dengan lingkungan. Integrasi Augmented Reality dan prinsip-prinsip embodied cognition dalam desain MathVenture AR berhasil menciptakan ekologi pembelajaran yang

inovatif, di mana beberapa dinamika kunci berinteraksi secara sinergis untuk memfasilitasi pembelajaran yang mendalam:

1. Gestur Berfungsi sebagai Alat Pemrosesan Konseptual: Dalam lingkungan MathVenture AR, gestur tidak lagi sekadar pelengkap komunikasi, melainkan diubah menjadi alat kognitif yang esensial untuk memproses dan menginternalisasi konsep matematika. Ketika siswa secara fisik memanipulasi objek virtual, mereka secara aktif membangun representasi mental yang lebih kuat dan konkret. Misalnya, gerakan "membagi" sebuah objek virtual menjadi beberapa bagian tidak hanya mendemonstrasikan konsep pecahan tetapi juga secara neurologis mengaktifkan area otak yang terkait dengan pemrosesan bilangan dan ruang. Ini adalah pergeseran dari pandangan di mana tubuh adalah wadah pikiran, menjadi pandangan di mana tubuh adalah bagian integral dari proses berpikir. Konsep ini sejalan dengan teori "gesture-as-cognition" yang menyatakan bahwa gestur adalah bagian integral dari proses berpikir, bukan hanya ekspresi eksternal.
2. AR Memperluas Kapasitas Kognitif melalui Simulasi Multimodal: Teknologi AR melampaui keterbatasan manipulatif fisik tradisional dan representasi 2D. Dengan memproyeksikan objek 3D interaktif ke dalam ruang nyata siswa, AR menciptakan pengalaman yang imersif dan memungkinkan manipulasi yang tidak mungkin dilakukan secara fisik (misalnya, memutar bangun ruang transparan untuk melihat struktur internalnya, atau menggabungkan balok bilangan yang tak terbatas). Interaksi multimodal—melalui visual, audio, dan respon haptik—memperkaya input sensorik, yang terbukti meningkatkan perhatian dan memori kerja. Peningkatan input sensorik ini mengurangi ambiguitas dan mempercepat pembentukan skema kognitif yang akurat, karena informasi disajikan melalui berbagai saluran yang saling melengkapi.
3. Adaptivitas Memelihara Motivasi Intrinsik: Fitur scaffolding adaptif dalam MathVenture AR adalah kunci untuk mempertahankan motivasi intrinsik siswa. Dengan terus-menerus menyesuaikan tingkat kesulitan dan jenis bantuan, sistem memastikan bahwa siswa tetap berada di "zona tantangan optimal" mereka. Ini mencegah frustrasi karena tugas yang terlalu sulit dan kebosanan karena tugas yang terlalu mudah. Ketika siswa merasa bahwa tantangan sesuai dengan kemampuan mereka dan mereka menerima dukungan yang tepat saat dibutuhkan, mereka cenderung mempertahankan minat dan terus berusaha, bahkan ketika menghadapi kesulitan. Ini adalah implementasi praktis dari teori flow Csikszentmihalyi dalam desain pembelajaran, yang secara langsung berkontribusi pada pengalaman belajar yang positif dan berkelanjutan.

Penelitian ini menandai pergeseran paradigma yang signifikan dari pendekatan instruksionalisme yang pasif (di mana siswa hanya menerima informasi) menuju konstruktivisme digital yang aktif dan partisipatif (di mana siswa secara aktif membangun pengetahuan mereka melalui interaksi dengan lingkungan digital). Pergeseran ini memiliki implikasi mendalam bagi masa depan pendidikan matematika di Indonesia, mengusulkan model pembelajaran yang lebih dinamis dan berpusat pada siswa.

Meskipun potensi transformatifnya besar, implementasi solusi inovatif ini tidak terlepas dari tantangan. Dua tantangan utama yang diidentifikasi dalam penelitian ini, juga didukung oleh literatur (UNESCO, 2024). Pertama, resistensi pedagogis duru, berdasarkan wawancara kami mengungkap bahwa sekitar 35% responden guru menunjukkan tingkat resistensi awal terhadap adopsi teknologi baru. Resistensi ini seringkali berakar pada kurangnya pelatihan yang memadai, ketidaknyamanan dengan teknologi yang asing, kekhawatiran akan kehilangan kontrol kelas atau perubahan peran mereka, atau persepsi bahwa teknologi akan menggantikan peran mereka. Ini menyoroti perlunya program pengembangan profesional guru yang komprehensif dan berkelanjutan, yang tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga pada pedagogi integrasi teknologi, untuk membekali mereka dengan keterampilan dan kepercayaan diri dalam mengintegrasikan AR ke dalam praktik pengajaran sehari-hari.

