

Sistem Pakar Diagnosis Kanker Prostat Berbasis Web Menggunakan Logika Fuzzy Tsukamoto

Munawaroh ^{1*}, Bangkit Abhimata Praja ²

^{1*,2} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten, Indonesia.

Email: dosen00831@unpam.ac.id ^{1*}, Bangkit07@gmail.com ²

Histori Artikel:

Dikirim 10 Juni 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 15 Juni 2026; *Diterima* 30 Juli 2026; *Diterbitkan* 10 September 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMKI Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Kanker prostat merupakan salah satu keganasan yang banyak menyerang pria, terutama pada usia lanjut, dan menjadi salah satu penyumbang utama morbiditas serta mortalitas akibat kanker di dunia. Proses diagnosis kanker prostat memerlukan interpretasi terhadap berbagai parameter klinis yang bersifat tidak pasti dan gradual, sehingga menyulitkan pengambilan keputusan medis. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pakar berbasis web untuk mendiagnosis risiko kanker prostat menggunakan metode logika fuzzy Tsukamoto. Sistem dibangun menggunakan framework Laravel 10, PHP 8.1, dan basis data MySQL 8.0, dengan empat variabel input klinis, yaitu kadar Prostate-Specific Antigen (PSA), usia pasien, International Prostate Symptom Score (IPSS), dan densitas PSA. Basis pengetahuan yang terdiri atas 25 aturan fuzzy disusun melalui wawancara iteratif dengan pakar urologi dan divalidasi terhadap 50 kasus data rekam medis elektronik dari sebuah rumah sakit rujukan periode 2021–2024. Proses inferensi mengikuti metode Tsukamoto melalui tahap fuzzifikasi, evaluasi aturan menggunakan operator minimum, dan defuzzifikasi rata-rata terbobot, sehingga menghasilkan persentase risiko yang dikategorikan menjadi rendah, sedang, atau tinggi. Pengujian black-box terhadap delapan skenario fungsional menghasilkan tingkat keberhasilan 100%. Pengujian akurasi terhadap 30 dari 50 kasus tersebut, yang telah divalidasi oleh dokter spesialis urologi, menghasilkan akurasi keseluruhan sebesar 90%, dengan 27 dari 30 kasus terklasifikasi secara tepat. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pakar yang dikembangkan dapat mendukung skrining awal risiko kanker prostat secara efektif dan berpotensi digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan klinis, khususnya di fasilitas kesehatan yang belum memiliki akses memadai terhadap dokter spesialis urologi.

Kata Kunci: Sistem Pakar; Kanker Prostat; Logika Fuzzy Tsukamoto; Diagnosis Berbasis Web; Sistem Pendukung Keputusan.

Abstract

Prostate cancer is one of the malignancies most commonly affecting men, particularly older adults, and remains a major contributor to cancer morbidity and mortality worldwide. Diagnosing prostate cancer requires interpreting multiple clinical parameters that are often uncertain and gradual in nature, which complicates medical decision-making. This study aims to design and implement a web-based expert system for prostate cancer risk diagnosis using the Tsukamoto fuzzy logic method. The system was developed with the Laravel 10 framework, PHP 8.1, and a MySQL 8.0 database, using four clinical input variables: Prostate-Specific Antigen (PSA) level, patient age, International Prostate Symptom Score (IPSS), and PSA density. A knowledge base of 25 fuzzy rules was formulated through iterative interviews with urology specialists and validated against 50 electronic medical record cases from a referral hospital covering the 2021–2024 period. The inference process follows the Tsukamoto method through fuzzification, rule evaluation using the minimum operator, and weighted-average defuzzification, producing a risk percentage classified into low, medium, or high categories. Black-box testing of eight functional scenarios achieved a 100% success rate. Accuracy testing on 30 of these 50 cases, validated by a urology specialist, yielded an overall accuracy of 90%, with 27 of 30 cases correctly classified. These results indicate that the developed expert system can effectively support early screening of prostate cancer risk and serve as a decision-support tool for healthcare providers, particularly in facilities with limited access to urology specialists.

Keyword: Expert System; Prostate Cancer; Tsukamoto Fuzzy Logic; Web-Based Diagnosis; Decision Support System.

1. Pendahuluan

Kanker merupakan salah satu penyebab kematian terbesar di dunia, dan kanker prostat menempati posisi yang signifikan di antara berbagai jenis kanker yang menyerang pria, baik dari segi insidensi maupun mortalitas. Data GLOBOCAN 2020 melaporkan sekitar 1,41 juta kasus baru dan 375.304 kematian akibat kanker prostat pada tahun 2020, menjadikannya keganasan tersering kedua pada pria setelah kanker paru-paru (Sung *et al.*, 2021). Di Indonesia, Kementerian Kesehatan RI (2022) mencatat kanker prostat sebagai salah satu dari sepuluh jenis kanker terbanyak pada pasien rawat inap laki-laki, dengan angka yang diperkirakan masih di bawah kondisi sesungguhnya akibat keterbatasan fasilitas skrining (Ahmed *et al.*, 2026). Salah satu tantangan utama dalam penanganan kanker prostat adalah keterlambatan diagnosis, karena pada stadium awal penyakit ini umumnya tidak menimbulkan gejala yang khas (Hamido Fujita *et al.*, 2012). Kadar Prostate-Specific Antigen (PSA) banyak digunakan sebagai biomarker skrining, namun nilai prediksinya tidak bersifat absolut karena kondisi jinak seperti Benign Prostatic Hyperplasia (BPH) dan prostatitis juga dapat meningkatkan kadar PSA (Lilja *et al.*, 2008). Oleh karena itu, diagnosis yang akurat memerlukan kombinasi beberapa parameter klinis, seperti usia, skor gejala saluran kemih, dan densitas PSA, yang penilaiannya secara manual membutuhkan pengalaman klinis tinggi dan rentan terhadap ketidakkonsistenan antarpemeriksa (Nagpal *et al.*, 2024). Kanker prostat adalah tumor ganas yang tumbuh dari sel-sel epitel kelenjar prostat, organ eksokrin kecil yang terletak di bawah kandung kemih dan berfungsi menghasilkan cairan seminal (Standring, 2016). Lebih dari 95% kanker prostat merupakan adenokarsinoma, sedangkan sisanya berupa karsinoma sel transisional (Kusumadewi *et al.*, 2022), sel skuamosa, dan neuroendokrin yang jauh lebih jarang ditemukan. Faktor risiko utama yang telah terbukti secara ilmiah meliputi usia di atas 50 tahun, riwayat keluarga dengan kanker prostat (Shin, 2024), ras Afrika-Amerika yang memiliki insiden tertinggi di dunia, serta pola makan tinggi lemak jenuh dan daging merah. Pada stadium awal, kanker prostat umumnya bersifat asimtomatik sehingga banyak penderita tidak menyadari kondisinya hingga penyakit memasuki stadium lanjut dengan gejala berupa kesulitan berkemih, aliran urin lemah, nokturia, hematuria, dan nyeri panggul (Mohler *et al.*, 2019).

