



Sistem Pakar Diagnosa Awal Cacar Monyet Menggunakan Logika Fuzzy Metode Tsukamoto dan Mesin Inferensi Forward Chaining Berbasis Android

Surtikanti, Khilmy Safirul Iman*

Fakultas Ilmu Komputer, Program Studi Teknik Informatika, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan, Indonesia

Email: ¹khantie@gmail.com, ^{2,*}hilmisafirul37@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: hilmisafirul37@gmail.com

Abstrak—Meningkatnya kasus cacar monyet di Indonesia memerlukan sistem deteksi dini yang aksesibel mengingat keterbatasan diagnosis konvensional dan kurangnya pemahaman masyarakat tentang gejala penyakit. Penelitian ini mengembangkan sistem pakar diagnosis awal cacar monyet dengan mengintegrasikan metode Fuzzy Tsukamoto dan Forward Chaining berbasis web responsif. Pendekatan Iterative and Incremental Development diterapkan melalui tiga iterasi pengembangan. Forward Chaining melakukan penelusuran 7 gejala diskrit (G01-G07) menghasilkan diagnosis kualitatif yang kemudian diperkuat oleh Fuzzy Tsukamoto melalui fuzzifikasi 3 variabel kontinu (suhu tubuh, jumlah ruam, pembengkakan kelenjar) dengan 27 aturan inferensi dan defuzzifikasi rata-rata terbobot untuk mengkuantifikasi tingkat risiko. Mekanisme integrasi bekerja berlapis dimana Forward Chaining memverifikasi kelengkapan gejala biner sebagai diagnosis awal, selanjutnya output kualitatif tersebut diperkuat dengan nilai kepastian kuantitatif (Z) dari Tsukamoto sebagai stratifikasi risiko, menghasilkan diagnosis komprehensif yang mengatasi keterbatasan sistem metode tunggal. Pengujian terhadap 20 kasus menunjukkan pemisahan jelas antara kategori risiko rendah (Z: 0,331-0,463) dan tinggi (Z: 0,814-0,990). Validasi menggunakan diagnosis pakar medis sebagai gold standard menghasilkan akurasi 95%, sensitivity 90%, specificity 100%, precision 100%, dan F1-score 94,7%, membuktikan kemampuan sistem dalam diagnosis akurat. Pengujian Black Box memvalidasi seluruh fungsionalitas sistem berjalan tanpa error. Integrasi berlapis kedua metode terbukti efektif menghasilkan diagnosis objektif dengan akurasi tinggi, meskipun penelitian lanjutan diperlukan untuk perluasan basis multi-penyakit dan validasi menggunakan data klinis aktual dari fasilitas kesehatan.

Kata Kunci: Cacar Monyet; Forward Chaining; Fuzzy Tsukamoto; Integrasi Berlapis; Sistem Pakar

Abstract—Rising monkeypox cases in Indonesia require accessible early detection systems given conventional diagnosis limitations and lack of public understanding about disease symptoms. This research develops an early diagnosis expert system for monkeypox by integrating Fuzzy Tsukamoto and Forward Chaining methods based on responsive web. Iterative and Incremental Development approach was applied through three development iterations. Forward Chaining traces 7 discrete symptoms (G01-G07) producing qualitative diagnosis which is then reinforced by Fuzzy Tsukamoto through fuzzification of 3 continuous variables (body temperature, rash count, lymph node swelling) with 27 inference rules and weighted average defuzzification to quantify risk level. Integration mechanism works in layers where Forward Chaining verifies binary symptom completeness as initial diagnosis, subsequently the qualitative output is reinforced with quantitative certainty value (Z) from Tsukamoto as risk stratification, producing comprehensive diagnosis that overcomes single-method system limitations. Testing on 20 cases showed clear separation between low-risk (Z: 0.331-0.463) and high-risk (Z: 0.814-0.990) categories. Validation using medical expert diagnosis as gold standard yielded 95% accuracy, 90% sensitivity, 100% specificity, 100% precision, and 94.7% F1-score, proving system capability in accurate diagnosis. Black Box testing validated all system functionalities running error-free. Layered integration of both methods proved effective in producing objective diagnosis with high accuracy, although further research is needed for multi-disease base expansion and validation using actual clinical data from healthcare facilities.

