

Game RPG Matematika Berbasis Fuzzy Mamdani-DDA dan Dasbor Guru untuk Sekolah Dasar

Yulyanto^{1*}, Muhammad Nauval Bintang² Rio Andriyat Kridiawan²

¹ Program Studi Desain Komunikasi Visual, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Kuningan

² Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Kuningan, Kuningan, Indonesia

Email: ¹yulyanto@uniku.ac.id, ²muhnaualbintang@gmail.com, ³rioandriyat@uniku.ac.id

*Email Penulis Korespondensi: yulyanto@uniku.ac.id

Abstrak—Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi kelayakan “Jiwa Menghitung,” sebuah game RPG berbasis giliran Android untuk pembelajaran matematika siswa sekolah dasar Kelas 4–6. Kebaruan utama penelitian ini adalah: (1) penggunaan inferensi Fuzzy Mamdani—bukan Sugeno—sebagai mesin DDA yang menghasilkan keluaran kategoris linguistik lebih transparan dan interpretatif bagi pendidik; dan (2) arsitektur dua sisi yang menghubungkan game dengan dasbor guru real-time melalui Firebase. Mesin inferensi dengan sembilan aturan IF-THEN dan defuzzifikasi Centroid of Gravity (COG) mengadaptasi tingkat kesulitan soal berdasarkan waktu respons dan jumlah kesalahan pemain. Parameter fungsi keanggotaan divalidasi melalui expert review dua guru matematika, dan basis aturan diverifikasi dengan analisis kotak putih ($V(G)=3$). Uji Penerimaan Pengguna (UAT) terhadap 42 siswa menghasilkan penerimaan keseluruhan 90,98% (Kegunaan: 95,35%; Sistem DDA: 80,00%), dan UAT dua guru pada dasbor menghasilkan 88,09%—keduanya melampaui ambang “Sangat Layak.” Analisis N-gain pada Kelas 4 dan Kelas 5 menghasilkan kategori Sedang ($g=0,36$ dan $g=0,34$), sementara Kelas 6 menunjukkan efek langit-langit (ceiling effect) yang mengidentifikasi keterbatasan desain kritis. Temuan mengkonfirmasi kelayakan teknis dan penerimaan pengguna mekanisme DDA berbasis Mamdani, sekaligus menetapkan granularitas adaptasi sebagai prioritas pengembangan lanjutan.

Kata Kunci: Penyesuaian Tingkat Kesulitan Dinamis, Fuzzy Mamdani, game edukasi, RPG turn-based, pembelajaran matematika, Android, dasbor guru

Abstract—This study develops and evaluates the feasibility of “Jiwa Menghitung,” an Android turn-based RPG for elementary school mathematics (Grades 4–6). The principal novelties are: (1) adoption of Fuzzy Mamdani inference—rather than Sugeno—as the DDA engine, yielding linguistically interpretable categorical outputs (Easy/Medium/Hard) directly communicable to educators; and (2) a dual-sided architecture integrating the game client with a real-time teacher dashboard via Firebase. The Mamdani engine, governed by nine IF-THEN rules and Centroid of Gravity (COG) defuzzification, adapts question difficulty from two inputs: player response time and error count. Membership function parameters were validated through expert review by two mathematics teachers, and the rule base verified by white-box analysis ($V(G)=3$). User Acceptance Testing (UAT) with 42 students yielded 90.98% overall acceptance (Usability: 95.35%; DDA System: 80.00%), while teacher UAT ($n=2$) produced 88.09%—both exceeding the “Very Feasible” threshold. N-gain analysis for Grades 4 and 5 produced moderate gains ($g=0.36$ and $g=0.34$), while Grade 6 exhibited a ceiling effect identifying a critical design constraint. Findings confirm the technical feasibility and user acceptance of Mamdani-based DDA, while establishing adaptation granularity as a key development priority.

Keywords: Dynamic Difficulty Adjustment, Fuzzy Mamdani, educational game, turn-based RPG, mathematics learning, Android, teacher dashboard

1. PENDAHULUAN

Kecakapan matematika dasar merupakan kompetensi kognitif fundamental yang memiliki implikasi luas bagi capaian akademik di berbagai bidang studi [1]. Di Indonesia, hasil PISA 2022 menempatkan Indonesia pada kuartil bawah negara-negara peserta dalam literasi matematika, dengan rerata skor 366 berbanding rerata OECD sebesar 472 [2]. Data Asesmen Nasional Kompetensi Minimum (AKM) mengindikasikan bahwa sebagian besar siswa sekolah dasar Indonesia mengalami kesulitan dalam operasi aritmetika dasar, khususnya perkalian dan pembagian. Bukti lapangan dari lokasi penelitian ini memperkuat kondisi tersebut: wawancara dengan guru di SDN 1 Cikondang mengungkapkan bahwa hanya sekitar 30% siswa Kelas 5 yang mampu melakukan perkalian sederhana dengan benar, sementara siswa Kelas 6 menunjukkan kesulitan persisten dalam operasi pembagian bersusun—kondisi yang sebagian disebabkan pendekatan pembelajaran yang pasif dan minimnya media belajar yang menarik dan adaptif.

Pesatnya penetrasi perangkat mobile di kalangan anak usia sekolah mendorong minat terhadap pembelajaran berbasis permainan (game-based learning/GBL) sebagai suplemen pedagogis. Game edukasi terbukti mampu meningkatkan motivasi belajar, mempertahankan perhatian siswa, dan memperbaiki pemahaman konseptual [3], [4]. Dalam lanskap GBL, game role-playing game (RPG) berbasis giliran (turn-based) menawarkan affordansi pedagogis yang khas bagi latihan matematika: mekanik pertarungan berubah secara alami menjadi tugas pemecahan masalah yang terstruktur, dan konteks naratif menyediakan bingkai motivasional untuk latihan berulang [5], [6].

Namun, keterbatasan kritis dari sebagian besar game matematika edukatif adalah ketergantungan pada tingkat kesulitan yang statis. Game yang gagal beradaptasi dengan kemampuan individual pemain berisiko menimbulkan kebosanan atau kecemasan—kedua kondisi ini mengganggu kondisi aliran (flow state) yang diteorikan oleh Csikszentmihalyi [7], yakni suatu kondisi di mana tantangan dan kemampuan berada dalam keseimbangan dinamis sehingga menghasilkan

keterlibatan optimal. Penyesuaian Tingkat Kesulitan Dinamis (Dynamic Difficulty Adjustment/DDA) mengatasi hal ini dengan memodifikasi parameter game secara berkelanjutan sebagai respons terhadap data kinerja pemain [8]. Sistem inferensi logika fuzzy sangat sesuai untuk DDA dalam konteks pendidikan karena mampu menangani ketidaktepatan yang melekat pada indikator kinerja perilaku dan menghasilkan keputusan dalam bahasa alami [9].