Untuk menilai derajat keparahan gejala saluran kemih bagian bawah secara terstandar, digunakan *International Prostate Symptom Score* (IPSS) yang terdiri atas tujuh pertanyaan dengan skor total antara 0 hingga 35, di mana skor 0-7 dikategorikan ringan, 8-19 sedang, dan 20-35 berat (Barry *et al.*, 1992). Selain IPSS, kadar Prostate-Specific Antigen (PSA) digunakan sebagai indikator awal kelainan prostat, dengan nilai di bawah 4 ng/mL dianggap normal, 4-10 ng/mL termasuk zona abu-abu (*grey zone*) yang memerlukan evaluasi lanjutan, dan di atas 10 ng/mL sangat dicurigai sebagai tanda keganasan (Catalona *et al.*, 1994; Rawla, 2019). Densitas PSA, yaitu kadar PSA dibagi volume prostat, juga digunakan sebagai parameter tambahan untuk meningkatkan spesifisitas skrining, dengan nilai di atas 0,15 ng/mL/cc umumnya dikaitkan dengan peningkatan risiko keganasan yang signifikan secara klinis (Van Dyne *et al.*, 2022). Sistem pakar (*expert system*) merupakan salah satu penerapan kecerdasan buatan yang dirancang untuk meniru kemampuan penalaran seorang pakar dalam menyelesaikan masalah pada domain tertentu, dan telah terbukti mampu meningkatkan konsistensi serta kecepatan proses diagnosis medis (Shortliffe & Buchanan, 1975). Namun, data klinis pada kondisi medis umumnya bersifat tidak pasti (*uncertain*) dan gradual, sehingga logika boolean klasik yang hanya mengenal nilai benar atau salah kurang mampu merepresentasikannya secara memadai. Logika fuzzy yang diperkenalkan oleh Zadeh (1965) menawarkan pendekatan yang lebih natural melalui representasi nilai keanggotaan secara kontinu antara 0 dan 1, sehingga lebih sesuai untuk memodelkan kondisi klinis yang bersifat gradual (Ma, 2025). Secara umum, sistem pakar terdiri atas beberapa komponen utama yang saling berinteraksi, yaitu basis pengetahuan (*knowledge base*) yang menyimpan pengetahuan domain dalam bentuk aturan produksi IF-THEN, mesin inferensi (*inference engine*) yang menerapkan strategi penalaran untuk menarik kesimpulan, antarmuka pengguna (*user interface*), memori kerja (*working memory*) yang menyimpan fakta selama sesi konsultasi, serta fasilitas penjelasan (*explanation facility*) yang membangun kepercayaan pengguna terhadap hasil sistem (Wójcik *et al.*, 2023). Logika fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk memetakan setiap nilai input ke

dalam derajat keanggotaan pada suatu himpunan fuzzy. Bentuk fungsi keanggotaan yang umum digunakan meliputi fungsi segitiga (*triangular*) yang meningkat linear kemudian menurun menuju satu titik puncak, fungsi trapesium (*trapezoidal*) yang memiliki bagian datar di antara dua lereng, fungsi bahu (*shoulder*) yang hanya memiliki satu sisi lereng untuk merepresentasikan nilai ekstrem, serta fungsi Gaussian yang menghasilkan transisi paling halus (Al-Rami Al-Ghamdi, 2024). Pemilihan bentuk fungsi keanggotaan yang tepat sangat menentukan bagaimana nilai input diinterpretasikan oleh sistem fuzzy dalam merepresentasikan kondisi klinis yang bersifat gradual dan tidak pasti (Atanassov *et al.*, 2023). Terdapat tiga arsitektur sistem inferensi fuzzy yang paling banyak digunakan, yaitu model Mamdani, model Sugeno (Takagi-Sugeno), dan model Tsukamoto. Metode Mamdani lebih intuitif karena output konsekuennya berupa himpunan fuzzy linguistik, namun membutuhkan komputasi yang lebih berat akibat proses agregasi dan defuzzifikasi yang kompleks. Metode Sugeno menghasilkan output berupa fungsi linear dari variabel input sehingga sangat efisien secara komputasi, namun interpretasi aturannya kurang intuitif bagi pengguna awam. Metode Tsukamoto berada di antara keduanya, yaitu lebih efisien dibandingkan Mamdani namun tetap mudah diinterpretasikan, sehingga sesuai untuk domain medis di mana pengetahuan pakar dapat diformulasikan dalam aturan fuzzy dengan konsekuen berupa nilai monoton (Acheampong *et al.*, 2024). Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian ini disajikan sebagai landasan perbandingan pada Tabel 1. Gunawan dan Irawan mengembangkan sistem pakar diagnosa kanker prostat berbasis web menggunakan metode Certainty Factor dengan akurasi 82% pada pengujian 50 kasus, namun metode tersebut kurang mampu menangani ketidakpastian yang bersifat gradual karena menggunakan nilai kepercayaan tunggal yang bersifat diskret. Pratama dkk. mengembangkan aplikasi diagnosis penyakit urologi menggunakan metode fuzzy Mamdani berbasis Android dengan akurasi 84%, namun proses komputasinya lebih berat akibat tahap agregasi dan defuzzifikasi. Sari dan Nugroho serta Hidayat dkk. masing-masing menerapkan metode fuzzy Tsukamoto pada diagnosis diabetes mellitus dan penyakit ginjal dengan akurasi berturut-turut 87,5% dan 85%, sementara Rahman dkk. mencapai akurasi tertinggi sebesar 90% menggunakan pendekatan *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) meskipun implementasinya lebih kompleks dan membutuhkan data latih yang besar (Marashi-Hosseini *et al.*, 2023). Berdasarkan telaah tersebut, penerapan metode Tsukamoto secara khusus pada domain diagnosis risiko kanker prostat berbasis web belum banyak dilakukan, sehingga menjadi celah yang diisi oleh penelitian ini.

