



Diagnosis Kerusakan Alat Berat dan Mobil Berbasis *Web* Menggunakan Algoritma *Fuzzy Tsukamoto*

Kiki Noviana Saputri¹, Bambang Pramono², Muh. Yamin³

^{1,2,3} Informatika, Teknik, Universitas Halu Oleo

kikinoviana48@gmail.com, bambang_pramono@uho.ac.id, muh_yamin@uho.ac.id

Abstract

Daily inspection of heavy equipment and operational vehicles is essential to prevent unexpected failures, reduce downtime, and support safe operation. At PT Bumi Sarana Beton, inspection data were previously recorded manually, creating risks of inconsistent assessment, delayed reporting, and fragmented documentation. This study develops a web-based system for damage diagnosis and operational feasibility evaluation using the Fuzzy Tsukamoto method. The system processes daily inspection data grouped into three assessment variables: main operational system, mobility and structure, and safety and control. Component conditions are converted into numerical scores, fuzzified through membership functions, evaluated using fuzzy rules and minimum alpha-predicate values, and defuzzified using a weighted average to produce a crisp feasibility score. The final result is mapped into three operational statuses: Not Feasible, Needs Attention, and Feasible. A hard safety override is also applied to critical components so that a damaged or missing safety item can force the final status to Not Feasible regardless of the fuzzy score. The system was implemented as a web application with inspection forms, photo evidence, diagnostic results, inspection history, and reporting functions. White-box testing showed that all 19 internal test scenarios passed, while a preliminary confusion-matrix evaluation on six test cases achieved 83.33% accuracy. The results indicate that the proposed system can support faster, more consistent, and traceable inspection decisions, although broader testing with more balanced operational data is still required.

Keywords: Tsukamoto Fuzzy, Fault Diagnosis, Operational Feasibility, Heavy Equipment, Web-Based System

Abstrak

Pemeriksaan harian alat berat dan kendaraan operasional penting untuk mencegah kerusakan tidak terduga, menekan waktu henti dan mendukung keselamatan operasi. Pada PT Bumi Sarana Beton, data pemeriksaan sebelumnya dicatat secara manual sehingga berisiko menimbulkan ketidakkonsistenan penilaian, keterlambatan pelaporan, dan dokumentasi yang terpisah. Penelitian ini mengembangkan sistem berbasis web untuk diagnosis kerusakan dan evaluasi kelayakan operasional menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Sistem mengolah data pemeriksaan harian yang dikelompokkan ke dalam tiga variabel penilaian, yaitu sistem utama operasional, mobilitas dan struktur, serta *safety* dan kontrol. Kondisi komponen dikonversi menjadi skor numerik, difuzzifikasi melalui fungsi keanggotaan, dievaluasi menggunakan aturan fuzzy dan nilai alpha-predikat minimum, kemudian didefuzzifikasi dengan rata-rata terbobot untuk menghasilkan nilai kelayakan tegas. Hasil akhir dipetakan ke dalam tiga status operasional, yaitu Tidak Layak, Perlu Perhatian, dan Layak. Sistem juga menerapkan hard safety override pada komponen kritis sehingga kondisi rusak atau hilang dapat mengunci status akhir menjadi Tidak Layak tanpa bergantung pada nilai fuzzy. Implementasi sistem mencakup form P2H, unggah foto bukti, hasil diagnosis, riwayat pemeriksaan, dan laporan. Pengujian white box menunjukkan seluruh 19 skenario internal lulus, sedangkan evaluasi awal confusion matrix terhadap enam data uji menghasilkan akurasi 83,33%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat mendukung keputusan pemeriksaan yang lebih cepat, konsisten, dan dapat ditelusuri, meskipun pengujian lanjutan dengan data yang lebih besar dan seimbang masih diperlukan.

Kata Kunci: Fuzzy Tsukamoto, Diagnosis Kerusakan, Kelayakan Operasional, Alat Berat, Sistem Berbasis *Web*

1. Pendahuluan

Alat berat dan kendaraan operasional menjadi komponen penting dalam industri konstruksi, produksi beton, pertambangan, dan berbagai kegiatan lapangan yang menuntut produktivitas tinggi. Ketersediaan unit yang andal berpengaruh langsung terhadap kelancaran produksi, distribusi material, mobilitas personel, serta pencapaian target pekerjaan. Gangguan pada mesin, sistem mobilitas, struktur, atau komponen keselamatan dapat menyebabkan penghentian operasi, keterlambatan kegiatan, peningkatan biaya perbaikan, dan risiko kecelakaan. Oleh sebab itu, pemeriksaan kondisi sebelum unit digunakan perlu dilakukan secara rutin dan terdokumentasi. Penelitian mengenai produktivitas alat berat menunjukkan bahwa kinerja proyek sangat dipengaruhi oleh kesiapan peralatan dan pengelolaan operasional yang memadai (Sihale et al., 2023).

