



Desain Sistem Inferensi *Fuzzy* Mamdani Dinamis Berbasis KKM Adaptif untuk Evaluasi Holistik Pembelajaran Matematika

Tsabitha Fritza Renata¹, Rikayanti²

¹ Mahasiswa Pendidikan Matematika, FKIP, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

² Pendidikan Matematika, FKIP, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

bithafritza@gmail.com

Abstract

Integrating cognitive and psychomotor assessment under Indonesia's Kurikulum Merdeka often produces interpretive uncertainty and subjectivity bias, particularly when teachers must convert scores of Mathematical Concept Understanding Ability (KPKM) and hands-on skills into a single representative final grade. Existing fuzzy-based systems generally rely on static membership functions that must be manually redesigned whenever the Minimum Mastery Criteria (KKM) policy changes. This study aims to design a dynamic Mamdani Fuzzy algorithm architecture based on adaptive KKM parameters to integrate KPKM and hands-on skill scores into a single Learning Success Level (TKB) score through an analytical simulation approach using four linguistic sets (Needs Guidance, Sufficient, Good, Very Good), sixteen implication rules, MIN-MAX inference, and Centroid defuzzification, tested through eight boundary cases and six representative input-combination scenarios. The results show that the membership functions remain mathematically consistent at every critical curve point, while the inference process yields crisp values consistent with the designed reasoning logic, including under imbalanced input conditions between the two ability domains. The model proves consistent and adaptive to changes in KKM without requiring formula modification, thereby contributing a foundation for a holistic evaluation instrument aligned with the authentic assessment principles of Kurikulum Merdeka.

Keywords: Mamdani Fuzzy; Holistic Evaluation; Mathematical Concept Understanding Ability; Hands-On Skills; Minimum Mastery Criteria

Abstrak

Integrasi penilaian kognitif dan psikomotorik dalam Kurikulum Merdeka kerap menimbulkan ketidakpastian interpretatif dan bias subjektivitas, terutama ketika guru harus mengonversi skor Kemampuan Pemahaman Konsep Matematis (KPKM) dan keterampilan *hands-on* menjadi nilai akhir yang representatif. Sistem *fuzzy* yang ada umumnya menggunakan kurva fungsi keanggotaan statis sehingga harus dirancang ulang setiap kali kebijakan Kriteria Ketuntasan Minimal (KKM) berubah. Penelitian ini bertujuan merancang arsitektur algoritma *Fuzzy* Mamdani dinamis berbasis parameter KKM adaptif untuk mengintegrasikan KPKM dan keterampilan *hands-on* ke dalam satu skor Tingkat Keberhasilan Belajar (TKB) melalui pendekatan simulasi analitis dengan empat himpunan linguistik (Perlu Bimbingan, Cukup, Baik, Sangat Baik), 16 aturan implikasi, inferensi MIN-MAX, dan defuzzifikasi Centroid, yang diuji melalui delapan kasus batas dan enam skenario kombinasi *input* representatif. Hasil simulasi menunjukkan fungsi keanggotaan konsisten secara matematis pada seluruh titik kritis kurva, serta proses inferensi menghasilkan nilai tegas yang sesuai dengan logika penalaran yang dirancang, termasuk pada kondisi *input* yang timpang antarranah kemampuan. Model ini terbukti konsisten dan adaptif terhadap perubahan KKM tanpa memerlukan modifikasi rumus,

sehingga berkontribusi sebagai fondasi instrumen evaluasi holistik yang sejalan dengan prinsip asesmen autentik Kurikulum Merdeka.

Kata Kunci: *Fuzzy* Mamdani; Evaluasi Holistik; Kemampuan Pemahaman Konsep Matematis; Keterampilan *Hands-On*; Kriteria Ketuntasan Minimal

1. PENDAHULUAN

Pemberlakuan Kurikulum Merdeka di tanah air membawa arah baru dalam restrukturisasi sistem evaluasi, di mana fokus beralih dari sekadar kalkulasi akumulatif di akhir pembelajaran menuju model penilaian yang substantif sekaligus autentik (Marwa et al., 2024; Winarti et al., 2023). Rekonstruksi paradigma ini menjadi pilar krusial demi mendongkrak kualitas serta mewujudkan kesetaraan mutu pendidikan (Levy-Feldman, 2025). Selaras dengan agenda tersebut, penegakan prinsip keadilan dalam asesmen di ruang kelas menjadi syarat mutlak agar capaian setiap individu siswa dapat terpotret secara representatif (Baniasadi et al., 2023). Sebagai instrumen vital dalam ekosistem pendidikan abad ke-21, asesmen autentik diwajibkan mampu memproyeksikan seluruh dimensi kompetensi siswa, mencakup internalisasi teori kognitif hingga kelihaian praktis sewaktu menyelesaikan problem riil (Najmudin & Qurrotul 'Ain, 2024; Winarti et al., 2023).