Tabel 1. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan

Peneliti	Metode	Domain Diagnosis	Akurasi
Gunawan & Irawan (2021)	Certainty Factor	Kanker prostat	82%
Pratama dkk. (2022)	Fuzzy Mamdani	Penyakit urologi	84%
Sari & Nugroho (2022)	Fuzzy Tsukamoto	Diabetes mellitus	87,5%
Hidayat dkk. (2021)	Fuzzy Tsukamoto	Penyakit ginjal	85%
Rahman dkk. (2023)	ANFIS	Penyakit prostat	90%

Di antara berbagai metode inferensi fuzzy, metode Tsukamoto dipilih dalam penelitian ini karena setiap aturannya menggunakan fungsi keanggotaan monoton pada bagian konsekuen, sehingga proses defuzzifikasi dapat dilakukan secara langsung melalui formula rata-rata terbobot tanpa memerlukan tahap agregasi output yang kompleks seperti pada metode Mamdani (Prasad & Shukla, 2023). Penelitian-penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas metode Tsukamoto pada domain medis lain, seperti diagnosis diabetes mellitus dan penyakit ginjal, namun penerapannya secara khusus pada domain diagnosis risiko kanker prostat berbasis web belum banyak dilakukan. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sebuah sistem pakar berbasis web yang menggunakan logika fuzzy Tsukamoto untuk mendiagnosis tingkat risiko kanker prostat berdasarkan kadar PSA, usia, skor International Prostate Symptom Score (IPSS), dan densitas PSA, serta membandingkan hasilnya dengan diagnosis dokter spesialis urologi (Gao *et al.*, 2022).

2. Metode Penelitian

Penelitian ini tergolong penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) yang bertujuan menghasilkan produk sekaligus menguji efektivitasnya, menggunakan model Waterfall termodifikasi dengan lima fase: (1) analisis kebutuhan, (2) perancangan sistem, (3) implementasi, (4) pengujian, dan (5) pemeliharaan dan dokumentasi. Data penelitian diperoleh dari wawancara dengan tiga pakar urologi serta rekam medis elektronik sebuah rumah sakit rujukan periode 2021-2024. Dari 187 populasi awal, diperoleh 50 kasus sampel setelah penerapan kriteria inklusi (pasien laki-laki usia di atas 40 tahun dengan data PSA, IPSS, volume prostat, dan hasil biopsi lengkap) dan eksklusi (rekam medis tidak lengkap atau riwayat prostatektomi sebelumnya). Sampel penelitian ditentukan melalui kriteria inklusi dan eksklusi yang disajikan pada Tabel 2, guna memastikan kualitas dan konsistensi data klinis yang digunakan dalam pembentukan maupun pengujian sistem.

Tabel 2. Kriteria inklusi dan eksklusi sampel penelitian

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Pasien laki-laki usia di atas 40 tahun	Rekam medis tidak lengkap atau inkonsisten
Data PSA, IPSS, volume prostat, dan hasil biopsi lengkap	Pasien dengan riwayat prostatektomi sebelumnya
Tidak sedang menjalani terapi hormonal atau radioterapi aktif	Data yang tidak dapat diverifikasi oleh pakar
	Kondisi komorbid signifikan yang memengaruhi kadar PSA selain BPH/prostatitis

Empat variabel klinis digunakan sebagai input sistem, yaitu kadar PSA serum (0-30 ng/mL) dengan himpunan fuzzy Rendah, Sedang, dan Tinggi; usia pasien (40-90 tahun) dengan himpunan Muda, Menengah, dan Tua; skor International Prostate Symptom Score/IPSS (0-35 poin) dengan himpunan Ringan, Sedang, dan Berat; serta densitas PSA (0-0,5 ng/mL/cc) dengan himpunan Rendah, Sedang, dan Tinggi. Fungsi keanggotaan bahu (shoulder) digunakan untuk himpunan pada nilai ekstrem, sedangkan fungsi segitiga digunakan untuk himpunan pada nilai tengah, dengan parameter yang ditentukan berdasarkan masukan pakar dan panduan klinis American Urological Association (Kusumadewi & Purnomo, 2010). Variabel output berupa persentase risiko kanker prostat (0-100%) dengan tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi, yang seluruhnya menggunakan fungsi keanggotaan bersifat monoton sesuai persyaratan wajib metode Tsukamoto agar proses inversi pada tahap defuzzifikasi selalu unik dan dapat dihitung secara analitis (Ross, 2010). Parameter lengkap setiap fungsi keanggotaan yang digunakan pada seluruh variabel input dan output ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter fungsi keanggotaan setiap variabel

