

Media Matematika Adaptif Berbasis *Offline-First* Untuk SD

Pedesaan: Di SD Negeri 102 Sigalapang

Inda Warni¹, Almira Amir², Khairunnisa³, Tuti Alawiyah Matondang⁴

^{1,2,3,4}UIN Syekh Ali Hasan Ahmad Addary, Sumatera Utara, Indonesia

indahwarni@gamil.com¹, almiraamir@uinsyahada.ac.id², khairunnisa1456@gmail.com³,
talawiyah373@gmail.com⁴

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan dan menguji dampak media pembelajaran matematika adaptif berbasis *offline-first* terhadap pemahaman konsep dan efikasi diri digital siswa sekolah dasar di wilayah pedesaan. Penelitian ini menggunakan desain metode campuran *sequential explanatory* terintegrasi dengan *Design-Based Research*, studi ini melibatkan 87 siswa SD Negeri 102 Sigalapang dalam intervensi enam minggu. Analisis kuantitatif melalui ANCOVA mengungkap peningkatan signifikan pada pemahaman konsep ($\Delta = +13,3$ poin; $p < ,001$; $\eta^2 = 0,183$) dan efikasi diri digital ($\Delta = +1,06$; $p < ,001$; $\eta^2 = 0,145$). Temuan kualitatif mengidentifikasi mekanisme psikopedagogis pendorong dampak prediktabilitas antarmuka mereduksi beban kognitif ekstrinsik, *branching* adaptif memfasilitasi otonomi tanpa stigma, serta umpan balik instan memperkuat pengalaman penguasaan. Frekuensi *task abandonment* turun dari 34,2% menjadi 9,1%, mengonfirmasi stabilitas keterlibatan dalam ekosistem terbatas. Studi menyimpulkan bahwa pembelajaran matematika adaptif berbasis *offline-first* merupakan strategi pedagogis sah secara kognitif dan afektif, bukan sekadar solusi teknis. Hasil ini menawarkan kerangka referensi yang dapat direplikasi untuk pengembangan teknologi pendidikan inklusif di pasar berkembang, sekaligus menegaskan bahwa keadilan digital dalam pembelajaran matematika memerlukan desain yang responsif terhadap realitas infrastruktur lokal.

Kata Kunci: Pembelajaran adaptif *offline-first*, Pemahaman konsep matematika, Efikasi diri digital, Sekolah Dasar Pedesaan.

ABSTRACT

This study developed and evaluated the impact of an *offline-first* adaptive mathematics learning platform on the conceptual understanding and digital self-efficacy of rural primary school students. Utilizing a *sequential explanatory mixed-methods design* integrated with *Design-Based Research*, the study involved 87 students from SD Negeri 102 Sigalapang over a six-week intervention. Quantitative analysis via ANCOVA revealed significant improvements in conceptual understanding ($\Delta = +13.3$ points; $p < .001$; $\eta^2 = 0.183$) and digital self-efficacy ($\Delta = +1.06$; $p < .001$; $\eta^2 = 0.145$). Qualitative findings identified the psychopedagogical mechanisms underlying these outcomes: interface predictability reduced extraneous cognitive load, adaptive branching facilitated autonomy without stigma, and immediate feedback reinforced mastery experiences. The frequency of task abandonment decreased from 34.2% to 9.1%, confirming sustained engagement within resource-constrained environments. The study concludes that *offline-first* adaptive mathematics learning represents a cognitively and affectively sound pedagogical strategy, rather than merely a technical workaround. These findings offer a replicable framework for

developing inclusive educational technologies in emerging markets, while underscoring that digital equity in mathematics education necessitates designs responsive to local infrastructural realities.

Keywords: *Offline-first adaptive learning, Mathematical conceptual understanding, Digital self-efficacy, Rural primary education*

PENDAHULUAN

Transformasi digital dalam pendidikan matematika di Indonesia telah menjadi agenda strategis nasional, tercermin dari percepatan implementasi Kurikulum Merdeka dan dorongan integrasi teknologi dalam setiap jenjang satuan pendidikan. Namun, di balik narasi kemajuan yang sering dikumandangkan, terdapat paradoks struktural yang belum terselesaikan kesenjangan antara kebijakan yang bersifat *urban-centric* dan realitas infrastruktur di wilayah pedesaan yang masih berkuat pada keterbatasan akses, perangkat usang, dan ketimpangan kompetensi pedagogis guru (Dewi, 2026)

Data Badan Pusat Statistik tahun 2024 menunjukkan bahwa hampir 68 persen sekolah dasar di kawasan rural Indonesia beroperasi dengan konektivitas internet yang tidak stabil atau sama sekali tidak tersedia, sementara rasio kepemilikan perangkat digital layak pakai mencapai 1:11 per siswa. Kondisi ini tidak hanya menghambat distribusi konten pembelajaran, tetapi juga memperlebar jurang pemahaman konsep matematika dasar antara siswa perkotaan dan pedesaan, sebagaimana terekam dalam hasil Asesmen Nasional 2023 yang mencatat disparitas skor literasi numerasi sebesar 26,8 poin. SD Negeri 102 Sigalapang, yang berlokasi di Kabupaten Mandailing Natal, Sumatera Utara, merepresentasikan mikro-kosmos tantangan tersebut. Sekolah ini menghadapi dualitas tuntutan: di satu sisi, kurikulum menuntut penguasaan konsep matematis yang progresif dan kontekstual; di sisi lain, ekosistem belajar dibatasi oleh fluktuasi sinyal, ketergantungan pada perangkat *Android* generasi lama dengan kapasitas penyimpanan di bawah 16 GB, serta minimnya pelatihan guru dalam merancang pengalaman belajar yang adaptif tanpa bergantung pada *cloud infrastructure* (Nasution & Hidayati, 2025).

Secara teoretis, pembelajaran matematika adaptif seharusnya berfungsi sebagai katalis personalisasi, di mana algoritma penyesuaian tingkat kesulitan, umpan balik instan, dan representasi visual interaktif dapat mengurangi beban kognitif ekstrinsik sekaligus memperkuat skema pemahaman konseptual siswa. Kerangka *Cognitive Load Theory* menegaskan bahwa desain instruksional yang efektif harus meminimalkan distraksi teknis dan mengalokasikan kapasitas memori kerja secara optimal untuk pemrosesan informasi matematis yang esensial. Namun, asumsi ini runtuh ketika diterapkan pada konteks dengan konektivitas terfragmentasi. Platform adaptif konvensional yang mengandalkan streaming data, sinkronisasi cloud, atau pemrosesan berbasis server justru menambah beban kognitif

melalui latency, kegagalan loading, dan ketidakpastian akses, yang pada gilirannya memicu kecemasan teknologi dan menggerus motivasi intrinsik siswa (Arif & Handayani, 2024).

Dalam perspektif *Digital Equity Framework*, keadilan digital tidak sekadar diukur dari ketersediaan perangkat, melainkan dari kemampuan sistem pendidikan untuk menyediakan ekosistem belajar yang inklusif, otonom, dan relevan secara kultural. Tanpa desain yang secara sengaja mempertimbangkan keterbatasan infrastruktur, teknologi pendidikan berisiko menjadi instrumen eksklusi baru, alih-alih jembatan pemerataan (Aditya & Harahap, 2024).

Di sinilah letak kesenjangan empiris yang mendesak untuk diatasi: literatur terkini tentang *adaptive learning mathematics* hampir seluruhnya dibangun di atas asumsi ketersediaan jaringan stabil, perangkat mutakhir, dan lingkungan belajar perkotaan. Studi yang mengangkat konteks *low-resource settings* cenderung bersifat deskriptif, berfokus pada adopsi perangkat keras, atau mengabaikan dimensi afektif-kognitif secara terintegrasi. Akibatnya, tidak ada kerangka operasional yang memandu bagaimana media adaptif dapat dirancang, divalidasi, dan diuji dampaknya dalam kondisi *offline* yang realistis, khususnya pada jenjang sekolah dasar di mana pembentukan *number sense* dan kepercayaan diri matematis berada pada fase kritis (Amella et al., 2023).

Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan dan menguji media pembelajaran matematika adaptif berbasis *offline-first* yang secara eksplisit dirancang untuk ekosistem perangkat terbatas dan wilayah dengan konektivitas fluktuatif (Hasanah & Malang, 2025). Kebaruan utama terletak pada integrasi tiga dimensi yang selama ini dibahas secara terfragmentasi: arsitektur teknis yang memprioritaskan penyimpanan lokal, kompresi aset multimedia, dan algoritma adaptasi berbasis *rule-engine* sederhana yang tidak memerlukan koneksi internet; pendekatan pedagogis yang menyelaraskan personalisasi konten dengan prinsip TPACK sehingga teknologi tidak menggantikan peran guru, melainkan memperkuat kapasitasnya dalam memberikan *scaffolding* yang tepat waktu; serta pengukuran dampak simultan terhadap pemahaman konsep matematika dan efikasi diri digital, dengan mengadopsi lensa *Self-Determination Theory* untuk memahami bagaimana otonomi belajar, persepsi kompetensi, dan pengalaman keberhasilan bertahap dapat mentransformasi kecemasan teknologi menjadi agensi digital (Anwar & Iriani, 2025).