Kendati demikian, realitas di lapangan membuktikan bahwa para pendidik masih menemui kendala besar sewaktu mengimplementasikan format penilaian holistik tersebut. Laporan World Bank (2024) mengonfirmasi rendahnya intensitas interaksi kelas yang bermakna, sehingga menyulitkan pengumpulan data autentik yang dibutuhkan untuk evaluasi holistik. Situasi pelik ini kian diperumit oleh minimnya alokasi waktu penyusunan perangkat administrasi, ketidakefisienan durasi kerja, hingga rumitnya pengoperasian modul komputasi skor otomatis (Bravo & Paceno, 2025; Prinanda, 2022). Dampaknya, kalkulasi capaian belajar siswa kerap kali bertumpu pada teknik manual atau skema rata-rata aritmatika biasa yang kaku sekaligus menyita banyak waktu (Pebriani et al., 2025).

Pada ranah kognitif disiplin matematika, kemampuan pemahaman konsep matematis bertindak sebagai jangkar utama yang menopang seluruh konstruksi matematis siswa. Mengacu pada kerangka teoretis tersebut, penguasaan asas dasar secara matang menjadi prasyarat yang tidak bisa ditawar. Dalam hal ini, siswa dituntut mengasimilasi prinsip-prinsip matematis terlebih dahulu sebelum didelegasikan untuk menyusun prosedur resolusi masalah secara akurat (Sengkey et al., 2023). Kompetensi konseptual yang kokoh ini berkelindan erat dengan ketangkasan motorik dalam mengaplikasikannya, lantaran karakteristik objek matematika yang abstrak memaksa hadirnya representasi eksternal berupa pemanfaatan media nyata sebagai jembatan stimulus berpikir siswa (Umar et al., 2022). Guna mengonstruksi pemahaman tersebut, aktivitas *hands-on* hadir sebagai bentuk domain psikomotorik yang sangat ideal, di mana

siswa memanipulasi alat peraga secara langsung demi menginvestigasi dan mengonstruksi temuan matematis secara mandiri (Kusuma et al., 2025; Yulianti & Ramdhan, 2020). Kendati formulasi ini senafas dengan doktrin asesmen autentik Kurikulum Merdeka, Aisyah et al. (2025) mengidentifikasi adanya tingkat kerumitan yang tinggi bagi guru sewaktu meleburkan skor pemahaman konsep teoretis dengan capaian performa keterampilan *hands-on*. Imbasnya, muncul kerancuan interpretasi serta potensi bias subjektivitas kala merumuskan konversi nilai akhir yang adil.

Sebagai jalan keluar atas problem ambiguitas konversi skor tersebut, pemanfaatan kecerdasan buatan melalui skema logika *Fuzzy Mamdani* dapat diandalkan. Logika *fuzzy* diakui sebagai instrumen yang tangguh untuk menjinakkan ketidakpastian penalaran berkat keunggulannya dalam mengurai sistem dunia nyata yang pelik dan samar (*ill-defined*) menggunakan pendekatan derajat keanggotaan kontinu (Zadeh, 1969). Penggunaan metode Mamdani dipilih karena kemampuannya dalam menyelaraskan penalaran komputer dengan pola pikir manusia melalui pendekatan variabel linguistik yang intuitif. Melalui mekanisme ini, relasi antarkomponen variabel dapat dipetakan secara lebih halus demi menegakkan keadilan prosedural (*procedural fairness*) sekaligus menekan bias subjektivitas dalam penilaian (Baniasadi et al., 2023). Di samping itu, implementasi model ini terbukti efektif dalam memelihara konsistensi evaluasi tanpa membebani kapasitas kognitif para pendidik (Al-Kandari & Alajmi, 2025; Gkintoni et al., 2025).

Eksplorasi penggunaan *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani dalam dunia pendidikan sejatinya telah banyak dikaji oleh para peneliti terdahulu untuk mereduksi subjektivitas asesmen tradisional. Di antaranya, logika *fuzzy* telah sukses diterapkan untuk menentukan predikat prestasi belajar matematika siswa sekolah menengah secara objektif (Sudrajat & Agustiani, 2023; Vinsensia, 2018). Pada jenjang pendidikan tinggi, metode ini juga diandalkan untuk mengomputasi standarisasi nilai akhir semester mahasiswa berbasis penalaran komputer (Aprilianto et al., 2025). Dalam konteks yang lebih spesifik, integrasi *fuzzy* bahkan mampu mengukur penguasaan kuantitatif pada indikator teoretis matematika tertentu (Hashemi et al., 2025), serta mulai dikembangkan ke dalam platform digital praktis siap pakai guna membantu efisiensi kerja guru (Rohim, 2025).