Pada PT Bumi Sarana Beton, proses Pemeriksaan Harian (P2H) sebelumnya masih mengandalkan formulir manual. Pola pencatatan tersebut memiliki beberapa keterbatasan, seperti keterlambatan rekapitulasi data, kesulitan dalam menelusuri riwayat kondisi unit secara cepat, serta bukti visual yang tidak selalu terhubung dengan

hasil pemeriksaan. Selain itu, belum tersedia mekanisme pengolahan data yang terstandarisasi untuk menggabungkan seluruh hasil pemeriksaan menjadi dasar penentuan kelayakan operasional unit. Digitalisasi P2H dapat mengurangi hambatan tersebut karena data pemeriksaan, identitas unit, tanggal pemeriksaan, operator, catatan, dan foto bukti kondisi dapat disimpan serta dikelola dalam satu sistem. Penerapan aplikasi dalam pelaksanaan perawatan harian dapat meningkatkan efisiensi pencatatan dan monitoring dibandingkan dengan prosedur manual (Eltryandi et al. 2024).

Permasalahan selanjutnya terletak pada proses penentuan kelayakan operasional berdasarkan keseluruhan hasil pemeriksaan. Pada setiap item P2H, petugas memilih salah satu kategori kondisi, yaitu baik, kurang, rusak, atau hilang. Setiap kategori tersebut kemudian dikonversi menjadi skor numerik dan diolah berdasarkan kelompok komponen yang diperiksa. Banyaknya item pemeriksaan dengan kondisi dan tingkat kepentingan yang berbeda menyebabkan keputusan kelayakan tidak dapat hanya didasarkan pada satu komponen tertentu atau pada penjumlahan skor secara sederhana. Logika fuzzy relevan digunakan untuk mengolah skor agregat karena mampu merepresentasikan batas yang tidak tegas antara kondisi buruk, sedang, dan baik. Logika fuzzy menggunakan nilai keanggotaan pada interval 0 sampai 1 sehingga suatu nilai dapat memiliki tingkat keanggotaan yang berbeda pada lebih dari satu himpunan kondisi. Melalui proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, berbagai indikator pemeriksaan dapat diolah menjadi nilai akhir yang digunakan untuk menentukan status kelayakan operasional unit (Adha et al., 2022).

Relevansi penggunaan logika fuzzy dalam penelitian ini didukung oleh sejumlah penelitian terdahulu pada bidang diagnosis kendaraan. Akazue et al. (2024) mengembangkan sistem diagnosis kerusakan mobil berbasis fuzzy (Akazue et al. 2024), sedangkan Nugroho dan Susilawati (2025) menerapkan Fuzzy Inference System Tsukamoto untuk mendeteksi kerusakan sepeda motor listrik (Nugroho dan Susilawati 2025). Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode fuzzy dapat mengolah berbagai indikator kondisi kendaraan menjadi hasil diagnosis yang mendukung proses pengambilan keputusan.

Meskipun demikian, penelitian terdahulu masih berfokus pada diagnosis kerusakan kendaraan dan belum mengintegrasikan proses Pemeriksaan Harian beberapa jenis unit, pengelompokan komponen P2H, perhitungan Fuzzy Tsukamoto, dokumentasi foto, riwayat pemeriksaan, laporan kerusakan, serta penguncian keputusan berdasarkan komponen keselamatan kritis dalam satu sistem berbasis web. Kesenjangan tersebut menjadi dasar pelaksanaan penelitian ini. Kebaruan praktis penelitian terletak pada integrasi tiga kelompok variabel P2H, yaitu sistem utama operasional, mobilitas dan struktur, serta safety dan kontrol, dengan mekanisme hard safety override. Mekanisme tersebut digunakan untuk mencegah skor agregat yang tinggi menutupi kondisi berbahaya pada item keselamatan kritis, seperti sistem pengereman atau safety belt yang berada dalam kondisi rusak atau hilang.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem diagnosis kerusakan dan evaluasi kelayakan operasional alat berat serta kendaraan berbasis web menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Sistem dirancang untuk mengonversi kategori kondisi setiap item pemeriksaan menjadi skor numerik, mengolah skor tersebut berdasarkan tiga kelompok variabel P2H dan menghasilkan tiga kategori keputusan yaitu Tidak Layak, Perlu Perhatian dan Layak. Sistem juga dirancang untuk menyajikan hasil pemeriksaan secara terstruktur bagi operator dan manajemen. Pertanyaan penelitian yang dijawab meliputi bagaimana algoritma Fuzzy Tsukamoto diimplementasikan pada data P2H, bagaimana sistem menentukan status kelayakan operasional secara digital serta sejauh mana hasil implementasi dapat divalidasi melalui pengujian internal dan evaluasi klasifikasi awal.

2. Metode Penelitian

2.1. Desain penelitian dan sumber data

Penelitian menggunakan pendekatan pengembangan sistem. Data diperoleh melalui studi literatur dan survei lapangan pada lingkungan operasional PT Bumi Sarana Beton. Studi literatur digunakan untuk mengidentifikasi konsep diagnosis kerusakan, Fuzzy Tsukamoto, pemeriksaan harian, pengembangan web, dan pengujian sistem. Survei lapangan digunakan untuk memahami alur P2H, jenis unit, item pemeriksaan, kondisi yang sering ditemukan, serta kebutuhan pengguna. Komponen inspeksi disusun menjadi tiga kelompok penilaian agar data dari berbagai item dapat diproses secara lebih terstruktur.