Berbeda dengan studi sebelumnya yang hanya melaporkan skor tes pasca-intervensi, penelitian ini mengeksplorasi mekanisme *how* dan *why* desain *offline-first* memengaruhi jalur kognitif dan afektif siswa melalui desain campuran sequential explanatory, di mana data kuantitatif dari kuasi-eksperimen diperkaya dengan observasi kelas, *think-aloud protocol*, dan wawancara mendalam dengan guru serta siswa di SD Negeri 102 Sigalapang. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola engagement yang tidak terdeteksi oleh metrik konvensional, seperti perubahan strategi pemecahan masalah, penurunan frekuensi penghentian tugas

akibat error teknis, dan pergeseran narasi identitas siswa dari ketidakmampuan menjadi keberanian mencoba tanpa ketakutan terhadap habisnya kuota internet (Asri, Sukriadi & Muhlis, Hety, 2025)

Konteks SD Negeri 102 Sigalapan dipilih bukan sebagai studi kasus yang terisolasi, melainkan sebagai representasi empiris dari ratusan sekolah di Sumatera dan kawasan Indonesia Timur yang beroperasi dalam kondisi *constrained digital ecosystems*. Survei pendahuluan yang dilakukan pada awal tahun 2025 terhadap 87 siswa dan 4 guru matematika di sekolah tersebut mengungkap bahwa 74 persen siswa mengakses pembelajaran digital hanya melalui *smartphone* orang tua dengan sistem operasi Android 8 hingga 10, sementara 62 persen guru melaporkan kesulitan dalam memantau progres belajar karena ketergantungan pada *platform* yang memerlukan login berulang dan sinkronisasi manual. Lebih lanjut, analisis terhadap hasil ulangan harian matematika menunjukkan bahwa 58 persen siswa mengalami kesulitan pada konsep pecahan dan geometri ruang, yang secara teoretis memerlukan representasi visual dinamis dan umpan balik formatif berkelanjutan.

Media yang dikembangkan dalam penelitian ini merespons temuan tersebut melalui arsitektur modular: setiap modul berisi animasi interaktif ringan di bawah 3 MB, kuis adaptif dengan *branching logic* berbasis respons benar-salah, serta dashboard guru yang dapat diunduh sekali dan digunakan tanpa koneksi (Damayanti, 2023). Validasi ahli materi dan teknologi menghasilkan indeks validitas isi sebesar 0,87 dan skor *usability* 4,6 dari skala 5,0, yang menunjukkan kesiapan produk untuk diuji secara empiris.

Uji coba lapangan terstruktur selama enam minggu dengan desain kelompok kontrol tidak ekuivalen akan melibatkan 87 siswa kelas V–VI (43 kelompok eksperimen, 44 kontrol) untuk mengukur perubahan skor pemahaman konsep menggunakan instrumen berbasis rubrik NCTM yang telah divalidasi secara kultural, sementara efikasi diri digital diukur melalui adaptasi skala *Computer Self-Efficacy* yang dikontekstualisasikan untuk siswa sekolah dasar. Analisis data kuantitatif akan menggunakan ANCOVA dengan kontrol nilai pretest, sedangkan data kualitatif akan dianalisis melalui *coding tematik iteratif* untuk mengungkap mekanisme psikopedagogis yang mendasari perubahan perilaku belajar (Rahmawati et al., 2022).

Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada perluasan kerangka *equity-oriented educational technology* dengan bukti empiris bahwa desain *offline-first* bukan sekadar solusi teknis darurat, melainkan strategi pedagogis yang sah secara kognitif dan afektif. Dengan menunjukkan bahwa personalisasi pembelajaran tidak harus bergantung pada infrastruktur cloud, penelitian ini menantang asumsi dominan dalam literatur edtech yang sering mengagungkan kompleksitas algoritma sebagai indikator kemajuan. Sebaliknya, temuan ini memperkuat argumen bahwa kesederhanaan arsitektur, ketika diselaraskan dengan prinsip pengurangan beban kognitif, dukungan otonomi belajar, dan validasi kontekstual, justru

menghasilkan dampak yang lebih berkelanjutan bagi siswa marginal. Secara praktis, prototipe yang dihasilkan dapat diadopsi sebagai model referensi oleh dinas pendidikan daerah, lembaga pelatihan guru, dan pengembang aplikasi edukasi yang berfokus pada pasar emerging.

Berdasarkan celah teoretis dan empiris yang telah diuraikan, penelitian ini secara eksplisit bertujuan untuk: (1) menguji dampak media adaptif berbasis *offline-first* terhadap pemahaman konsep matematika dan efikasi diri digital siswa SD di wilayah pedesaan Indonesia; dan (2) mengidentifikasi mekanisme psikopedagogis yang menjelaskan transisi dari *techno-anxiety* menuju *digital agency* dalam konteks pembelajaran matematika adaptif tanpa koneksi internet. Untuk mencapai tujuan tersebut, studi ini dirumuskan melalui dua pertanyaan utama: Bagaimana desain *offline-first* memengaruhi pemahaman konsep dan efikasi diri digital siswa? Mekanisme psikopedagogis apa yang memediasi perubahan tersebut? Artikel ini dirancang untuk memenuhi standar rigor akademik dengan transparansi metodologis, keterbukaan instrumen, serta diskusi kritis mengenai keterbatasan generalisasi dan implikasi kebijakan pengembangan teknologi pendidikan inklusif.

METODE

Penelitian ini mengadopsi desain metode campuran sequential explanatory yang diintegrasikan dengan kerangka *Design-Based Research* (DBR) untuk mengembangkan dan menguji media pembelajaran matematika adaptif berbasis offline-first. Pendekatan ini dipilih guna memastikan bahwa iterasi produk tidak hanya berlandaskan validasi teknis, tetapi juga responsif terhadap dinamika kognitif dan afektif siswa di lapangan. Partisipan penelitian terdiri dari 87 siswa kelas V dan VI SD Negeri 102 Sigalapang yang dipilih melalui teknik purposive sampling berdasarkan kriteria ketersediaan perangkat *Android* lama dan kesediaan mengikuti protokol penelitian, serta dibagi menjadi kelompok eksperimen ($n = 43$) dan kontrol ($n = 44$). Empat guru matematika juga dilibatkan sebagai kolaborator dalam fase implementasi dan refleksi pedagogis.

Instrumen pengumpulan data mencakup tes pemahaman konsep matematika berbasis rubrik NCTM yang telah divalidasi ahli (*Cronbach's* $\alpha=0,84$), skala efikasi diri digital adaptif dari konstruk *Computer Self-Efficacy* ($\alpha=0,89$), pedoman wawancara semi-terstruktur, serta lembar observasi keterlibatan belajar. Seluruh instrumen diuji validitas isi (*Aiken's V* $>0,75$) dan reliabilitas internal sebelum implementasi lapangan. Prosedur pengumpulan data dilaksanakan dalam tiga tahap terstruktur: tahap pertama berupa pemberian *pretest* kognitif dan afektif untuk mengukur baseline kemampuan siswa; tahap kedua berupa intervensi pembelajaran selama enam minggu di mana kelompok eksperimen menggunakan media adaptif *offline-first* dengan frekuensi tiga pertemuan per minggu, sementara kelompok kontrol mengikuti pembelajaran konvensional sesuai kurikulum; tahap ketiga melibatkan *posttest* serta pengumpulan data kualitatif melalui wawancara mendalam dan observasi partisipatif.

Analisis data kuantitatif dilakukan menggunakan *Analysis of Covariance* (ANCOVA) dengan kontrol skor pretest untuk mengisolasi efek murni intervensi terhadap pemahaman konsep dan efikasi diri digital, setelah asumsi normalitas (*Shapiro-Wilk*) dan homogenitas (*Levene's test*) terpenuhi.

Data kualitatif dianalisis melalui *thematic analysis iteratif* dengan prosedur koding terbuka, aksial, dan selektif untuk mengidentifikasi pola mekanisme psikopedagogis yang mendasari perubahan perilaku belajar. Triangulasi metode dan sumber data diterapkan untuk memperkuat validitas konvergen temuan. Aspek etika penelitian dijaga ketat melalui persetujuan tertulis orang tua/wali, anonymisasi identitas partisipan, prinsip kerelaan penuh, serta jaminan bahwa partisipasi tidak memengaruhi nilai akademik siswa di sekolah. Seluruh analisis kuantitatif diproses menggunakan SPSS v.26, sedangkan koding kualitatif memanfaatkan NVivo 14.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dampak Kuantitatif Intervensi Terhadap Pemahaman Konsep Matematika Dan Efikasi Diri Digital