Namun demikian, sistem evaluasi *fuzzy* yang ditawarkan dalam berbagai literatur di atas umumnya masih menggunakan kurva fungsi keanggotaan statis dengan koordinat interval nilai yang dikunci secara permanen, sehingga rumusnya tidak adaptif dan harus dirancang ulang secara manual dari awal setiap kali kebijakan Kriteria Ketuntasan Minimal (KKM) bergeser. Keterbatasan struktural inilah yang menjadi celah sekaligus melandasi fokus penelitian ini untuk merancang arsitektur algoritma *Fuzzy Mamdani* dinamis berbasis parameter adaptif untuk pengolahan nilai kemampuan pemahaman konsep matematis dan performa keterampilan *hands-on*. Kontribusi utama dari

rancangan ini terletak pada fleksibilitas fungsi keanggotaannya yang diintegrasikan secara struktural dengan parameter KKM, sehingga koordinat kurva penilaian dapat bergeser secara otomatis mengikuti fluktuasi batas kelulusan tanpa memerlukan modifikasi ulang pada rumus komputasi dasarnya. Oleh karena itu, ruang lingkup kajian ini dibatasi pada fase simulasi analitis melalui serangkaian skenario kasus batas (*boundary cases*) dan kombinasi *input* representatif. Langkah ini dilakukan untuk menguji konsistensi penalaran matematis, keandalan inferensi, serta akurasi nilai tegas (*crisp value*) akhir sebelum algoritma ini diimplementasikan secara formal dalam sistem administrasi penilaian digital berskala luas.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan pemodelan komputasi analitis menggunakan Mamdani *Fuzzy Inference System* (FIS) untuk merancang arsitektur penilaian hasil belajar yang adaptif. Pendekatan ini didasarkan pada kemampuan logika *fuzzy* yang adaptif dalam memetakan ruang *input* yang kompleks dan mengaburkan batas nilai menuju ruang *output* yang tegas (Yulmaini, 2018). Melalui penerapan metode Mamdani tersebut, model ini dirancang untuk mengatasi ketidakpastian interpretatif dalam penggabungan ranah kognitif dan psikomotorik tanpa bergantung pada interval penilaian yang kaku.

2.1. Variabel dan Parameter Pemodelan Dinamis

Komponen utama dalam sistem ini terdiri dari dua variabel *crisp input*, yaitu Kemampuan Pemahaman Konsep Matematis (KPKM) sebagai representasi ranah kognitif dan performa keterampilan *hands-on* sebagai manifestasi ranah psikomotorik. Keluaran dari sistem penalaran ini adalah satu variabel *crisp output* berupa Tingkat Keberhasilan Belajar (TKB) siswa. Ketiga variabel dioperasikan pada rentang semesta pembicaraan yang sama, yaitu skala interval 0 hingga 100.

Seluruh variabel diwakili oleh empat himpunan linguistik yang identik, yaitu Perlu Bimbingan (PB), Cukup (C), Baik (B), dan Sangat Baik (SB). Batas-batas koordinat untuk setiap himpunan linguistik dikonstruksi secara dinamis dengan mengintegrasikan parameter Kriteria Ketuntasan Minimal (KKM) sebagai variabel pergeseran (*intercept*) mekanis. Formulasi parameter koordinat dinamis tersebut ditetapkan sebagai berikut.

- Perlu Bimbingan (PB): $(0, 0, KKM - 1, KKM)$ membentuk kurva trapesium bahu kiri.
- Cukup (C): $(KKM - 1, KKM + 4, KKM + 9)$ membentuk kurva segitiga.
- Baik (B): $(KKM + 8, KKM + 13, KKM + 18)$ membentuk kurva segitiga.
- Sangat Baik (SB): $(KKM + 17, 100)$ membentuk kurva linear naik.

2.2. Prosedur Komputasi dan Persamaan Matematika FIS

Prosedur penarikan kesimpulan *fuzzy* dieksekusi secara sekuensial melalui empat tahapan matematis formal yang mengadopsi standardisasi algoritma Ross (2010) sebagai berikut.

a. Fuzzifikasi

Tahap pertama adalah fuzzifikasi, yaitu proses mengonversi nilai *crisp input* (skor KPKM dan *hands-on*) menjadi derajat keanggotaan *fuzzy* menggunakan fungsi matematis berikut:

Fungsi Keanggotaan Perlu Bimbingan (PB):

$$\mu_{PB}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq KKM - 1 \\ \frac{KKM - x}{1}, & KKM - 1 \leq x \leq KKM \\ 0, & x \geq KKM \end{cases}$$

Fungsi Keanggotaan Cukup (C):

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0, & x \leq KKM - 1 \text{ atau } x \geq KKM + 9 \\ \frac{x - (KKM - 1)}{5}, & KKM + 1 \leq x \leq KKM + 4 \\ \frac{(KKM + 9) - x}{5}, & KKM + 4 \leq x \leq KKM + 9 \end{cases}$$