Tiga variabel masukan yang digunakan ialah Sistem Utama Operasional, Mobilitas dan Struktur, serta Safety dan Kontrol. Setiap kelompok memperoleh nilai dari rata-rata skor item yang termasuk di dalamnya. Kondisi tiap item diubah menjadi nilai crisp, yaitu Baik = 100, Kurang = 60, Rusak = 20, dan Hilang = 0. Konversi ini membuat penilaian kualitatif dapat diolah oleh mesin inferensi. Nilai kelompok berada pada skala 0 sampai 100. Contoh item yang digunakan dalam skenario perhitungan ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kelompok variabel dan contoh item pemeriksaan

Variabel	Contoh item	Fungsi penilaian
Sistem Utama Operasional	Air radiator, air aki, oli mesin	Menilai kesiapan komponen utama yang mendukung operasi unit
Mobilitas dan Struktur	Tekanan ban, kondisi ban, baut roda	Menilai kemampuan bergerak dan integritas struktur pendukung
Safety dan Kontrol	Minyak rem, APAR, safety belt	Menilai aspek keselamatan, kontrol, dan perlindungan operator

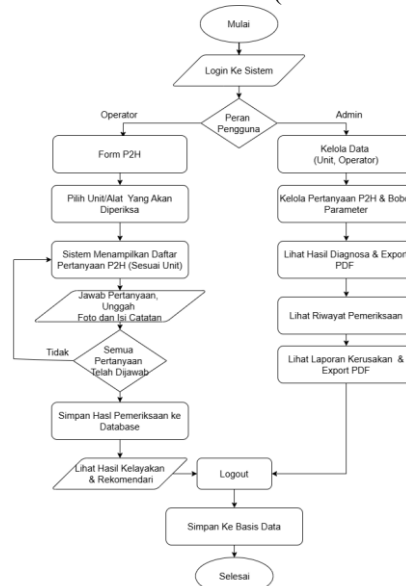
DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.12158>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Beberapa item ditandai sebagai komponen kritis. Jika komponen kritis berada pada kondisi rusak atau hilang, sistem mengaktifkan hard safety override dan menetapkan status akhir Tidak Layak. Pendekatan ini dipilih karena evaluasi kelayakan tidak cukup hanya berdasarkan nilai rata-rata. Dalam keselamatan operasional, satu komponen kritis dapat menjadi alasan untuk menghentikan penggunaan unit. Analisis kegagalan komponen alat berat menunjukkan bahwa kerusakan material dan sistem hidrolik dapat berkembang menjadi gangguan serius ketika tidak dideteksi dan ditangani secara tepat (Saputra et al., 2025; Samole & Jayatun, 2023).

2.2. Pengembangan sistem

Pengembangan perangkat lunak mengikuti tahapan Rational Unified Process yang meliputi inception, elaboration, construction, dan transition. Pada tahap inception dilakukan identifikasi kebutuhan, aktor, batasan sistem, data unit, item checklist, dan kebutuhan diagnosis. Tahap elaboration berfokus pada pemodelan use case, activity diagram, sequence diagram, class diagram, struktur basis data, serta rancangan antarmuka. Tahap construction mencakup implementasi aplikasi web, modul P2H, modul Fuzzy Tsukamoto, penyimpanan foto, hasil diagnosis, riwayat, laporan, dan pengujian. Tahap transition dilakukan melalui penyiapan sistem agar dapat digunakan oleh pengguna serta perbaikan berdasarkan hasil pengujian. Pendekatan RUP relevan untuk pengembangan yang membutuhkan iterasi dan pemodelan sistem secara terstruktur (Fariz & Riswandha, 2024).

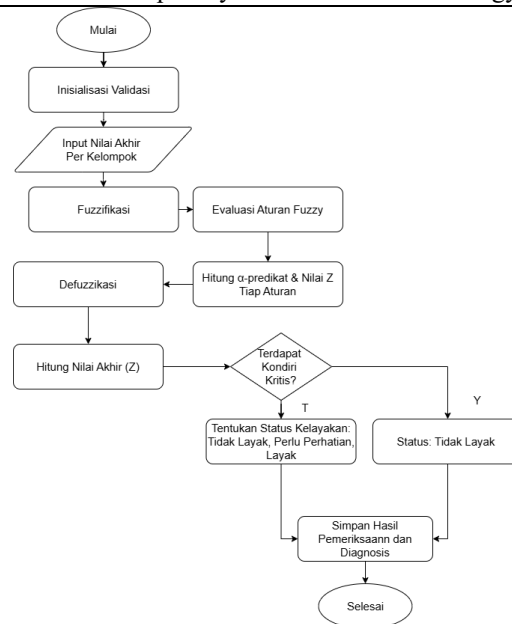


Gambar 1. Alur kerja sistem secara umum

Sistem memiliki dua peran utama, yaitu operator dan admin. Operator melakukan inspeksi P2H, memilih unit, mengisi kondisi komponen, mengunggah foto, menambahkan catatan, melihat hasil diagnosis, dan meninjau riwayat pemeriksaan. Admin mengelola data pengguna, unit, master checklist, bobot atau parameter, memantau seluruh hasil diagnosis, melihat laporan kerusakan, serta mengekspor dokumen. Alur umum sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Alur ini menghubungkan input pemeriksaan, penyimpanan basis data, proses inferensi, keputusan kelayakan, dan pelaporan dalam satu aplikasi.

