

Integrasi Logika Fuzzy dengan Teknologi Cerdas: Tinjauan Sistematis atas Peluang, Tantangan, dan Arah Masa Depan

YOULLIA INDRAWATY NURHASANAH, EMA KURNIA, SUTARTI

Ilmu Komputer, IPB University

Email: youlliaindrawaty@apps.ipb.ac.id¹, emakurnia@apps.ipb.ac.id²,
sutarti86sutarti@ apps.ipb.ac.id^{3*}

Received 20 Oktober 2024 | *Revised* 3 Januari 2025 | *Accepted* 9 Mei 2025

ABSTRAK

Pengembangan sistem logika fuzzy telah mengalami kemajuan pesat sejak awal diperkenalkan. Studi ini menyajikan tinjauan literatur untuk mengeksplorasi berbagai metodologi logika fuzzy dan aplikasi di berbagai sektor, seperti sistem kontrol, prediksi cuaca, diagnosa medis, dan lainnya. Kajian ini juga mencakup integrasi fuzzy dengan teknologi modern seperti IoT, Big Data, dan kecerdasan buatan (AI), yang telah mendorong penerapan lebih luas dan efisien. Selain menyoroti pencapaian, makalah ini membahas tantangan dalam interpretabilitas, efisiensi komputasi, dan adaptabilitas metode fuzzy dalam menghadapi kompleksitas teknologi dan data modern. Studi ini mengkaji pentingnya pengembangan lebih lanjut terhadap integrasi dengan AI untuk memastikan relevansi dan kontribusi logika fuzzy terhadap solusi cerdas di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini menyediakan arah yang strategis untuk eksplorasi lebih lanjut, terutama terkait tantangan teknis dan peluang inovasi dalam domain ini.

Kata kunci: AI, Big Data, IoT, Logika Fuzzy, Tantangan Teknologi

ABSTRACT

The development of fuzzy logic systems has progressed rapidly since its introduction. This study presents a review of recent literature to explore various fuzzy logic methodologies and applications in various sectors, such as control systems, weather prediction, medical diagnosis, and others. The review also covers the integration of fuzzy with modern technologies such as IoT, Big Data, and AI, which has driven wider and more efficient applications. In addition to highlighting achievements, the paper discusses challenges in computational efficiency, and adaptability of fuzzy methods in the face of modern technological and data complexity. The study emphasises the importance of further development towards interpretability and integration with AI to ensure the relevance and contribution of fuzzy logic to future intelligent solutions. Thus, this research provides a strategic direction for further exploration, especially regarding technical challenges and innovation opportunities in this domain.

Keywords: AI, Big data, Fuzzy Logic, IoT, Technology Challenges

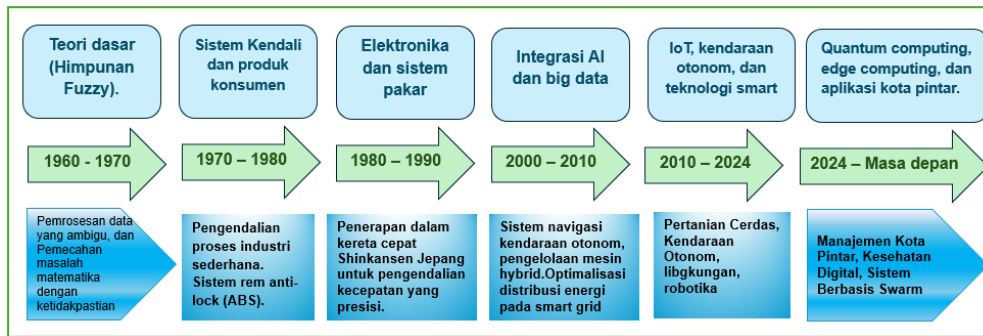
1. PENDAHULUAN

Sistem logika fuzzy telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang seperti sistem kontrol, prediksi cuaca, dan diagnosa medis. Logika fuzzy yang berbasis pada ketidakpastian menjadi solusi untuk menangani masalah yang tidak dapat diselesaikan menggunakan logika biner atau sistem berbasis aturan konvensional (**Slim & Nadeau, 2020**). Konsep ini mampu memodelkan ketidakpastian dan ambiguitas, sehingga sangat sesuai untuk pengembangan sistem cerdas. Dalam beberapa dekade terakhir, adopsi logika fuzzy terus meningkat. Sebuah studi menunjukkan bahwa penggunaan logika fuzzy pada sistem kontrol kendaraan otomatis dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 15% dibandingkan dengan pengendali tradisional (**Martínez, dkk, 2012**). Di bidang medis, logika fuzzy untuk mendukung diagnosa penyakit kronis, dengan peningkatan akurasi diagnostik sebesar 20% pada kasus diabetes dan penyakit kardiovaskular. Selain itu, industri energi terbarukan telah mengintegrasikan logika fuzzy dalam pengelolaan jaringan mikro (*microgrid*), yang berhasil mengoptimalkan penggunaan energi hingga 25%. Hal ini menunjukkan minat dan kepercayaan yang terus berkembang terhadap teknologi ini.

Namun, terdapat tantangan signifikan dalam penerapan logika fuzzy, seperti kebutuhan akan model yang lebih mudah diadaptasi, komputasi yang efisien, serta interpretasi hasil yang lebih jelas. Oleh karena itu, diperlukan studi literatur yang komprehensif untuk mengkaji seberapa besar potensi pengintegrasian logika fuzzy dengan teknologi lain dalam menangani data yang bervariasi dan tidak pasti. Pertanyaan penelitian ini difokuskan pada kajian komprehensif terhadap perkembangan sistem logika fuzzy dari berbagai perspektif. Pertama, penelitian ini mengkaji bagaimana evolusi logika fuzzy telah berlangsung dari sisi teknologi dan domain aplikasi selama beberapa dekade terakhir, termasuk bagaimana penerapannya telah meluas ke berbagai sektor seperti industri, pertanian, kesehatan, dan transportasi. Selanjutnya, penelitian ini juga berfokus pada identifikasi teknik-teknik baru yang telah terintegrasi dengan logika fuzzy, seperti integrasi dengan algoritma *machine learning*, *deep learning*, dan *hybrid systems* lainnya, serta bagaimana kombinasi tersebut memengaruhi peningkatan kinerja sistem. Penelitian ini akan mengeksplorasi peluang dan potensi pengembangan logika fuzzy di masa depan, khususnya dalam kaitannya dengan kemunculan teknologi-teknologi mutakhir.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan mengenai pencapaian, tantangan, serta peluang yang dapat dimanfaatkan dalam rangka mengembangkan teknologi berbasis logika fuzzy. Studi ini difokuskan untuk mengidentifikasi bagaimana sistem logika fuzzy telah berkembang baik dari sisi teknologi maupun aplikasinya dalam berbagai domain selama beberapa dekade terakhir. Selain itu, penelitian ini juga akan mengkaji berbagai metode dan inovasi terbaru dalam pengembangan sistem logika fuzzy, termasuk pendekatan hibrida dan integrasi dengan teknologi kecerdasan buatan. Di samping itu, penelitian ini akan mengeksplorasi potensi dan prospek logika fuzzy di masa depan, terutama dalam konteks kemajuan teknologi yang pesat seperti *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan sistem cerdas, yang secara signifikan memperluas ruang lingkup aplikasi logika fuzzy.