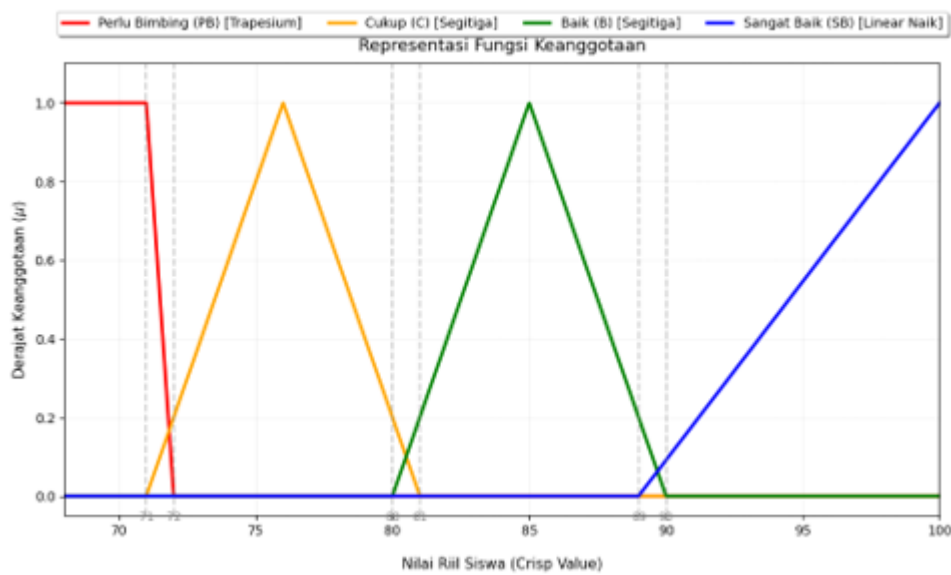
Fungsi Keanggotaan Baik (B):

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0, & x \leq KKM + 8 \text{ atau } x \geq KKM + 18 \\ \frac{x - (KKM + 8)}{5}, & KKM + 8 \leq x \leq KKM + 13 \\ \frac{(KKM + 18) - x}{5}, & KKM + 13 \leq x \leq KKM + 18 \end{cases}$$

Fungsi Keanggotaan Sangat Baik (SB):

$$\mu_{SB}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq KKM + 17 \\ \frac{x - (KKM + 17)}{100 - (KKM + 17)}, & KKM + 17 \leq x \leq 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases}$$

Representasi grafis dari keempat fungsi keanggotaan tersebut pada *baseline* KKM = 72 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Representasi Fungsi Keanggotaan Variabel *Input/Output*

b. Konstruksi Basis Aturan (*Rule Base*)

Setelah fungsi keanggotaan ditetapkan, sistem membangun 16 aturan implikasi bersyarat (*IF-THEN rules*) yang mengombinasikan seluruh variasi himpunan linguistik dari kedua *input*. Penyusunan aturan ini didasarkan pada pertimbangan pedagogis di mana variabel KPKM (kognitif) diposisikan sebagai parameter fondasi utama, sedangkan keterampilan *hands-on* (psikomotorik) bertindak sebagai faktor penguat capaian akhir. Pemetaan kombinasi aturan implikasi tersebut disajikan secara ringkas dalam bentuk matriks aturan pada Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Aturan Implikasi (*Rule Base*) Sistem Evaluasi

KPKM	<i>Hands-On</i>			
	PB	C	B	SB
PB	PB	PB	C	C
C	PB	C	B	B
B	C	B	B	SB
SB	B	B	SB	SB

Matriks pada Tabel 1 mentransformasikan logika penalaran evaluasi ke dalam model komputasi formal melalui penomoran aturan dari R1 hingga R16. Sebagai gambaran operasional sistem, aturan dibangun dengan struktur implikasi konvensional, seperti pada R1 yang memetakan bahwa jika KPKM dan *hands-on* berada pada kategori Perlu

Bimbingan maka TKB juga berada pada kategori Perlu Bimbingan. Pola ini bergerak secara gradual hingga R16, yaitu ketika dua *input* mencapai kategori Sangat Baik yang menghasilkan luaran TKB Sangat Baik. Pelabelan kode aturan inilah yang digunakan secara konsisten dalam melakukan simulasi evaluasi pada tahapan berikutnya.

c. Mekanisme Inferensi

Penalaran *fuzzy* mengeksekusi fungsi implikasi menggunakan operator MIN untuk menentukan nilai α -predikat dari setiap aturan yang aktif. Langkah ini mengambil nilai derajat keanggotaan terkecil di antara kedua *input* guna menjaga prinsip penilaian yang konservatif dan akurat. Selanjutnya, komposisi aturan-aturan dilakukan melalui operator MAX (agregasi) untuk menggabungkan seluruh daerah solusi *fuzzy* menjadi satu daerah penyelesaian terpadu.