Meskipun minat penelitian terhadap DDA untuk game edukasi terus berkembang, Tabel 1 mengidentifikasi tiga kesenjangan signifikan yang belum tertangani. Pertama, implementasi DDA dalam game edukasi di Indonesia hampir secara eksklusif menggunakan inferensi Fuzzy Sugeno [10], yang efisien secara komputasional namun menghasilkan keluaran numerik crisp yang sulit diinterpretasikan oleh pemangku kepentingan pendidikan non-teknis. Kelayakan Fuzzy Mamdani—yang menghasilkan keluaran kategoris linguistik (Mudah/Sedang/Sulit) yang dapat dikomunikasikan langsung kepada guru—belum dikaji secara sistematis sebagai alternatif DDA dalam konteks ini [24]. Kedua, seluruh sistem game edukasi yang diidentifikasi beroperasi sebagai lingkungan tertutup tanpa menyediakan mekanisme terstruktur bagi guru untuk mengakses data kinerja siswa secara real-time [11], sehingga menghalangi integrasi penilaian formatif yang terbukti efektif secara pedagogis [18]. Ketiga, penelitian game edukasi berbasis DDA untuk matematika dasar di Indonesia dalam kerangka Kurikulum Merdeka hampir tidak ada. Ketiga kesenjangan ini secara bersama-sama mendefinisikan celah kontribusi yang ditangani oleh penelitian ini.

Makalah ini melaporkan pengembangan dan evaluasi kelayakan “Jiwa Menghitung”—game RPG matematika berbasis giliran Android untuk Kelas 4–6—dengan tiga dimensi kebaruan yang secara langsung mengatasi ketiga kesenjangan tersebut: (1) mengimplementasikan Fuzzy Mamdani—bukan Sugeno—sebagai mesin DDA untuk memperoleh keluaran interpretatif berbasis bahasa alami yang dapat digunakan langsung oleh guru; (2) membangun ekosistem dua sisi yang menghubungkan klien game dengan dasbor guru real-time melalui Firebase Realtime Database, memungkinkan integrasi penilaian formatif yang kontinu [18]; dan (3) menyelaraskan konten soal dengan Kurikulum Merdeka untuk Kelas 4–6 sekolah dasar Indonesia.

DDA adalah paradigma komputasional di mana suatu sistem secara berkelanjutan mengevaluasi kinerja pengguna dan memodifikasi parameter tugas guna mempertahankan tingkat tantangan yang sesuai [8]. Pedersen et al. [12] mendemonstrasikan bahwa DDA berbasis model secara signifikan meningkatkan kepuasan pengalaman pemain dibandingkan kesulitan statis, khususnya bagi pemain dengan profil kemampuan beragam—kondisi yang relevan dengan heterogenitas siswa di kelas sekolah dasar.

Dalam inferensi fuzzy, dua metode mendominasi implementasi praktis: Mamdani dan Takagi-Sugeno-Kang (Sugeno). Inferensi Sugeno menghasilkan keluaran tajam (crisp) yang efisien secara komputasional [13]. Krisdiawan et al. [10] mendemonstrasikan DDA berbasis Fuzzy Sugeno dalam game rehabilitasi disleksia dan mencapai modulasi tingkat kesulitan yang responsif. Namun, keluaran Sugeno kurang dapat diinterpretasikan oleh pemangku kepentingan pendidikan non-teknis karena menghasilkan fungsi numerik, bukan label kategoris. Inferensi Mamdani menghasilkan himpunan keluaran fuzzy yang dapat diberi label secara linguistik (Mudah, Sedang, Sulit), membuat logika adaptif lebih dapat diaudit dan ramah-pendidik [14]. Soedargo dan Junaedi [9] menemukan bahwa DDA berbasis fuzzy meningkatkan kesesuaian tingkat kesulitan yang dirasakan, namun akurasi adaptasi meningkat secara substansial ketika pelacakan riwayat kinerja ditambahkan. Tabel 1 mengontekstualisasikan penelitian ini terhadap karya-karya terdahulu yang relevan.

Tabel 1. Analisis Komparatif Studi DDA dan RPG Edukasi Terkait

Studi	Konteks	Metode DDA	Variabel Input	Kesenjangan Diatasi	Keterbatasan
Krisdiawan et al. [10]	Game rehab disleksia	Fuzzy Sugeno	Akurasi, waktu	Hanya satu keluaran	Tanpa dasbor guru
Soedargo & Junaedi [9]	Game roguelike	DDA berbasis Fuzzy	Kinerja real-time	Konten prosedural statis	Bukan konteks edukasi
Lopes & Bidarra [8]	Kerangka umum game	Berbagai metode DDA	Berbagai input	Survei teoretis	Tanpa studi empiris
Muttakin et al. [5]	Game RPG Android	Tanpa DDA	Kesulitan statis	Tidak ada adaptasi	Tanpa dasbor guru
Penelitian Ini	Math RPG Turn-Based	Fuzzy Mamdani	Waktu + kesalahan	Dasbor guru terintegrasi	Selaras Kurikulum Merdeka

Flow Theory Csikszentmihalyi [7] menyediakan fondasi motivasional-teoretis bagi DDA dalam konteks pendidikan. Pengalaman optimal—yang dicirikan oleh keterlibatan penuh dan motivasi intrinsik—muncul ketika tantangan yang dipersepsikan secara dinamis sesuai dengan tingkat kemampuan individu. Ketika tantangan melampaui kemampuan, kecemasan timbul; ketika kemampuan melampaui tantangan, kebosanan menyusul. Mekanisme DDA berfungsi sebagai regulator aliran yang dinamis. Dukungan empiris bagi model ini dalam konteks GBL telah didokumentasikan oleh Soedargo dan Junaedi [9], serta oleh Kiili [15], yang model pembelajaran berbasis game eksperiensialnya menjadikan kondisi aliran sebagai variabel mediasi inti antara keterlibatan game dan hasil belajar.

