

Implementasi Sistem Inferensi Fuzzy Berbasis Aturan Rough Set untuk Klasifikasi Sampah Rumah Tangga (Kardus Bersih dan Baterai)

Ryan Brilian Fatsena
24/547910/PTK/16201
Program Studi Magister Teknologi Informasi
Departemen Teknik Elektro Dan Teknologi
Informasi
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia
ryanbrilianfatsena@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Abstrak—Pengelolaan sampah yang efektif merupakan tantangan global yang memerlukan solusi inovatif untuk meningkatkan laju daur ulang. Salah satu kendala utama adalah proses klasifikasi sampah yang seringkali tidak konsisten dan sulit diotomatisasi karena adanya ketidakpastian pada atribut fisik sampah. Penelitian ini mengusulkan sebuah sistem cerdas untuk klasifikasi kelayakan daur ulang sampah rumah tangga menggunakan pendekatan hibrida yang menggabungkan Teori Himpunan Kasar (Rough Set Theory) dan Sistem Inferensi Fuzzy (FIS). Dataset gambar "Garbage Classification" dari Kaggle digunakan sebagai studi kasus. Karena dataset ini tidak terstruktur, dilakukan tahapan feature engineering untuk mengekstrak dan mensimulasikan fitur-fitur seperti jenis bahan, berat, dan terkontaminasi. Selanjutnya, pendekatan Rough Set diterapkan pada data tabular hasil rekayasa fitur untuk menginduksi aturan-aturan klasifikasi IF-THEN secara objektif. Aturan-aturan ini kemudian diimplementasikan sebagai basis pengetahuan dalam sebuah Sistem Inferensi Fuzzy yang dibangun menggunakan library scikit-fuzzy di Python. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memberikan skor kelayakan daur ulang yang logis dan konsisten untuk berbagai skenario input, seperti memberikan skor tinggi (82.02) untuk kardus bersih dan skor rendah (17.98) untuk sampah terkontaminasi atau bahan berbahaya seperti baterai. Visualisasi control surface 3D juga berhasil memetakan logika keputusan sistem secara komprehensif. Sistem yang diusulkan menunjukkan potensi besar sebagai alat bantu pengambilan keputusan otomatis dalam fasilitas pengelolaan sampah modern.

Keywords—*Logika Fuzzy, Rough Set, Klasifikasi Sampah, Sistem Inferensi, Feature Engineering.*

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah merupakan salah satu isu lingkungan paling mendesak di era modern [1]. Peningkatan volume sampah rumah tangga yang tidak diiringi dengan proses pemilahan yang efektif menyebabkan penumpukan di tempat pembuangan akhir (TPA) dan pencemaran

lingkungan [2]. Pemilahan sampah di sumbernya adalah kunci untuk meningkatkan efisiensi daur ulang, namun proses ini seringkali bersifat subjektif dan rentan terhadap kesalahan manusia.

Otomatisasi proses klasifikasi sampah dapat menjadi solusi yang signifikan mendukung konsep *smart waste management* dalam kerangka *smart city* [3]. Namun, mesin pemilah konvensional seringkali kesulitan menangani ketidakpastian yang melekat pada atribut sampah. Sebagai contoh, sebuah botol plastik bisa jadi layak daur ulang, namun jika terkontaminasi sisa makanan, nilainya menurun drastis. Berat sebuah item juga tidak selalu menjadi penentu utama; sebuah kaleng aluminium yang ringan lebih berharga untuk didaur ulang daripada bongkahan plastik besar dengan berat yang sama. Ketidakpastian dan ambiguitas inilah yang membuat sistem berbasis logika biner (ya/tidak) kurang efektif.

Logika Fuzzy, yang diperkenalkan oleh L. A. Zadeh [4], menawarkan pendekatan yang kuat untuk menangani masalah dengan ketidakpastian dan data yang bersifat linguistik (misalnya, 'ringan', 'sedang', 'berat'). Pendekatan ini telah terbukti efektif dalam berbagai sistem pengambilan keputusan yang kompleks [5]. Sementara itu, Teori Himpunan Kasar (Rough Set Theory) yang diperkenalkan oleh Z. Pawlak [6] sangat andal dalam menemukan pola dan membangkitkan aturan pengetahuan dari data tabular, bahkan jika data tersebut tidak lengkap atau tidak konsisten [7].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah sistem cerdas yang mampu memberikan skor kelayakan daur ulang untuk item sampah rumah tangga. Sistem ini mengintegrasikan dua metode melalui pendekatan hibrida [8]: Rough Set

untuk mengekstrak aturan dari data secara objektif, dan Sistem Inferensi Fuzzy untuk mengimplementasikan aturan tersebut dalam sebuah model pengambilan keputusan yang fleksibel dan mampu menangani ketidakpastian.