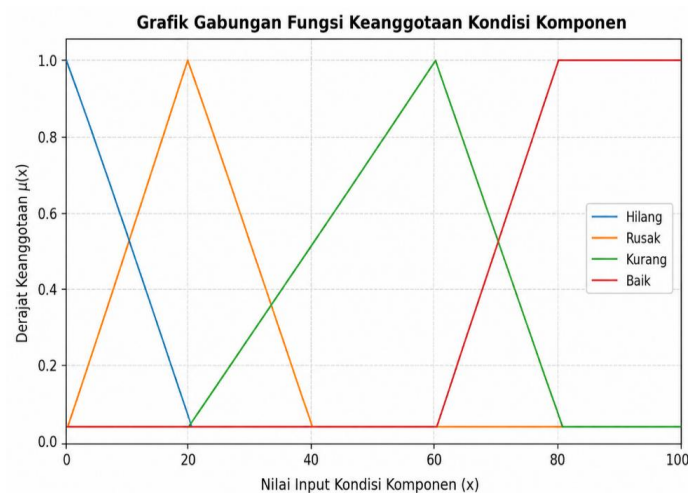
2.3. Model Fuzzy Tsukamoto

Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk mengolah tiga nilai kelompok hasil P2H. Tahapan utama terdiri atas normalisasi masukan ke rentang 0 sampai 100, fuzzifikasi, evaluasi aturan, perhitungan alpha-predikat menggunakan operator MIN, penentuan nilai crisp pada setiap aturan aktif, defuzzifikasi, dan pemetaan nilai akhir menjadi status kelayakan. Diagram proses ditunjukkan pada Gambar 2. Setelah nilai akhir diperoleh, sistem memeriksa kembali item kritis. Jika terdapat pelanggaran keselamatan kritis, status akhir dioverride menjadi Tidak Layak, sedangkan status fuzzy asli tetap dapat disimpan untuk kebutuhan audit.



Gambar 2. Alur perhitungan Fuzzy Tsukamoto dan pemeriksaan kondisi kritis

Fungsi keanggotaan kondisi komponen menggunakan empat istilah linguistik, yaitu Hilang, Rusak, Kurang, dan Baik. Representasi fungsi keanggotaan pada skala 0 sampai 100 ditunjukkan pada Gambar 3. Hilang memiliki derajat terbesar pada nilai sangat rendah, Rusak berpusat di sekitar nilai 20, Kurang berpusat di sekitar nilai 60, sedangkan Baik meningkat menuju nilai 80 dan mempertahankan derajat maksimum sampai 100. Bentuk fungsi ini memungkinkan nilai kelompok yang berada di wilayah transisi memiliki keanggotaan pada lebih dari satu himpunan.



Gambar 3. Fungsi keanggotaan kondisi komponen pada skala 0 sampai 100

Derajat aktivasi setiap aturan dihitung menggunakan operator MIN karena anteseden dihubungkan dengan operator AND. Secara umum, alpha-predikat untuk aturan ke-i dinyatakan sebagai nilai minimum dari derajat keanggotaan ketiga variabel masukan. Setiap aturan aktif menghasilkan nilai crisp z_i sesuai konsekuennya. Nilai akhir dihitung menggunakan rata-rata terbobot sebagaimana Persamaan (1).

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i \times z_i)}{\sum \alpha_i} \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), α_i adalah alpha-predikat aturan ke-i, z_i adalah nilai crisp yang dihasilkan oleh konsekuen aturan ke-i, dan Z adalah nilai akhir hasil defuzzifikasi. Nilai Z kemudian dipetakan menjadi tiga status: $Z < 40$ sebagai Tidak Layak, $40 \leq Z \leq 70$ sebagai Perlu Perhatian, dan $Z > 70$ sebagai Layak. Batas tersebut digunakan sebagai aturan keputusan pada sistem yang dikembangkan. Fuzzy Tsukamoto dipilih karena setiap aturan dapat menghasilkan keluaran crisp dan seluruh keluaran dapat digabungkan secara transparan melalui rata-rata terbobot. Penelitian Olmedo-García et al. (2025) juga memperlihatkan penggunaan inferensi Tsukamoto pada sistem kontrol yang membutuhkan keluaran tegas dari kombinasi kondisi fuzzy.

2.4. Pengujian sistem

Pengujian terdiri atas white box testing dan evaluasi klasifikasi menggunakan confusion matrix. White box testing menelusuri struktur internal program, termasuk pembacaan checklist, konversi skor, validasi item kritis, pembatasan input ke rentang 0 sampai 100, fungsi keanggotaan, aktivasi aturan, perhitungan alpha-predikat, nilai z, defuzzifikasi, trace perhitungan, fixture data, rule coverage, dan hard safety override. Teknik white box relevan untuk memeriksa alur logika internal serta kondisi batas suatu program (Pratiwi & Widiyanti, 2025).