Game RPG berbasis giliran menawarkan affordansi pedagogis yang khas dibandingkan genre game berorientasi aksi [16]. Struktur giliran yang berurutan menciptakan jeda pemrosesan kognitif yang alami—pemain harus merespons soal matematika sebelum serangan diselesaikan—menciptakan siklus berpikir, merespons, dan menerima umpan balik yang

selaras dengan prinsip-prinsip praktik deliberatif [1]. Ke [6] menemukan bahwa menyematkan latihan matematika dalam konteks game naratif secara signifikan meningkatkan keterlibatan maupun kefasihan prosedural siswa sekolah dasar dibandingkan perangkat lunak latihan-dan-praktik konvensional. Lebih baru lagi, Yulyanto et al. [17] mendemonstrasikan bahwa game edukasi berbasis RPG dengan Unity secara efektif mendukung tugas penalaran terstruktur dalam konteks pendidikan Indonesia.

Penilaian formatif—pemantauan berkelanjutan terhadap proses belajar siswa guna menginformasikan keputusan pengajaran—merupakan salah satu praktik pedagogis yang paling didukung bukti empiris, dengan ukuran efek yang secara konsisten melampaui $d=0,70$ dalam tinjauan meta-analitik [18], [11]. Namun, game edukasi secara historis beroperasi sebagai sistem mandiri yang menghasilkan data pelajar tanpa menyampaikannya kepada guru, menciptakan pemutusan struktural antara praktik berbasis game dan perencanaan pengajaran. Firebase Realtime Database memungkinkan sinkronisasi latensi rendah antara klien game mobile dan dasbor berbasis web tanpa memerlukan infrastruktur server khusus [19]—keunggulan yang sangat signifikan untuk latar pendidikan dengan keterbatasan sumber daya. Arsitektur dua sisi yang dieksplorasi dalam penelitian ini memperluas pola arsitektur ini ke domain game matematika adaptif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Penelitian dan Pengembangan (Research and Development/R&D) dengan kerangka Game Development Life Cycle (GDLC) [20], yang terdiri dari enam fase: Inisiasi, Pra-Produksi, Produksi, Pengujian Alfa, Pengujian Beta, dan Rilis. Penelitian ini diposisikan sebagai studi kelayakan—mengkaji apakah sistem berfungsi sebagaimana dirancang dan diterima oleh pengguna target—bukan sebagai studi efektivitas terkontrol. Penentuan ini tepat secara metodologis mengingat ketiadaan kelompok kontrol acak dan ketidaksetaraan instrumen penilaian pra dan pascates, yang keduanya menghalangi inferensi kausal. Kualitas sistem dievaluasi melalui pengujian kotak hitam (black-box testing), pengujian kotak putih (white-box testing), dan Uji Penerimaan Pengguna (UAT); data kinerja pra-pascates disajikan sebagai bukti deskriptif eksploratoris tambahan.

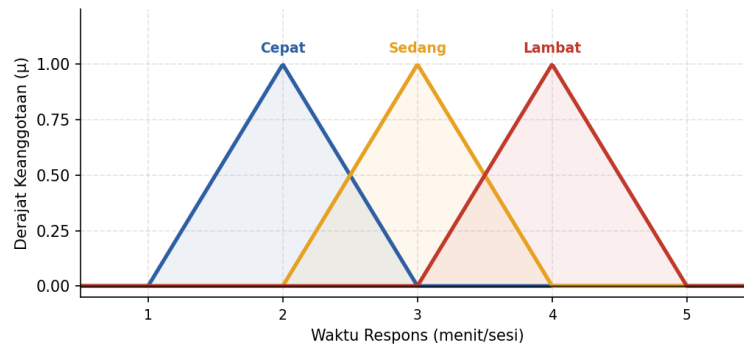
2.2 Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari tiga komponen terintegrasi yang membentuk ekosistem pembelajaran adaptif dua sisi. Klien game dikembangkan di Unity Engine (v2021) dengan skrip C# dan dikompilasi untuk Android (minimum API Level 24). Firebase Realtime Database berfungsi sebagai lapisan sinkronisasi, menerima data sesi pemain—identifikasi siswa, tingkat kelas, skor per operasi, waktu respons, dan jumlah kesalahan—secara real-time. Dasbor guru adalah aplikasi berbasis web yang mengambil data dari Firebase dan merender visualisasi kinerja individu maupun tingkat kelas, dengan fungsi ekspor ke Microsoft Excel. Pemodelan sistem mengikuti standar UML (Diagram Use Case, Aktivitas, Kelas, dan Urutan).

2.3 Implementasi DDA Berbasis Fuzzy Mamdani

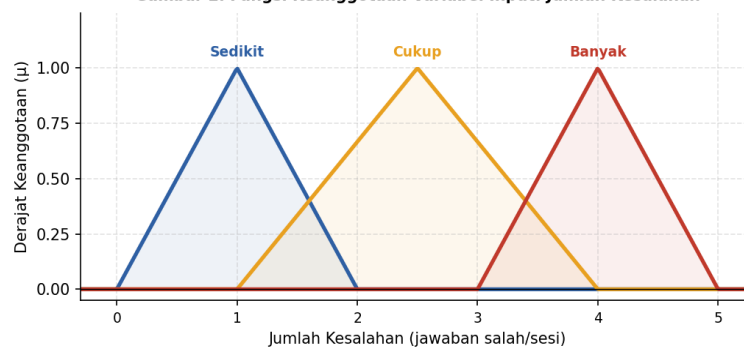
Subsistem DDA menggunakan inferensi Fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat kesulitan soal setelah setiap sesi pertarungan. Dua variabel masukan didefinisikan berdasarkan observasi kelas awal dan konsultasi intensif dengan dua guru matematika SDN 1 Cikondang. Waktu Respons (T), diukur dalam menit per sesi pertarungan, memiliki fungsi keanggotaan segitiga: Lambat [3,4,5], Sedang [2,3,4], dan Cepat [1,2,3]. Rentang 1–5 menit ditetapkan berdasarkan waktu rata-rata yang diamati selama pilot sesi ($n=12$ siswa): pemain tercepat menyelesaikan satu sesi dalam ± 1 menit dan terlambat memerlukan ± 5 menit. Jumlah Kesalahan (E), mewakili jawaban salah per sesi (rentang 0–5, sesuai jumlah maksimum soal per sesi), memiliki fungsi keanggotaan segitiga: Sedikit [0,1,2], Cukup [1,2,3,4], dan Banyak [3,4,5]. Variabel keluaran Tingkat Kesulitan (D) mendefinisikan tiga kategori: Mudah [1,2,3], Sedang [2,3,4], dan Sulit [3,4,5]. Bentuk segitiga dipilih karena kesederhanaan komputasional dan kemudahan interpretasinya, konsisten dengan praktik mapan dalam sistem fuzzy pendidikan [14]. Validasi model fuzzy dilakukan melalui dua mekanisme: (a) expert review oleh kedua guru matematika yang memverifikasi kesesuaian antara setiap kombinasi input (T,E) dan tingkat kesulitan output—seluruh 9 aturan dinyatakan valid tanpa revisi; dan (b) verifikasi kotak putih yang mengonfirmasi kompleksitas siklomatik $V(G)=3$, membuktikan bahwa setiap jalur keputusan mesin inferensi telah tertelusuri dan berperilaku sesuai spesifikasi [22]. Grafik fungsi keanggotaan untuk ketiga variabel ditampilkan pada Gambar 1–3.