Analisis kuantitatif dalam penelitian ini diarahkan untuk mengisolasi efek murni intervensi media adaptif berbasis *offline-first* terhadap pemahaman konsep matematika dan efikasi diri digital, dengan mengendalikan varians awal melalui desain *Analysis of Covariance* (ANCOVA). Sebelum pengujian hipotesis, dilakukan verifikasi ketat terhadap asumsi parametrik guna menjamin validitas inferensi statistik. (Naufal, 2025) Uji kesetaraan awal (*baseline equivalence*) terhadap skor *pretest* menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelompok eksperimen dan kontrol, baik pada variabel pemahaman konsep ($t(85) = 0,42, p = .675, d = 0,09$) maupun efikasi diri digital ($t(85) = 0,31, p = .758, d = 0,07$), yang mengonfirmasi bahwa randomisasi *purposive* berhasil menciptakan kondisi awal yang komparabel. Selanjutnya, uji asumsi ANCOVA mengungkapkan bahwa residual berdistribusi normal (Shapiro-Wilk $W = 0,981, p = .124$), varian error homogen antar kelompok (Levene's $F = 1,13, p = .291$), serta terdapat hubungan linear antara kovariat (*pretest*) dan variabel terikat (*posttest*) dengan kemiringan regresi yang paralel (*interaction term* tidak signifikan, $p > .05$). Homoskedastisitas juga terpenuhi berdasarkan inspeksi visual terhadap plot residual versus *predicted values*. Dengan demikian, seluruh prasyarat metodologis untuk penerapan ANCOVA telah terpenuhi, memungkinkan estimasi efek perlakuan yang tidak bias oleh perbedaan awal atau pelanggaran asumsi distribusi (Setiawan, 2025)

Hasil ANCOVA untuk variabel pemahaman konsep matematika, dengan skor *pretest* sebagai kovariat, mengungkapkan efek utama yang signifikan secara statistik bagi kelompok perlakuan, $F(1, 84) = 18,73, p < .001$, dengan *partial eta-squared* (η^2) sebesar 0,183. Nilai η^2

ini, menurut konvensi Cohen (1988), merepresentasikan *effect size* dalam kategori besar, yang mengindikasikan bahwa sekitar 18,3% varians dalam skor *posttest* pemahaman konsep dapat diatribusikan secara unik pada intervensi media *offline-first*, setelah varians awal dikendalikan. Analisis deskriptif marginal means yang diestimasi menunjukkan bahwa kelompok eksperimen mencapai skor rata-rata tertimbang sebesar 78,4 ($SE = 1,2$), secara signifikan melampaui kelompok kontrol yang berada pada 65,1 ($SE = 1,3$). Perbedaan absolut sebesar 13,3 poin ini tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga bermakna secara pedagogis, setara dengan peningkatan lebih dari satu deviasi standar dalam konteks distribusi skor ulangan harian matematika di sekolah tersebut. (Amalia, 2025) Lebih lanjut, eksplorasi pada sub-dimensi pemahaman konsep meliputi representasi, penalaran, dan koneksi matematis menunjukkan pola konsistensi: efek terbesar teramati pada dimensi penalaran ($\eta^2 = 0,211$), diikuti oleh representasi ($\eta^2 = 0,176$) dan koneksi ($\eta^2 = 0,154$). Temuan ini mengisyaratkan bahwa mekanisme adaptif berbasis *rule-engine* dalam media *offline-first* mungkin paling efektif dalam memfasilitasi scaffolding kognitif untuk proses inferensi logis, yang secara teoretis selaras dengan prinsip pengurangan *extraneous cognitive load* dalam *Cognitive Load Theory*.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Pretest dan Hasil Uji Asumsi ANCOVA

Variabel	Kelompok	N	Mean (SD)	Skewness (SE)	Kurtosis (SE)	Uji Levene (F, p)	Shapiro-Wilk (W, p)
Pemahaman Konsep (Pre)	Eksperimen	43	52,3 (8,7)	-0,14 (0,36)	-0,32 (0,71)	1,13; .291	0,981; .124
	Kontrol	44	51,1 (9,2)	0,08 (0,36)	-0,41 (0,71)		
Efikasi Diri Digital (Pre)	Eksperimen	43	3,42 (0,61)	-0,21 (0,36)	-0,18 (0,71)	0,87; .354	0,988; .312
	Kontrol	44	3,38 (0,58)	0,11 (0,36)	-0,29 (0,71)		
Linearitas & Homoskedastisitas						Pre→Post Concept: $R^2 = .64$, $\beta = .78$; Residual plot: tidak ada pola sistematis	

Catatan :

SD = Simpangan Baku; SE = *Standard Error*; $p < .001$. Uji linearitas dilakukan melalui regresi sederhana *pretest* memprediksi *posttest*; homoskedastisitas dinilai secara visual dan melalui uji *Breusch-Pagan* (tidak signifikan, $p > .10$).

Analisis terhadap Tabel 1 memerlukan penafsiran yang cermat terhadap tiga lapisan informasi: distribusi awal, kesetaraan kelompok, dan kelayakan model. Pertama, nilai skewness dan kurtosis yang berada dalam rentang $\pm 0,5$ untuk semua variabel mengindikasikan distribusi yang mendekati normal univariat, memperkuat keandalan statistik

parametrik. Kedua, hasil uji Levene yang tidak signifikan ($p > .05$) untuk kedua variabel terikat menegaskan bahwa varians error antar kelompok bersifat homogen, sehingga estimasi F dalam ANCOVA tidak terinflasi oleh heteroskedastisitas. Ketiga, koefisien determinasi ($R^2 = .64$) pada hubungan linear pretest-posttest pemahaman konsep menunjukkan bahwa kovariat menjelaskan 64% varians dalam skor akhir, yang membenarkan penggunaannya sebagai kontrol statistik untuk meningkatkan presisi estimasi efek perlakuan. Kombinasi bukti ini memberikan fondasi metodologis yang kokoh bagi interpretasi hasil ANCOVA selanjutnya, sekaligus meminimalkan ancaman terhadap validitas internal yang bersumber dari perbedaan awal atau pelanggaran asumsi distribusi (Ignasia, 2025).

Temuan ini sejalan dengan laporan Setiawan dkk. (2025) yang mengonfirmasi bahwa modul digital adaptif mampu meningkatkan penguasaan konsep matematis siswa sekolah dasar melalui personalisasi tingkat kesulitan dan representasi visual yang terdiferensiasi. Namun, besaran efek dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan studi Amella dkk. (2023) yang melaporkan peningkatan moderat pada konteks sumber daya terbatas tanpa integrasi eksplisit prinsip pengurangan beban kognitif. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa arsitektur *offline-first* yang secara sengaja meminimalkan distraksi teknis dan menyederhanakan logika *branching* ke tiga jalur diferensiasi berhasil mengalokasikan kapasitas memori kerja secara lebih efisien untuk pemrosesan penalaran matematis. Berbeda dengan platform konvensional yang mengutamakan kompleksitas fitur dan sinkronisasi *cloud*, pendekatan kami memprioritaskan *germane load* sehingga efek intervensi tidak hanya terpusat pada hafalan prosedur, tetapi menembus dimensi penalaran konseptual. Hal ini menunjukkan bahwa keefektifan media adaptif di wilayah pedesaan tidak bergantung pada kecanggihan algoritmik, melainkan pada keselarasan desain instruksional dengan batas kapasitas kognitif dan infrastruktur nyata siswa. Dengan demikian, penelitian ini memperluas temuan Naufal (2025) dengan membuktikan bahwa stabilitas akses lokal dan penyederhanaan antarmuka merupakan prediktor kognitif yang lebih determinan daripada konektivitas internet dalam konteks pembelajaran matematika di daerah 3T.

Pada dimensi afektif, ANCOVA untuk skor komposit efikasi diri digital juga menghasilkan efek utama yang signifikan, $F(1, 84) = 14,29$, $p < .001$, $\eta p^2 = 0,145$, yang dikategorikan sebagai efek sedang ke besar. Estimasi marginal means mengungkapkan bahwa kelompok eksperimen melaporkan tingkat efikasi diri digital sebesar 4,18 ($SE = 0,09$) pada skala 5-point, secara signifikan lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol (3,71; $SE = 0,09$). Peningkatan absolut sebesar 0,47 poin ini merefleksikan pergeseran psikologis yang substantif, dari kecenderungan keraguan teknis menuju kepercayaan diri dalam berinteraksi dengan alat digital pembelajaran. Analisis lebih lanjut pada tiga sub-skala efikasi otonomi belajar, persepsi kompetensi, dan ketahanan teknis mengungkap pola yang menarik: efek

terbesar terdapat pada persepsi kompetensi ($\eta^2 = 0,168$), diikuti oleh otonomi ($\eta^2 = 0,139$) dan ketahanan teknis ($\eta^2 = 0,112$). Temuan ini konsisten dengan postulat *Self-Determination Theory* bahwa pengalaman keberhasilan bertahap (*mastery experience*) yang difasilitasi oleh umpan balik instan dan *branching logic* adaptif dalam media *offline-first* merupakan prediktor terkuat bagi pembentukan keyakinan akan kemampuan diri. Lebih lanjut, matriks korelasi parsial (mengontrol nilai *pretest*) menunjukkan hubungan positif yang signifikan antara skor *posttest* pemahaman konsep dan efikasi diri digital ($r = .41, p < .001$), yang mengisyaratkan adanya siklus resiprokal: peningkatan kompetensi kognitif memperkuat keyakinan afektif, yang pada gilirannya mendorong keterlibatan belajar yang lebih persisten. (Ulya et al., 2025)

Tabel 2. Ringkasan Hasil ANCOVA untuk Pemahaman Konsep dan Efikasi Diri Digital

Variabel Terikat	Sumber Varians	SS	df	MS	F	p	η^2	95% CI for η^2
Pemahaman Konsep (Post)	Kelompok (Intervensi)	1.842,3	1	1.842,3	18,73	<.001	.183	[.068, .312]
	Pretest (Kovariat)	6.315,7	1	6.315,7	64,21	<.001	.433	[.298, .541]
	Error	8.259,4	84	98,3				
Efikasi Diri Digital (Post)	Kelompok (Intervensi)	9,84	1	9,84	14,29	<.001	.145	[.041, .267]
	Pretest (Kovariat)	22,17	1	22,17	32,18	<.001	.277	[.152, .401]

Catatan:

SS = Sum of Squares; MS = Mean Square; η^2 = Partial Eta-Squared; CI = Confidence Interval. Kovariat: skor pretest masing-masing variabel.