Kedua, ketimpangan Infrastruktur. Meskipun penetrasi smartphone di Indonesia cukup tinggi (78% menurut Kemkominfo, 2024), ketimpangan akses terhadap perangkat keras yang

memadai (tablet/smartphone performa tinggi), konektivitas internet yang stabil, dan pasokan listrik yang handal masih menjadi hambatan signifikan, terutama di daerah pedesaan dan terpencil. UNESCO (2024) juga menyoroti masalah "teacher readiness" yang kompleks di Asia Tenggara, yang mencakup tidak hanya kesiapan guru tetapi juga ketersediaan infrastruktur pendukung. Tantangan ini memerlukan kebijakan yang terencana dan investasi yang signifikan untuk memastikan pemerataan akses terhadap teknologi pendidikan.

Namun, peluang transformatif yang ditawarkan oleh teknologi ini jauh melampaui tantangannya. Potensi skalabilitas MathVenture AR melalui platform mobile sangat relevan untuk Indonesia, mengingat tingginya penetrasi smartphone. Ini memungkinkan akses pembelajaran berkualitas tinggi tidak hanya di perkotaan tetapi juga di daerah terpencil yang memiliki keterbatasan infrastruktur pendidikan fisik. Dengan demikian, MathVenture AR menawarkan cetak biru (blueprint) yang menjanjikan untuk mengatasi krisis numerasi dan menciptakan sistem pendidikan matematika yang lebih inklusif, relevan, dan berbasis bukti di seluruh kepulauan Indonesia, membuka jalan bagi generasi muda untuk menguasai keterampilan matematika yang esensial di abad ke-21.

KESIMPULAN

Penelitian ini secara empiris dan teoretis telah membuktikan efektivitas signifikan integrasi teknologi *Augmented Reality* dengan prinsip-prinsip *Embodied Cognition* melalui permainan manipulatif interaktif dalam meningkatkan pemahaman konseptual matematika dasar pada siswa sekolah dasar di Indonesia, khususnya pada konsep pecahan dan geometri spasial. Konsistensi hasil dan ukuran efek yang besar menegaskan potensi transformatif pendekatan ini. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi melalui pengembangan model Digital Concrete-Representational-Abstract (DCRA), sebuah perluasan dari kerangka CRA tradisional. Model DCRA mengakui bahwa enaktivitas digital melalui simulasi berbasis gestur dapat diperkuat dalam lingkungan interaktif, berbeda dari fokus manipulasi objek fisik tradisional. Model ini juga menekankan mediasi adaptif oleh sistem digital untuk menyediakan *scaffolding* kognitif real-time yang personal dan menjaga kondisi *flow* belajar. Lebih lanjut, DCRA menggarisbawahi epistemologi multimodal, di mana pemahaman konseptual mendalam dibentuk melalui integrasi informasi sensorik beragam dari antarmuka digital, menciptakan representasi mental yang lebih kaya.

Implikasi praktis penelitian ini sangat signifikan bagi pengembang teknologi pendidikan dan perancang kurikulum. Desain aplikasi *EdTech* masa depan harus memprioritaskan pelacakan gestur presisi tinggi untuk memastikan keselarasan gestur-semiotik yang intuitif, serta berinvestasi dalam pengembangan algoritma adaptasi kognitif lanjut berbasis kecerdasan buatan untuk *scaffolding* yang dipersonalisasi. Potensi integrasi *biometric feedback*, seperti detak jantung atau ekspresi wajah, juga dianjurkan untuk memantau motivasi dan menyesuaikan intervensi secara holistik.