d. Defuzzifikasi

Tahap akhir adalah mentransformasikan kembali daerah *fuzzy* hasil agregasi menjadi nilai tegas akhir (skor TKB) berskala 0-100 dengan mengeksekusi metode Centroid (titik pusat daerah) melalui persamaan:

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$$

2.3. Skenario Simulasi Kasus Batas

Untuk memvalidasi keandalan arsitektur dan konsistensi logis dari formula dinamis yang telah dirancang, dilakukan dua tahap pengujian simulasi yang saling melengkapi, dengan *baseline* KKM = 72 sebagai acuan pengujian. Tahap pertama adalah uji sensitivitas fungsi keanggotaan terhadap 8 titik kasus batas (*boundary cases test*), yang mencakup nilai di bawah ketuntasan, nilai transisi antarkurva, nilai puncak masing-masing himpunan linguistik, hingga nilai batas atas semesta pembicaraan. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa setiap titik kritis pada kurva fungsi keanggotaan menghasilkan derajat keanggotaan yang konsisten secara matematis. Tahap kedua adalah uji penalaran inferensi MIN-MAX hingga defuzzifikasi pada 6 skenario kombinasi *input* yang representatif, mencakup kondisi homogen pada keempat kategori linguistik, kondisi transisi, dan kondisi heterogen ekstrem. Pemilihan 6 skenario representatif ini dimaksudkan untuk menguji perilaku sistem pada kombinasi *input* KPKM dan *hands-on* yang paling menentukan validitas logika penalaran, tanpa perlu mengulang seluruh 16 kombinasi aturan yang secara struktural bersifat simetris. Data keluaran tegas (*crisp output*) yang dihasilkan dari kedua tahap simulasi ini kemudian dianalisis untuk memastikan tidak adanya anomali penalaran atau lompatan nilai yang tidak adil bagi evaluasi hasil belajar siswa.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

Proses pengujian fungsionalitas arsitektur *fuzzy* dinamis diawali dengan mengeksekusi tahap fuzzifikasi menggunakan nilai parameter KKM = 72 sebagai *baseline* simulasi. Melalui penetapan parameter ini, koordinat batas kritis untuk masing-masing fungsi keanggotaan secara otomatis terkonfigurasi secara mekanis. Pengujian dilakukan terhadap 8 nilai kasus batas (*boundary cases*) untuk mendeteksi sensitivitas kurva dalam memetakan skor tegas (*crisp input*) siswa ke dalam derajat keanggotaan *fuzzy* (μ). Hasil kalkulasi matematis dari proses fuzzifikasi pada titik-titik kritis tersebut disajikan secara komprehensif pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Fuzzifikasi pada 8 Kasus Batas (*Baseline* KKM = 72)

Kasus	Nilai	$\mu_{PB}(x)$	$\mu_C(x)$	$\mu_B(x)$	$\mu_{SB}(x)$
1	71	1	0	0	0
2	71,5	0,5	0,1	0	0
3	72	0	0,2	0	0
4	76	0	1	0	0
5	80,5	0	0,1	0,1	0
6	85	0	0	1	0
7	89,5	0	0	0,1	0,045
8	100	0	0	0	1

Setelah karakteristik fungsi keanggotaan dipetakan melalui uji kasus batas, tahapan pengujian dilanjutkan ke proses penalaran utuh di dalam *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani. Berbeda dengan uji fuzzifikasi yang menyasar seluruh titik kritis kurva, pengujian pada tahap ini difokuskan pada 6 skenario kombinasi *input* yang representatif, mencakup kondisi homogen, transisi, dan heterogen ekstrem, untuk memvalidasi keandalan mekanis dan konsistensi penalaran yang telah dikonstruksi. Proses ini mengomparasikan nilai *input* kognitif (KPKM) dan psikomotorik (*hands-on*) untuk melihat bagaimana aturan aktif bekerja dan bagaimana fungsi implikasi diproses. Hasil simulasi komputasi sekuensial hingga tahap defuzzifikasi menggunakan metode Centroid untuk menentukan nilai akhir Tingkat Keberhasilan Belajar (TKB) dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Inferensi dan Defuzzifikasi pada Skenario *Input* Representatif

Skenario	<i>Input</i> KPKM	<i>Input</i> Hands-On	Aturan Aktif	Alpha- predikat	Crisp TKB	Predikat akhir
1 (Homogen PB)	60	60	R1	1,0	60,0	Perlu Bimbingan
2 (Homogen C)	76	76	R6	1,0	76,0	Cukup
3 (Homogen B)	85	85	R11	1,0	85,0	Baik
4 (Homogen SB)	100	100	R16	1,0	100,0	Sangat Baik
5 (Transisi)	80,5	76	R6, R10	0,1; 0,1	80,5	Cukup
6 (Heterogen)	71	100	R4	1,0	76,0	Cukup