Gambar 1. Fungsi Keanggotaan Variabel Input: Waktu Respons



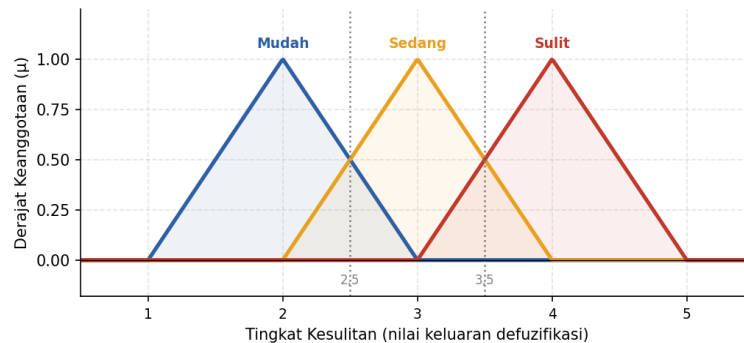
Gambar 1. Fungsi Keanggotaan Variabel Input: Waktu Respons (T)

Gambar 2. Fungsi Keanggotaan Variabel Input: Jumlah Kesalahan



Gambar 2. Fungsi Keanggotaan Variabel Input: Jumlah Kesalahan (E)

Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Variabel Output: Tingkat Kesulitan



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Variabel Output: Tingkat Kesulitan (D) — garis putus-putus menunjukkan batas defuzifikasi COG (2,5 dan 3,5)

Sembilan aturan IF-THEN mengendalikan proses inferensi, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Defuzifikasi menggunakan metode Centroid of Gravity (COG) yang menghitung sentroid dari area keluaran fuzzy teragregasi untuk menghasilkan nilai numerik tajam yang dipetakan ke kategori kesulitan: $<2,5$ = Mudah; $2,5-3,5$ = Sedang; $\geq 3,5$ = Sulit. Sebagai contoh verifikasi: dengan $T=3,2$ menit dan $E=3$ kesalahan, diperoleh $\mu(\text{Lambat})=0,2$, $\mu(\text{Sedang})=0,8$; $\mu(\text{Cukup})=1,0$. Aturan aktif A2 dan A5 menghasilkan α -cut sebesar 0,2 (Mudah) dan 0,8 (Sedang); COG menghasilkan keluaran tajam 2,625, diklasifikasikan sebagai Sedang.

Tabel 2. Basis Aturan Fuzzy Mamdani

Aturan	Waktu Respons	Jumlah Kesalahan	Tingkat Kesulitan
A1	Lambat	Banyak	Mudah
A2	Lambat	Cukup	Mudah
A3	Lambat	Sedikit	Sedang
A4	Sedang	Banyak	Mudah

A5	Sedang	Cukup	Sedang
A6	Sedang	Sedikit	Sulit
A7	Cepat	Banyak	Mudah
A8	Cepat	Cukup	Sedang
A9	Cepat	Sedikit	Sulit

2.4 Desain Game "Jiwa Menghitung"

"Jiwa Menghitung" adalah game RPG berbasis giliran pemain tunggal di mana karakter pemain melawan monster dengan menjawab soal matematika. Setiap pertarungan terdiri dari lima soal; jawaban benar memberikan kerusakan kepada musuh, sementara jawaban salah mengakibatkan pemain menerima kerusakan—dengan poin kesehatan (health points/HP) menentukan kondisi menang atau kalah. Setelah pertarungan berakhir, mesin Mamdani memproses data sesi dan menyesuaikan tingkat kesulitan untuk pertarungan berikutnya. Konten soal mencakup empat operasi aritmetika dengan kompleksitas operasi yang disesuaikan dengan tingkat kelas sesuai Kurikulum Merdeka: Kelas 4 (bilangan puluhan), Kelas 5 (ratusan), Kelas 6 (ribuan). Siswa memasukkan NISN, nama, usia, dan kelas pada awal permainan; data ini ditransmisikan ke Firebase dan ditampilkan di dasbor guru secara real-time.

2.5 Partisipan dan Prosedur

Partisipan terdiri dari 42 siswa sekolah dasar (Kelas 4: $n=15$; Kelas 5: $n=14$; Kelas 6: $n=13$) dan 2 guru kelas dari SDN 1 Cikondang, dipilih melalui purposive sampling. Pengumpulan data mengikuti tiga fase berurutan. Pada fase prapenilaian, siswa mengerjakan tes aritmetika berbasis kertas (pretes) yang mencakup keempat operasi. Pada fase sesi game, siswa memainkan "Jiwa Menghitung" dalam satu sesi, dengan skor pascates diturunkan dari kinerja pertarungan dalam game yang dipantau melalui Firebase. Pada fase evaluasi, siswa dan guru mengisi kuesioner UAT.

Catatan metodologis penting: karena sistem DDA Mamdani mengadaptasi kompleksitas soal berdasarkan kinerja sesi masing-masing siswa, setiap siswa menerima urutan dan tingkat kesulitan soal yang berbeda. Akibatnya, butir-butir pretes (berbasis kertas, identik) dan butir-butir pascates (berbasis game, bersifat individual dan adaptif) berbeda secara sistematis dalam format maupun kompleksitas. Ketidakesetaraan instrumen ini membatasi validitas inferensial dari perbandingan pra-pasca secara langsung. Oleh karena itu, seluruh temuan pra-pascates dilaporkan hanya sebagai indikator tren deskriptif.