Interpretasi terhadap Tabel 2 menggarisbawahi dua poin krusial. Pertama, nilai F yang tinggi untuk kovariat (*pretest*) pada kedua model (64,21 dan 32,18) menegaskan bahwa kemampuan awal memang prediktor kuat hasil akhir, sehingga pengendaliannya melalui ANCOVA merupakan langkah metodologis yang esensial untuk menghindari bias atribusi. Kedua, interval kepercayaan 95% untuk η^2 yang tidak mencakup nol (.068–.312 untuk pemahaman konsep; .041–.267 untuk efikasi diri) memberikan bukti robust bahwa efek intervensi bersifat stabil dan tidak merupakan artefak sampling. Besaran η^2 sebesar .183 untuk pemahaman konsep, jika dikonversi ke *Cohen's f*, menghasilkan nilai sekitar 0,47, yang berada di atas ambang batas efek besar (0,40). Ini mengimplikasikan bahwa intervensi tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga memiliki dampak praktis yang layak dipertimbangkan dalam kebijakan pengembangan media pembelajaran untuk konteks *low-resource*. Secara keseluruhan, temuan kuantitatif ini memberikan bukti empiris awal yang kuat bahwa desain *offline-first* yang mengintegrasikan prinsip adaptivitas kognitif dan dukungan otonomi belajar mampu menghasilkan peningkatan simultan pada dimensi kognitif dan afektif pembelajaran matematika di wilayah pedesaan. Transisi ke analisis kualitatif pada bagian selanjutnya akan mengeksplorasi mekanisme psikopedagogis yang mendasari pola statistik ini, khususnya bagaimana pengalaman interaksi dengan antarmuka yang dapat diprediksi dan

umpan balik instan memfasilitasi transformasi dari *techno-anxiety* menuju *digital agency* (Saekoko,dkk 2025)

Temuan ini sejalan dengan tinjauan Ulya dkk. (2025) yang menegaskan bahwa interaksi terstruktur dengan media digital mampu memperkuat keyakinan siswa dalam mengoperasikan teknologi pembelajaran secara mandiri. Berbeda dengan penelitian Ignasia (2025) yang melaporkan stagnasi atau penurunan efikasi pada siswa yang bergantung pada platform berbasis *cloud* dengan latensi tinggi, temuan kami menunjukkan bahwa eliminasi ketidakpastian akses justru menjadi katalis utama pertumbuhan afektif. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan *offline-first* berfungsi sebagai ruang psikologis yang aman, di mana kegagalan teknis tidak terjadi dan siswa dapat fokus pada kesalahan konseptual tanpa dihantui kekhawatiran kehabisan kuota atau *error sinkronisasi*. Pola peningkatan terbesar pada sub-dimensi persepsi kompetensi ($\eta^2 = 0,168$) memperkuat argumen Anwar dan Iriani (2025) bahwa pengalaman keberhasilan bertahap (*mastery experience*) yang difasilitasi oleh umpan balik instan merupakan fondasi terkuat bagi internalisasi kompetensi. Lebih lanjut, temuan ini membuktikan bahwa penyederhanaan terminologi antarmuka (dari "*hint*" menjadi "bantuan langkah") secara signifikan menurunkan persepsi evaluasi eksternal, sehingga siswa marginal lebih berani melakukan eksplorasi mandiri. Dengan demikian, peningkatan afektif dalam penelitian ini tidak bersifat sekunder, melainkan hasil langsung dari desain yang secara sengaja memisahkan hambatan infrastruktur dari proses validasi kompetensi diri.

Dinamika Kualitatif: Mekanisme Psikopedagogis Transisi Dari Techno-Anxiety Menuju Digital Agency

Analisis kuantitatif yang telah dipaparkan sebelumnya memberikan bukti statistik mengenai efektivitas intervensi, namun tidak cukup untuk menjelaskan mekanisme kausal yang menghubungkan arsitektur teknis media *offline-first* dengan transformasi psikopedagogis siswa. Untuk mengungkap dimensi *how* dan *why*, data kualitatif dianalisis melalui *thematic analysis* iteratif yang mengintegrasikan data observasi partisipatif, log aktivitas sistem, dan wawancara mendalam. Proses koding dilakukan secara siklikal: mulai dari koding terbuka untuk mengidentifikasi unit makna, pengelompokan aksial untuk membangun kategori, hingga koding selektif untuk merumuskan tema inti yang terikat secara teoretis. Temuan kualitatif dalam bagian ini tidak berfungsi sebagai ilustrasi naratif semata, melainkan sebagai penjelasan mekanistik yang memvalidasi jalur kausal antara desain produk dan respons afektif-kognitif peserta didik. Observasi lapangan selama enam minggu intervensi mengungkapkan transformasi pola keterlibatan belajar yang konsisten dengan tren peningkatan skor efikasi diri digital. Pada fase awal, catatan lapangan merekam frekuensi *task*

abandonment sebesar 34,2%, yang secara dominan dipicu oleh kecemasan akan kehabisan kuota atau kegagalan sinkronisasi *platform* eksternal. Seiring dengan familiarisasi terhadap antarmuka lokal yang stabil, insiden penghentian tugas mendadak turun drastis menjadi 9,1% pada minggu kelima. Pergeseran ini disertai perubahan strategi kognitif: siswa beralih dari pola *trial-and-error* impulsif menuju eksplorasi terstruktur yang ditandai dengan penundaan respons, pengulangan mandiri, dan penggunaan fitur *hint* sebelum meminta bantuan guru. Log aktivitas sistem mengonfirmasi pola ini melalui peningkatan durasi sesi belajar rata-rata dari 12,4 menit menjadi 28,7 menit, dengan rasio *retry-to-success* yang stabil pada kisaran 2,4:1, mengindikasikan ketekunan yang tidak disertai frustrasi akumulatif. (Zuhro et al., 2025)

Tabel 3. Matriks Koding Tematik Hierarkis: Transisi Psikopedagogis dalam Ekosistem *Offline-First*

Tema Utama (Teoretis)	Sub-Tema Operasional	Kode Empiris (Indikator)	Frekuensi Kode (n=12 Siswa)	Kutipan Representatif (Anonim)	Bukti Triangulasi (Log/Observasi)
Reduksi Techno-Anxiety (Cognitive Load Theory)	Prediktabilitas Antarmuka	Stabilitas akses tanpa notifikasi gangguan	47 referensi	"Tidak perlu takut mati sinyal, jadi bisa fokus hitung pecahan tanpa panik." (S07_E)	Rata-rata inter-click interval turun dari 4,2s ke 1,8s; 0 session timeout tercatat
	Eliminasi Distraksi Eksternal	Ketiadaan peringatan kuota/update	31 referensi	"Dulu sering berhenti karena muncul 'kuota habis', sekarang tidak ada itu lagi." (S03_E)	Log sistem: 0 permintaan API eksternal selama sesi belajar
Otonomi Terstruktur (Self-Determination Theory)	Branching Adaptif Tanpa Stigma	Retry mandiri, eksplorasi jalur alternatif	52 referensi	"Kalau salah, sistem tidak langsung nilai merah. Cuma dikasih contoh lain, jadi berani coba lagi." (S11_E)	Rasio *retry-to-success* 2,4:1; 83% siswa mengakses *hint* sebelum bantuan guru
	Kontrol Progres Belajar	Kebebasan mengatur kecepatan & urutan modul	38 referensi	"Saya bisa ulang bagian yang susah sampai paham, tidak perlu nunggu teman." (S09_E)	Variasi durasi modul per siswa: 8–24 menit (SD = 4,3), menunjukkan diferensiasi alami
Penguatan Kompetensi (Mastery Experience)	Umpan Balik Instan & Visual	Validasi progresif, representasi kontekstual	61 referensi	"Langsung tahu bagian mana yang keliru, jadi tidak numpuk bingungnya." (S03_E)	Peningkatan skor *self-correction* dari 31% ke 67% selama intervensi
	Scaffolding Berbasis Kearifan Lokal	Analogi budaya dalam	29 referensi	"Penjelasannya pakai contoh anyaman, jadi	Observasi: 78% siswa menunjukkan

		penjelasan konsep		lebih mudah dibayangkan." (S05_E)	ekspresi "aha moment" saat analogi lokal muncul
--	--	-------------------	--	-----------------------------------	---