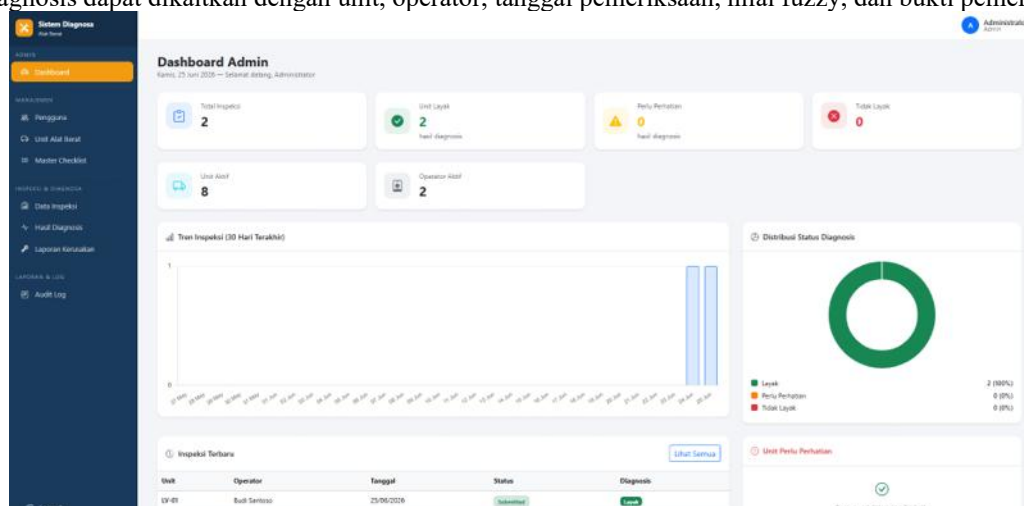
Confusion matrix digunakan untuk membandingkan status aktual pada data uji dengan status yang dihasilkan sistem. Metrik yang dihitung meliputi accuracy, precision, recall, dan F1-score. Karena ukuran data uji masih kecil, hasil confusion matrix diposisikan sebagai evaluasi awal, bukan bukti final generalisasi sistem. Validasi yang lebih kuat memerlukan jumlah data lebih besar, distribusi kelas lebih seimbang, dan label aktual yang konsisten dari pihak berwenang di lapangan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Implementasi sistem berbasis web

Hasil penelitian berupa aplikasi web yang mengintegrasikan pemeriksaan P2H, diagnosis fuzzy, dokumentasi foto, riwayat inspeksi, laporan kerusakan, dan rekap hasil diagnosis. Sistem dibangun agar data pemeriksaan tidak berhenti sebagai formulir terpisah, tetapi langsung menjadi basis data kondisi unit yang dapat ditelusuri. Setelah login, operator dapat memilih unit, mengisi tanggal, memastikan identitas operator, menjawab checklist kondisi, mengunggah foto, menyimpan draft, dan mengirim inspeksi. Ketika inspeksi dikirim, sistem menghitung nilai setiap kelompok dan meneruskan hasilnya ke modul Fuzzy Tsukamoto.

Dashboard admin menyajikan ringkasan jumlah inspeksi, status unit, tren inspeksi, distribusi diagnosis, data inspeksi terbaru, dan unit yang memerlukan perhatian. Informasi tersebut membantu manajemen melihat kondisi armada tanpa harus membaca setiap formulir satu per satu. Tampilan dashboard ditunjukkan pada Gambar 4. Selain dashboard, admin dapat membuka halaman hasil diagnosis, menggunakan filter tanggal, status, unit, atau operator, serta mengekspor laporan dalam format PDF. Pola ini mendukung transparansi dan keterlacakan karena hasil diagnosis dapat dikaitkan dengan unit, operator, tanggal pemeriksaan, nilai fuzzy, dan bukti pemeriksaan.



Gambar 4. Dashboard admin sistem diagnosis kelayakan alat berat

Digitalisasi inspeksi memberikan beberapa manfaat operasional. Pertama, data unit tersimpan secara terpusat. Kedua, hasil penilaian dapat dihitung dengan formula yang sama untuk seluruh operator. Ketiga, bukti foto memperkuat dokumentasi kondisi aktual. Keempat, riwayat unit memudahkan penelusuran perubahan kondisi dari waktu ke waktu. Temuan ini sejalan dengan penelitian Eltryandi et al. (2024) yang memperlihatkan manfaat aplikasi digital pada P2H, serta penelitian lain mengenai pengembangan sistem web yang menekankan integrasi data dan kemudahan akses sebagai faktor utama keberhasilan aplikasi operasional (Hendri et al., 2023).

3.2. Hasil antarmuka diagnosis dan pelaporan

Halaman hasil diagnosis menampilkan unit, operator, tanggal pemeriksaan, nilai fuzzy, status, dan aksi untuk melihat detail atau mengekspor laporan. Gambar 5 memperlihatkan implementasi halaman tersebut. Pada contoh tampilan, sistem dapat menyimpan beberapa hasil pemeriksaan dan membedakan status Layak maupun Tidak Layak. Fitur filter membantu admin mencari data berdasarkan tanggal, status kelayakan, unit, dan operator. Penyajian ini penting karena keluaran algoritma tidak hanya berupa angka, tetapi juga harus dapat dibaca dan digunakan dalam proses kerja.

Gambar 5. Halaman hasil diagnosis dan rekap nilai fuzzy

Selain hasil diagnosis, sistem memiliki riwayat P2H, laporan kerusakan, audit log, dan ekspor PDF. Integrasi fitur tersebut memperluas fungsi sistem dari sekadar kalkulator fuzzy menjadi perangkat pencatatan operasional. Namun, nilai fuzzy tetap harus dibaca bersama data checklist dan bukti pemeriksaan. Sistem tidak menggantikan kewenangan mekanik atau supervisor dalam melakukan inspeksi teknis yang memerlukan pengukuran khusus, pembongkaran, atau diagnosis mendalam. Posisi sistem adalah sebagai alat bantu keputusan untuk mempercepat identifikasi kondisi, menstandarkan pengolahan data P2H, dan menyediakan rekam jejak yang dapat diaudit.