2.6 Instrumen Evaluasi dan Analisis

UAT siswa terdiri dari 15 butir Skala Likert (1=Sangat Tidak Setuju hingga 5=Sangat Setuju) yang mencakup lima dimensi: Fungsionalitas (4 butir), Sistem DDA/Fuzzy Mamdani (3 butir), Kegunaan/Usability (4 butir), Efektivitas Pembelajaran (2 butir), dan Performa Game (2 butir). UAT guru terdiri dari 21 butir yang mencakup enam dimensi: Aksesibilitas & Navigasi, Kualitas Informasi, Analitik & Visualisasi, Efektivitas Evaluasi, Performa & Stabilitas, dan Kegunaan Keseluruhan. Skor penerimaan dihitung sebagai: $\text{Penerimaan (\%)} = (\text{Skor Aktual} / \text{Skor Ideal}) \times 100\%$, dengan $\text{Skor Ideal} = n \times \text{butir} \times 5$. Pengujian sistem mencakup verifikasi fungsional kotak hitam [21] dan analisis kompleksitas siklomatik kotak putih [22] menggunakan $V(G) = E - N + 2$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Verifikasi Sistem

Pengujian kotak hitam mengonfirmasi kebenaran operasi seluruh komponen fungsional: input dan validasi data siswa, navigasi menu, mekanik pertarungan (evaluasi jawaban, manajemen poin kesehatan, kondisi menang/kalah), perhitungan skor, dan sinkronisasi Firebase. Semua fungsi berperilaku sesuai spesifikasi dalam kondisi kasus normal maupun kondisi batas. Analisis kotak putih terhadap logika keputusan Fuzzy Mamdani menghasilkan kompleksitas siklomatik $V(G) = 9 - 8 + 2 = 3$, yang mengindikasikan tiga jalur eksekusi independen bersesuaian dengan tiga kategori keluaran kesulitan (Mudah, Sedang, Sulit). Semua jalur diverifikasi selama pengujian. Contoh defuzzifikasi yang diverifikasi ($T=3,2$ menit, $E=3$ kesalahan $\rightarrow$ keluaran tajam=2,625 $\rightarrow$ Sedang) dikonfirmasi secara programatik, memvalidasi implementasi perhitungan COG.

3.2 Uji Penerimaan Pengguna oleh Siswa ($n = 42$)

UAT yang diberikan kepada 42 siswa menghasilkan skor penerimaan keseluruhan sebesar 90,98% (aktual: 2.866; ideal: 3.150), diklasifikasikan sebagai Sangat Layak ($>81\%$). Hasil per dimensi disajikan pada Tabel 3. Kegunaan (95,35%) dan Fungsionalitas (94,52%) mendapat skor tertinggi, mengindikasikan kualitas antarmuka yang kuat dan

keandalan mekanik inti. Dimensi Sistem DDA mendapat skor terendah (80,00%), menunjukkan bahwa sebagian siswa merasakan transisi tingkat kesulitan yang kurang mulus atau responsif.

Tabel 3. Hasil UAT Siswa per Dimensi (n = 42)

Dimensi	Skor Aktual	Skor Ideal	Penerimaan (%)
Fungsionalitas	794	840	94,52%
Kegunaan (Usability)	801	840	95,35%
Performa Game	386	420	91,90%
Efektivitas Pembelajaran	381	420	90,71%
Sistem DDA (Fuzzy Mamdani)	504	630	80,00%
Keseluruhan	2.866	3.150	90,98%

3.3 Uji Penerimaan Pengguna oleh Guru (n = 2)

Dua guru mengevaluasi dasbor guru berbasis web dan menghasilkan skor penerimaan keseluruhan sebesar 88,09% (aktual: 185; ideal: 210). Hasil per dimensi disajikan pada Tabel 4. Mengingat ukuran sampel yang sangat kecil (n=2), skor-skor ini diperlakukan sebagai indikator awal kelayakan konsep. Kualitas Informasi (70,00%) dan Analitik & Visualisasi (72,00%) mendapat skor terendah, sementara Kegunaan Keseluruhan (90,00%) mendapat skor tertinggi—menunjukkan bahwa navigabilitas dasar dasbor memadai, namun kedalaman analitiknya memerlukan pengembangan lebih lanjut.

Tabel 4. Hasil UAT Guru per Dimensi (n = 2; hasil bersifat indikatif)

Dimensi	Skor Aktual	Skor Ideal	Penerimaan (%)
Aksesibilitas & Navigasi	38	50	76,00%
Kualitas Informasi	35	50	70,00%
Analitik & Visualisasi	36	50	72,00%
Efektivitas Evaluasi	25	30	83,30%
Performa & Stabilitas	24	30	80,00%
Kegunaan Keseluruhan	27	30	90,00%
Keseluruhan	185	210	88,09%

3.4 Analisis Kinerja Pra-Pascates

Tabel 5 menyajikan rerata skor pretes dan pascates per kelas. Sebagaimana ditetapkan pada Bagian 2.5, perbandingan-perbandingan ini bersifat deskriptif dan tidak mengontrol ketidaksetaraan instrumen; disajikan untuk mengungkap pola yang relevan bagi studi terkontrol di masa mendatang.

Tabel 5. Perbandingan Skor Pra-Pascates per Kelas (tidak mengandung klaim inferensial)

Kelas	n	Rerata Pretes	Rerata Pascates	Selisih	Tren
4	15	71,68	81,82	+10,14	↑ Meningkat
5	14	71,63	81,27	+9,64	↑ Meningkat
6	13	94,29	82,04	-12,25	↓ Menurun
Seluruh	42	78,66	81,71	+3,04	↑ Meningkat

Siswa Kelas 4 dan Kelas 5 menunjukkan selisih skor positif (masing-masing +10,14 dan +9,64), sementara Kelas 6 menunjukkan selisih negatif yang substansial (-12,25 poin) yang dianalisis lebih lanjut pada Bagian 3.7. Rerata keseluruhan menunjukkan tren positif yang moderat (+3,04 poin). Tabel 6 merinci temuan berdasarkan operasi aritmetika. Untuk mengkuantifikasi besaran peningkatan secara lebih bermakna, Tabel 7 menyajikan analisis N-gain ternormalisasi [25] bagi kelas-kelas yang menunjukkan selisih positif.