3.2 Pembahasan

Analisis terhadap data hasil komputasi pada Tabel 2 menunjukkan karakteristik matematis yang konsisten dari fungsi keanggotaan dinamis yang dirancang. Pada kasus 1, skor riil 71 ($KKM - 1$) menghasilkan nilai keanggotaan penuh $\mu_{PB} = 1$, yang mengonfirmasi posisi angka tersebut sebagai batas atas absolut dari kurva trapesium bahu kiri untuk kategori Perlu Bimbingan. Pola transisi gradual yang representatif terjadi pada Kasus 2 dengan *input* nilai 71,5. Berdasarkan formulasi kurva turun Perlu Bimbingan dan kurva naik Cukup, nilai tersebut berada pada intersepsi ganda dengan capaian $\mu_{PB} = 0,5$ dan $\mu_C = 0,1$. Secara teoretis, kelandaian kurva Cukup ($\mu_C = 0,1$) disebabkan oleh penggunaan *intercept* pembagi interval sebesar 5 satuan pada fungsi segitiga. Hal ini merepresentasikan gradasi ketidakpastian yang halus, di mana siswa mulai meninggalkan kategori Perlu Bimbingan namun belum sepenuhnya masuk ke dalam zona Cukup. Karakteristik ini sekaligus mengatasi keterbatasan sistem ambang batas biner konvensional yang cenderung mengklasifikasikan siswa secara kaku tanpa mengakomodasi wilayah transisi tersebut.

Kondisi transisi tersebut selaras dengan pola penarikan kesimpulan yang ditunjukkan pada Skenario 5 (Kondisi Transisi) pada Tabel 3. Ketika *input* siswa berada pada nilai desimal di wilayah abu-abu, sistem berhasil mengaktifkan dua aturan secara simultan, yaitu R6 dan R10, dengan derajat penyalaan α -predikat = 0,1. Melalui eksekusi metode Centroid, penentuan titik berat dari penggabungan dua potongan kurva *output* secara presisi menghasilkan nilai *crisp* TKB $\approx 80,5$. Nilai akhir ini mencerminkan representasi posisi riil pencapaian siswa secara objektif, di mana keputusan kualitatif akhir tetap dapat ditetapkan secara tegas berkat dominasi nilai α -predikat pada variabel luaran. Sementara itu, pada titik-titik puncak seperti Kasus 4 ($x = 76$) untuk kategori Cukup dan Kasus 6 ($x = 85$) untuk kategori Baik, nilai derajat keanggotaan mencapai angka mutlak 1. Stabilitas ini berdampak pada luaran tegas Skenario 1 hingga 4 yang dihasilkan secara deterministik tanpa mengalami pergeseran desimal, membuktikan bahwa interval kebijakan penilaian telah terpetakan secara presisi oleh kurva.

Hasil pengujian skenario heterogen juga memvalidasi keandalan penalaran sistem dari aspek keadilan evaluasi (*procedural fairness*). Hal ini terlihat nyata pada Skenario 6 yang menguji kasus ekstrem, yaitu ketika nilai kognitif siswa berada di bawah ketuntasan (KPKM = 71), namun performa psikomotoriknya sempurna (*hands-on* = 100). Aturan yang terpicu adalah R4 (*IF* KPKM Perlu Bimbingan *AND* *Hands-On* Sangat Baik) dengan nilai $\alpha = \min(1,0; 1,0) = 1,0$. Logika implikasi menahan nilai akhir tegas siswa tepat di angka 76,0 (Cukup). Secara filosofis-pedagogis dalam konteks Kurikulum Merdeka, keputusan komputasi ini tepat karena ranah kognitif tetap merupakan fondasi utama yang melandasi kecakapan aplikatif matematika. Penggunaan operator MIN pada fungsi implikasi terbukti mampu mengimplementasikan pendekatan evaluasi yang konservatif dan akurat. Dengan mengambil nilai minimum dari kedua ranah *input*, sistem mencegah terjadinya inflasi nilai sepihak, di mana seorang siswa tidak dapat langsung didongkrak menjadi “Sangat Baik” atau “Baik” hanya karena unggul di satu domain sementara domain fundamental lainnya belum tuntas.