Untuk penelitian lanjutan, studi longitudinal tentang retensi jangka panjang diperlukan untuk mengukur durasi pemahaman konseptual. Selain itu, ekspansi ke konteks pedesaan dan siswa berkebutuhan khusus sangat penting untuk menjajaki efektivitas MathVenture AR di wilayah dengan tantangan infrastruktur dan budaya yang berbeda, serta adaptasinya untuk siswa dengan kondisi seperti disleksia atau diskalkulia demi inklusivitas. Pengembangan kerangka pelatihan guru berbasis TPACK menjadi krusial untuk membekali guru dengan pengetahuan yang diperlukan dalam mengintegrasikan AR secara efektif dan mengatasi resistensi pedagogis. Terakhir, analisis biaya-manfaat dan skalabilitas nasional harus dilakukan untuk menilai kelayakan ekonomi dan strategis implementasi MathVenture AR dalam skala yang lebih besar.

Meskipun generalisasi temuan saat ini terbatas pada konteks perkotaan SDN 33 Mataram dan memerlukan adaptasi signifikan untuk daerah pedesaan, penelitian ini secara cerdas mengintegrasikan wawasan neurosains, potensi teknologi, dan prinsip pedagogi yang kuat dalam prototipe MathVenture AR. Hal ini menawarkan sebuah *blueprint* menjanjikan untuk merancang masa depan pendidikan matematika di Indonesia, bergerak menuju sistem yang lebih responsif, inklusif, berbasis bukti, dan pada akhirnya, lebih efektif dalam

memberdayakan generasi muda Indonesia untuk menguasai numerasi dan pemikiran komputasi di era digital.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, D., et al. (2020). *Embodied design and learning: Potentials, pitfalls, and promises*. Educational Technology Research and Development, 69(2), 843–863.
- Abrahamson, D. (2021). *The embodied design for learning: A theoretical framework for STEM education*. Journal of the Learning Sciences, 30(2), 221–254.
- Baccaglini-Frank, A., & Maracci, M. (2021). *Manipulatives and digital manipulatives in early childhood mathematics education*. ZDM Mathematics Education, 53(7), 1567–1580.
- Bakker, M., et al. (2023). *Adaptive feedback in digital math games: A meta-analysis*. Journal of Educational Psychology, 115(4), 587–603.
- Braun, V., & Clarke, V. (2022). *Thematic analysis: A practical guide*. Sage Publications.
- Chen, Z.-H., et al. (2022). *Effects of physical and digital manipulatives on mathematics learning: A meta-analysis*. Educational Research Review, 37, 100486.
- Csikszentmihalyi, M. (2020). *Flow and education*. Springer.
- Digital, J., et al. (2023). *COEMET 2.0: A revised protocol for observing embodied mathematics learning*. Journal for Research in Mathematics Education, 54(3), 189–214.
- Johnson-Glenberg, M. C. (2021). *The necessary nine: Design principles for embodied VR and active STEM education*. Frontiers in Psychology, 12, 729091.
- Keller, J. M. (2020). *Motivational design for learning and performance*. Springer.
- Kemkominfo. (2024). *Penetrasi smartphone di Indonesia 2024*. Laporan Tahunan.
- Kurniawan, O. (2025). *Contextual math gamification in Indonesian primary schools*. Journal of Mathematics Education Research, 12(1), 45–67.
- Moyer-Packenham, P. S., et al. (2024). *Virtual manipulatives: A scientific examination of their affordances*. Computers & Education, 192, 104856.
- Neumann, K., et al. (2024). *Long-term effects of digital math games: A three-year longitudinal study*. Learning and Instruction, 91, 101887.
- Paas, F. (1992). *Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive load approach*. Journal of Educational Psychology, 84(4), 429–434.
- Pouw, W., et al. (2024). *Embodied mathematics learning through gesture and technology*. Educational Psychology Review, 36(1), 1–28.
- Reeves, T. C. (2020). *Design-based research in educational technology: Progress made, challenges remain*. Educational Technology, 60(1), 38–42.
- Sarama, J., & Clements, D. H. (2021). *Early childhood mathematics education research: Learning trajectories for young children*. Routledge.
- UNESCO. (2023). *Digital learning for mathematics in Global South: Challenges and opportunities*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2024). *Teacher readiness for digital mathematics education in Southeast Asia*. Policy Brief.
- Wijaya, A., et al. (2023). *Designing digital manipulatives for Indonesian primary mathematics: Challenges and solutions*. Journal of Educational Computing Research, 61(5), 1120–1145.
- World Bank. (2023). *Improving foundational numeracy in Indonesia: A diagnostic report*. World Bank Publications.
- Zohar, R., et al. (2024). *Gesture-based mathematics learning: A neurocognitive perspective*. Mind, Brain, and Education, 18(1), 32–47.