Kajian penerapan logika fuzzy sangat luas, karena logika fuzzy dalam pengembangannya dapat dipadukan dengan metoda lainnya untuk menangani masalah ketidakpastian. Pada *review paper* ini akan dijelaskan penerapan logika fuzzy untuk bidang kesehatan, industri, agrikultur, sistem kontrol dan optimasi. Metode atau pendekatan yang akan diulas, adalah integrasi Logika Fuzzy dengan IoT, *machine learning*, *big data*, *Deep learning*, dan Kecerdasan buatan. Gambar 1 menunjukkan perkembangan *Fuzzy logic* dari mulai tahun 1965, Lotfi A. Zadeh memperkenalkan konsep himpunan fuzzy, yang menjadi dasar teori *fuzzy logic*.



Gambar 1. Perkembangan *Fuzzy Logic*

1.1 Fuzzy Set

Fuzzy set merupakan himpunan klasik yang berisi elemen-elemen dalam himpunan yang memiliki derajat keanggotaan yang bervariasi. *Fuzzy set* berbasis kosinus menggunakan fungsi kosinus sebagai dasar untuk menentukan derajat keanggotaan suatu elemen. Pendekatan ini memberikan representasi yang lebih halus dan presisi dalam model ketidakpastian. Aplikasi *fuzzy set* salah satunya untuk masalah simulasi dan kuantifikasi ketidakpastian untuk mencakup ketidakpastian aleatorik dan epistemik yang biasa terlihat pada model non-probabilistik (**Figueroa-García, dkk, 2024**). Implementasi *fuzzy set* lainnya adalah untuk memasok oksigen medis dengan menghilangkan nitrogen dari udara sekitar. Tujuan utamanya untuk memastikan pasokan oksigen yang konsisten dan berkualitas tinggi untuk keselamatan pasien di pusat-pusat kesehatan. Evaluasi keandalan sistem menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA). FTA memberikan fleksibilitas dalam menangani ketidakpastian dan ambiguitas, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih realistis mengenai kemungkinan kegagalan dalam sistem pasokan oksigen (**Yousofnejad & Es'haghi, 2024**).

1.2 Fuzzy Logic Controller (FLC)

FLC menangani ketidakpastian dan sistem yang kompleks dengan aturan *if-then*. Aplikasi FLC pada optimasi dari sistem penyimpanan energi hibrida yang terhubung ke jaringan dengan kontrol logika fuzzy (**Shirinda, dkk, 2024**). FLC digunakan untuk mengendalikan sistem fotovoltaik yang terhubung ke jaringan listrik dan sistem penyimpanan energi hibrid. Sistem ini memanfaatkan logika fuzzy untuk mengelola distribusi daya dan penyimpanan energi secara efisien, terutama dengan mempertimbangkan variabilitas sumber daya terbarukan. Aplikasi FLC untuk merancang skema kontrol suhu otomatis dan kontrol logika fuzzy untuk sistem *Automotive Air-Conditioned* (**Yakubu, dkk, 2024**).

Logika Fuzzy Tipe 1

Logika fuzzy tipe 1 ditemukan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Keuntungan utama dari *type 1 fuzzy logic* adalah kesederhanaan dan keefektifannya dalam banyak aplikasi seperti sistem kendali otomatis, pengenalan pola, dan pengambilan keputusan. Namun, ia juga memiliki keterbatasan karena hanya mempertimbangkan ketidakpastian yang terkait dengan variabel input/output, tanpa mempertimbangkan ketidakpastian yang mungkin terkait dengan fungsi keanggotaan itu sendiri. Salah satu contoh implementasi dari pengontrol fuzzy tipe 1 adalah berbasis Takagi-Sugeno (T-S) adalah untuk kontrol frekuensi beban (**Mersadek, dkk, 2024**). Inferensi Mamdani memberikan himpunan fuzzy yang didefuzzifikasi untuk membentuk keluaran, sedangkan inferensi T-S tidak memerlukan defuzzifikasi karena keluarannya adalah ekspresi input polinomial linier konstan.

Logika Fuzzy Tipe 2

Untuk menangani ketidakpastian pada fungsi keanggotaan, digunakan *Type 2 Fuzzy Logic*. Pada tahun 1975 Zadeh menggambarkan bagaimana fungsi keanggotaan dalam fuzzy set juga bisa memiliki ketidakpastian. *Type 2 Fuzzy Logic* memungkinkan ketidakpastian tidak hanya pada data input, tetapi juga pada fungsi keanggotaan itu sendiri, melalui konsep *Footprint of Uncertainty* (FoU). Logika Fuzzy tipe 2 mulai diimplementasikan pada tahun 2001. Contoh implementasi pengontrol logika fuzzy tipe 2 (T2FLC) adalah untuk meningkatkan kualitas daya sistem PV dalam kondisi yang berbeda (**Maroua, dkk, 2024**). Penelitian ini melibatkan dua versi pengontrol logika fuzzy yaitu pengontrol logika fuzzy tipe 1 (T1FLC) dan T2FL. Pengontrol digunakan untuk mengekstrak daya maksimum dari panel surya dan memastikan daya optimal penyimpanan baterai. Kehandalan logika fuzzy tipe-2 juga diuji pada model kontrol kelembapan yang dapat disesuaikan untuk bangunan bersejarah dalam bentuk infrastruktur IoT (**Woźniak, dkk, 2024**).

Logika Fuzzy Type 3

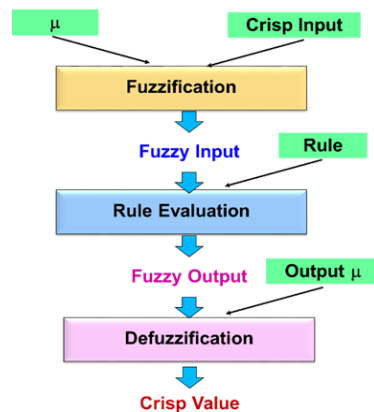
Type 3 Fuzzy Logic adalah konsep lanjutan yang muncul dari pengembangan lebih lanjut. Type 1 Fuzzy Logic menggunakan fungsi keanggotaan tunggal untuk memodelkan ketidakpastian, sementara Type 2 Fuzzy Logic memperkenalkan FoU dalam fungsi keanggotaan untuk menangani ketidakpastian yang lebih kompleks. Sistem logika fuzzy tipe-3 dapat menjadi alternatif metode dalam pemodelan dinamika data keuangan (**Yan, dkk, 2024**). Teori chaos menawarkan cara baru untuk menyelidiki variasi data pasar keuangan yang tidak mungkin terjadi diperoleh dengan metode tradisional.