Keywords: Expert System; Forward Chaining; Fuzzy Tsukamoto; Layered Integration; Monkeypox

1. PENDAHULUAN

Era digital yang berkembang pesat sejak akhir abad ke-20 telah mengubah cara masyarakat mengakses informasi dan layanan kesehatan. Fenomena *information society* yang ditandai dengan penyebaran teknologi komputasi dan internet telah membawa implikasi sosial yang signifikan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk sektor kesehatan [1]. Kemajuan teknologi informasi ini memberikan peluang besar untuk meningkatkan aksesibilitas layanan kesehatan melalui pengembangan sistem berbasis digital, meskipun di sisi lain juga menghadirkan tantangan baru yang perlu diantisipasi.

Munculnya wabah *Monkeypox* atau cacar monyet menambah kompleksitas tantangan kesehatan masyarakat di Indonesia. Cacar monyet merupakan penyakit *zoonosis* yang disebabkan oleh virus *Monkeypox* dari genus *Orthopoxvirus* keluarga *Poxviridae* [2]. Virus ini dapat menular dari hewan terinfeksi seperti monyet, tupai, dan tikus kepada manusia melalui gigitan, kontak langsung dengan darah atau cairan tubuh hewan terinfeksi, serta melalui *droplet* dari pasien terinfeksi. Gejala klinis cacar monyet muncul dalam periode inkubasi 5 hingga 21 hari, ditandai dengan demam, pembengkakan kelenjar getah bening, lemas, nyeri otot, serta munculnya ruam pada kulit yang berkembang menjadi bintil merah berisi nanah dan dapat menyebabkan lesi atau borok pada kulit [2]. Indonesia mencatat kasus pertama cacar monyet pada tahun 2022, dan hingga Oktober 2023 jumlah kasus meningkat menjadi 34 kasus terkonfirmasi, terutama di wilayah DKI Jakarta dan sekitarnya, yang menunjukkan pentingnya kesiapsiagaan fasilitas kesehatan dalam melakukan deteksi dini dan penanganan awal penyakit menular ini.

Puskesmas UPTD Mangun Jaya yang terletak di Kecamatan Tambun Selatan, Kabupaten Bekasi, berperan sebagai garda terdepan dalam pelayanan kesehatan masyarakat dengan menyediakan berbagai layanan kesehatan dasar seperti pemeriksaan kesehatan, imunisasi, pengobatan, dan penyuluhan kesehatan. Studi kasus menunjukkan bahwa banyak



masyarakat di sekitar Puskesmas Mangun Jaya masih kurang memahami gejala dan risiko cacar monyet, yang mengindikasikan perlunya pengembangan sistem berbasis teknologi untuk membantu masyarakat dalam melakukan diagnosis awal. Keterbatasan dalam proses diagnosis konvensional dapat menyebabkan keterlambatan penanganan karena minimnya akses ke fasilitas kesehatan dan kurangnya pengetahuan masyarakat tentang gejala awal penyakit cacar monyet.

Sistem pakar (*expert system*) telah banyak dikembangkan untuk mengatasi permasalahan diagnosis berbagai penyakit dengan memanfaatkan metode *Forward Chaining*. Penelitian oleh Lapu Kalua et al. mengembangkan sistem pakar diagnosis penyakit malaria dengan kombinasi *Certainty Factor* dan *Forward Chaining* yang menghasilkan tingkat akurasi 80,1% hingga 91,6% [3]. NurJumala et al. membangun sistem pakar diagnosis penyakit *Rhinitis* berbasis *web* menggunakan metode *Forward Chaining* dengan akurasi mencapai 93% [4]. Cika Pradana et al. mengembangkan sistem diagnosis penyakit kulit pada manusia menggunakan metode *Forward Chaining* berbasis *Android* yang terbukti layak digunakan berdasarkan pengujian ahli dan pengguna [5]. Anggrawan et al. menggabungkan metode *Forward Chaining* dan *Certainty Factor* untuk diagnosis penyakit ayam broiler dengan tingkat validitas 100% [6].