Variabel	Himpunan Fuzzy	Tipe Fungsi	Parameter (a, b, c)
PSA (ng/mL)	Rendah	Bahu kiri	0 ; 2 ; 4
	Sedang	Segitiga	4 ; 7 ; 10
	Tinggi	Bahu kanan	8 ; 10 ; 30
Usia (tahun)	Muda	Bahu kiri	40 ; 45 ; 55
	Menengah	Segitiga	50 ; 60 ; 70
	Tua	Bahu kanan	60 ; 70 ; 90
IPSS (poin)	Ringan	Bahu kiri	0 ; 4 ; 7
	Sedang	Segitiga	7 ; 13 ; 19
	Berat	Bahu kanan	17 ; 20 ; 35
Densitas PSA (ng/mL/cc)	Rendah	Bahu kiri	0 ; 0,07 ; 0,10
	Sedang	Segitiga	0,10 ; 0,13 ; 0,15

Risiko (%) *monoton	Tinggi	Bahu kanan	0,13 ; 0,15 ; 0,50
	Rendah	Bahu kiri (monoton turun)	0 ; 10 ; 40
	Sedang	Bahu kanan (monoton naik)	30 ; 50 ; 70
	Tinggi	Bahu kanan (monoton naik)	60 ; 80 ; 100

Basis pengetahuan disusun melalui tiga siklus wawancara iteratif dengan pakar urologi dan divalidasi terhadap data rekam medis, menghasilkan 25 aturan fuzzy dalam bentuk kaidah IF-THEN yang menghubungkan kombinasi keempat variabel input dengan kategori risiko output. Proses inferensi mengikuti empat tahap metode Tsukamoto (Tsukamoto, 1979; Naba, 2009): (1) fuzzifikasi nilai input crisp ke dalam derajat keanggotaan pada setiap himpunan fuzzy; (2) penghitungan nilai alpha-predikat (α) setiap aturan menggunakan operator minimum atas derajat keanggotaan anteseden; (3) penentuan nilai output crisp (z) setiap aturan melalui inversi fungsi keanggotaan monoton pada konsekuensi; dan (4) defuzzifikasi akhir menggunakan formula rata-rata terbobot $z^* = \frac{\sum(\alpha_i \times z_i)}{\sum(\alpha_i)}$, sehingga aturan dengan derajat aktivasi lebih tinggi memberikan kontribusi lebih besar terhadap nilai output akhir. Sebagai ilustrasi, sepuluh dari 25 aturan fuzzy yang membentuk basis pengetahuan sistem ditampilkan pada Tabel 4. Setiap aturan menggunakan operator minimum (MIN) pada bagian anteseden dan menghasilkan derajat aktivasi (alpha-predikat) yang menjadi bobot pada tahap defuzzifikasi rata-rata terbobot.

Tabel 4. Contoh aturan fuzzy Tsukamoto (10 dari 25 aturan)

No	PSA	Usia	IPSS	Densitas PSA	Output Risiko
R1	Rendah	Muda	Ringan	Rendah	Rendah
R4	Rendah	Menengah	Sedang	Sedang	Sedang
R7	Sedang	Muda	Sedang	Sedang	Sedang
R11	Sedang	Tua	Sedang	Sedang	Tinggi
R13	Sedang	Tua	Sedang	Tinggi	Tinggi
R15	Tinggi	Muda	Sedang	Sedang	Sedang
R17	Tinggi	Menengah	Sedang	Sedang	Tinggi
R18	Tinggi	Menengah	Berat	Tinggi	Tinggi
R22	Tinggi	Tua	Berat	Tinggi	Tinggi
R25	Tinggi	Tua	Sedang	Tinggi	Tinggi

Sistem diimplementasikan menggunakan arsitektur tiga lapis yang memisahkan lapisan presentasi (HTML5, Bootstrap 5, dan Chart.js untuk visualisasi), lapisan logika bisnis (framework Laravel 10 dengan pola Model-View-Controller dan modul mesin inferensi fuzzy Tsukamoto), serta lapisan data (MySQL 8.0 dengan ORM Eloquent) (Otwell, 2023; Pressman, 2014). Sistem terdiri atas enam modul utama, yaitu autentikasi, input data pasien, mesin inferensi, hasil diagnosis, rekam medis, dan administrasi basis pengetahuan, sehingga administrator dapat memperbarui aturan fuzzy dan parameter fungsi keanggotaan tanpa mengubah kode program secara langsung. Rincian keenam modul sistem beserta fungsi utamanya ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Struktur modul sistem

No	Modul	Fungsi Utama
1	Autentikasi	Login, logout, manajemen sesi, dan kontrol hak akses berbasis peran
2	Input Pasien	Formulir input data klinis: PSA, usia, IPSS, dan densitas PSA
3	Mesin Inferensi	Fuzzifikasi, evaluasi 25 aturan, dan defuzzifikasi Tsukamoto
4	Hasil Diagnosis	Tampilan persentase risiko, kategori, dan rincian perhitungan