1.3 Fuzzy Inference System (FIS)

FIS adalah proses pengambilan keputusan berbasis logika fuzzy berdasarkan aturan-aturan *if-then*. Sistem ini memungkinkan penanganan data yang tidak pasti atau kabur (*vague*) melalui pemetaan antara himpunan fuzzy input dan output. Beberapa macam FIS:

1. Mamdani FIS lebih umum digunakan untuk representasi linguistik dan pengambilan keputusan.
2. Tsukamoto FIS adalah metode alternatif yang digunakan dalam situasi tertentu di mana hasil skalar langsung dibutuhkan. Tsukamoto FIS ditemukan tahun 1979.
3. Sugeno FIS lebih cocok untuk kontrol otomatis dan model matematika yang menghasilkan output numerik langsung. Sugeno FIS ditemukan oleh Michio Sugeno pada tahun 1985.

Aplikasi FIS untuk menentukan kesesuaian air tanah untuk irigasi, penyerapan natrium, konduktivitas listrik, persentase natrium, natrium karbonat residu, dan rasio magnesium. Mamdani FIS memanfaatkan aturan *if-then* di mana parameter kualitas air tanah dipetakan ke output (kategorisasi kelayakan air untuk irigasi) (**Loganathan, dkk, 2024**). Aplikasi FIS lainnya untuk meningkatkan produktivitas perikanan dan akuakultur (**Pujaru, dkk, 2024**). FIS dengan aturan yang dioptimalkan untuk mendiagnosis penyakit kardiovaskular selama kehamilan (**Mariadoss & Augustin, 2023**). Banyak metode penelitian telah dikembangkan untuk memantau operasi mesin. Namun metode ini tidak memperhitungkan kekritisannya, jenis kesalahan, atau tingkat degradasi komponen untuk memicu peringatan, sehingga pemantauan waktu nyata dan keputusan yang diambil menjadi terdistorsi. Hasil yang diperoleh menunjukkan kemungkinan untuk memantau tingkat keparahan gangguan pada mesin induksi listrik menggunakan model Tsukamoto secara *real-time* (**Dore, dkk, 2023**).



Gambar 2. Tahapan *Fuzzy Inference System* (Suyanto, 2021)

1.4 Fuzzy C-Means

Fuzzy C-Means dikembangkan oleh J.C. Dunn pada tahun 1973 dan tahun 1981 dilakukan perbaikan oleh James C. Bezdek. *Fuzzy C-Means* adalah metode pengelompokan yang menggunakan teori himpunan fuzzy untuk mengelompokkan data. Aplikasi Fuzzy C-Means menggunakan metode hibrida yang menggabungkan LS-SVR dan Fuzzy Clustering (Ahmadi, dkk, 2024). Aplikasi *Fuzzy C-means* menggunakan kedua teknik *fuzzy logic* dan *K-means Clustering* untuk menganalisis data curah hujan jangka panjang di Bangladesh, guna mengidentifikasi wilayah-wilayah dengan pola curah hujan yang serupa atau homogen (Roy, dkk, 2024).

1.5 Fuzzy Time Series

Time series features adalah karakteristik atau atribut yang dapat diidentifikasi dari data *time series*. Fitur ini berupa statistik seperti rata-rata, variansi, tren, musiman, dan pola, yang semuanya membantu dalam memahami perilaku data. Fungsi dari *time series features* untuk menangkap informasi penting dari data urutan waktu dan mereduksi data mentah menjadi representasi yang lebih informatif. Ini memungkinkan algoritma klasifikasi untuk bekerja lebih efisien dan akurat dalam mengklasifikasikan pola yang ada dalam data. Penggabungan kedua konsep ini bertujuan untuk meningkatkan performa dan fleksibilitas dalam klasifikasi data *time series*, terutama ketika data menunjukkan pola yang tidak pasti atau non-linear (Baldán & Martínez, 2024).

1.6 Fuzzy Hybrid

Dalam pengambilan keputusan multi-kriteria atau *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), logika fuzzy menjadi semakin populer dalam menangani ketidakpastian.

Fuzzy VIKOR

Fuzzy VIKOR adalah metode MCDM yang menggabungkan konsep VIKOR dengan logika fuzzy. Fuzzy VIKOR digunakan juga untuk memecahkan masalah pada beberapa kriteria yang saling bertentangan, dan tujuannya adalah untuk menemukan solusi yang paling mendekati ideal. Metode ini sangat cocok untuk situasi di mana ada konflik antar kriteria dan diperlukan solusi yang tidak hanya optimal untuk satu kriteria, tetapi juga memberikan kompromi antara semua kriteria yang relevan. Implementasi fuzzy VIKOR cukup handal dalam layanan jasa manufaktur (Liang & Liu, 2024). Metode VIKOR berdasarkan himpunan fuzzy intuisi digunakan untuk

mengevaluasi dan memberi peringkat pada saham manufaktur calon jasa, yang menggabungkan manfaat dan nilai kerugian minimum kelompok-kelompok tersebut.

Integrasi Fuzzy-AHP dan Fuzzy VIKOR

Integrasi Fuzzy-AHP dan Fuzzy VIKOR digunakan terutama ketika kriteria penilaian atau preferensi pengambil keputusan sulit untuk diukur secara pasti. Dengan menggabungkan kedua metode, peringkat alternatif menjadi lebih akurat karena bobot kriteria ditentukan dengan lebih teliti. Metode ini dapat diterapkan pada berbagai jenis masalah pengambilan keputusan, termasuk dalam manajemen proyek, penilaian risiko, pemilihan pemasok, dan pengambilan keputusan strategis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode Fuzzy-AHP dan Fuzzy VIKOR menawarkan pendekatan yang sistematis dan obyektif mendukung pengambilan keputusan dalam pemilihan lokasi PLTN (**Mahmudah, dkk, 2024**).

Hierarchical Fuzzy Deep Learning System

Pendekatan ini menggabungkan logika fuzzy dengan *deep learning* untuk menangani masalah terutama di bidang pengenalan pola, pengambilan keputusan, dan kontrol sistem. Pendekatan ini memanfaatkan keunggulan dari kedua metode, yaitu kemampuan *deep learning* dalam mengenali pola secara otomatis dari data yang besar dan kompleks, serta fleksibilitas logika fuzzy dalam menangani ketidakpastian dan data yang ambigu. Tujuannya adalah merancang algoritma klasifikasi citra sehingga menghasilkan akurasi yang tinggi. Keakuratan algoritma telah diperoleh untuk berbagai kelas gambar yang menggunakan gambar ambang batas. Pengembangan algoritma pembelajaran ini telah divalidasi pada data yang rusak dan terdapat *noise* serta hasil berbagai kelas gambar yang telah disajikan (**Kamthan & Singh, 2023**).

Defuzzifikasi Luukka–Stoklasa

Metode Luukka–Stoklasa meningkatkan keakuratan proses defuzzifikasi dengan mempertimbangkan distribusi data fuzzy. Pendekatan ini mempertimbangkan derajat keanggotaan kumulatif dan pemfaktoran informasi fuzzy untuk mendapatkan nilai crisp yang lebih representatif. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi kesalahan yang dapat terjadi dalam metode defuzzifikasi tradisional (**Luukka & Stoklasa, 2024**).