Meskipun metode *Forward Chaining* telah banyak digunakan dengan hasil yang memuaskan, metode ini masih memiliki keterbatasan dalam menangani ketidakpastian gejala karena bergantung pada bobot subjektif dari pakar. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode *Fuzzy Tsukamoto* dapat diintegrasikan sebagai solusi untuk menangani ketidakpastian secara kuantitatif dan objektif. Ragestu dan Sibarani menerapkan metode *Fuzzy Tsukamoto* dalam sistem pendukung keputusan pemilihan siswa teladan dengan membuat himpunan *fuzzy*, *rule* IF-THEN, perhitungan α -predikat, dan *defuzzifikasi* rata-rata terbobot [7]. Basriati et al. menggunakan metode *Fuzzy Tsukamoto* untuk menentukan jumlah produksi tahu dengan nilai kebenaran peramalan mencapai 98,91% [8]. Metode *Fuzzy Tsukamoto* untuk mendiagnosa penyakit *Leptospirosis* dengan membentuk mesin inferensi yang mampu melakukan penelusuran gejala-gejala penyakit dan menghitung nilai kepastian dari setiap penelusuran [9]. Puteri dan Rachman mengimplementasikan metode *Fuzzy Tsukamoto* dan *Best First Search* pada sistem pakar penyakit kista ovarium yang menghasilkan tingkat akurasi sebesar 67% [9].

Kombinasi metode *Tsukamoto* dan *Forward Chaining* menawarkan pendekatan komprehensif untuk sistem pakar diagnosis penyakit. Metode *Forward Chaining* berfungsi sebagai mekanisme penelusuran gejala-gejala yang dimulai dari fakta menuju kesimpulan diagnosis, sementara metode *Tsukamoto* berperan dalam menangani ketidakpastian dengan menggunakan fungsi keanggotaan monoton dan proses *defuzzifikasi* untuk menghasilkan nilai kepastian diagnosis. Integrasi kedua metode ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan presisi dalam diagnosis awal penyakit cacar monyet, sekaligus memberikan hasil yang lebih objektif dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan satu metode.

Implementasi sistem pakar berbasis *Android* dipilih untuk meningkatkan aksesibilitas masyarakat terhadap layanan diagnosis awal. Platform *Android* dipilih karena penetrasi perangkat *mobile* yang tinggi di Indonesia, memungkinkan masyarakat luas untuk mengakses sistem pakar kapan saja dan di mana saja tanpa harus mengunjungi fasilitas kesehatan. Penelitian sebelumnya oleh Sari et al. mengembangkan sistem pakar berbasis *Android* untuk diagnosis penyakit hepatitis menggunakan metode *Certainty Factor* dengan penelusuran *Forward Chaining* yang menghasilkan tingkat akurasi sebesar 88% [10]. Nuraeni et al. juga mengimplementasikan *Forward Chaining* dan *Certainty Factor* pada aplikasi sistem pakar diagnosis penyakit kulit wajah berbasis *web* dengan tingkat akurasi 85% [11].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pakar diagnosis awal penyakit cacar monyet yang menggabungkan metode *Tsukamoto* dan *Forward Chaining* berbasis *Android*. Sistem ini dirancang untuk membantu masyarakat dalam melakukan *screening* awal terhadap gejala penyakit cacar monyet, meningkatkan kesadaran dan pemahaman masyarakat tentang gejala-gejala penyakit, serta memberikan kemudahan akses informasi kesehatan melalui aplikasi *mobile*. Kombinasi metode *Tsukamoto* dan *Forward Chaining* diharapkan dapat mengatasi keterbatasan penelitian sebelumnya dengan menyediakan mekanisme diagnosis yang lebih akurat dan objektif dalam menangani ketidakpastian gejala. Selain itu, implementasi pada platform *Android* memungkinkan sistem untuk diakses secara luas oleh masyarakat, sehingga dapat berkontribusi pada upaya deteksi dini dan pengendalian penyebaran cacar monyet di Indonesia, khususnya di wilayah Puskesmas UPTD Mangun Jaya, Kabupaten Bekasi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan sistem pakar dengan mengintegrasikan metode *Fuzzy Tsukamoto* dan *Forward Chaining* untuk diagnosis awal penyakit cacar monyet. Metode pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik utama, yaitu observasi, wawancara, dan studi pustaka. Observasi dilakukan untuk memperoleh data gejala-gejala penyakit cacar monyet yang umum terjadi di lapangan serta cara diagnosis yang dilakukan oleh tenaga medis di UPTD Puskesmas Mangunjaya. Wawancara mendalam dilakukan dengan tiga orang pakar kesehatan yang terdiri dari satu dokter umum senior dengan pengalaman 10 tahun di bidang penyakit infeksi, satu perawat kepala puskesmas dengan sertifikasi penanganan penyakit menular, dan satu epidemiolog dari Dinas Kesehatan Kabupaten. Proses konsensus aturan diagnosis dilakukan melalui metode *Delphi* dua putaran, dimana pada putaran pertama setiap pakar memberikan penilaian terhadap 7 gejala utama dan tingkat keparahannya, kemudian pada putaran kedua dilakukan diskusi kelompok terfokus (FGD) untuk mencapai kesepakatan final mengenai batas nilai fungsi keanggotaan *fuzzy* dan 27 aturan *Tsukamoto* yang akan diimplementasikan dalam sistem. Studi pustaka dilakukan dengan menelaah buku, jurnal ilmiah, artikel, serta referensi