Tabel 4. Profil Partisipan Wawancara dan Pola Engagement Awal-Akhir Intervensi

Kode Partisipan	Kelas	Gender	Skor Pre Efikasi (1-5)	Skor Post Efikasi (1-5)	Δ Efikasi	Pola Engagement Awal	Pola Engagement Akhir	Perubahan Strategis Utama
S01_E	V	L	2,8	4,1	+1,3	Impulsif, sering skip hint	Terstruktur, gunakan hint strategis	Dari guessing ke reasoning
S03_E	V	P	3,1	4,4	+1,3	Cemas teknis, minta bantuan guru	Mandiri, bantu teman (peer tutor)	Transisi dari dependen ke fasilitator
S07_E	VI	L	3,5	4,3	+0,8	Stabil tapi lambat	Cepat dan akurat, eksplorasi cabang	Peningkatan efisiensi kognitif
S11_E	VI	P	2,9	4,5	+1,6	Sering abandon tugas	Persisten, retry hingga sukses	Peningkatan ketahanan afektif
S14_E	V	L	3,3	4,0	+0,7	Moderat, ikuti instruksi	Inisiatif coba jalur alternatif	Pengembangan otonomi eksploratif
Rata-rata (n=12)			3,12	4,18	+1,06	Task abandonmen t: 34,2%	Task abandonmen t: 9,1%	Self-correction: +36%

Analisis mendalam terhadap Tabel 3 dan Tabel 4 mengungkapkan tiga mekanisme kausal yang saling memperkuat. Pertama, sub-tema prediktabilitas antarmuka tidak sekadar merujuk pada kenyamanan penggunaan, melainkan pada eliminasi *extraneous cognitive load* yang secara kronis mengganggu alokasi memori kerja untuk pemrosesan matematis. Data log yang menunjukkan penurunan *inter-click interval* dari 4,2 detik menjadi 1,8 detik mengonfirmasi bahwa stabilisasi akses secara kognitif membebaskan kapasitas atensi untuk fokus pada tugas inti. Frekuensi kode "stabilitas akses" yang muncul 47 kali dalam transkrip wawancara menunjukkan bahwa ini adalah pengalaman universal, bukan anomali individu. Kedua, pola *branching* adaptif yang dioperasikan secara lokal berfungsi sebagai mekanisme *scaffolding* dinamis. Rasio *retry-to-success* 2,4:1 bukanlah indikasi kegagalan, melainkan pola eksplorasi terkontrol yang konsisten dengan teori *productive failure*: siswa diizinkan melakukan kesalahan dalam lingkungan yang aman secara afektif. Tingginya proporsi siswa yang mengakses fitur *hint* sebelum meminta intervensi guru (83%) memperkuat argumen bahwa otonomi belajar difasilitasi oleh desain responsif, bukan dibiarkan tanpa arah. Ketiga, umpan balik instan yang divisualisasikan secara ringan berfungsi

sebagai penguat kompetensi bertahap. Peningkatan skor *self-correction* dari 31% menjadi 67% selama intervensi menunjukkan pergeseran dari ketergantungan eksternal menuju regulasi diri metakognitif. Tabel 4 memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa peningkatan efikasi diri tidak merata secara mekanis, melainkan termoderasi oleh pola engagement awal: siswa dengan kecemasan teknis tinggi (S03_E, S11_E) menunjukkan lonjakan efikasi terbesar (+1,3 hingga +1,6), mengindikasikan bahwa desain *offline-first* paling berdampak pada mereka yang paling rentan terhadap hambatan infrastruktur (Subarkah et al., 2025).

Tabel 5. Matriks Triangulasi Data: Konvergensi Observasi, Wawancara, dan Log Aktivitas

Konstruk Teoretis	Indikator Perilaku (Observasi)	Narasi Subjektif (Wawancara)	Jejak Digital (Log Aktivitas)	Status Konvergensi
Reduksi Cognitive Load	Penurunan frekuensi *glance* ke indikator sinyal (dari 8,2x/jam ke 1,1x/jam)	"Tidak perlu cek kuota terus, jadi pikiran tidak terpecah." (S07_E)	0 permintaan *background sync*; 100% sesi selesai tanpa interrupt	☒ Konvergen Penuh
Otonomi Belajar	Inisiatif navigasi non-linear (pilih modul sesuai minat) pada 67% siswa	"Saya bisa loncat ke materi yang saya mau duluan." (S11_E)	58% siswa mengakses >1 jalur branching per sesi; rata-rata 2,3 cabang dieksplorasi	☒ Konvergen Penuh
Mastery Experience	Ekspresi wajah "aha moment" + verbalisasi self-explanation	"Oh jadi begitu caranya, sekarang saya ngerti!" (S03_E)	Peningkatan rasio *correct-first-try* dari 41% ke 73% pada modul berulang	☒ Konvergen Penuh
Social Scaffolding	Interaksi *peer-tutoring* spontan saat satu siswa menguasai modul	"Saya ajari teman cara pakai hint-nya, biar dia juga bisa." (S01_E)	Pola akses berdekatan: 2-3 perangkat mengakses modul sama dalam window 5 menit	☒ Konvergen Penuh

Tabel 6. Evolusi Perilaku Engagement Mingguan: Frekuensi & Durasi (Kelompok Eksperimen, n=43)

Minggu Intervensi	Rata-rata Durasi Sesi (menit)	Frekuensi Task Abandonment (%)	Rasio Retry-to-Success	Akses Fitur Hint (% sesi)	Interaksi Sosial Belajar (frekuensi/jam)
Minggu 1	12,4 (SD=3,1)	34,2	1,8:1	41%	2,1
Minggu 2	16,7 (SD=3,8)	26,5	2,1:1	53%	3,4
Minggu 3	21,3 (SD=4,2)	18,1	2,3:1	67%	4,8
Minggu 4	25,1 (SD=3,9)	12,4	2,4:1	74%	5,2
Minggu 5	27,8 (SD=4,1)	9,1	2,4:1	79%	5,6
Minggu 6	28,7 (SD=3,7)	9,1	2,5:1	81%	5,9
Uji Tren Linear	$\beta = 2,71, p < .001$	$\beta = -4,12, p < .001$	Stabil ($p = .312$)	$\beta = 6,83, p < .001$	$\beta = 0,64, p < .001$

Analisis terhadap Tabel 5 dan Tabel 6 memberikan bukti robust mengenai validitas konvergen temuan kualitatif. Tabel 5 menunjukkan bahwa setiap konstruk teoretis reduksi *cognitive load*, otonomi belajar, *mastery experience*, dan *social scaffolding* didukung oleh tiga

sumber data yang saling mengonfirmasi. Status "Konvergen Penuh" pada keempat baris menolak kemungkinan bahwa temuan bersifat artifisial atau bias sumber tunggal. Lebih penting lagi, konvergensi ini bersifat mekanistik: misalnya, penurunan frekuensi *glance* ke indikator sinyal (observasi) selaras dengan narasi "tidak perlu cek kuota terus" (wawancara) dan data 0 permintaan *background sync* (log), yang secara kolektif menjelaskan bagaimana desain *offline-first* secara teknis membebaskan kapasitas kognitif. Tabel 6 memperkuat argumen temporal: tren linear yang signifikan pada durasi sesi (+2,71 menit/minggu), penurunan *task abandonment* (-4,12%/minggu), dan peningkatan penggunaan fitur *hint* (+6,83%/minggu) menunjukkan bahwa transformasi engagement bukan peristiwa instan, melainkan proses akumulatif yang memerlukan waktu familiarisasi (Epran & Muhammad, 2023). Stabilitas rasio *retry-to-success* ($\sim 2,4:1$) sepanjang intervensi mengindikasikan bahwa pola eksplorasi terkontrol telah terinternalisasi sejak minggu ketiga, bukan sekadar adaptasi awal. Kombinasi bukti ini menegaskan bahwa dinamika kualitatif yang teridentifikasi tidak hanya mengonfirmasi signifikansi statistik, tetapi juga memetakan jalur kausal melalui mana desain *offline-first* mentransformasi hambatan struktural menjadi peluang agensi belajar. Temuan ini menjadi landasan empiris untuk sintesis *Design-Based Research* pada bagian selanjutnya, di mana iterasi produk, kelayakan ekologis, dan implikasi desain akan diintegrasikan ke dalam kerangka yang lebih luas untuk pendidikan matematika di ekosistem digital terkendala. (Mawardi & Sari, 2025)

Temuan ini sejalan dengan tinjauan Ulya dkk. (2025) yang menegaskan bahwa interaksi terstruktur dengan media digital mampu memperkuat keyakinan siswa dalam mengoperasikan teknologi pembelajaran secara mandiri. Berbeda dengan penelitian Ignasia (2025) yang melaporkan stagnasi atau penurunan efikasi pada siswa yang bergantung pada platform berbasis *cloud* dengan latensi tinggi, temuan kami menunjukkan bahwa eliminasi ketidakpastian akses justru menjadi katalis utama pertumbuhan afektif. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan *offline-first* berfungsi sebagai ruang psikologis yang aman, di mana kegagalan teknis tidak terjadi dan siswa dapat fokus pada kesalahan konseptual tanpa dihantui kekhawatiran kehabisan kuota atau *error sinkronisasi*. Pola peningkatan terbesar pada sub-dimensi persepsi kompetensi ($\eta^2 = 0,168$) memperkuat argumen Anwar dan Iriani (2025) bahwa pengalaman keberhasilan bertahap (*mastery experience*) yang difasilitasi oleh umpan balik instan merupakan fondasi terkuat bagi internalisasi kompetensi. Lebih lanjut, temuan ini membuktikan bahwa penyederhanaan terminologi antarmuka (dari "*hint*" menjadi "bantuan langkah") secara signifikan menurunkan persepsi evaluasi eksternal, sehingga siswa marginal lebih berani melakukan eksplorasi mandiri. Dengan demikian, peningkatan afektif dalam penelitian ini tidak bersifat sekunder, melainkan hasil langsung dari desain yang secara sengaja memisahkan hambatan infrastruktur dari proses validasi kompetensi diri.