1.7 Neuro Fuzzy

Sistem *neuro-fuzzy* berbasis *Mamdani* merupakan kombinasi antara jaringan saraf tiruan dan logika fuzzy Mamdani, yang dirancang untuk menangkap hubungan non-linier dalam data dan mengotomatisasi pengaturan aturan fuzzy. *Mamdani-based system* lebih menekankan pada interpretabilitas atau transparansi dalam pengambilan keputusan, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi di mana keputusan harus dapat dijelaskan secara jelas kepada pengguna. TSK mengandalkan representasi matematis yang lebih presisi. *TSK-based system* lebih menekankan pada akurasi dan efisiensi dalam menangani data numerik, sehingga lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan prediksi yang lebih akurat, meskipun dengan interpretabilitas yang lebih rendah. Kinerja dan interpretabilitas sistem *neuro-fuzzy* berbasis Mamdani dan Takagi-Sugeno-Kang untuk diagnosis medis menunjukkan bahwa kedua sistem memiliki peran penting dalam konteks diagnosis medis (**Ouifak & Idri, 2023**).

1.8 Fuzzy Cognitive Map (FCM)

Kombinasi FCM dengan metode pembelajaran mesin dan optimasi fuzzy meningkatkan kemampuan FCM dalam memprediksi dan menganalisis sistem. FCM dikembangkan oleh Bart Kosko pada tahun 1986. FCM adalah gabungan antara logika fuzzy dan peta kognitif, yang digunakan untuk memodelkan sistem kompleks yang dinamis berdasarkan hubungan sebab-akibat antar variabel yang tidak pasti. FCM merupakan model representasi grafis yang digunakan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat. Studi mengenai penilaian risiko dinamis LPG dalam tangki penyimpanan berbentuk bola mengidentifikasi beberapa temuan utama mengenai risiko terkait **(Sarebanzadeh, dkk, 2024)**. Penelitian ini menggunakan metode Bow-Tie dan FCM untuk mengidentifikasi hambatan dan konsekuensi efektif terkait skenario pelepasan LPG. Pendekatan ini menunjukkan bahwa metode FCM dapat secara efektif menentukan titik-titik penting dengan tingkat pengaruh yang lebih tinggi.

1.9 Fuzzy Optimization

Salah satu perkembangan utama fuzzy adalah penggabungan logika fuzzy dengan metode optimasi metaheuristik seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), dan *Artificial Bee Colony* (ABC). Kombinasi ini menghasilkan sistem optimasi fuzzy yang lebih kuat dan efisien. Teknik *metaheuristic harmonic search* (HS) merupakan metode optimasi yang dapat diimplementasikan bersama logika fuzzy. Teknik *metaheuristic harmonic search* (HS) berbasis fuzzy bertujuan untuk mengoptimalkan pengontrol fuzzy tipe-1 untuk *Fault-Tolerant Control* (FTC) untuk aplikasi kontrol level nonlinier yaitu kesalahan aktuator dan gangguan proses eksternal, menggunakan tipe Algoritma HS berbasis fuzzy -1 dan interval tipe-2 **(Patel & Shah, 2022)**.

1.10 Fuzzy Big Data dan IoT

logika fuzzy telah diintegrasikan ke dalam sistem *big data* dan IoT mampu memproses data besar dan heterogen secara *real-time*. *Fuzzy Big Data* menerapkan logika fuzzy dalam analisis *big data* untuk menangani ketidakpastian, ketidakakuratan, dan kompleksitas data yang sangat besar dan beragam. *Fuzzy logic* memberikan representasi data dan mampu mengelola data yang tidak pasti atau ambigu yang sering ditemui dalam *big data*. Salah satu penelitian mengenai teknologi IoT dan logika fuzzy yang digunakan untuk mendukung manajemen pasien COVID-19 **(Rahman, dkk, 2024)**. IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh, logika fuzzy sebagai pengambilan keputusan, dan pengelolaan sumber daya kesehatan. Penelitian lain tentang teknologi multi-agen dan logika fuzzy yang diintegrasikan untuk meningkatkan pemrosesan dan pengelolaan data besar, misalnya sistem multi-agen digunakan untuk menciptakan jaringan agen terdistribusi yang dapat beroperasi secara mandiri. Setiap agen mampu mengumpulkan data dari lingkungan, memproses, dan membuat keputusan berdasarkan aturan yang telah ditentukan. Kombinasi teknologi multi-agen dan logika fuzzy memberikan kerangka kerja yang kuat untuk mengekstraksi wawasan yang bermakna dari data *noise* dalam jumlah besar, sehingga meningkatkan kualitas data dan efisiensi jaringan **(Elaggoune, dkk, 2020)**.

1.11 Explainable Fuzzy AI

Explainable Fuzzy AI adalah kombinasi antara logika fuzzy dan AI yang dirancang untuk membuat prediksi yang akurat dan juga memberikan penjelasan yang dapat dipahami oleh manusia tentang bagaimana prediksi tersebut dibuat. *Explainable Fuzzy AI* dikembangkan tahun 2020. *Explainable Fuzzy AI* menjelaskan bagaimana model AI sampai pada sebuah keputusan atau hasil klasifikasi. Pada klasifikasi citra ultrasonografi paru-paru, model ini tidak

hanya memberikan hasil tetapi juga menunjukkan bagaimana faktor-faktor seperti area, tekstur, atau pola pada gambar mempengaruhi keputusan tersebut **(Hasan, dkk, 2023)**. Pendekatan ini meningkatkan pemahaman dokter tentang bagaimana fitur-fitur pada gambar dianalisis oleh model untuk mendeteksi potensi kelainan, sehingga dokter dapat lebih percaya diri dalam menggunakan AI sebagai alat bantu diagnosis.

1.12 Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)

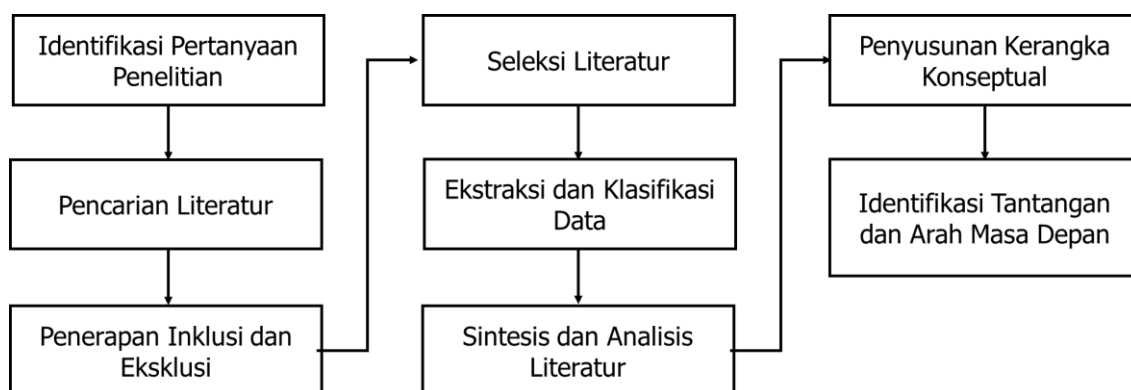
ANFIS dikembangkan oleh Jang pada tahun 1993. ANFIS adalah kombinasi dari logika fuzzy dan *neural networks*. ANFIS digunakan untuk pemodelan dan pengendalian non-linear yang kompleks. ANFIS memanfaatkan kemampuan jaringan saraf dalam belajar dari data, serta kemampuan fuzzy dalam menangani ketidakpastian. Salah satu penelitian terkait ANFIS dalam optimisasi konsentrasi PM sensor berbiaya rendah menyatakan bahwa penggabungan logika fuzzy dengan struktur jaringan saraf untuk menangani kompleksitas penyesuaian data sensor berbiaya rendah, dan memberikan kerangka kerja yang kuat untuk analisis data lingkungan. Algoritme ANFIS memungkinkan proses pengoptimalan diulang atau diperluas dengan kasus baru, sehingga dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan dan karakteristik sensor yang berbeda **(Casari, dkk, 2024)**.