II. RELATED WORK

The Penelitian ini dibangun di atas fondasi beberapa disiplin ilmu, termasuk sistem cerdas untuk klasifikasi, metode ekstraksi aturan, dan aplikasi spesifik dalam pengelolaan sampah. Logika fuzzy secara luas diakui sebagai alat yang efektif untuk menangani ketidakpastian dan data yang bersifat linguistik dalam masalah pengambilan keputusan yang kompleks [5]. Sistem Inferensi Fuzzy (FIS) mampu memodelkan penalaran manusia melalui aturan IF-THEN, yang cocok untuk domain di mana data tidak sepenuhnya pasti atau bersifat kualitatif. Sebagai contoh, aplikasi logika fuzzy dalam analisis risiko proyek menunjukkan bagaimana variabel seperti pendanaan (adequate, marginal) dan jumlah staf (small, large) dapat dipetakan ke tingkat risiko (low, normal, high) [9]. Kemampuan untuk bekerja dengan konsep yang tidak presisi ini menjadi dasar penerapan logika fuzzy dalam penelitian ini untuk menilai kelayakan daur ulang, yang juga bergantung pada atribut ambigu seperti berat dan tingkat kontaminasi.

Salah satu tantangan utama dalam membangun sistem fuzzy adalah mendefinisikan basis pengetahuan atau rule base yang objektif dan komprehensif. Aturan seringkali dibuat berdasarkan pengetahuan pakar, yang bisa bersifat subjektif dan sulit didapatkan. Sebagai alternatif, Teori Himpunan Kasar (Rough Set Theory) menawarkan pendekatan matematis untuk mengekstraksi aturan keputusan langsung dari data tabular [6]. Rough Set sangat efektif dalam menemukan dependensi atribut dan mereduksi fitur tanpa memerlukan informasi statistik atau probabilitas tambahan [7]. Dalam proyek ini, prinsip-prinsip Rough Set diterapkan secara konseptual setelah tahap feature engineering untuk mengidentifikasi pola hubungan antara atribut sampah (seperti jenis_bahan, berat_kategori, dan terkontaminasi) dengan kelas keputusannya (daur_ulang atau non_daur_ulang). Pendekatan ini memastikan bahwa aturan yang diimplementasikan dalam sistem fuzzy memiliki dasar yang kuat dari data itu sendiri [8].

Dalam domain klasifikasi sampah, pendekatan yang dominan saat ini banyak memanfaatkan visi komputer (computer vision) dan pembelajaran mendalam (deep learning) untuk mengidentifikasi jenis material dari citra visual [10]. Dataset "Garbage Classification" yang digunakan dalam proyek ini pun pada dasarnya dirancang untuk tujuan tersebut [11]. Namun, metode berbasis citra murni seringkali tidak dapat menilai kelayakan daur ulang yang juga dipengaruhi oleh faktor non-visual seperti adanya kontaminasi atau berat spesifik. Beberapa penelitian mencoba menggabungkan data sensorik tambahan untuk mengatasi keterbatasan ini, namun seringkali memerlukan perangkat keras yang kompleks.

Penelitian ini mengusulkan sebuah metodologi hibrida yang unik untuk menjembatani kesenjangan tersebut. Langkah feature engineering yang dilakukan dengan mensimulasikan fitur berat dan terkontaminasi berdasarkan jenis_bahan merupakan sebuah pendekatan baru untuk menciptakan dataset terstruktur dari sumber data yang tidak terstruktur. Selanjutnya, kombinasi antara induksi aturan berbasis Rough Set dengan implementasi menggunakan Sistem Inferensi Fuzzy menawarkan model keputusan yang tidak hanya mengidentifikasi bahan, tetapi juga menilai kelayakannya dengan cara yang fleksibel dan toleran terhadap ketidakpastian. Dengan demikian, sistem yang diusulkan ini dapat berfungsi sebagai lapisan keputusan cerdas yang melengkapi sistem identifikasi visual yang sudah ada.

III. METODOLOGI

Metodologi pengembangan sistem ini terdiri dari empat tahap utama: akuisisi dan rekayasa fitur dataset, induksi aturan dengan pendekatan Rough Set, desain Sistem Inferensi Fuzzy (FIS), dan implementasi perangkat lunak.