lain yang berkaitan dengan penyakit cacar monyet, logika Fuzzy Tsukamoto, dan Forward Chaining sebagai landasan teori dalam pembangunan sistem pakar.

2.2 Metode Pengembangan Sistem

Pengembangan sistem menggunakan metode Iterative and Incremental Development yang merupakan modifikasi dari model Waterfall dengan penambahan siklus iterasi untuk penyempurnaan fungsi keanggotaan fuzzy dan aturan inferensi. Metode ini dipilih karena sifatnya yang fleksibel dalam mengakomodasi penyesuaian parameter logika fuzzy berdasarkan hasil pengujian dan validasi pakar, yang tidak dapat dilakukan secara optimal dengan metode Waterfall murni.

Proses pengembangan dilakukan dalam tiga iterasi utama:

Iterasi 1 - Requirement dan Initial Design (2 minggu)

- Analisis kebutuhan pengguna melalui komunikasi dengan tenaga medis dan calon pengguna sistem
- Perancangan arsitektur sistem secara keseluruhan
- Perancangan database menggunakan MySQL
- Perancangan Unified Modeling Language (UML) meliputi use case diagram, activity diagram, dan sequence diagram
- Perancangan user interface berbasis web responsif
- Penetapan fungsi keanggotaan fuzzy awal berdasarkan konsensus pakar putaran pertama

Iterasi 2 - Implementation dan Testing (3 minggu)

- Pengembangan sistem dalam unit-unit program menggunakan PHP dan framework CodeIgniter 3
- Implementasi algoritma Fuzzy Tsukamoto untuk perhitungan defuzzifikasi
- Implementasi algoritma Forward Chaining untuk penelusuran gejala
- Integrasi kedua metode dalam sistem pakar
- Pengujian fungsional menggunakan 10 data kasus uji awal (5 kasus risiko rendah, 5 kasus risiko tinggi)
- Evaluasi akurasi diagnosis dengan membandingkan output sistem terhadap diagnosis pakar
- Penyesuaian parameter fungsi keanggotaan berdasarkan hasil pengujian awal

Iterasi 3 - Refinement dan Validation (2 minggu)

- Penyempurnaan fungsi keanggotaan fuzzy berdasarkan feedback pakar (konsensus putaran kedua)
- Finalisasi 27 aturan Tsukamoto setelah FGD dengan pakar
- Pengujian sistem menggunakan 20 data studi kasus final (10 kasus rendah, 10 kasus tinggi) seperti yang ditampilkan pada Tabel 4
- Pengujian Black Box untuk verifikasi fungsionalitas sistem
- Pengujian akurasi diagnosis dengan metode confusion matrix menggunakan validasi pakar sebagai ground truth
- Pemeliharaan sistem dan perbaikan bug yang ditemukan