1.13 Deep Fuzzy Network (DFN)

DFN dikembangkan tahun 2000-an merupakan kombinasi dari *deep learning* dan logika fuzzy. Aplikasi DFN meliputi pengenalan suara, deteksi objek, pemrosesan gambar, serta sistem kontrol robotik cerdas. Dalam DFN, jaringan saraf digunakan untuk mengotomatisasi pembelajaran aturan fuzzy dari data, sehingga meningkatkan akurasi dalam pemodelan sistem yang kompleks. Pada kasus peptide terapeutik mampu meningkatkan efisiensi identifikasi yang secara tradisional merupakan proses padat karya **(Guo, dkk, 2024)**.

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan tinjauan literatur sistematis (*systematic literature review*/SLR) yang bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan, pendekatan terbaru, serta potensi masa depan dari sistem logika fuzzy dalam berbagai bidang teknologi. Proses ini dilakukan secara bertahap dan terstruktur untuk memastikan keluaran yang komprehensif dan relevan terhadap fokus kajian dan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan Penelitian

Berikut adalah langkah-langkah utama dalam penelitian:

1. Identifikasi Pertanyaan Penelitian

Studi ini diawali dengan perumusan pertanyaan penelitian yang bertujuan mengeksplorasi perkembangan, integrasi, dan tantangan logika fuzzy dalam teknologi cerdas sepanjang 2020–2024, serta menilai kontribusinya dalam membangun sistem adaptif dan transparan di era AI, IoT, dan Big Data. Kajian ini menjadi landasan untuk memahami transformasi logika fuzzy dan arah pengembangannya di masa depan.

2. Pencarian Literatur

Literatur dicari melalui *database* ilmiah bereputasi ScienceDirect (Elsevier) periode 2020–2024, untuk mengkaji perkembangan terbaru integrasi logika fuzzy dengan teknologi cerdas. Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci utama seperti "*Fuzzy Logic*", "*Fuzzy Inference System*", "*Type-2 Fuzzy Logic*", serta kata kunci terkait teknologi seperti "*Artificial Intelligence*", "*IoT*", "*Big Data*", dan "*Hybrid Fuzzy Model*". Operator Boolean AND dan OR digunakan untuk mengoptimalkan hasil pencarian yang relevan dengan topik.

3. Penerapan Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan relevansi dan kualitas ilmiah, literatur yang dianalisis dipilih berdasarkan kriteria inklusi seperti publikasi jurnal bereputasi (berdasarkan IF dan SJR), fokus pada integrasi logika fuzzy dengan teknologi cerdas, serta periode 2020–2024. Literatur yang bersifat teoretis tanpa aplikasi, prosiding tidak terindeks, atau duplikatif dikeluarkan dari analisis agar kajian mencerminkan perkembangan dan prospek nyata logika fuzzy di era teknologi cerdas.

4. Seleksi Literatur

Proses seleksi dilakukan dalam dua tahap: pertama, *screening* awal berdasarkan judul dan abstrak untuk menilai relevansi; kedua, analisis *full-text* untuk mengevaluasi isi secara mendalam dan kontribusinya terhadap integrasi logika fuzzy dengan teknologi cerdas.

5. Ekstraksi dan Klasifikasi Data

Literatur terpilih diekstraksi dan dianalisis berdasarkan identitas, domain aplikasi, teknologi pendukung, serta metode fuzzy yang digunakan, termasuk temuan utama, kelebihan, dan keterbatasannya. Proses ini membantu memetakan tren, menilai performa, dan merumuskan arah pengembangan logika fuzzy dalam konteks teknologi cerdas secara lebih terstruktur.

6. Sintesis dan Analisis Literatur

Data yang diekstraksi dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi tren, pola integrasi, dan celah penelitian dalam pengembangan logika fuzzy dengan teknologi cerdas. Sintesis naratif dilakukan untuk mengevaluasi kolaborasi fuzzy dengan AI, *neural network*, dan *deep learning*, serta menilai dampaknya terhadap efisiensi, akurasi, dan interpretabilitas sistem.

7. Penyusunan Kerangka Konseptual

Hasil analisis kemudian dirangkum dalam bentuk kerangka konseptual yang menggambarkan hubungan antara logika fuzzy dan teknologi cerdas, termasuk proses integrasi yang didukung oleh teknologi seperti AI, IoT, dan sensor cerdas. Diagram visual disiapkan untuk memperjelas alur dan modul sistem secara menyeluruh.

8. Identifikasi Tantangan dan Arah Masa Depan

Langkah akhir adalah mengidentifikasi tantangan implementatif, metodologis, dan teknis yang masih menghambat perkembangan sistem fuzzy cerdas, sekaligus memetakan peluang riset lanjutan. Penelitian ini juga merumuskan rekomendasi arah pengembangan masa depan, khususnya terkait dengan penguatan *explainability*, efisiensi komputasi, dan integrasi dalam ekosistem digital *real-time*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metode yang dilakukan berikut adalah hasil perkembangan penelitian terkait *fuzzy logic*.