Tabel 6. Perbandingan Skor Pra-Pascates per Operasi Aritmetika (Seluruh Kelas)

Operasi	Rerata Pretes	Rerata Pascates	Selisih
Penjumlahan	85,26	91,67	+6,41
Pengurangan	81,24	86,67	+5,43
Perkalian	70,17	75,71	+5,54
Pembagian	77,98	72,76	-5,22

Tiga dari empat operasi menunjukkan selisih positif, dengan penjumlahan mencatat perolehan terbesar (+6,41 poin). Pembagian adalah satu-satunya operasi yang menunjukkan selisih negatif (-5,22 poin), dianalisis pada Bagian 3.8. Tabel 7 di bawah menyajikan N-gain per kelas sebagai ukuran kuantitatif besaran peningkatan.

Tabel 7. Analisis N-gain Ternormalisasi per Kelas

Kelas	n	Rerata Pretes	Rerata Pascates	N-gain (g)	Kategori
4	15	71,68	81,82	0,36	Sedang
5	14	71,63	81,27	0,34	Sedang
6	13	94,29	82,04	—	Efek Langit-Langit
Seluruh*	42	78,66	81,71	0,14	Rendah*

*N-gain keseluruhan ($g=0,14$) tertekan oleh ceiling effect Kelas 6. Kelas 4 dan Kelas 5 menunjukkan peningkatan kategori Sedang ($0,30 \leq g < 0,70$), mengindikasikan efektivitas pembelajaran yang bermakna secara pedagogis. Formula N-gain: $g = (\text{Pascates} - \text{Pretes}) / (100 - \text{Pretes})$ [25]. Nilai N-gain Kelas 6 tidak ditampilkan karena rerata pretes (94,29) mendekati skor maksimum sehingga formula tidak menghasilkan nilai yang bermakna (ceiling effect).

3.5 Kelayakan Sistem Melalui Perspektif Flow Theory

Penerimaan UAT siswa secara keseluruhan sebesar 90,98% mengindikasikan bahwa "Jiwa Menghitung" dipersepsikan dengan sangat baik oleh pengguna yang dituju. Diinterpretasikan dalam kerangka Flow Theory Csikszentmihalyi [7], skor tinggi pada dimensi Kegunaan (95,35%) dan Fungsionalitas (94,52%) menunjukkan bahwa desain antarmuka berhasil meminimalkan hambatan kognitif—prasyarat untuk mempertahankan keterlibatan dalam kondisi aliran. Temuan ini konsisten dengan model pembelajaran berbasis game eksperensial Kiili [15], di mana kegunaan antarmuka berfungsi sebagai landasan yang memungkinkan kondisi aliran sebelum faktor keseimbangan tantangan dapat beroperasi. Paralel dengan Soedargo dan Junaedi [9] bersifat instruktif: game DDA berbasis fuzzy mereka juga mencapai penerimaan tertinggi pada dimensi antarmuka, suatu pola yang menunjukkan bahwa siswa terutama mengalami DDA melalui efek hilir pada kesenangan.

Skor relatif lebih rendah pada dimensi Sistem DDA (80,00%) perlu diinterpretasikan dengan cermat. Skor ini masih memenuhi ambang batas "Layak" (>61%) dan mengindikasikan bahwa sebagian siswa tidak merasakan transisi kesulitan sebagai cukup mulus. Dua penjelasan mekanistik dapat diajukan. Pertama, sistem saat ini beroperasi pada granularitas tingkat pertarungan—menyesuaikan kesulitan setelah lima soal selesai—menimbulkan keterlambatan temporal antara pergeseran kinerja dan respons tingkat kesulitan. Krisdiawan et al. [10] mengatasi keterbatasan analog dalam DDA berbasis Sugeno mereka dengan adaptasi tingkat soal yang menghasilkan respons lebih dipersepsikan. Kedua, dengan hanya dua variabel masukan dan sembilan aturan, mesin Mamdani menghasilkan kategorisasi yang relatif kasar [8]. Iterasi mendatang sebaiknya mengeksplorasi adaptasi yang lebih halus dengan variabel tambahan seperti tingkat akurasi kumulatif dan trajektori waktu respons.

3.6 Keunggulan Interpretabilitas Inferensi Mamdani

Pemilihan Mamdani atas Sugeno didasarkan pada rasional interpretabilitas yang memiliki signifikansi praktis dalam pendidikan. Keluaran Mamdani—kategori tingkat kesulitan berlabel (Mudah/Sedang/Sulit) yang ditampilkan di antarmuka game—memungkinkan siswa dan guru untuk langsung mengamati perilaku adaptif sistem, berkontribusi pada transparansi yang dipersepsikan. Transparansi kategoris ini secara inheren tidak tersedia dalam implementasi Sugeno yang menghasilkan keluaran numerik kontinu [13]. Untuk penerapan pendidikan di mana kepercayaan guru terhadap sistem otomatis sangat penting bagi adopsi, keunggulan interpretabilitas ini memiliki nilai praktis di luar sekadar efisiensi komputasional. Skor Efektivitas Evaluasi dasbor guru sebesar 83,30% mengindikasikan bahwa guru menemukan sistem bermanfaat untuk pengambilan keputusan instruksional. Perbandingan empiris langsung antara DDA Mamdani dan Sugeno dalam lingkungan game yang identik akan merepresentasikan kontribusi bernilai tinggi bagi literatur DDA.

3.7 Efek Langit-Langit pada Kelas 6: Implikasi Desain yang Kritis

Penurunan skor Kelas 6 (-12,25 poin) merupakan temuan paling substantif dari penelitian ini. Siswa Kelas 6 memasuki penelitian dengan rerata pretes 94,29—mengindikasikan penguasaan yang hampir mencapai batas atas (ceiling) terhadap butir-butir aritmetika berbasis kertas. Di bawah sistem DDA, kinerja awal yang kuat memicu eskalasi cepat menuju tingkat kesulitan Sulit, menghasilkan soal-soal pascates dengan kompleksitas operan yang jauh lebih tinggi dari butir-butir pretes. Ketidaksetaraan instrumen ini—di mana mekanisme adaptif berfungsi persis sebagaimana dirancang namun secara tidak sengaja membatalkan perbandingan skor langsung—merupakan tantangan yang diakui dalam penilaian adaptif [11].

Temuan ini membawa implikasi desain yang substantif: batasan batas atas yang terikat pada kurikulum harus diimplementasikan untuk mencegah tingkat kesulitan melampaui konten normatif kurikulum bagi tingkat kelas siswa. Iterasi berikutnya harus mengimplementasikan plafon kesulitan yang terikat kurikulum—memastikan bahwa siswa berkemampuan tinggi tetap berada dalam cakupan konten kelas mereka—disertai jalur pengayaan yang bersifat eksploratoris daripada sekadar eskalasi operan.