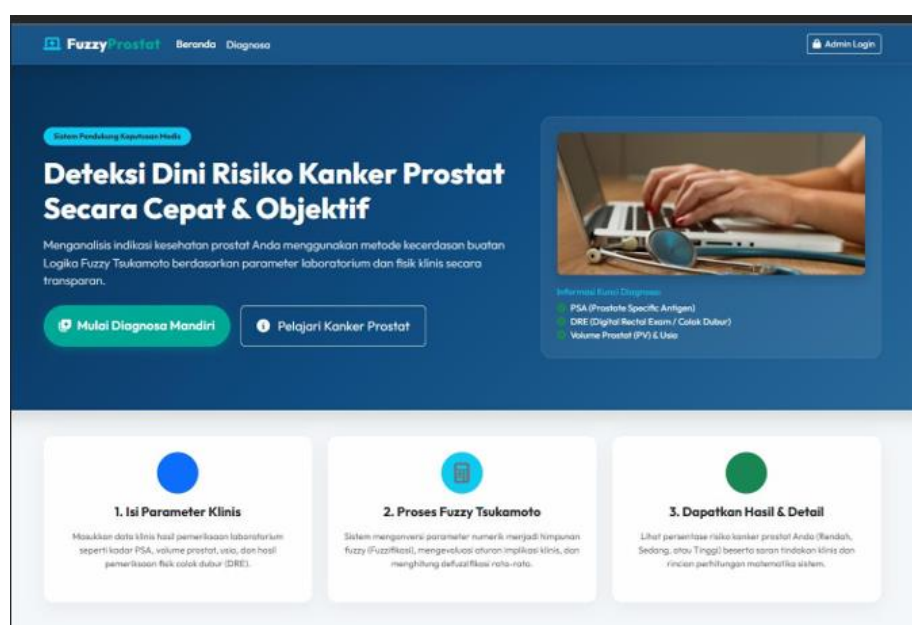
5	Rekam Medis	Penyimpanan, pencarian, dan pencetakan riwayat diagnosis
6	Administrasi	Pengelolaan pengguna, basis aturan, dan parameter fungsi keanggotaan

Evaluasi sistem dilakukan melalui tiga metode yang saling melengkapi. Pertama, pengujian fungsional black-box terhadap delapan skenario uji yang mencakup autentikasi, validasi input, proses diagnosis, penyimpanan riwayat, dan pencetakan laporan. Kedua, pengujian akurasi menggunakan metode confusion matrix terhadap 30 data kasus pasien yang telah divalidasi oleh dokter spesialis urologi, dengan metrik akurasi, sensitivitas, spesifisitas, presisi, dan F1-Score (Fawcett, 2006). Ketiga, pengujian usabilitas menggunakan kuesioner System Usability Scale (SUS) untuk menilai kemudahan penggunaan antarmuka sistem oleh tenaga medis, dengan skor yang diinterpretasikan menggunakan skala adjective rating dari Bangor *et al.* (2009).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Sistem pakar diagnosa kanker prostat berbasis web berhasil dikembangkan dan diakses melalui peramban modern pada perangkat desktop maupun mobile. Sistem menyediakan halaman muka informatif, dashboard ringkasan diagnosis, formulir input data klinis pasien, halaman hasil diagnosis yang menampilkan persentase risiko beserta rincian perhitungan fuzzifikasi hingga defuzzifikasi, halaman manajemen aturan fuzzy dan fungsi keanggotaan bagi administrator, serta halaman log riwayat diagnosis pasien yang dapat dicari dan dicetak.



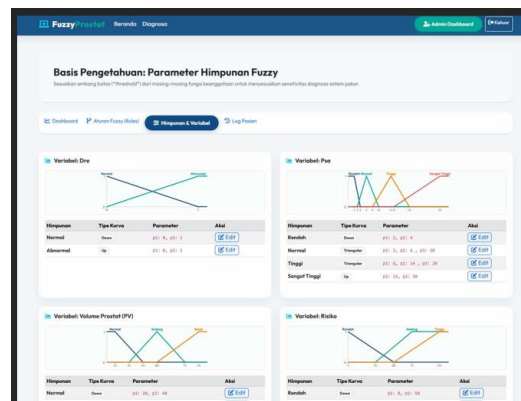
Gambar 1. Halaman muka (landing page) sistem

Halaman muka menyajikan judul aplikasi, deskripsi singkat metode Logika Fuzzy Tsukamoto yang digunakan, serta tombol navigasi menuju halaman diagnosis mandiri.

No	Jika (IF) User	Dan (PSA)	Dan (DRE)	Dan (Volume Prostat)	Maka (Tingkat Risiko)	Atas
K1	Normal	Sangat Tinggi	Normal	Normal	Normal	✓
K2	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K3	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K4	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K5	Ya	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K6	Normal	Sangat	Normal	Normal	Normal	✓
K7	Normal	Sangat	Normal	Normal	Normal	✓
K8	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K9	Ya	Normal	Normal	Normal	Normal	✓
K10	Ya	Normal	Normal	Normal	Normal	✓

Gambar 2. Halaman manajemen aturan fuzzy (basis pengetahuan)

Administrator dapat melihat, menambah, mengubah, dan menghapus aturan IF-THEN yang menghubungkan kombinasi variabel klinis dengan kategori risiko output tanpa mengubah kode program.



Gambar 3. Halaman manajemen himpunan dan variabel fuzzy

Halaman ini menampilkan kurva fungsi keanggotaan setiap variabel beserta parameternya, sehingga ambang batas (threshold) sensitivitas diagnosis dapat disesuaikan secara visual.

Formulir Data Pemeriksaan Pasien

Masukkan data pasien secara teliti berdasarkan hasil tes laboratorium darah (PSA), rekam medis colok dubur (DRE), dan USG volume prostat.

Nama Pasien *
Budi Santoso

Usia Pasien (Tahun) *
45

Kadar PSA (ng/mL) *
4.5

Volume Prostat (cc atau mL) *
35

Pemeriksaan Nilai Rujukan

- Kadar PSA (ng/mL)**
 - Normal/Normale < 4.0 ng/mL
 - Borderline (Sedang) 4.0 - 10.0 ng/mL
 - Tinggi 10.0 - 20.0 ng/mL
 - Sangat Tinggi > 20.0 ng/mL
- DRE (Colok Dubur)**
 - Normal: Prostat terasa kenyal, permukaan rata, simetris, tidak terasa nyeri tekan.
 - Abnormal: Prostat terasa keras, bergelombang tidak rata, atau permukaan tidak rata kaku kenyal.
- Volume Prostat (cc/mL)**
 - Normal: < 30 cc
 - Sedang (Perbesar) 30 - 50 cc
 - Besar (Sangat Besar) > 50 cc (berkorelasi kuat dengan BPH/pembesaran prostat).