Temuan ini memperkuat sekaligus memperluas argumen Yulmaini (2018) bahwa metode Mamdani efektif memetakan ruang *input* kabur menjadi ruang *output* keputusan yang tegas demi memenuhi aspek akuntabilitas evaluasi hasil belajar siswa. Namun demikian, jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian *fuzzy* sejenis dalam konteks pendidikan matematika, terdapat perbedaan mendasar arsitektur sistem yang dirancang dalam penelitian ini. Sudrajat & Agustiani (2023) serta Vinsensia (2018) menerapkan logika *fuzzy* untuk menentukan predikat prestasi belajar matematika siswa sekolah menengah, namun fungsi keanggotaan pada kedua penelitian tersebut menggunakan koordinat interval yang dikunci secara permanen (statis), sehingga perubahan kebijakan KKM mengharuskan perancangan ulang kurva secara manual. Demikian pula pada penelitian Aprilianto et al. (2025) yang mengomputasi standardisasi nilai akhir semester mahasiswa, serta Hashemi et al. (2025) yang mengukur penguasaan kuantitatif pada indikator teoretis matematika. Kedua penelitian tersebut tetap bertumpu pada parameter kurva yang bersifat statis sehingga tidak responsif terhadap pergeseran standar ketuntasan minimum. Rohim (2025) memang telah mengembangkan platform digital *fuzzy* yang lebih aplikatif bagi guru, tetapi belum mengintegrasikan mekanisme adaptif semacam ini ke dalam struktur fungsi keanggotaannya.

Perbedaan inilah yang menjadi titik tumpu kebaruan (*novelty*) penelitian ini. Kelebihan utama dari model komputasi dinamis ini terletak pada fleksibilitas strukturnya. Ketika parameter KKM diubah atau digeser (misalnya dari KKM = 72 menjadi KKM = 75), seluruh titik koordinat dan fungsi keanggotaan matematis akan bergeser secara otomatis dan proporsional tanpa perlu mengubah struktur formula logika ataupun matriks aturan di dalam sistem. Karakteristik pemodelan dinamis berbasis *intercept* KKM otomatis ini menawarkan dua keunggulan praktis sekaligus, yaitu efisiensi struktural karena guru atau pengelola sistem tidak perlu merekonstruksi ulang kurva setiap kali kebijakan ketuntasan berubah dan keadilan prosedural yang berkelanjutan karena seluruh siswa

pada periode penilaian yang berbeda tetap dievaluasi melalui logika penalaran yang identik. Karakteristik ini membedakan rancangan dalam penelitian ini secara struktural dari sistem *fuzzy* evaluasi statis yang umumnya ditemukan pada literatur konvensional, sekaligus menjawab celah penelitian yang telah diidentifikasi pada bagian pendahuluan.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan arsitektur *Fuzzy* Mamdani dinamis berbasis parameter Kriteria Ketuntasan Minimal (KKM) adaptif untuk mengintegrasikan penilaian Kemampuan Pemahaman Konsep Matematis (KPKM) dan keterampilan *hands-on* ke dalam satu skor Tingkat Keberhasilan Belajar (TKB). Hasil simulasi pada serangkaian kasus batas dan kombinasi *input* representatif menunjukkan bahwa model ini konsisten secara matematis karena fungsi keanggotaan menghasilkan derajat keanggotaan yang tepat pada setiap titik kritis kurva, proses inferensi dan defuzzifikasi menghasilkan nilai tegas yang sesuai dengan logika penalaran yang dirancang, serta sistem tetap adil pada kondisi *input* yang timpang antarranah kemampuan. Keunggulan utama model ini adalah kemampuannya menyesuaikan koordinat kurva secara otomatis mengikuti perubahan KKM tanpa modifikasi rumus, sehingga menjawab kebutuhan akan instrumen penilaian yang valid dan sejalan dengan prinsip asesmen autentik Kurikulum Merdeka.

5. REKOMENDASI

Model yang telah divalidasi secara matematis ini perlu diimplementasikan ke dalam lembar kerja Microsoft Excel berbantuan VBA, dilanjutkan dengan validasi ahli serta uji kepraktisan dan keefektifan bersama guru di lapangan. Penelitian lanjutan juga disarankan menguji sensitivitas model pada rentang nilai KKM yang berbeda-beda untuk memastikan generalisasinya di berbagai satuan pendidikan.

6. REFERENSI

- Aisyah, Helviana, & Ramdan, A. (2025). Antara kertas dan realita: penilaian autentik dalam Kurikulum Merdeka. *Jurnal Inovasi Pedagogi & Teknologi (JIPTek)*, 3(2), 56–65. <http://www.journal.arthamaramedia.co.id/index.php/jiptek>
- Al-Kandari, M. M., & Alajmi, A. H. (2025). Fuzzy logic-driven assessment model for mathematical proof grading in education. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 18(3). <https://doi.org/10.29020/nybg.ejpam.v18i3.6257>
- Aprilianto, A. R., Cahyono, B., & Tafrikan, M. (2025). Implementation of Mamdani method fuzzy system in determining final semester grades of UIN Walisongo Semarang students. *Contemporary Mathematics and Applications*, 7(1), 46–63.
- Baniasadi, A., Salehi, K., Khodaie, E., Bagheri Noaparast, K., & Izanloo, B. (2023). Fairness in classroom assessment: A systematic review. *Asia-Pacific Education Researcher*, 32(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s40299-021-00636-z>
- Bravo, M. M., & Paceno, R. D. (2025). Classroom-based assessment practices and challenges of primary teachers: Basis for a proposed upskilling program. *Randwick International of Education and Linguistics Science Journal*, 6(2), 553–573. <https://doi.org/10.47175/rielsj.v6i2.1175>