3.8 Penurunan Kinerja Pembagian: Pentingnya Representasi

Penurunan skor pada operasi pembagian (-5,22 poin) mencerminkan keterbatasan pedagogis yang bersifat domain-spesifik. Pembagian secara kognitif berbeda dari tiga operasi lainnya dalam tuntutananya terhadap pengetahuan prosedural multi-langkah dan pemahaman konseptual tentang hubungan invers dengan perkalian [23]. Game menyajikan semua operasi melalui format pilihan ganda di bawah tekanan waktu—representasi yang mungkin memadai untuk penjumlahan dan pengurangan, namun merugikan pelajar yang menggunakan metode pembagian tertulis yang memerlukan langkah-langkah menengah secara berurutan. Ke [6] menemukan bahwa format interaksi game secara signifikan memediasi hasil belajar untuk operasi matematika yang kompleks secara prosedural. Temuan ini berargumen untuk desain interaksi yang bersifat operasi-spesifik, misalnya pendampingan input langkah-demi-langkah untuk soal pembagian.

3.9 Dasbor Guru: Validasi Konsep dan Agenda Pengembangan

Penerimaan keseluruhan dasbor guru sebesar 88,09% memvalidasi konsep arsitektur dua sisi sebagai layak secara teknis dan disambut baik oleh pendidik. Pola tingkat dimensi mengungkap agenda pengembangan yang kritis: Kualitas Informasi (70,00%) dan Analitik & Visualisasi (72,00%) mendapat skor jauh di bawah dimensi lainnya. Black dan Wiliam [18] menetapkan bahwa penilaian formatif yang efektif memerlukan sinyal yang dapat ditindaklanjuti—bukan sekadar data—untuk memicu respons instruksional [11]. Tampilan data tabular dasbor saat ini tanpa indikator interpretatif (misalnya, tanda peringatan siswa yang kesulitan, profil kelemahan operasi-spesifik) gagal menutup lingkaran umpan balik yang diperlukan untuk integrasi penilaian formatif yang sesungguhnya. Mengembangkan lapisan analitik interpretatif ini merupakan arah pengembangan dengan dampak tertinggi untuk iterasi berikutnya. Keterbatasan sampel guru yang ekstrem (n=2) harus ditempatkan di garis terdepan: skor-skor ini mencirikan pengalaman dua guru di satu sekolah dan tidak dapat mendukung klaim mengenai populasi guru secara lebih luas.

3.10 Implikasi Penelitian

Implikasi teoretis. Penelitian ini memberikan tiga kontribusi pada literatur teknologi pendidikan. Pertama, memperluas literatur DDA dengan mendemonstrasikan kelayakan teknis Fuzzy Mamdani sebagai alternatif pendekatan Sugeno yang dominan, menyediakan model implementasi konkret bagi studi komparatif di masa mendatang. Kedua, memberikan landasan empiris bagi nilai preskriptif Flow Theory dalam desain game adaptif: bahkan sistem fuzzy dua-variabel mencapai penerimaan pengguna yang tinggi (90,98%) ketika disematkan dalam struktur RPG yang koheren secara motivasional, menunjukkan bahwa kualitas desain naratif mengamplifikasi manfaat yang dipersepsikan dari modulasi kesulitan adaptif. Ketiga, penelitian ini memperkenalkan dan memvalidasi arsitektur ekosistem pembelajaran adaptif dua sisi pada tingkat konsep, berkontribusi pada diskusi tentang mengintegrasikan pembelajaran berbasis game dengan infrastruktur penilaian formatif yang berorientasi guru.

Implikasi praktis. Bagi pengembang game edukasi, arsitektur Unity-Firebase yang didemonstrasikan mewakili jalur berbiaya rendah menuju kesulitan adaptif sekaligus pemantauan guru tanpa infrastruktur server khusus. Bagi guru, konsep dasbor mendemonstrasikan bagaimana penilaian formatif dapat disematkan dalam lingkungan pembelajaran berbasis game tanpa instrumen penilaian terpisah atau pengumpulan data manual. Bagi kebijakan pendidikan Indonesia, pola efektivitas diferensial antar tingkat kelas memberikan landasan empiris untuk menargetkan game berbasis DDA bagi siswa dengan kemahiran dasar tingkat menengah sebagai alat suplemen dalam agenda pembelajaran digital Kurikulum Merdeka.



4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi kelayakan “Jiwa Menghitung,” game RPG berbasis giliran Android yang mengintegrasikan mesin DDA berbasis Fuzzy Mamdani dan dasbor guru real-time melalui Firebase untuk pembelajaran matematika siswa sekolah dasar. Tiga kontribusi utama ditetapkan: (1) inferensi Fuzzy Mamdani terbukti layak secara teknis sebagai mesin DDA interpretatif—verifikasi kotak putih mengonfirmasi kebenaran logika ($V(G)=3$) dan UAT siswa mencapai 90,98%, melebihi ambang “Sangat Layak;” (2) arsitektur dua sisi Game–Firebase–Dasbor Guru memperoleh penerimaan guru 88,09%, memvalidasi model integrasi penilaian formatif dalam ekosistem game edukasi; dan (3) analisis N-gain mengungkapkan peningkatan kategori Sedang pada Kelas 4 ($g=0,36$) dan Kelas 5 ($g=0,34$), serta efek langit-langit pada Kelas 6 yang menentukan batas desain kritis. Keterbatasan utama meliputi ketiadaan kelompok kontrol dan ketidaksetaraan instrumen penilaian. Penelitian mendatang diprioritaskan pada studi kuasi-eksperimental terkontrol, perbandingan langsung Mamdani vs. Sugeno, dan perluasan variabel masukan DDA untuk meningkatkan granularitas adaptasi. Arsitektur sistem, algoritma inferensi, dan baseline empiris yang ditetapkan penelitian ini menyediakan fondasi sistematis dan dapat direplikasi bagi pengembangan game edukasi adaptif selanjutnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada para guru dan siswa SDN 1 Cikondang atas partisipasi mereka dalam fase uji penerimaan pengguna penelitian ini. Para penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Program Studi Teknik Informatika atas dukungan institusional selama proses pengembangan sistem.