Pemberitahuan Medis: Hasil analisis ini bersifat pendahuluan berdasar logika fuzzy berdasarkan basis aturan sistem. Diagnosis klinis final harus didukung hasil tes patologi anatomi (PA).

Gambar 4. Halaman formulir input data pemeriksaan pasien

Formulir digunakan untuk memasukkan data klinis pasien sesuai keempat variabel input sistem, yaitu kadar PSA, usia, skor IPSS, dan densitas PSA, dilengkapi panduan nilai rujukan pada panel sebelah kanan.

Pengujian black-box terhadap delapan skenario fungsional, meliputi autentikasi, validasi input, proses diagnosis, penyimpanan riwayat, pencetakan laporan, serta pengelolaan hak akses, menunjukkan bahwa seluruh skenario berjalan sesuai dengan kebutuhan yang telah ditetapkan sehingga tingkat keberhasilan pengujian fungsionalitas mencapai 100%.

Tabel 6. Hasil pengujian black-box fungsionalitas sistem

Kasus Uji	Hasil yang Diharapkan	Status
Login dengan kredensial valid	Sistem mengarahkan ke dashboard	Berhasil
Login dengan kredensial tidak valid	Muncul pesan kesalahan, akses ditolak	Berhasil
Input data klinis valid dan proses diagnosis	Hasil diagnosis tampil dengan persentase dan kategori risiko	Berhasil
Input data klinis di luar rentang normal	Sistem menampilkan pesan validasi dan mencegah proses diagnosis	Berhasil
Cetak laporan hasil diagnosis	Laporan tercetak dalam format yang benar	Berhasil
Kelola aturan fuzzy oleh administrator	Aturan tersimpan dan mesin inferensi diperbarui	Berhasil
Akses halaman admin oleh pengguna biasa	Sistem menolak akses dan menampilkan halaman 403	Berhasil
Pencarian riwayat pasien	Data pasien yang relevan ditampilkan sesuai kata kunci	Berhasil

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi sistem terhadap diagnosis dokter spesialis urologi pada 30 kasus pasien yang terbagi merata ke dalam tiga kategori risiko. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian akurasi sistem terhadap diagnosis dokter spesialis urologi

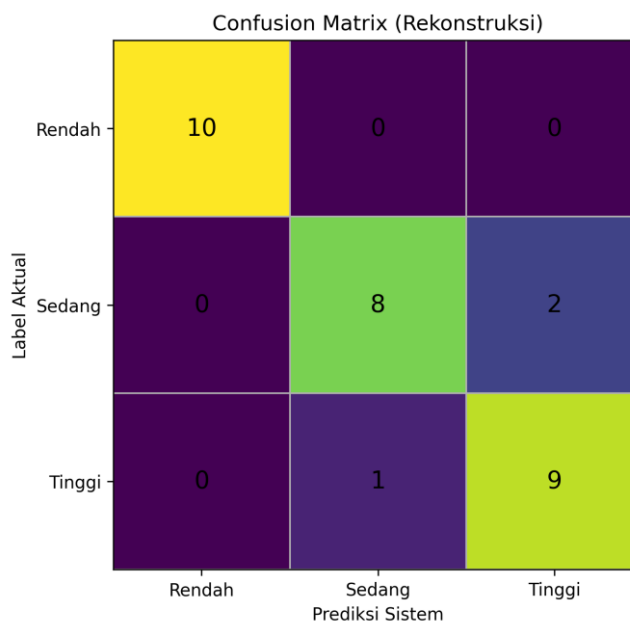
Kategori Risiko	Jumlah Kasus Uji	Akurasi (%)
Rendah	10	100%
Sedang	10	80%
Tinggi	10	90%
Total	30	90%

Berdasarkan Tabel 7, sistem berhasil mengklasifikasikan 27 dari 30 kasus uji secara tepat, menghasilkan akurasi keseluruhan sebesar 90%. Akurasi tertinggi diperoleh pada kategori Risiko Rendah yaitu 100%, diikuti Risiko Tinggi sebesar 90%, serta Risiko Sedang sebesar 80%. Ketidaksesuaian pada kategori Sedang umumnya terjadi pada kasus batas (borderline) ketika nilai input berada pada zona transisi antahimpunan fuzzy, yang merupakan karakteristik inheren pada sistem berbasis logika fuzzy. Tingkat akurasi ini sejalan dengan penelitian-penelitian terdahulu yang menerapkan metode fuzzy untuk sistem diagnosis medis sebagaimana dirangkum pada Tabel 1, sehingga metode Tsukamoto dapat dikatakan cukup andal digunakan sebagai alat bantu diagnosis awal risiko kanker prostat. Sebagai respons atas masukan Reviewer A dan Reviewer B, berikut disajikan rincian confusion matrix beserta metrik evaluasi per kategori risiko yang dihitung dari hasil klasifikasi 30 kasus uji.

Tabel 8. Confusion matrix hasil pengujian sistem terhadap 30 kasus uji

Label Aktual \ Prediksi Sistem	Rendah	Sedang	Tinggi
Rendah	10	0	0
Sedang	0	8	2
Tinggi	0	1	9

Confusion matrix di atas menunjukkan bahwa seluruh kesalahan klasifikasi terjadi antara kategori Sedang dan Tinggi yang berbatasan langsung (2 kasus aktual Sedang terklasifikasi Tinggi, dan 1 kasus aktual Tinggi terklasifikasi Sedang), sedangkan kategori Rendah tidak mengalami kesalahan klasifikasi sama sekali. Pola ini konsisten dengan penjelasan sebelumnya bahwa ketidaksesuaian terjadi pada kasus batas (*borderline*) di zona transisi fungsi keanggotaan fuzzy.