Temuan ini sejalan dengan pola keterlibatan yang dilaporkan Zuhro dkk. (2025), namun berbeda secara fundamental pada sumber daya yang memediasi keberlanjutan *engagement* tersebut. Berbeda dengan studi konvensional yang mengaitkan peningkatan partisipasi dengan fitur gamifikasi atau notifikasi *push* berbasis internet, temuan kualitatif kami menunjukkan bahwa prediktabilitas akses lokal justru menjadi variabel penentu utama transformasi dari *techno-anxiety* menuju *digital agency*. Hal ini menunjukkan bahwa ketika distraksi eksternal (peringatan kuota, *loading screen*, *error* koneksi) dihilangkan secara sistematis, kapasitas atensi siswa secara otomatis dialihkan kembali ke pemrosesan matematis dan regulasi diri metakognitif. Integrasi konteks lokal seperti analogi anyaman Mandailing tidak hanya berfungsi sebagai jembatan kultural, melainkan sebagai *schema activation* yang memperkuat pemahaman spasial dan emosional sebuah mekanisme yang jarang dieksplorasi dalam literatur *adaptive learning* yang cenderung bersifat universalistik (Prasetyawati dkk., 2025; Mawardi & Sari, 2025). Lebih jauh, kemunculan *peer-tutoring* spontan dan peningkatan penggunaan fitur bantuan secara mandiri mengonfirmasi bahwa desain *offline-first* tidak mengisolasi siswa, melainkan memicu *scaffolding* sosial yang organik di tingkat kelas. Dengan demikian, penelitian ini memperluas kerangka keadilan digital dengan membuktikan bahwa transformasi afektif-kognitif tidak dicapai melalui pemaksaan standar teknologi mutakhir, melainkan melalui rekayasa ekologis yang menyelaraskan arsitektur teknis, prinsip pengurangan beban kognitif, dan validasi kontekstual pengguna akhir.

Sintesis DBR dan Integrasi Temuan: Kelayakan Ekologis Dan Implikasi Desain Offline-First

Proses iterasi dalam kerangka *Design-Based Research* (DBR) tidak semata-mata berfungsi sebagai siklus perbaikan teknis, melainkan sebagai mekanisme epistemologis yang menyelaraskan arsitektur digital dengan realitas kognitif dan infrastructural peserta didik. Pada siklus pertama, validasi ahli dan uji coba terbatas mengungkap dua hambatan kritis: ukuran aset multimedia yang melebihi kapasitas penyimpanan perangkat Android generasi lama, serta kompleksitas logika *branching* yang justru meningkatkan *extraneous cognitive load* alih-alih memfasilitasi personalisasi. Respons terhadap temuan ini berupa kompresi algoritmis terhadap seluruh modul pembelajaran menjadi rata-rata 2,7 MB per unit, penggantian animasi berbasis *vector* untuk mengoptimalkan rendering pada GPU tingkat rendah, serta penghapusan total ketergantungan pada *cloud synchronization*. Secara pedagogis, struktur *branching* disederhanakan menjadi tiga jalur diferensiasi yang diaktifkan berdasarkan pola respons benar-salah berurutan, bukan skor agregat. (Oktaviana & Susiaty, 2026) Scaffolding kontekstual juga diintegrasikan melalui visualisasi konsep pecahan dan geometri yang merujuk pada pola anyaman tradisional Mandailing, sebuah penyesuaian yang secara

signifikan meningkatkan keterikatan emosional dan pemahaman spasial siswa. Siklus kedua mengonfirmasi efektivitas revisi ini melalui observasi *think-aloud* dan log interaksi, yang menunjukkan penurunan tingkat kesalahan navigasi sebesar 64% dan peningkatan waktu on-task menjadi 28,7 menit per sesi. Perubahan ini tidak bersifat ad-hoc, melainkan merupakan respons terukur terhadap umpan balik empiris yang memaksa desainer untuk memilih antara kompleksitas algoritmik dan aksesibilitas ekologis (Widiyasari et al., 2024).

Tabel 7. Matriks Iterasi Desain Berbasis DBR: Input Empiris, Modifikasi dan Justifikasi Teoretis

Siklus	Input Empiris (Observasi/Think-Aloud/Log)	Modifikasi Teknis dan Pedagogis	Justifikasi Teoretis dan Dampak Terukur
1	• 41% siswa gagal load modul >4MB • Navigasi branching terlalu kompleks (5 jalur) • Konteks soal terasa asing (kota/metropolitan)	• Kompresi aset ke <3 MB/modul • Penyederhanaan branching ke 3 jalur • Integrasi konteks lokal (anyaman, pasar tradisional)	• Cognitive Load Theory: Reduksi extraneous load melalui kompresi dan UI minimalis • Situated Learning Theory: Kontekstualisasi meningkatkan skema mental • Dampak: Error rate turun 64%, on-task time ↑ 112%
2	• Siswa ragu klik "hint" karena takut dinilai • Guru kesulitan pantau progres tanpa dashboard • Sinkronisasi manual via Bluetooth lambat	• Ubah label "hint" → "bantuan langkah" • Tambahkan dashboard offline lokal • Optimasi protokol transfer data (chunking 512KB)	• Self-Determination Theory: Reduksi evaluasi eksternal memperkuat otonomi • Formative Assessment: Dashboard memungkinkan intervensi tepat waktu • Dampak: Hint usage ↑ 38%, transfer time ↓ 71%, guru confidence ↑ 4.2/5

Analisis terhadap Tabel 7 mengungkap bahwa setiap modifikasi desain tidak didorong oleh preferensi estetika atau tren teknologi, melainkan oleh imperatif pedagogis yang terverifikasi secara empiris. Penurunan *error rate* navigasi sebesar 64% pada siklus kedua bukan sekadar perbaikan antarmuka, melainkan konsekuensi langsung dari penyelarasan arsitektur informasi dengan kapasitas memori kerja siswa. Ketika kompleksitas *branching* dikurangi dari lima menjadi tiga jalur, siswa tidak kehilangan kesempatan personalisasi, justru memperoleh ruang kognitif yang lebih stabil untuk memproses hubungan sebab-akibat matematis. Hal ini mengonfirmasi postulat *Cognitive Load Theory* bahwa desain instruksional yang efektif pada konteks sumber daya terbatas harus memprioritaskan *germane load* melalui penyederhanaan struktural, bukan penambahan fitur. Integrasi konteks lokal seperti pola

anyaman Mandailing juga bukan dekorasi kultural semata, melainkan mekanisme *schema activation* yang memungkinkan siswa menghubungkan representasi abstrak matematika dengan pengalaman sensorimotor yang telah terinternalisasi (Dilson, Rini Yunita, 2022).

Data peningkatan penggunaan fitur bantuan sebesar 38% setelah perubahan terminologi dari *hint* menjadi bantuan langkah mengilustrasikan bagaimana *framing linguistik* memengaruhi persepsi risiko psikologis. Siswa menginterpretasikan hint sebagai indikator ketidakmampuan, sementara bantuan langkah dibaca sebagai alat *scaffolding* yang normatif. Perubahan ini, meskipun sederhana secara teknis, menghasilkan dampak afektif yang signifikan terhadap kesiapan siswa untuk melakukan *productive failure*. Optimasi protokol transfer data melalui *chunking* 512KB juga menyelesaikan *bottleneck* ekologis yang sebelumnya menghambat distribusi produk di ruang kelas dengan konektivitas terbatas. Dengan demikian, iterasi DBR dalam penelitian ini membuktikan bahwa inovasi pendidikan di lingkungan terkendala bukan soal mengadopsi teknologi mutakhir, melainkan merekayasa ulang arsitektur digital agar selaras dengan batasan kognitif, psikologis, dan infrastruktur pengguna akhir (Helly et al., 2022).

Kelayakan ekologis media yang telah direvisi diuji tidak hanya melalui metrik teknis, tetapi melalui respons sistemik terhadap ekosistem pembelajaran yang secara struktural dibatasi oleh keterbatasan perangkat, ketiadaan jaringan stabil, dan variasi kompetensi digital guru. Kompatibilitas dengan sistem operasi Android 8 hingga 10, yang mencakup 74% perangkat di SD Negeri 102 Sigalapang, menjadi prasyarat non-negotiable yang memastikan inklusivitas akses. Stabilitas operasional tanpa ketergantungan internet diwujudkan melalui penyimpanan lokal terenkripsi dan mekanisme *local caching* yang memungkinkan sinkronisasi progres hanya ketika guru menghubungkan perangkat master ke perangkat siswa via Bluetooth atau kabel USB OTG. Model distribusi ini mengurangi biaya replikasi secara drastis, karena tidak memerlukan langganan server, lisensi *cloud*, atau pemeliharaan jaringan sekolah. Respons siswa marginal terhadap desain *low-bandwidth, high-cognitive* ini bersifat paradoks: semakin sederhana arsitektur teknis, semakin kompleks dan mendalam interaksi kognitif yang terjadi. Hal ini mengonfirmasi hipotesis bahwa hambatan infrastruktur tidak serta-merta menghasilkan degradasi kualitas belajar, asalkan desain instruksional secara sengaja mengkompensasi keterbatasan teknis melalui *scaffolding* adaptif dan umpan balik formatif yang terstruktur (Prasetiawati et al., 2025).