- Gkintoni, E., Antonopoulou, H., Sortwell, A., & Halkiopoulos, C. (2025). Challenging cognitive load theory: The role of educational neuroscience and artificial intelligence in redefining learning efficacy. In *Brain Sciences*, 15(2), 1-11. <https://doi.org/10.3390/brainsci15020203>
- Hashemi, H., Behzadi, M. H., Rasouli, H., & Azhini, M. (2025). A Mamdani Fuzzy-APOS model for quantitatively assessing students' skill in solving linear systems by the inverse matrix. *International Journal of Mathematical Modelling & Computations (IJM2C)*, 15(4), 248–260. <https://doi.org/10.57647/ijm2c.2025.150424>
- Kusuma, N. A., Suwarma, I. R., & Rusnayanti, H. (2025). Pengaruh hands-on experiment dan demonstrasi materi gerak lurus terhadap motivasi intrinsik belajar peserta didik. *Syntax Admiration*, 6(3), 1454–1465.
- Levy-Feldman, I. (2025). The role of assessment in improving education and promoting educational equity. *Education Sciences*, 15(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/educsci15020224>
- Marwa, N. W. S., Pitria, P. R., & Madani, F. (2024). Development of authentic assessment of 21st-century skills in Kurikulum Merdeka. *Inovasi Kurikulum*, 21(2), 635–646. <https://doi.org/10.17509/jik.v21i2.67273>
- Najmudin, D., & Qurrotul 'Ain, S. (2024). Penilaian portofolio sebagai instrumen pengukuran kompetensi peserta didik. *Celebes Journal of Elementary Education*, 2(1), 2024–2025.
- Pebriani, I., Hamdian Affandi, L., & Astria, F. P. (2025). Analisis kesiapan guru untuk melakukan penilaian dalam implementasi Kurikulum Merdeka di SDN 02 Jurit Kecamatan Pringgasela Lombok Timur. *Jurnal Studi Guru Dan Pembelajaran*, 8(1). <https://doi.org/10.30605/jsdp.8.1.2025.5645>
- Prinanda, D. (2022). Analisis problematika guru dalam implementasi media. *Indonesian Journal of Administration or Management in Education (IJAM-Edu)*, 2(2), 2025–2329.
- Rohim, A. (2025). Pengembangan SMART; Sistem penilaian media pembelajaran berbasis teknologi Fuzzy Mamdani di Excel. *Wahana Pedagogika*, 7(1), 40–47.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Sengkey, D. J., Sampoerno, P. D., & Aziz, T. A. (2023). Kemampuan pemahaman konsep matematis: Sebuah kajian literatur. *Griya Journal of Mathematics Education and Application*, 3(1), 67–74. <https://mathjournal.unram.ac.id/index.php/Griya/indexGriya>
- Sudrajat, & Agustiani, S. (2023). Penerapan fuzzy logic Mamdani untuk menentukan prestasi belajar matematika siswa SMP. *ELIPS: Jurnal Pendidikan Matematika*, 4(2). <http://journal.unpacti.ac.id/index.php/ELIPS>
- Umar, W., Somadayo, S., & Miliyawati, B. (2022). Representasi konsep pecahan dan operasinya dalam pembelajaran matematika di sekolah dasar. *Saintifik@: Jurnal Pendidikan MIPA*, 7(2), 57–63.
- Vinsensia, D. (2018). Penentuan prestasi belajar siswa menggunakan aplikasi Fuzzy Mamdani (Study kasus: SMK Negeri 1 Serdang Bedagai). *Sinkron: Jurnal & Penelitian Teknik Informatika*, 2(2), 47–51.
- Winarti, P., Sari, F., Jannah, M., Manubay, J., Ayu Oka, G., Ayu Rai, G., Sari, R., Sukwika, T., & Widayati, S. (2023). *Evaluasi pembelajaran* (Sarwandi, Ed.).
- World Bank. (2024). *Teacher practices in Indonesia: Results of the Teach Primary Classroom Observation Study*.
- Yulianti, A., & Ramdhan, B. (2020). Eksperimentasi pembelajaran kontekstual berbasis. *Report of Biological Education*, 1(1), 15–20.
- Yulmaini. (2018). *Logika fuzzy - studi kasus & penyelesaian menggunakan Microsoft Excel dan Matlab* (R. Indra, Ed.). Andi.
- Zadeh, L. A. (1969). *A theory of fuzzy systems*.