Tabel 1. Perkembangan Penelitian

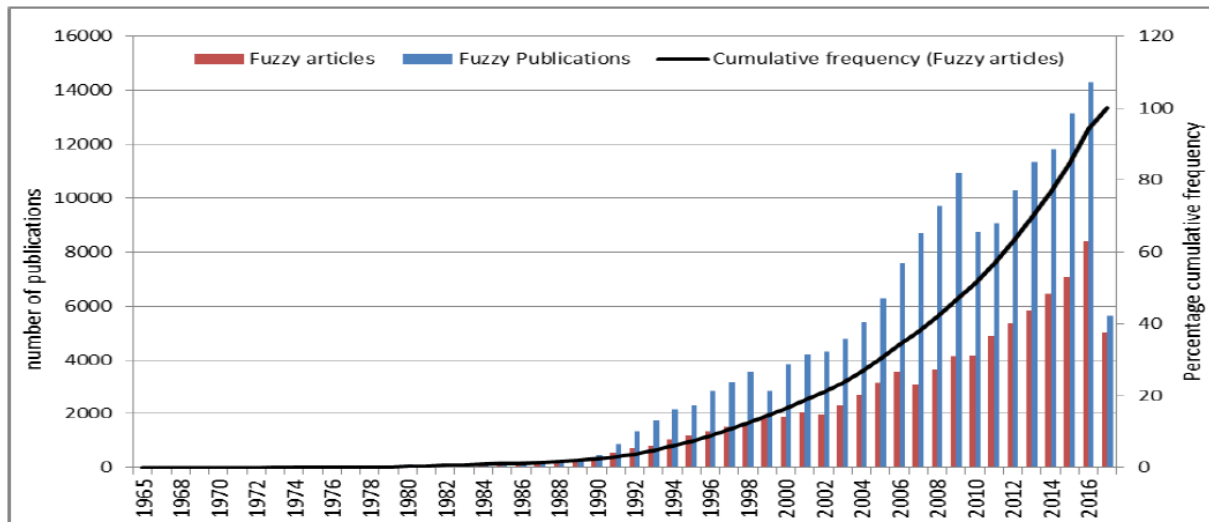
No	Kategori	Author (tahun)	Judul Artikel	Algoritme/ Metodologi	Domain	Tipe artikel
1	Fuzzy set	Yeganeh Yousofnejad, Mahboubeh Es'haghi (2024)	Reliability evaluation of a medical oxygen supply system by FTA based on intuitionistic fuzzy sets	Intuitionistic Fuzzy System	memasok oksigen medis	Eksperimen
2	fuzzy logic controller (FLC)	Khanyisa Shirinda, Kanzumba Kusakana, Mikołaj Ostraszewski (2024)	Combinatorial optimization of a fuzzy logic-controlled grid connected photovoltaic with hybrid energy storage systems using time of use tariff	rule-based fuzzy logic controller (FLC)	Sistem kontrol energi terbarukan	Eksperimen
3	Fuzzy Logic	Sayani Adak, T.K. Kar, Soovoojeet Jana (2024)	A fuzzy inference system for predicting outbreaks in emerging infectious diseases	Fuzzy logic Mamdani	Prediksi wabah penyakit menular	Implementasi
4	Fuzzy Inference	Loganathan, Ramakrishn, Sathiyamoorthy, Azamathulla (2024)	Assessment of irrigational suitability of groundwater in Thanjavur district, Southern India using Mamdani fuzzy inference system	Mamdani Fuzzy Inference	Pertanian	Eksperimen
5	Fuzzy Inference	Kanisha Pujaru, Sayani Adak, T.K. Kar, Sova Patra, Soovoojeet Jana (2024)	A Mamdani fuzzy inference system with trapezoidal membership functions for investigating fishery production	Mamdani Fuzzy Inference	Peningkatan produktivitas perikanan dan akuakultur	Eksperimen
6	Fuzzy Inference	Stephen Mariadoss, Felix Augustin (2023)	Enhanced sugeno fuzzy inference system with fuzzy AHP and coefficient of variation to diagnose cardiovascular disease during pregnancy	Sugeno Fuzzy Inference	Diagnosis penyakit kardiovaskular	Eksperimen
7	Fuzzy C-Means	Hossein Ahmadi, Lin Huo, Goli Arji, Abbas Sheikhtaheri, Shang-Ming Zhou (2024)	Early diagnosis of Parkinson's disease using a hybrid method of least squares support vector regression and fuzzy clustering	Fuzzy C-Means (LS-SVR dan Fuzzy Clustering)	Peningkatan deteksi Penyakit Parkinson (PD)	Eksperimen
8	Fuzzy C-Means	Kumar Roy, Abrar Morshed, Pratik Mojumder, Mahmudul Hasan, A.K.M. Saiful Islam (2024)	Innovative trend analysis technique with fuzzy logic and K-means clustering approach for identification of homogeneous rainfall region:	(Teknik pengelompokan Fuzzy C-means (FCM) dan K-means)	Mengidentifikasi wilayah dengan pola curah	Eksperimen

Integrasi Logika Fuzzy dengan Teknologi Cerdas: Tinjauan Sistematis atas Peluang, Tantangan, dan Arah Masa Depan

No	Kategori	Author (tahun)	Judul Artikel	Algoritme/ Metodologi	Domain	Tipe artikel
			A long-term rainfall data analysis over Bangladesh		hujan yang sebanding	
9	Fuzzy Means	Francisco J. Baldán, Luis Martínez (2024)	Time series features and fuzzy memberships combination for time series classification	fuzzy feature-based time series classification	Menggabungkan informasi global tentang perilaku Time series	Development
10	Neuro-fuzzy systems	Hafsaa Ouifaka, Ali Idri (2023)	On the performance and interpretability of Mamdani and Takagi-Sugeno-Kang based neuro-fuzzy systems for medical diagnosis	Neuro-fuzzy systems	Medical diagnosis	Development
11	Fuzzy Cognitive Map	Keyvan Sarebanzadeh Mahboubeh Es'haghi (2024)	Using fuzzy cognitive map in bow tie method for dynamic risk assessment of spherical storage tanks: A case study	Fuzzy Cognitive Map	Penilaian risiko dinamis	SPK
12	Adaptive Neural Fuzzy Inference	Martina Casari, Piotr A. Kowalski, Laura P. (2024)	Optimisation of the adaptive neuro-fuzzy inference system for adjusting low-cost sensors PM concentrations	(ANFIS)	Algoritma optimasi	Eksperimen
13	Fuzzy inference systems	Pasi Luukka, Jan Stoklasa (2024)	Possibilistic mean based defuzzification for fuzzy expert systems and fuzzy control—LSD for general fuzzy sets	Defuzzifikasi Luukka–Stoklasa	Teknik defuzzifikasi baru	Pengembangan
14	Magnitude Based Fuzzy AHP	Sarbast Moslem, Baris Tekin Tezel, Ayse Ovgu Kinay, Francesco Pilla (2024)	A hybrid approach based on magnitude-based fuzzy analytic hierarchy process for estimating sustainable urban transport solutions	Magnitude Based Fuzzy AHP	Memperkirakan an solusi transportasi perkotaan	Implementasi
15	Fuzzy Logic	Mersadek, Nagi, Permal, Ramasamy, Aidil Azwin (2024)	Takagi-sugeno type 1-2 fuzzy linear output controller for two-area load frequency control	Type-1 Fuzzy Logic	load frequency control (LFC)	Implementasi
16	Fuzzy Logic	Woźniak, Szczotka, Sikora, Zielonka (2024)	Fuzzy logic type-2 intelligent moisture control system	Type-2 Fuzzy Logic	Infrastruktur IoT	Implementasi
17	Fuzzy Logic	Maroua, Laid, Benbouhenni, Fateh, Debdouche, Colak (2024)	Robust type 2 fuzzy logic control microgrid-connected photovoltaic system with battery energy storage through multi-functional voltage source inverter using direct power control	type 2 fuzzy logic control	Kontrol daya listrik pada sistem fotovoltaiik	Simulasi