REFERENCES

- [1] R. E. Mayer, "Computer games in education," *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 70, pp. 531–549, 2019, doi: 10.1146/annurev-psych-010418-102917.
- [2] OECD, PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education. Paris: OECD Publishing, 2023, doi: 10.1787/53f23881-en.
- [3] R. Windawati and H. D. Koeswanti, "Pengembangan game edukasi berbasis Android untuk meningkatkan hasil belajar siswa di sekolah dasar," *Jurnal Basicedu*, vol. 5, no. 2, pp. 1027–1038, 2021, doi: 10.31004/basicedu.v5i2.835.
- [4] G.-J. Hwang and P.-H. Wu, "Advancements and trends in digital game-based learning research: A review of publications in selected journals from 2001 to 2010," *Br. J. Educ. Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. E6–E10, 2012, doi: 10.1111/j.1467-8535.2011.01242.x.
- [5] Y. A. M. Muttakin, S. A. Wibowo, and R. P. Primaswara, "Game Turn-Based Role Playing Game (Turn-Based RPG) 'Grand Line' dengan Unity Game Engine berbasis Android," *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, vol. 4, no. 2, 2020.
- [6] F. Ke, "A case study of computer gaming for math: Engaged learning from gameplay?" *Comput. Educ.*, vol. 51, no. 4, pp. 1609–1620, 2008, doi: 10.1016/j.compedu.2008.03.003.
- [7] M. Csikszentmihalyi, *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. New York: Harper & Row, 1990.
- [8] R. Lopes and R. Bidarra, "Adaptivity challenges in games and simulations: A survey," *IEEE Trans. Comput. Intell. AI Games*, vol. 3, no. 2, pp. 85–99, 2011, doi: 10.1109/TCIAIG.2011.2152841.
- [9] D. S. O. Soedargo and H. Junaedi, "Dynamic Difficulty Adjustment berbasis logika Fuzzy untuk Procedural Content Generation pada permainan Roguelike," *Teknika*, vol. 11, no. 2, pp. 98–105, 2022, doi: 10.34148/teknika.v11i2.468.
- [10] R. A. Krisdiawan, T. Sugiharto, and N. Nugraha, "Terapi rehabilitasi Dyslexia berbasis mobile game dengan Dynamic Difficulty Adjustment (DDA) menggunakan algoritma Fuzzy Sugeno," *Jurnal Teknologi Informatika dan Komputer*, vol. 9, no. 2, pp. 975–991, 2023, doi: 10.37012/jtik.v9i2.1837.
- [11] V. J. Shute and F. Ke, "Games, learning, and assessment," in *Assessment in Game-Based Learning*, D. Ifenthaler, D. Eseryel, and X. Ge, Eds. New York: Springer, 2012, pp. 43–58, doi: 10.1007/978-1-4614-3546-4_4.
- [12] C. Pedersen, J. Togelius, and G. N. Yannakakis, "Modeling player experience for content creation," *IEEE Trans. Comput. Intell. AI Games*, vol. 2, no. 1, pp. 54–67, 2010, doi: 10.1109/TCIAIG.2010.2043950.
- [13] U. Latifah and Z. Alamsyah, "Implementasi Fuzzy Mamdani sebagai pendukung keputusan pada sistem monitoring air layak konsumsi," *Jurnal CoSciTech*, vol. 4, no. 1, pp. 15–24, 2023, doi: 10.37859/coscitech.v4i1.4479.
- [14] U. Athiyah, A. P. Handayani, M. Y. Aldean, N. P. Putra, and R. Ramadhani, "Penerapan metode logika Fuzzy dalam evaluasi kinerja dosen," *J. DINDA*, vol. 1, pp. 73–76, 2021.
- [15] K. Kiili, "Digital game-based learning: Towards an experiential gaming model," *Internet Higher Educ.*, vol. 8, no. 1, pp. 13–24, 2005, doi: 10.1016/j.iheduc.2004.12.001.
- [16] R. Kaban, F. Syahputra, and Fajrillah, "Perancangan game RPG 'Nusantara Darkness Rises,'" *J. Inf. Syst. Res. (JOSH)*, vol. 2, no. 4, 2021, doi: 10.47065/josh.v2i4.780.
- [17] Y. Yulyanto, R. Nugraha, and S. S. Kusuma, "Development of respiratory system RPG game using Unity with A* (A Star) algorithm," *Jurnal Pilar Nusa Mandiri*, vol. 20, no. 2, pp. 199–209, 2024, doi: 10.33480/pilar.v20i2.5911.
- [18] P. Black and D. Wiliam, "Assessment and classroom learning," *Assess. Educ.: Princ. Policy Pract.*, vol. 5, no. 1, pp. 7–74, 1998, doi: 10.1080/0969595980050102.
- [19] Fauziah and A. K. Arrifqie, "Rancang bangun game edukasi pengenalan hewan berbasis Android menggunakan Unity 3D," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Informatika*, vol. 7, no. 1, pp. 10–16, 2022.
- [20] R. Y. Ariyana, E. Susanti, M. R. Ath-Thaariq, and R. Apriadi, "Penerapan metode Game Development Life Cycle (GDLC) pada pengembangan game motif batik khas Yogyakarta," *INSOLOGI*, vol. 1, no. 6, pp. 796–807, 2022, doi: 10.55123/insologi.v1i6.1129.



- [21] B. A. Priyaungga, D. B. Aji, M. Syahroni, N. T. S. Aji, and A. Saifudin, "Pengujian Black Box pada aplikasi perpustakaan menggunakan teknik Equivalence Partitions," *Jurnal Teknologi Sistem Informasi dan Aplikasi*, vol. 3, no. 3, p. 150, 2020, doi: 10.32493/jtsi.v3i3.5343.
- [22] H. Gusdevi et al., "Pengujian White-Box pada aplikasi Debt Manager berbasis Android," *NARATIF: Jurnal Ilmiah Nasional Riset Aplikasi dan Teknik Informatika*, vol. 4, no. 1, pp. 11–22, 2022.
- [23] R. Sinaga, "Pengaruh pendekatan matematika realistik terhadap hasil belajar matematika siswa," *Algebra: Jurnal Pendidikan, Sosial dan Sains*, vol. 3, no. 1, 2023.
- [24] M. Zohaib, "Dynamic Difficulty Adjustment (DDA) in Computer Games: A Review," *Adv. Human-Computer Interaction*, vol. 2018, Art. no. 5681652, 2018, doi: 10.1155/2018/5681652.
- [25] R. R. Hake, "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses," *Am. J. Phys.*, vol. 66, no. 1, pp. 64–74, 1998, doi: 10.1119/1.18809.