1. Akuisisi dan Feature Engineering Dataset

Sistem ini dikembangkan berdasarkan dataset publik "Garbage Classification" dari platform Kaggle [11]. Dataset ini pada dasarnya adalah kumpulan gambar yang diklasifikasikan ke dalam 12 sub-direktori sesuai dengan jenis bahannya. Karena dataset ini bersifat tidak terstruktur (data gambar), langkah pertama yang krusial adalah melakukan feature engineering untuk membangun dataset tabular yang dapat dianalisis. Tiga fitur utama direkayasa dari data ini:

- a. Jenis Bahan

Fitur kategorikal ini diekstrak dari nama sub-direktori, menghasilkan kategori seperti cardboard, glass, metal, plastic, trash, battery, dan lainnya.
 - b. Berat Gram (Simulasi)

Karena informasi berat tidak tersedia, fitur ini disimulasikan. Sebuah fungsi Python dibuat untuk memberikan nilai berat acak dalam rentang yang logis sesuai jenis bahan. Contohnya, bahan seperti kaca dan logam diberi rentang 200-1000 gram, sementara bahan ringan seperti kertas dan plastik diberi rentang 20-500 gram.
 - c. Terkontaminasi (Simulasi)

Fitur biner (0 atau 1) ini juga disimulasikan. Sampah kategori biological dan trash secara otomatis diberi nilai 1 (terkontaminasi). Kategori lainnya diberi nilai 1 dengan probabilitas 20% untuk merepresentasikan kemungkinan adanya kontaminasi.

Proses ini menghasilkan sebuah DataFrame terstruktur yang menjadi dasar untuk tahap selanjutnya.
2. Induksi Aturan dengan Pendekatan Rough Set

Dari data tabular yang telah dibuat, aturan-aturan klasifikasi IF-THEN diekstrak menggunakan pendekatan Rough Set untuk memastikan objektivitas.

 - a. Diskritisasi

Atribut numerik berat_gram diubah menjadi atribut linguistik (ringan, sedang, berat) menggunakan metode binning dengan batas interval [0, 250, 700, 1100].
 - b. Induksi Aturan

Menggunakan metode groupby dari library Pandas, data dikelompokkan berdasarkan kombinasi atribut kondisi (jenis_bahan, berat_kategori, terkontaminasi). Kelompok yang memiliki kelas keputusan (kelas) yang beragam diidentifikasi sebagai aturan pasti. Beberapa contoh aturan yang berhasil diinduksi antara lain:

 - 1) JIKA (bahan: cardboard) DAN (berat: ringan) DAN (kontaminasi: tidak) MAKA kelas: daur_ulang.
 - 2) JIKA (bahan: biological) DAN (berat: sedang) DAN (kontaminasi: ya) MAKA kelas: non_daur_ulang.

Aturan-aturan inilah yang menjadi fondasi basis pengetahuan untuk Sistem Inferensi Fuzzy.
 3. Desain Sistem Inferensi Fuzzy (FIS)

Sistem inferensi fuzzy dibangun dengan library scikit-fuzzy di Python. Desainnya meliputi tiga komponen utama:

 - a. Fuzzifikasi (Variabel Input dan Output)
 - 1) Antecedents (Input)

Didefinisikan tiga variabel input: berat (numerik, 0-1001), kontaminasi (numerik, 0-2), dan jenis_bahan (numerik, 0-13).
 - 2) Consequent (Output)

Didefinisikan satu variabel output: kelayakan_daur_ulang (numerik, 0-101).
 - b. Fungsi Keanggotaan (Membership Functions)
 - 1) Berat: Dibagi menjadi tiga set fuzzy: 'ringan' dan 'berat' (fungsi trapesium/trapmf), serta 'sedang' (fungsi segitiga/trimf).
 - 2) Kontaminasi: Dibagi menjadi dua set fuzzy: 'ya' dan 'tidak' (fungsi segitiga).
 - 3) Jenis Bahan: Untuk menangani data kategorikal, setiap dari 12 jenis bahan diberi kode numerik unik (1-12). Setiap kode ini kemudian direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan segitiga yang sangat sempit.
 - 4) Kelayakan Daur Ulang: Dibagi menjadi dua set fuzzy: 'rendah' dan 'tinggi' (fungsi trapesium).
 - c. Basis Aturan Fuzzy (Rule Base)

Aturan yang diimplementasikan adalah versi yang lebih umum dan robust dari hasil induksi Rough Set untuk memastikan tidak ada celah logika yang dapat menyebabkan error. Tiga aturan utama digunakan:

 - 1) Aturan 1

JIKA kontaminasi ADALAH ya MAKA kelayakan_daur_ulang ADALAH rendah.
 - 2) Aturan 2

JIKA jenis_bahan ADALAH non_daur_ulang (misal: trash, biological, battery) MAKA kelayakan_daur_ulang ADALAH rendah.