No	Kategori	Author (tahun)	Judul Artikel	Algoritme/ Metodologi	Domain	Tipe artikel
18	Fuzzy Logic	Yan, Mohammadzadeh, Ghaderpour (2024)	Type-3 fuzzy logic and Lyapunov approach for dynamic modeling and analysis of financial markets	Type-3 Fuzzy Logic	Data pasar keuangan	Metode simulasi
19	Hierarchical fuzzy deep learning system	Shashank Kamthan, Harpreet Singh (2023)	Hierarchical fuzzy deep learning system for various classes of images	Hierarchical fuzzy deep learning system	Klasifikasi Citra	Pengembangan
20	Fuzzy Optimization Metaheuristic	Himanshukumar R. Patel, Vipul A. Shah (2022)	Fuzzy Logic Based Metaheuristic Algorithm for Optimization of Type-1 Fuzzy Controller: Fault-Tolerant Control for Nonlinear System with Actuator Fault	Fuzzy Optimization Metaheuristic	Optimasi fuzzy berbasis metaheuristik	Optimasi
21	Fuzzy VIKOR	Jiating Liang, Peng Liu	Shared manufacturing service evaluation based on intuitionistic fuzzy VIKOR	Intuitive fuzzy	Model saham manufaktur	Implementasi
22	Fuzzy AHP dan Fuzzy VIKOR	Mahmudah, Putri, Abdullah, Shafii, Hakim, Setiadipura	Developing a Multi-Criteria Decision-Making model for nuclear power plant location selection using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Fuzzy VIKOR methods focused on socio-economic factors	Penggabungan metode Fuzzy AHP dan Fuzzy VIKOR	Identifikasi lokasi yang paling cocok untuk PLTN	Integrasi Fuzzy-AHP dan Fuzzy VIKOR
23	Fuzzy Big Data and IoT	Ur Rahman, Martin-Barreiro, Imran, Riaz, Castro (2024)	An IoT-fuzzy intelligent approach for holistic management of COVID-19 patients	Fuzzy Big Data and IoT	Rekomendasi perawatan medis bagi pasien	Development
24	Fuzzy Big Data and IoT	Elaggoune, Maamri, Boussebough (2020)	A fuzzy agent approach for smart data extraction in big data environments	Fuzzy big data	Ekstraksi data	Implementasi
25	Deep Fuzzy Networks	Guoa, Zheng, Cheong, Zoua, Tiwarif, Ding (2024)	Sequence Homology Score-based deep fuzzy network for identifying therapeutic peptides	Deep Fuzzy Networks	Komputasi biologi	Eksperimen
26	Explainable Fuzzy AI	Hasan, Hossain, Rahman, Azad, Alyami, Moni (2023)	FP-CNN: Fuzzy pooling-based convolutional neural network for lung ultrasound image classification with explainable AI	Fuzzy Pooling-CNN-Explainable AI	Kategorikan citra ultrasonografi	Pengembangan
27	Fuzzy TOPSIS	Fahmi, Khan, Abdeljawad, Alqudah (2024)	Natural gas based on combined fuzzy TOPSIS technique and entropy	Fuzzy TOPSIS	Multi criteria decision making (MCDM)	SPK

Berikut adalah grafik perkiraan perkembangan jumlah publikasi terkait *fuzzy logic* dari tahun 1965 hingga 2017. Grafik ini mencerminkan pertumbuhan eksponensial dalam minat dan penelitian terkait *fuzzy logic* di berbagai bidang (López-Guauque & Gil-Lafuente, 2020).



Gambar 4. Evolusi Penelitian Fuzzy (1965-2017)

Gambar 4 menunjukkan tren pertumbuhan jumlah publikasi terkait *fuzzy logic* yang meningkat secara eksponensial sejak diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Hal ini mempertegas relevansi *fuzzy logic* dalam menghadapi ketidakpastian dan kompleksitas dunia nyata.

Tantangan dan Isu Terbuka

Tantangan dan isu terbuka dalam perkembangan teknologi fuzzy hingga saat ini masih memerlukan pengembangan solusi yang efektif dan akan membuka potensi baru bagi teknologi fuzzy di masa depan. Tantangan dan isu terbuka ini meliputi beberapa aspek, antara lain:

1. Menentukan fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang tepat masih menjadi tantangan. Pemilihan ini sangat mempengaruhi kinerja sistem fuzzy, dan metode otomatisasi seperti ANFIS atau *Deep Fuzzy Network* pun masih terus dikembangkan untuk menyempurnakan optimasi.
2. Meskipun fuzzy telah dikombinasikan dengan teknik seperti jaringan saraf tiruan (JST), *genetic algorithm*, dan logika probabilistik, mengintegrasikan fuzzy dengan teknik-teknik terbaru seperti *deep learning* secara efisien masih menjadi tantangan.
3. Sistem fuzzy cenderung mengalami peningkatan kompleksitas dengan bertambahnya variabel dan aturan. Teknologi fuzzy tradisional belum optimal untuk menangani *big data* atau ketidakpastian tingkat lanjut dalam data yang sangat dinamis dan bervolume besar, seperti dalam IoT atau data *real-time*.
4. Ada kompromi antara interpretabilitas aturan fuzzy dan akurasi model. Model yang terlalu kompleks sulit untuk diinterpretasi oleh manusia, padahal salah satu keunggulan fuzzy adalah kemampuannya dalam memberikan keputusan yang dapat dipahami secara linguistik.
5. Meski sistem fuzzy sudah banyak diterapkan di berbagai industri, tantangan tetap ada dalam adaptasi yang luas di bidang-bidang yang lebih kritis seperti autonomous systems atau AI, di mana akurasi, keandalan, dan ketangguhan sangat diperlukan.

6. Integrasi antara logika fuzzy dan machine learning, pengembangan sistem *hybrid*, serta pendekatan berbasis *Human-in-the-Loop*, semuanya berkontribusi terhadap peningkatan interpretabilitas sistem fuzzy.

4. KESIMPULAN

Beberapa peneliti yang tertarik mengembangkan *fuzzy logic* kemungkinan akan menghadapi tantangan. Area potensial untuk integrasi metode lain dengan fuzzy membuka peluang untuk aplikasi yang lebih kuat dan fleksibel di berbagai bidang, area potensial ini meliputi:

1. Logika fuzzy telah berkembang dari sekadar alat untuk menangani ketidakpastian menjadi sistem canggih yang diterapkan di berbagai bidang, termasuk kesehatan, keuangan, dan otomasi industri, didukung oleh kemajuan teknologi komputasi.
2. Penggabungan logika fuzzy dengan teknik seperti jaringan saraf tiruan, algoritma genetika, dan deep learning menghasilkan sistem hibrida yang lebih akurat, efisien, dan adaptif, memungkinkan solusi untuk permasalahan yang lebih kompleks.
3. Logika fuzzy memiliki peluang besar untuk berkembang bersama IoT, AI, dan big data, terutama untuk pengambilan keputusan waktu nyata, meningkatkan interpretabilitas AI, dan analisis data dengan ketidakpastian tinggi, didukung oleh teknologi komputasi modern.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahmadi, H., Huo, L., Arji, G., Sheikhtaheri, A., & Zhou, S. M. (2024). Early diagnosis of Parkinson's disease using a hybrid method of least squares support vector regression and fuzzy clustering. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 44(3), 569–585. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2024.08.009>
- Baldán, F. J., & Martínez, L. (2024). Time series features and fuzzy memberships combination for time series classification. *Neurocomputing*, 606(August). <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128368>
- Casari, M., Kowalski, P. A., & Po, L. (2024). Optimisation of the adaptive neuro-fuzzy inference system for adjusting low-cost sensors PM concentrations. *Ecological Informatics*, 83(March), 102781. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102781>
- Dore, P., Chakkor, S., Oualkadi, A. El, & Baghour, M. (2023). Real-time intelligent system for wind turbine monitoring using fuzzy system. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 3(July 2022), 100096. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100096>
- Elaggoune, Z., Maamri, R., & Boussebough, I. (2020). A fuzzy agent approach for smart data extraction in big data environments. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 32(4), 465–478. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.05.009>
- Figueroa-García, J. C., Neruda, R., & Hernandez-Perez, G. J. (2024). On cosine fuzzy sets and uncertainty quantification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 138(PA),