Tabel 8. Checklist Kelayakan Ekologis: Validasi Ahli Teknologi, Guru, dan Pengguna Akhir

Dimensi Kelayakan	Indikator Operasional	Skor Ahli Teknis (1-5)	Skor Guru (1-5)	Skor Siswa (1-5)	Rata-rata Tertimbang
Kompatibilitas Perangkat	Berjalan stabil di Android 8-10, RAM $\leq$ 2GB	4.8	4.6	4.7	4.70

Stabilitas Offline	Tidak crash, tidak hang, load <3 detik	4.9	4.8	4.9	4.87
Kemudahan Distribusi	Transfer via USB/Bluetooth <2 menit/modul	4.5	4.9	4.3	4.57
Relevansi Kontekstual	Konten selaras kurikulum & budaya lokal	4.7	4.8	4.9	4.80
Beban Kognitif Guru	Dashboard mudah dibaca, intervensi minimal	4.6	4.7	–	4.65
Skor Global	–	4.70	4.76	4.70	4.72

Interpretasi terhadap Tabel 8 menunjukkan konsistensi tinggi antar pemangku kepentingan dalam menilai kelayakan ekologis produk. Skor rata-rata tertimbang sebesar 4,72 pada skala Likert 5-point mengindikasikan bahwa media ini tidak hanya memenuhi standar fungsional minimum, tetapi juga melampaui ekspektasi pengguna dalam konteks *constrained digital ecosystem*. Konsistensi skor antara ahli teknis (4,70) dan siswa (4,70) mengisyaratkan bahwa optimasi arsitektur tidak mengorbankan pengalaman pengguna demi efisiensi teknis. Sebaliknya, kedua dimensi tersebut saling menguatkan: stabilitas *offline* dan kompatibilitas perangkat lama justru menjadi fondasi bagi keterlibatan kognitif yang lebih dalam. Dimensi kemudahan distribusi yang mendapat skor 4,57 dari ahli teknis namun 4,9 dari guru merefleksikan perbedaan prioritas: ahli teknis mengukur efisiensi protokol transfer, sementara guru menilai dampak praktis terhadap manajemen kelas. Nilai tinggi pada relevansi kontekstual (4,80) dan beban kognitif guru (4,65) mengonfirmasi bahwa desain *offline-first* tidak mengisolasi peran pendidik, melainkan memberdayakannya melalui dashboard diagnostik yang ringan dan responsif. Secara agregat, data ini membuktikan bahwa kelayakan ekologis bukan konsep statis, melainkan fungsi dinamis dari keselarasan antara batasan infrastruktur, kapasitas kognitif pengguna, dan responsivitas desain terhadap konteks mikro (Nurwahid et al., 2025).

Integrasi temuan kuantitatif dan kualitatif dalam kerangka *joint display* mengungkap meta-inferensi yang melampaui konvergensi data sederhana. Signifikansi statistik ANCOVA pada pemahaman konsep dan efikasi diri digital tidak dapat dipisahkan dari mekanisme psikopedagogis yang teridentifikasi secara kualitatif: prediktabilitas antarmuka mereduksi *techno-anxiety*, *branching* adaptif memfasilitasi otonomi terstruktur, dan umpan balik instan memperkuat *mastery experience*. Ketika data kuantitatif menunjukkan peningkatan skor *self-correction* sebesar 36%, data kualitatif menjelaskan bahwa lonjakan ini dimediasi oleh pergeseran dari ketergantungan eksternal menuju regulasi diri metakognitif yang difasilitasi oleh lingkungan belajar yang aman secara afektif. Joint display ini tidak hanya memvalidasi

temuan, tetapi juga memetakan jalur kausal melalui mana desain teknis bertranslasi menjadi dampak pedagogis. Namun, generalisasi temuan harus dibaca dengan kehati-hatian metodologis. Konteks SD Negeri 102 Sigalapang, dengan karakteristik sosio-teknis yang spesifik, tidak dapat direkayasa secara langsung ke wilayah dengan dinamika budaya, kurikulum, atau infrastruktur yang berbeda secara radikal. Batasan ini bukan kelemahan, melainkan pengakuan epistemologis bahwa inovasi pendidikan yang adil harus bersifat kontekstual, bukan universalistik (Kasmawati, 2026).

Tabel 9. *Joint Display Mixed-Methods: Meta-Inferensi Kuantitatif-Kualitatif*

Temuan Kuantitatif	Temuan Kualitatif Pendukung	Meta-Inferensi (Jalur Kausal)	Implikasi Desain
Peningkatan pemahaman konsep ($\Delta = +13,3$ poin, $\eta^2 = .183$)	Siswa beralih dari trial-error impulsif ke eksplorasi terstruktur; penggunaan hint strategis $\uparrow 38\%$	Stabilisasi antarmuka $\rightarrow$ reduksi extraneous load $\rightarrow$ alokasi memori kerja ke pemrosesan matematis $\rightarrow$ peningkatan penalaran konseptual	Prioritaskan UI minimalis & branching sederhana di konteks low-resource
Peningkatan efikasi diri digital ($\Delta = +1,06$, $\eta^2 = .145$)	Transisi dari kecemasan kuota ke kepercayaan retry mandiri; peer-tutoring spontan muncul	Lingkungan aman afektif $\rightarrow$ mastery experience bertahap $\rightarrow$ internalisasi kompetensi $\rightarrow$ digital agency	Desain umpan balik instan yang non-evaluatif & scaffolding berbasis otonomi
Task abandonment $\downarrow$ dari 34,2% ke 9,1%	Penurunan glance ke indikator sinyal; durasi sesi $\uparrow 112\%$	Prediktabilitas akses $\rightarrow$ stabilitas atensi $\rightarrow$ persistensi kognitif $\rightarrow$ engagement berkelanjutan	Hilangkan dependency cloud, optimalkan offline caching & chunking
Self-correction $\uparrow$ dari 31% ke 67%	Ekspresi "aha moment" saat analogi lokal muncul; self-explanation verbal meningkat	Kontekstualisasi budaya $\rightarrow$ schema activation $\rightarrow$ integrasi representasi $\rightarrow$ regulasi metakognitif	Integrasikan kearifan lokal sebagai jembatan kognitif, bukan dekorasi

Analisis Tabel 9 mengonfirmasi bahwa setiap peningkatan kuantitatif memiliki koridor kualitatif yang dapat dilacak secara mekanistik. Kolom meta-inferensi tidak sekadar menyandingkan data, tetapi merekonstruksi rantai kausal dari input desain hingga output belajar. Sebagai contoh, penurunan *task abandonment* tidak terjadi secara kebetulan, melainkan merupakan konsekuensi logis dari eliminasi *background sync* dan stabilitas akses yang membebaskan siswa dari distraksi eksternal, sehingga atensi dapat dialokasikan secara penuh pada pemecahan masalah. Implikasi desain yang dirumuskan dari joint display ini bersifat preskriptif namun fleksibel: arsitektur *offline-first* dengan UI minimalis, branching adaptif sederhana, dan scaffolding kontekstual terbukti efektif sebagai model referensi untuk pengembangan edtech di pasar *emerging*. Arah riset selanjutnya perlu memperluas cakupan temporal melalui studi longitudinal untuk menguji retensi dampak jangka panjang, mengintegrasikan modul ini ke dalam LMS offline yang dapat dikelola dinas pendidikan, serta

melakukan uji coba komparatif lintas wilayah 3T untuk memvalidasi transferabilitas desain. Dengan demikian, temuan penelitian ini tidak hanya menutup siklus DBR, tetapi juga membuka ruang dialog epistemologis antara ketepatan teknis, keadilan pedagogis, dan realitas infrastruktur yang sering diabaikan dalam wacana transformasi digital pendidikan (Baharuddin, 2026).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa desain media pembelajaran matematika adaptif berbasis *offline-first* secara signifikan meningkatkan pemahaman konsep dan efikasi diri digital siswa SD di wilayah pedesaan, dengan bukti statistik yang robust ($p < .001$, $\eta^2 = .183$ dan $.145$) serta mekanisme kausal yang terverifikasi secara kualitatif. Temuan utama menunjukkan bahwa eliminasi ketergantungan *cloud*, kompresi aset (<3 MB/modul), dan penyederhanaan logika *branching* adaptif tidak sekadar solusi teknis darurat, melainkan strategi pedagogis yang sah secara kognitif dan afektif. Mekanisme psikopedagogis yang mendasari dampak ini meliputi: prediktabilitas antarmuka yang mereduksi *extraneous cognitive load*, otonomi terstruktur yang memfasilitasi *productive failure* tanpa stigma, serta umpan balik instan yang memperkuat *mastery experience* bertahap. Integrasi kearifan lokal Mandailing Natal dalam visualisasi konsep matematika juga terbukti berfungsi sebagai jembatan kognitif yang efektif, bukan sekadar dekorasi kultural.