3.3. Hasil pengujian white box

Pengujian white box terdiri atas 19 skenario yang menguji fungsi internal sistem. Satu skenario digunakan sebagai smoke test untuk memastikan framework unit test berjalan. Delapan belas skenario lainnya memeriksa hard safety, perhitungan skor checklist, batas fungsi keanggotaan, status fuzzy, pembatasan input, defuzzifikasi, trace internal, fixture data, dan cakupan aturan. Seluruh skenario dinyatakan lulus. Rekapitulasi pengujian ditampilkan pada Tabel 5.

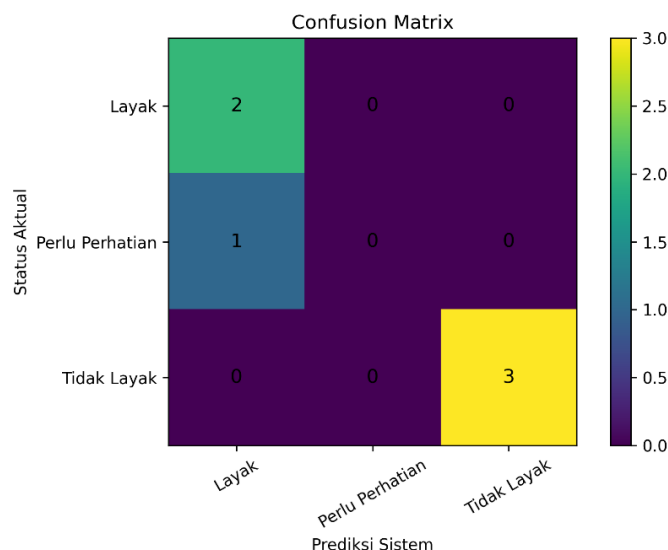
Tabel 2. Rekapitulasi pengujian white box

Kategori	Jumlah test	Lulus	Rasio
Smoke Test	1	1	100%
Hard Safety	5	5	100%
Skor Checklist	2	2	100%
Boundary Membership	2	2	100%
Status Fuzzy	2	2	100%
Clamp Input	2	2	100%
Defuzzifikasi	2	2	100%
Trace White Box	1	1	100%
Fixture White Box	1	1	100%
Rule Coverage	1	1	100%
Keseluruhan	19	19	100%

Hasil 19 dari 19 test menunjukkan bahwa fungsi internal yang diuji berjalan sesuai skenario yang dirancang. Secara khusus, mekanisme hard safety berhasil mengunci status menjadi Tidak Layak ketika item kritis berada pada kondisi rusak atau hilang. Pengujian juga memastikan bahwa status fuzzy asli tetap dapat dicatat untuk audit, input ekstrem dikunci ke rentang 0 sampai 100, nilai defuzzifikasi sesuai rumus rata-rata terbobot, dan jalur perhitungan dapat ditelusuri. Hasil tersebut merupakan bukti konsistensi implementasi kode, tetapi tidak boleh disamakan dengan akurasi diagnosis 100%. White box menguji kebenaran alur program terhadap skenario, sedangkan akurasi keputusan harus dinilai menggunakan data aktual.

3.4. Evaluasi awal menggunakan confusion matrix

Evaluasi awal confusion matrix menggunakan enam data uji. Dua data aktual Layak seluruhnya diprediksi Layak. Tiga data aktual Tidak Layak seluruhnya diprediksi Tidak Layak. Satu data aktual Perlu Perhatian diprediksi sebagai Layak. Dengan demikian, lima dari enam data diklasifikasikan dengan benar dan accuracy keseluruhan adalah 83,33%. Confusion matrix ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Confusion matrix hasil evaluasi awal sistem

Tabel 3. Metrik klasifikasi per kelas

Kelas	Precision	Recall	F1-score	Support
Layak	0,67	1,00	0,80	2
Perlu Perhatian	0,00	0,00	0,00	1
Tidak Layak	1,00	1,00	1,00	3
Accuracy	-	-	0,83	6

Kelas Layak memperoleh precision 0,67 karena terdapat satu data Perlu Perhatian yang salah diprediksi sebagai Layak. Recall kelas Layak mencapai 1,00 karena kedua data Layak dikenali dengan benar. Kelas Tidak Layak memperoleh precision, recall, dan F1-score sebesar 1,00. Sebaliknya, kelas Perlu Perhatian memperoleh nilai nol pada seluruh metrik karena hanya memiliki satu data aktual dan data tersebut salah klasifikasi. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem lebih mudah mengenali kondisi ekstrem daripada kelas transisi. Temuan tersebut konsisten dengan sifat kelas tengah yang memiliki wilayah tumpang tindih lebih besar dalam fungsi keanggotaan dan batas keputusan.

Interpretasi hasil harus dilakukan secara hati-hati karena ukuran sampel sangat kecil dan distribusi kelas tidak seimbang. Accuracy 83,33% tidak cukup untuk menyimpulkan performa general pada seluruh kondisi alat berat dan kendaraan. Pengujian berikutnya perlu menggunakan data lebih banyak, proporsi kelas yang seimbang, variasi unit dan kondisi lapangan yang lebih luas, serta label aktual yang ditetapkan secara konsisten oleh mekanik, supervisor, atau standar operasional perusahaan. Perbaikan juga dapat diarahkan pada penyetelan fungsi keanggotaan dan batas kelas Perlu Perhatian karena kategori ini merupakan wilayah transisi yang paling rentan mengalami kesalahan klasifikasi.