109241. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109241>
- Guo, X., Zheng, Z., Cheong, K. H., Zou, Q., Tiwari, P., & Ding, Y. (2024). Sequence homology score-based deep fuzzy network for identifying therapeutic peptides. *Neural Networks*, 178(May), 106458. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2024.106458>
- Hasan, M. M., Hossain, M. M., Rahman, M. M., Azad, A. K. M., Alyami, S. A., & Moni, M. A. (2023). FP-CNN: Fuzzy pooling-based convolutional neural network for lung ultrasound image classification with explainable AI. *Computers in Biology and Medicine*, 165(July 2022), 107407. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.107407>
- Kamthan, S., & Singh, H. (2023). Hierarchical fuzzy deep learning system for various classes of images. *Memories - Materials, Devices, Circuits and Systems*, 4(November 2022), 100023. <https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100023>
- Liang, J., & Liu, P. (2024). Shared manufacturing service evaluation based on intuitionistic fuzzy VIKOR. *Heliyon*, 10(8), e29250. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29250>
- Loganathan, S., Ramakrishnan, D., Sathiyamoorthy, M., & Azamathulla, H. M. (2024). Assessment of irrigational suitability of groundwater in Thanjavur district, Southern India using Mamdani fuzzy inference system. *Results in Engineering*, 21(November 2023), 101789. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101789>
- López-Guauque, J. A., & Gil-Lafuente, A. M. (2020). Fifty years of fuzzy research: A bibliometric analysis and a long-term comparative overview. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(5), 5413–5425. <https://doi.org/10.3233/JIFS-179634>
- Luukka, P., & Stoklasa, J. (2024). Possibilistic mean based defuzzification for fuzzy expert systems and fuzzy control—LSD for general fuzzy sets. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 441(November 2023), 115663. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115663>
- Mahmudah, R. S., Putri, D. I., Abdullah, A. G., Shafii, M. A., Hakim, D. L., & Setiadipura, T. (2024). Developing a Multi-Criteria Decision-Making model for nuclear power plant location selection using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Fuzzy VIKOR methods focused on socio-economic factors. *Cleaner Engineering and Technology*, 19(March), 100737. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100737>
- Mariadoss, S., & Augustin, F. (2023). Enhanced sugeno fuzzy inference system with fuzzy AHP and coefficient of variation to diagnose cardiovascular disease during pregnancy. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(8), 101659. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101659>
- Maroua, B., Laid, Z., Benbouhenni, H., Fateh, M., Debdouche, N., & Colak, I. (2024). Robust

- type 2 fuzzy logic control microgrid-connected photovoltaic system with battery energy storage through multi-functional voltage source inverter using direct power control. *Energy Reports*, 11(November 2023), 3117–3134. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.02.047>
- Martínez, J. S., John, R. I., Hissel, D., & Péra, M. C. (2012). A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles. *Information Sciences*, 190, 192–207. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.013>
- Mersadek, M., Nagi, F., Permal, N., Ramasamy, A. A. P., & Azwin, A. (2024). Takagi-sugeno type 1-2 fuzzy linear output controller for two-area load frequency control. *Systems and Soft Computing*, 6(February), 200083. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200083>
- Ouifak, H., & Idri, A. (2023). On the performance and interpretability of Mamdani and Takagi-Sugeno-Kang based neuro-fuzzy systems for medical diagnosis. *Scientific African*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01610>
- Patel, H. R., & Shah, V. A. (2022). Fuzzy Logic Based Metaheuristic Algorithm for Optimization of Type-1 Fuzzy Controller: Fault-Tolerant Control for Nonlinear System with Actuator Fault. *IFAC-PapersOnLine*, 55(1), 715–721. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.117>
- Pujaru, K., Adak, S., Kar, T. K., Patra, S., & Jana, S. (2024). A Mamdani fuzzy inference system with trapezoidal membership functions for investigating fishery production. *Decision Analytics Journal*, 11(May), 100481. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100481>
- Rahman, M. Z. U., Akbar, M. A., Leiva, V., Martin-Barreiro, C., Imran, M., Riaz, M. T., & Castro, C. (2024). An IoT-fuzzy intelligent approach for holistic management of COVID-19 patients. *Heliyon*, 10(1), e22454. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22454>
- Roy, S. K., Morshed, A., Mojumder, P., Hasan, M. M., & Islam, A. K. M. S. (2024). Innovative trend analysis technique with fuzzy logic and K-means clustering approach for identification of homogenous rainfall region: A long-term rainfall data analysis over Bangladesh. *Quaternary Science Advances*, 15(August), 100227. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100227>
- Sarebanzadeh, K., Hasheminejad, N., Alimohammadlou, M., & Es'haghi, M. (2024). Using fuzzy cognitive map in bow tie method for dynamic risk assessment of spherical storage tanks: A case study. *Heliyon*, 10(5), e26830. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26830>
- Shirinda, K., Kusakana, K., & Ostraszewski, M. (2024). Combinatorial optimization of a fuzzy logic-controlled grid connected photovoltaic with hybrid energy storage systems using time of use tariff. *Journal of Energy Storage*, 99(August). <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113251>

- Slim, H., & Nadeau, S. (2020). A proposition for combining rough sets, fuzzy logic and FRAM to address methodological challenges in safety management: A discussion paper. *Safety*, 6(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/safety6040050>
- Suyanto. (2021). *Artificial Intelligence*. Bandung: Penerbit Informatika.
- Woźniak, M., Szczotka, J., Sikora, A., & Zielonka, A. (2024). Fuzzy logic type-2 intelligent moisture control system. *Expert Systems with Applications*, 238(PA), 121581. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121581>
- Yakubu, A. U., Xiong, S., Jiang, Q., Zhao, J., Wu, Z., Wang, H., ... Wangsen, H. (2024). Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77(February), 834–843. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.030>
- Yan, S. R., Mohammadzadeh, A., & Ghaderpour, E. (2024). Type-3 fuzzy logic and Lyapunov approach for dynamic modeling and analysis of financial markets. *Heliyon*, 10(13), e33730. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33730>
- Yousofnejad, Y., & Es'haghi, M. (2024). Reliability evaluation of a medical oxygen supply system by FTA based on intuitionistic fuzzy sets. *Heliyon*, 10(15), e34649. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34649>