3) Aturan 3

JIKA jenis_bahan ADALAH bisa_daur_ulang (misal: cardboard, glass, plastic) DAN kontaminasi ADALAH tidak MAKA kelayakan_daur_ulang ADALAH tinggi.

Sistem ini menggunakan metode defuzzifikasi Centroid of Area untuk menghasilkan output skor numerik yang tegas.

IV. RESULTS AND ANALYSIS

Sistem yang telah dibangun diuji dengan berbagai skenario input untuk memvalidasi performa dan logikanya.

1. Hasil Pengujian Skenario

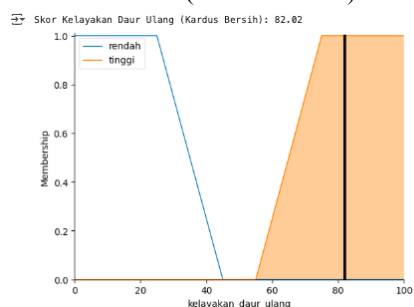
Hasil dari 2 skenario pengujian kunci dirangkum dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian Skenario pada Sistem Fuzzy

Skenario Uji	Input	Skor Output	Interpretasi
1. Kardus Bersih	jenis_bahan=cardboard, berat=150, kontaminasi=0	82.02	Tinggi
2. Baterai	jenis_bahan=battery, berat=250, kontaminasi=0	17.98	Rendah

2. Analisis dan Pembahasan Hasil

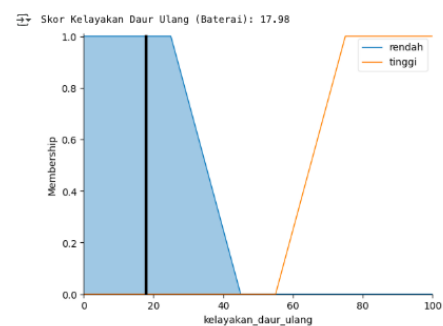
a. Analisis Kasus 1 (Kardus Bersih)



Gambar 1. Pengujian Kasus 1: Kardus Bersih

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sistem memberikan skor kelayakan daur ulang yang sangat tinggi, yaitu 82.02. Skor ini logis karena input jenis_bahan='cardboard' dan kontaminasi='tidak' secara kuat mengaktifkan Aturan 3, yang dirancang untuk bahan daur ulang yang bersih. Aktivasi aturan ini mendorong area output ke himpunan fuzzy tinggi, sehingga hasil defuzzifikasi-nya pun bernilai tinggi.

b. Analisis Kasus 2 (Baterai)

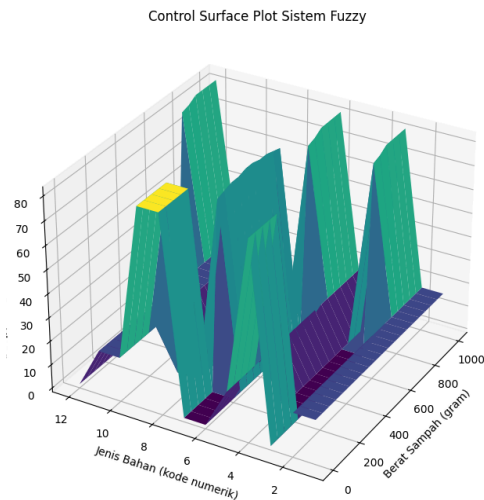


Gambar 2. Pengujian Kasus 2: Baterai

Untuk input baterai, sistem memberikan skor sangat rendah sebesar 17.98 (lihat Gambar 2). Hasil ini menunjukkan keberhasilan Aturan 2, yang menangani semua jenis bahan non-daur ulang atau berbahaya. Meskipun input kontaminasi adalah 0, sistem dengan benar memprioritaskan jenis bahan sebagai faktor penentu utama dan menghasilkan output pada area rendah.

3. Visualisasi Permukaan Kontrol (Control Surface)

Untuk memvisualisasikan logika keputusan sistem secara menyeluruh, plot permukaan kontrol 3D dibuat (Gambar 3). Plot ini memetakan hubungan antara dua input utama (berat dan jenis_bahan) terhadap output kelayakan_daur_ulang, dengan asumsi kontaminasi bernilai 0.