3.5. Pembahasan dan implikasi

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa Fuzzy Tsukamoto dapat diintegrasikan dengan proses P2H berbasis web untuk mengubah data pemeriksaan yang bersifat linguistik menjadi nilai kelayakan yang terukur. Kontribusi sistem tidak hanya terletak pada algoritma, tetapi juga pada integrasi alur pemeriksaan, bukti foto, riwayat, laporan kerusakan, dan audit log. Dibandingkan sistem diagnosis kendaraan fuzzy yang berfokus pada gejala tertentu (Akazue et al., 2024; Nugroho & Susilawati, 2025), penelitian ini menggabungkan beberapa kelompok kondisi operasional dan menghasilkan keputusan kelayakan yang dapat digunakan pada proses inspeksi harian.

Kelebihan lain adalah mekanisme hard safety override. Pada perhitungan agregat, skor tinggi dari banyak item baik dapat menaikkan nilai akhir meskipun satu item keselamatan kritis rusak. Mekanisme override mencegah kondisi tersebut. Secara praktis, desain ini lebih sesuai dengan prinsip kehati-hatian karena keselamatan tidak dapat sepenuhnya dirata-ratakan. Mekanisme tersebut juga memperjelas hubungan antara hasil fuzzy dan aturan operasional. Sistem masih menghitung nilai fuzzy untuk audit, tetapi keputusan akhir dapat dikunci oleh kondisi kritis yang telah ditentukan.

Dari sisi pengembangan perangkat lunak, hasil white box 100% menunjukkan konsistensi pada jalur logika yang diuji. Perhitungan fungsi keanggotaan, alpha-predikat, nilai z, dan defuzzifikasi dapat ditelusuri. Hal ini penting karena sistem keputusan harus dapat dijelaskan dan diaudit. Penggunaan model yang transparan membedakan sistem ini dari pendekatan kotak hitam yang sulit menelusuri alasan keputusan. Penelitian Fuzzy Tsukamoto pada

domain lain juga memperlihatkan keunggulan proses inferensi yang menghasilkan nilai crisp pada setiap aturan dan mudah diuraikan secara matematis (Dharmawan et al., 2023; Olmedo-García et al., 2025).

Meskipun demikian, penelitian memiliki keterbatasan. Pertama, evaluasi confusion matrix hanya menggunakan enam data. Kedua, penelitian belum membandingkan hasil Fuzzy Tsukamoto dengan metode lain pada dataset yang sama. Ketiga, dasar penetapan skor kondisi dan batas status perlu terus dikaji bersama ahli atau SOP perusahaan agar benar-benar merepresentasikan risiko operasional. Keempat, aplikasi masih berbasis web dan belum dioptimalkan sebagai aplikasi mobile native. Kelima, diagnosis yang dihasilkan merupakan diagnosis berbasis P2H dan belum menggantikan pemeriksaan teknis mendalam menggunakan sensor, pengukuran getaran, tekanan, suhu, atau analisis oli. Penelitian condition-based monitoring menunjukkan bahwa kombinasi beberapa parameter teknis dapat memperkuat deteksi dini kerusakan mesin (Mardhatillah et al., 2025; Feriadi et al., 2025; Putra et al., 2024).

Implikasi praktis penelitian adalah tersedianya dasar untuk membangun proses inspeksi yang lebih konsisten dan terdokumentasi. Perusahaan dapat memanfaatkan histori data untuk melihat pola unit yang sering bermasalah, mengidentifikasi komponen yang berulang kali berada pada kondisi kurang, dan menentukan prioritas pemeriksaan. Pada tahap lanjutan, data historis dapat digunakan untuk penyetelan fungsi keanggotaan, pengembangan rekomendasi perawatan, atau integrasi dengan sensor kondisi. Dengan demikian, sistem berpotensi berkembang dari alat evaluasi P2H menjadi bagian dari ekosistem pemeliharaan berbasis data.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan sistem berbasis web untuk mendiagnosis kerusakan dan mengevaluasi kelayakan operasional alat berat serta kendaraan menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Sistem mampu mengolah data pemeriksaan P2H dan menghasilkan klasifikasi Tidak Layak, Perlu Perhatian, atau Layak. Penerapan hard safety override memastikan kerusakan pada komponen keselamatan kritis tetap menjadi dasar penentuan ketidaklayakan unit. Pengujian white box menunjukkan bahwa seluruh 19 skenario pengujian berhasil dijalankan. Evaluasi menggunakan confusion matrix terhadap enam data menghasilkan akurasi sebesar 83,33%, meskipun klasifikasi pada kategori Perlu Perhatian masih perlu ditingkatkan. Keterbatasan penelitian terletak pada jumlah dan keseimbangan data yang belum memadai. Pengembangan selanjutnya disarankan menggunakan dataset yang lebih besar dan tervalidasi, menambah parameter teknis, memperluas pengujian pada berbagai jenis unit, serta mengintegrasikan data sensor untuk mendukung pemeliharaan berbasis kondisi.