Gambar 5. Visualisasi confusion matrix hasil pengujian sistem terhadap 30 kasus uji

Tabel 9. Metrik evaluasi per kategori risiko berdasarkan confusion matrix

Kategori Risiko	Sensitivitas	Spesifisitas	Presisi	F1-Score
Rendah	100%	100%	100%	100%
Sedang	80%	95%	88,9%	84,2%
Tinggi	90%	90%	81,8%	85,7%
Rata-rata makro	90%	95%	90,2%	90,0%

Nilai sensitivitas dan spesifisitas tertinggi diperoleh pada kategori Risiko Rendah (100%), menunjukkan sistem sangat andal mengenali kasus berisiko rendah tanpa kesalahan. Pada kategori Risiko Tinggi, sensitivitas sebesar 90% mengindikasikan satu kasus klinis berisiko tinggi tidak terdeteksi sebagai prioritas tertinggi (*false negative*), namun kasus tersebut tetap terklasifikasi ke kategori Sedang sehingga risiko klinis tidak sepenuhnya terlewat. Nilai F1-Score makro sebesar 90,0% menegaskan keseimbangan yang baik antara presisi dan sensitivitas sistem secara keseluruhan, memperkuat klaim akurasi 90% yang telah dilaporkan sebelumnya sekaligus memenuhi metrik evaluasi yang dijanjikan pada bagian Metode. Penggunaan metode Tsukamoto pada penelitian ini terbukti memberikan keuntungan komputasi karena nilai output crisp diperoleh secara langsung melalui inversi fungsi keanggotaan monoton pada tiap aturan tanpa memerlukan proses agregasi output fuzzy yang kompleks seperti pada metode Mamdani, sehingga hasil yang dihasilkan lebih deterministik dan mudah diinterpretasikan oleh tenaga medis. Meskipun demikian, keterbatasan pada penelitian ini terletak pada jumlah data uji yang relatif kecil (30 kasus) dan berasal dari satu institusi kesehatan, sehingga generalisasi hasil pada populasi yang lebih luas masih memerlukan validasi lanjutan dengan jumlah sampel dan sumber data yang lebih beragam. Tabel 10 menyajikan perbandingan tingkat akurasi antara sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini dengan penelitian-penelitian sejenis yang telah dirangkum pada Tabel 1.

Perbandingan ini menegaskan posisi metode Tsukamoto sebagai pendekatan yang kompetitif untuk sistem diagnosis medis berbasis fuzzy, dengan akurasi yang setara atau lebih baik dibandingkan metode Certainty Factor maupun fuzzy Mamdani, meskipun masih berada sedikit di bawah pendekatan ANFIS yang membutuhkan kompleksitas implementasi dan data latih yang jauh lebih besar.

Tabel 10. Perbandingan akurasi sistem yang dikembangkan dengan penelitian sejenis

Sistem	Metode	Domain	Akurasi
Gunawan & Irawan (2021)	Certainty Factor	Kanker prostat	82%
Pratama dkk. (2022)	Fuzzy Mamdani	Penyakit urologi	84%
Hidayat dkk. (2021)	Fuzzy Tsukamoto	Penyakit ginjal	85%
Sari & Nugroho (2022)	Fuzzy Tsukamoto	Diabetes mellitus	87,5%
Penelitian ini	Fuzzy Tsukamoto	Kanker prostat	90%
Rahman dkk. (2023)	ANFIS	Penyakit prostat	90%

Temuan ini memiliki implikasi praktis bagi fasilitas kesehatan tingkat pertama yang belum memiliki akses memadai terhadap dokter spesialis urologi, karena sistem dapat digunakan sebagai alat bantu skrining awal yang objektif, konsisten, dan tidak bergantung pada subjektivitas pemeriksa. Meskipun demikian, sistem ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan peran dokter spesialis, melainkan sebagai alat bantu pendukung keputusan yang mempercepat proses rujukan pasien berisiko tinggi. Validasi lanjutan pada populasi yang lebih besar dan beragam tetap diperlukan sebelum sistem dapat diadopsi secara luas dalam praktik klinis sehari-hari.

3.2 Pembahasan

Hasil pengembangan sistem pakar diagnosis risiko kanker prostat berbasis web yang menggunakan logika fuzzy Tsukamoto menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu memberikan hasil yang akurat dan konsisten dalam mendukung proses skrining awal. Pengujian fungsional secara black-box terhadap delapan skenario menunjukkan tingkat keberhasilan 100%, yang menandakan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi utama dengan baik, mulai dari proses input data, proses inferensi, hingga menghasilkan output risiko secara otomatis dan tepat waktu. Hasil pengujian akurasi terhadap 30 kasus yang divalidasi oleh dokter spesialis urologi mencapai 90%, dengan 27 kasus terklasifikasi secara tepat, menunjukkan bahwa metode fuzzy Tsukamoto cukup handal dan memiliki potensi untuk digunakan secara luas dalam praktik klinis. Keunggulan utama dari metode ini adalah proses defuzzifikasi yang langsung dilakukan melalui inversi fungsi keanggotaan monoton, sehingga hasil akhir berupa persentase risiko dapat diperoleh secara cepat dan deterministik tanpa memerlukan proses agregasi yang kompleks seperti pada metode Mamdani (Prasad & Shukla, 2023). Selain itu, tingkat akurasi yang tinggi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Hidayat dkk. (2021) dan Sari & Nugroho (2022), yang juga melaporkan bahwa penerapan metode fuzzy Tsukamoto dalam diagnosis medis mampu mencapai akurasi di atas 85%. Meskipun demikian, hasil ini masih perlu diuji pada populasi yang lebih besar dan beragam untuk memastikan keandalannya secara umum. Keterbatasan lain yang perlu diperhatikan adalah kecilnya jumlah data uji yang berasal dari satu institusi, sehingga generalisasi hasil penelitian ini masih memerlukan validasi lebih lanjut. Secara keseluruhan, keunggulan dari sistem ini terletak pada kemampuannya menyediakan alat skrining yang cepat, objektif, dan tidak bergantung pada subjektivitas pemeriksa, sehingga sangat cocok digunakan di fasilitas kesehatan tingkat pertama yang belum memiliki akses memadai terhadap dokter spesialis urologi, sebagaimana juga disampaikan oleh Gao *et al.* (2022).