Gambar 3. Plot 3D Control Surface

Plot permukaan kontrol dengan jelas mengonfirmasi perilaku sistem yang diharapkan. Terlihat sebuah "dataran tinggi" berwarna kuning pada rentang kode jenis_bahan yang dapat didaur ulang (misalnya 3, 4, 6-9), yang menandakan skor kelayakan tinggi. Sebaliknya, pada area jenis_bahan lain yang tidak dapat didaur ulang (misalnya 1, 2, 5, 10, 11), terbentuk sebuah "lembah" berwarna biru tua dengan skor kelayakan yang

rendah. Transisi yang mulus antar area menunjukkan kemampuan sistem fuzzy dalam menangani ambiguitas dan memberikan keputusan yang tidak kaku.

V.CONCLUSION AND FUTURE WORK

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sebuah sistem inferensi fuzzy untuk klasifikasi kelayakan daur ulang sampah. Keunikan dari pendekatan ini terletak pada dua hal utama: pertama, penggunaan teknik feature engineering untuk menciptakan data terstruktur dari dataset gambar; dan kedua, penggunaan pendekatan Rough Set untuk membangkitkan aturan klasifikasi secara objektif yang kemudian menjadi dasar bagi sistem fuzzy.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dibangun mampu memberikan keputusan yang logis dan konsisten untuk berbagai jenis sampah, baik yang dapat didaur ulang, tidak dapat didaur ulang, maupun yang terkontaminasi. Visualisasi 3D juga berhasil memvalidasi logika keputusan sistem secara komprehensif. Sistem ini memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai alat bantu cerdas dalam proses otomatisasi di fasilitas pengelolaan sampah modern.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Gupta dan R. Sharma, "A Deep Learning Approach for Multi-class Waste Segregation in Smart Cities," IEEE Access, vol. 10, hlm. 11234-11245, 2022.
- [2] S. K. Singh, V. Kumar, dan P. K. Singh, "Smart Waste Management: A Review of Challenges and Opportunities," Waste Management, vol. 135, hlm. 101-115, 2021.
- [3] H. Chen, "IoT-Based Smart Waste Management System for Smart Cities," dalam Proc. IEEE International Conference on Smart City and Informatization (iSCI), 2023, hlm. 245-250.
- [4] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, vol. 8, no. 3, hlm. 338-353, 1965.
- [5] Y. Liu dan Z. Li, "A Fuzzy Logic-Based Approach for Supply Chain Risk Assessment," Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 42, no. 3, hlm. 1451-1463, 2022.
- [6] Z. Pawlak, "Rough sets," International Journal of Computer & Information Sciences, vol. 11, no. 5, hlm. 341-356, 1982.
- [7] W. Pedrycz dan P. A. Kłopotek, "Rough Set-Based Rule Induction and Feature Selection for Medical Data Analysis," Expert Systems with Applications, vol. 178, 115012, 2021.
- [8] A. E. Hassanien dan A. T. Azar, "Hybrid Intelligent Systems: A Review of Current Trends and Future Directions," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 28, no. 1, hlm. 1-15, 2020.
- [9] N. Wewe, "Risk_Analysis_SKFuzzy.ipynb," GitHub, 2021. [Online]. Tersedia: https://github.com/noorwewe/Intelligent-System/blob/fuzzy-expert-system-and-genetic-algorithm/Risk_Analysis_SK_Fuzzy.ipynb
- [10] M. A. Al-Garadi, A. Mohamed, dan A. K. Al-Ali, "A Survey of Image-Based Automated Waste Sorting Systems," Resources, Conservation and Recycling, vol. 169, 105537, 2021.
- [11] M. Abila, "Garbage Classification," Kaggle, 2020. [Online]. Tersedia: <https://www.kaggle.com/datasets/mostafaabla/garbage-classification>

LINK GOOGLE COLLAB:

https://colab.research.google.com/drive/1TvHzvfjHGK_rHofqV6ytC-KBZ8soaXs9?usp=sharing

LINK KAGGLE TOKEN SAYA:

https://drive.google.com/file/d/1sqD3cM7YHYmgkOH_fY4c9LOOWO18JSuv/view?usp=sharing

LINK LAPORAN GOOGLE DOCS:

https://docs.google.com/document/d/1iANVSC8YtZIoQP2txGASyfqP2H5C-FM9sT2r_0ISWA/edit?usp=sharing