Reference

- Adha, A., Meidelfi, D., & Hidayat, R. (2022). Penerapan Logika Fuzzy Pada Mesin Cuci Dan Menentukan Lama Waktu Pencucian. *JIKO (Jurnal Informatika Dan Komputer)*, 6(1), 125–132. <https://doi.org/10.26798/Jiko.V6i1.289>
- Akazue, M., Ashie, J., & Edje, A. (2024). An Intelligent Fuzzy Logic Automobile Fault Diagnostic System. *International Journal Of Innovative Science And Research Technology*, 9(2), 1779–1787. <https://doi.org/10.38124/Ijsirt/IJISRT24FEB1293>
- Eltryandi, R., Manurung, V. A. T., Deprian, L. P., & Afani, R. P. (2024). Sistem Rekap Data Pelaksanaan Perawatan Harian (P2H) Menggunakan Aplikasi Berbasis Android PT XYZ. *ASTRATECH*, 3(4), 63–78. <https://repository.polytechnic.astra.ac.id/files/original/8b943a80dabaa055b5206f505a3b6564951556ae.pdf>
- Fariz, M., & Riswandha, M. N. (2024). Implementasi Metode Rational Unified Process (RUP) Untuk Rancang Bangun Sistem Informasi Pengajuan Cuti Di PT Betts Indonesia Berbasis Website Menggunakan Framework Laravel. *Jurnal Sistem Informasi Aplikasi Teknologi Informasi*, 1(2), 105–115. <https://doi.org/10.53567/Josiati.V1i2.7>
- Feriadi, I., Riva'i, M., Aswin, F., Pramono, E., & Putra, N. I. (2025). Pengembangan Model Condition-Based Monitoring Multi-Parameter Untuk Deteksi Dini Potensi Kerusakan Pompa Sentrifugal Pada Sistem Distribusi Air Bersih. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 1(9), 1785–1793. <https://doi.org/10.59837/Jpnmb.V1i9.336>
- Hendri, R., Hartanto, M. B., Yuniarthe, Y., & Agustin, A. (2023). Rancang Bangun Sistem Pendukung Keputusan Validasi Data Pegawai Poldas Dengan Metode AHP Berbasis Web. *Jurnal Teknologi Dan Informatika (JEDA)*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.57084/Jeda.V4i1.1189>
- Mardhatillah, A., Sembiring, A. C., & Sihombing, M. J. (2025). Perancangan Jadwal Perawatan Mesin Loader Di PT Kraton Menggunakan Metode Condition Based Monitoring (CBM). *Blend Sains Jurnal Teknik*, 4(2), 235–247. <https://doi.org/10.56211/Blendsains.V4i2.1031>
- Mendonça, L. F., Sousa, J. M. C., & Vieira, S. M. (2024). Fault Diagnosis Of Maritime Equipment Using An Intelligent Fuzzy Framework. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 12 (10), 1737. <https://doi.org/10.3390/Jmse12101737>
- Nugroho, W. S., & Susilawati, I. (2025). Electric Motorcycle Damage Detection System Using Tsukamoto's Fuzzy Inference System. *Journal Of Information System & Artificial Intelligence*, 6(2), 352–358. <https://doi.org/10.26486/Jisai.V6i2.128>
- Olmedo-García, L. F., García-Martínez, J. R., Rodríguez-Reséndiz, J., Dublan-Barragán, B. S., Cruz-Miguel, E. E., & Barra-Vázquez, O. A. (2025). Tsukamoto Fuzzy Logic Controller For Motion Control Applications: Assessment Of Energy Performance. *Technologies*, 13(9), 387. <https://doi.org/10.3390/Technologies13090387>
- Pratiwi, Y., & Widiati, L. W. (2025). Implementasi Whitebox Testing Dengan Teknik Basis Path Pada Pengujian Halaman Pencarian Program Promo. *Jurnal Kecerdasan Buatan Dan Teknologi Informasi*, 4(2), 173–180. <https://doi.org/10.69916/Jkbt.V4i2.280>
- Putra, D. P., Wilastari, S., Priyanto, & Pujiyanto, F. (2024). Analisis Rusaknya Crankpin Bearing Pada Motor Diesel Generator Di MV Lumoso Hawari. *Proceeding Of National Seminar On Maritime And Interdisciplinary Studies*, 3(1), 142–147. <https://www.e-journal.akpelnl.ac.id/index.php/NSMIS/Article/View/473>
- Samole, S. N. H., Jayatun, Y. A., & Sutrisna. (2023). Mitigasi Resiko Kerusakan Pada Sistem Hidrolik Dump Truck. *Jurnal Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin ITNY*, 4(2), 114–121. <https://journal.itny.ac.id/index.php/Cendekia/Article/View/4134>
- Saputra, L. A., Santoso, N., Setyana, L. D., & Basuki, B. (2025). Analisis Kegagalan Material Patahnya Coil Spring Pada Track Adjuster Excavator PC 78. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Alat Berat*, 2(1), 22–26. <https://doi.org/10.22146/Jtrab.V2i1.15707>

- Sihasale, H., Leuhery, L., & Titaley, H. D. (2023). Analisis Produktivitas Alat Berat Pada Pembangunan Marina Center Universitas Pattimura Tahap II Di Desa Hila. *Journal Agregate*, 2(2), 186–195. <https://ejournal-polnam.ac.id/index.php/JA/article/view/1930>
- Yulianto, J. (2022). Sistem Pakar Diagnosa Kerusakan Iphone Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto Berbasis Web. *Repository STMIK Widya Cipta Dharma*. <https://repository.wicida.ac.id/4544/>