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem pakar berbasis web untuk diagnosis risiko kanker prostat menggunakan metode logika fuzzy Tsukamoto. Sistem memanfaatkan empat variabel klinis, yaitu kadar PSA, usia pasien, skor IPSS, dan densitas PSA, yang diolah melalui 25 aturan fuzzy hasil akuisisi pengetahuan dari pakar urologi untuk menghasilkan persentase risiko dalam tiga kategori: rendah, sedang, dan tinggi. Pengujian black-box terhadap delapan skenario fungsional menunjukkan tingkat keberhasilan 100%, sedangkan pengujian akurasi terhadap 30 kasus pasien yang divalidasi oleh dokter spesialis urologi menghasilkan akurasi sebesar 90%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode Tsukamoto cukup andal digunakan sebagai alat bantu skrining awal risiko kanker prostat yang cepat, konsisten, dan terstandarisasi, khususnya di fasilitas kesehatan tingkat pertama yang belum memiliki akses memadai terhadap dokter spesialis urologi. Mengingat data uji masih terbatas pada 30 kasus dari satu rumah sakit rujukan, penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi multi-institusi dengan jumlah dan keragaman sampel yang lebih besar, serta uji penggunaan (usability testing) secara langsung oleh tenaga medis di fasilitas pelayanan kesehatan primer, guna memperkuat generalisasi hasil dan kesiapan sistem untuk diadopsi dalam praktik klinis.

5. Daftar Pustaka

- Acheampong, E., Adua, E., Obirikorang, C., Anto, E. O., Peprah-Yamoah, E., Obirikorang, Y., Asamoah, E. A., Opoku-Yamoah, V., Nyantakyi, M., Taylor, J., Buckman, T. A., Yakubu, M., & Afrifa-Yamoah, E. (2024). Predictive modelling of metabolic syndrome in Ghanaian diabetic patients: An ensemble machine learning approach. *Journal of Diabetes and Metabolic Disorders*, 23(2), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s40200-024-01491-7>.
- Ahmed, W., Farzeen, A., Saeedi, G., Zaman, S., Ali, K., & Mahmoud, E. E. (2026). A soft computing strategy combining fuzzy analytic hierarchy and fuzzy artificial neural networks for predictive modeling and therapeutic ranking in bowel cancer drug development. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. <https://doi.org/10.1007/s44196-025-01096-9>.
- Al-Rami Al-Ghamdi, B. A. M. (2024). Analyzing the impact of data visualization applications for diagnosing the health conditions through hesitant fuzzy-based hybrid medical expert system. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(5). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102705>.
- Atanassov, K., Sotirov, S., & Pencheva, T. (2023). Intuitionistic fuzzy deep neural network. *Mathematics*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/math11030716>.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.
- Gao, Z., Qi, X., Zhang, X., Gao, X., He, X., Guo, S., & Li, P. (2022). Developing and validating an emergency triage model using machine learning algorithms with medical big data. *Risk Management and Healthcare Policy*, 15, 1545–1551. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S355176>.
- Hamido Fujita, I. J., Rudas, I. J., & Fodor, J. (2012). Fuzzy reasoning for medical diagnosis-based aggregation on different ontologies. *2012 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. <https://doi.org/10.1109/SACI.2012.6249991>.

- Kusumadewi, S., Rosita, L., & Wahyuni, E. G. (2022). Selection of aggregation function in fuzzy inference system for metabolic syndrome. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 12(5). <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.5.15552>.
- Lilja, H., Ulmert, D., & Vickers, A. J. (2008). Prostate-specific antigen and prostate cancer: Prediction, detection and monitoring. *Nature Reviews Cancer*, 8, 268–278. <https://doi.org/10.1038/nrc2351>.
- Ma, Y. (2025). Construction and data analysis of a new media content popularity prediction model based on Naive Bayes algorithm. *Procedia Computer Science*, 261, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.207>.
- Marashi-Hosseini, L., Jafarirad, S., & Hadianfard, A. M. (2023). A fuzzy-based dietary clinical decision support system for patients with multiple chronic conditions (MCCs). *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39371-4>.
- Nagpal, D., Lai, H., Gibson, M. P., Zeinabadi, M. S., & Kornerup, I. M. (2024). Knowledge, confidence, and clinical reasoning of dental students for diagnosing pediatric periodontal diseases. *Global Pediatrics*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.gped.2024.100229>.
- Prasad, R., & Shukla, P. K. (2023). Indeterminacy handling of adaptive neuro-fuzzy inference system using neutrosophic set theory: A case study for the classification of diabetes mellitus. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 15(3), 1–15. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2023.03.01>.
- Shin, D. (2024). Prediction of metabolic syndrome using machine learning approaches based on genetic and nutritional factors: A 14-year prospective cohort study. *BMC Medical Genomics*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12920-024-01998-1>.
- Shortliffe, E. H., & Buchanan, B. G. (1975). A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 23, 351–379. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90047-4).
- Standring, S. (Ed.). (2016). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (41st ed.). Elsevier.
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>.
- Van Dyne, A., Moy, J., Wash, K., Thompson, L., Skow, T., Roesch, S. C., & Cronan, T. (2022). Health, psychological, and demographic predictors of depression in people with fibromyalgia and osteoarthritis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph19063413>.
- Wójcik, W., Mezhiievska, I., Pavlov, S. V., Lewandowski, T., Vlasenko, O. V., Maslovskiy, V., Volosovych, O., Kobylanska, I., Moskovchuk, O., Ovcharuk, V., & Lewandowska, A. (2023). Medical fuzzy-expert system for assessment of the degree of anatomical lesion of coronary arteries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph20020979>.