Secara teoretis, penelitian ini memperluas kerangka *equity-oriented educational technology* dengan membuktikan bahwa personalisasi pembelajaran tidak mensyaratkan infrastruktur mutakhir, melainkan keselarasan antara arsitektur teknis, prinsip pengurangan beban kognitif, dan validasi kontekstual. Secara praktis, prototipe yang dihasilkan menawarkan model referensi yang dapat direplikasi untuk pengembangan edtech di pasar *emerging*, dengan biaya distribusi minimal dan kompatibilitas perangkat lama. Keterbatasan studi ini terletak pada cakupan temporal enam minggu dan konteks spesifik SD Negeri 102 Sigalapang, sehingga generalisasi memerlukan kehati-hatian metodologis. Arah riset selanjutnya disarankan untuk menguji retensi dampak jangka panjang, mengintegrasikan modul ke dalam sistem LMS *offline* tingkat dinas, serta melakukan uji coba komparatif lintas wilayah 3T. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan kembali bahwa keadilan dalam transformasi digital pendidikan dimulai dari pengakuan terhadap realitas infrastruktur, bukan dari pemaksaan standar yang tidak inklusif.

DAFTAR RUJUKAN

Aditya, A., & Harahap, S. (2024). Systematic Literature Review: Pemanfaatan Software Matematika GeoGebra Sebagai Media Belajar Untuk Mengetahui Kemampuan Komputasi Peserta Didik. *CONSISTAN: Jurnal Tadris Matematika*, 2(01), 118–125.

- Ainun Asri, Sukriadi, A. A. A., & Muhlis, Hety Diana Septika, R. P. R. H. (2025). *Pengaruh Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Articulate Storyline 3 Terhadap Hasil Belajar Matematika Siswa Kelas Iv. As-Sabiqun: Jurnal Pendidikan Islam Anak Usia Dini*, 7(4), 579–591.
- Alvi Setya Kurnia Dewi, A. Q. (2026). Penerapan Bayesian Knowledge Tracing pada Game Ethno Run sebagai Media Pembelajaran Matematika Adaptif untuk Siswa Kelas 3-5 Sekolah Dasar. *Modem: Jurnal Informatika Dan Sains Teknologi*, 4(1), 129–137.
- Amalia, A. (2025). Penggunaan Media Flashcard untuk Mengatasi Hambatan Pemahaman Matematika Dasar Siswa MI Tarbiyatul Ikhwan Pamekasan. *RESTECH: Journal of Research In Education Dan Technology*, 1(1), 1–6.
- Amella, A. S., Supena, A., & Bachtiar, I. G. (2023). Pengembangan Media MOBIL (Monopoli Bilangan) Adaptif dalam Pembelajaran Matematika untuk Peserta Didik Hambatan Intelektual. *Jurnal Pendidikan Khusus*, 2, 1–12.
- Anwar, K., & Iriani, D. (2025). Pelatihan Pengembangan Media Smart Video Adaptive Berbasis H5P dalam Mendukung Pembelajaran Matematika Berdiferensiasi. *Jurnal Pengabdian Masyarakat (JUPEMA)*, 04(01), 61–66.
- Arif, M. B., & Handayani, U. F. (2024). Meta Analisis Penerapan Discovery Learning dalam Meningkatkan Hasil Belajar Matematika Siswa Kelas V SDN 1 Bululawang. *CONSISTAN: Jurnal Tadris Matematika*, 2(01), 98–105.
- Baharuddin. (2026). Pembelajaran Diferensiasi Matematika Berbasis Teknologi. *Jurnal Citra Pendidikan (JCP)*, 6(1), 79–88.
- Damayanti, H. N. (2023). Pengembangan Bahan Ajar PanDeCo Pada Pembelajaran Matematika Berdiferensiasi. *Jurnal Education Transformation*, 1(November).
- Dilson, Rini Yunita, S. A. (2022). Media Pembelajaran Matematika Interaktif Kelas 3 Sekolah Dasar Berbasis Mobile. *Jurnal SIMTIKA*, 5(1), 6–13.
- Epran, & Muhammad, I. (2023). Pengembangan Media Pembelajaran Matematika Berbasis Android pada Materi Matriks. *EDUKASIA: Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*, 4(2), 2051–2062.
- Hasanah, R., & Malang, U. A. (2025). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Motivasi Belajar Matematika Siswa : Sebuah Kajian Literatur. *CONSISTAN: Jurnal Tadris Matematika*, 3(01), 11–21.
- Helly, A. M. H., Lagu, D. B., Karlina, I., Blegur, S., & Cendana, U. N. (2022). Pemanfaatan Smart Apps Creator sebagai Media Pembelajaran Matematika Berbasis Android. *Circle: Jurnal Pendidikan Matematika*, 2(2), 162–172.
- Ignasia, F. (2025). Pengaruh Pembelajaran Adaptif Berbasis Game dengan Personalisasi terhadap Hasil Belajar Peserta Didik dalam Konteks Keragaman Karakteristik. *Jurnal Pendidikan Matematika Dan Sains*, 13, 273–282.

- Kasmawati, N. N. (2026). *Pembelajaran Matematika Menggunakan Media Ajar Interaktif Berbasis Misteri Boks Angka Aljabar Pada Siswa SMP*. *AFORA: Jurnal Pendidikan Matematika*, 5(1), 43–55.
- Mawardi, D. N., & Sari, R. P. (2025). Analisis Manfaat Media Digital Berbasis Budaya Terhadap Matematika Siswa. *Jurnal Perspektif Pendidikan*, 19(2), 326–342.
- Nasution, Z. M., & Hidayati, N. (2025). Rancang Bangun Game Edukasi Matheduquest Berbasis Unity 6 Sebagai Inovasi Teknologi Adaptif Untuk Meningkatkan Literasi Matematika Siswa SMP. *Jurnal Pembelajaran Dan Matematika Sigma (JPMS)*, 11(2), 191–200.
- Naufal, A. (2025). Development of a mathematics e-module using Polypad to improve fractional concept comprehension. *Curricula: Journal of Curriculum Development*, 4(2), 1037–1050.
- Neti Saekoko, Saniria Benu, Ivony Welchristin Adelis Oematan, H. D. B. P. (2025). Peran Evaluasi Formatif dalam Meningkatkan Kualitas Pembelajaran di Era Digital. *Jurnal Ilmiah Literasi Indonesia*, 1(2), 336–350.
- Nurwahid, M., Ashar, S., & Awantagusnik, A. (2025). Pembelajaran Realistic Mathematics Education (RME) Berbasis Literasi Numerasi : Strategi dan Tantangan. *CONSISTAN: Jurnal Tadris Matematika*, 3(01), 22–38.
- Oktaviana, D., & Susiaty, U. D. (2026). Eksplorasi Permasalahan Kebutuhan Media Inovatif Sebagai Dasar Pengembangan Game Berbasis Gamifikasi. *Jurnal Axioma: Jurnal Matematika Dan Pembelajaran*, 11(1), 29–39.
- Prasetiawati, C., Fatmawati, S., & Afandi, M. (2025). Sinergi Penalaran Matematis dan Literasi Finansial: Pengembangan Media Etnomatematika dalam Konteks Aritmatika Sosial Sekolah Dasar. *Teorema: Teori Dan Riset Matematika*, 10(1), 153–166.
- Rahmawati, N. D., Anggoro, B. S., & Arfina, S. (2022). Meningkatkan Kemampuan Metakognitif dan Penalaran Adaptif Matematis: Dampak Model FERA Berbantuan Video Pembelajaran. *Jurnal Cendekia: Jurnal Pendidikan Matematika*, 06(02), 1419–1432.
- Rudy Setiawan, E. M. S. W. (2025). Modul Digital Adaftif Matematika Sebagai Solusi Untuk Keanekaragaman Kemampuan Belajar. *Prismatika: Jurnal Pendidikan Dan Riset Matematika*, 7(2), 276–285.
- Subarkah, M. R., Raharjo, H., Haqq, A. A., & Mafatikah, P. (2025). Pengembangan Bahan Ajar Matematika Berbasis Multimedia Interaktif Terhadap Prestasi Belajar Peserta Didik Dalam Materi Fungsi. *Journal Of Mathematics Learning Innovation (JMLI)*, 4(1), 23–36.
- Ulya, N., Suhailah, S. E., Putri, V. J., Revita, R., Matematika, P., Islam, U., Sultan, N., & Kasim, S. (2025). Peran Media Pembelajaran Digital dalam Pembelajaran Matematika di Era Merdeka Belajar : Systematic Literature Review. *Aljabar: Jurnal Ilmuan Pendidikan, Matematika Dan Kebumian*, 1(2), 126–136.
- Widiyasari, R., Astriyani, A., Ramadianti, W., & Anindya, Devina, K. (2024). Pengembangan

Bahan Ajar Digital Matematika Berbasis Flip Pdf Corporate untuk Meningkatkan Kemandirian Belajar Mahasiswa. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ, November*, 1–12.

Zuhro, A. R., Cahyandaru, P., & Fidianingsih, A. (2025). Analisis Kebutuhan Media Pembelajaran Seni Budaya Berbasis Pendekatan Deep Learning Dalam Kurikulum Merdeka Pada Jenjang Operasional Formal. *EPISTEMA*, 6(2), 15–30.