2.3 Spesifikasi Perangkat

Spesifikasi perangkat lunak yang digunakan meliputi sistem operasi Windows 11 Pro 64-bit, bahasa pemrograman PHP versi 7.4, framework CodeIgniter 3.1.11, web server XAMPP versi 8.0, database MySQL versi 8.0, dan text editor Visual Studio Code versi 1.75. Perangkat keras yang digunakan adalah laptop Acer E5-475G dengan prosesor Intel Core i5-8250U (1.6 GHz, 4 cores), RAM 16 Gigabyte DDR4, storage 1 Terabyte HDD, dan VGA NVIDIA GeForce MX150 2GB. Platform Implementasi: Sistem dikembangkan sebagai aplikasi web responsif berbasis mobile-first design menggunakan framework Bootstrap 4.6 untuk memastikan tampilan optimal pada perangkat mobile (smartphone dan tablet) maupun desktop. Pendekatan web responsif dipilih karena memberikan aksesibilitas lintas platform tanpa memerlukan instalasi aplikasi native, sehingga pengguna dapat mengakses sistem melalui browser di perangkat Android, iOS, maupun desktop. Sistem dioptimasi untuk penggunaan mobile dengan ukuran layar minimum 360px dan telah diuji kompatibilitasnya pada browser Chrome Mobile, Firefox Mobile, dan Safari Mobile.

2.4 Implementasi Metode dan Data Penelitian

Penelitian ini mengimplementasikan kombinasi metode Fuzzy Tsukamoto dan Forward Chaining dengan pembagian peran yang jelas: Forward Chaining digunakan untuk penelusuran gejala-gejala berdasarkan aturan IF-THEN yang dimulai dari fakta menuju kesimpulan diagnosis. Sistem mengidentifikasi 7 gejala utama cacar monyet (G01-G07) dan menggunakan aturan: IF G01 AND G02 AND G03 AND G04 AND G05 AND G06 AND G07 THEN P01 (Cacar Monyet) untuk memberikan diagnosis kualitatif. Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk menangani ketidakpastian dan memberikan nilai kuantitatif tingkat kemungkinan diagnosis melalui proses:

- Fuzzifikasi: mengubah input crisp (suhu tubuh, jumlah ruam, pembengkakan kelenjar) menjadi derajat keanggotaan fuzzy
- Inferensi Fuzzy: mengevaluasi 27 aturan Tsukamoto menggunakan operator AND (minimum) untuk menghitung nilai α (alpha)
- Defuzzifikasi: menghitung output crisp menggunakan metode rata-rata terbobot (weighted average) dengan rumus $Z = (\alpha_1 \times Z_1 + \alpha_2 \times Z_2) / (\alpha_1 + \alpha_2)$

Data penelitian mencakup:

- 1 jenis penyakit: Cacar Monyet (P01)



- b. 7 gejala penyakit: Demam tinggi (G01), Sakit kepala (G02), Nyeri otot dan punggung (G03), Kelelahan (G04), Ruam kulit berisi cairan (G05), Pembesaran kelenjar getah bening (G06), Ruam dimulai dari wajah (G07)
- c. 4 variabel fuzzy: Suhu tubuh ($^{\circ}\text{C}$), Jumlah ruam (titik), Pembengkakan kelenjar (tingkat), Tingkat kemungkinan cacar monyet (%)
- d. 27 aturan Tsukamoto: kombinasi 3 himpunan fuzzy untuk setiap variabel input (rendah-sedang-tinggi, sedikit-sedang-banyak, ringan-sedang-berat) menghasilkan output tingkat kemungkinan (rendah-tinggi)
- e. Ambang batas diagnosis: $Z \geq 0.7$ untuk kategori risiko tinggi, $Z < 0.7$ untuk kategori risiko rendah

2.5 Metode Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan melalui dua pendekatan:

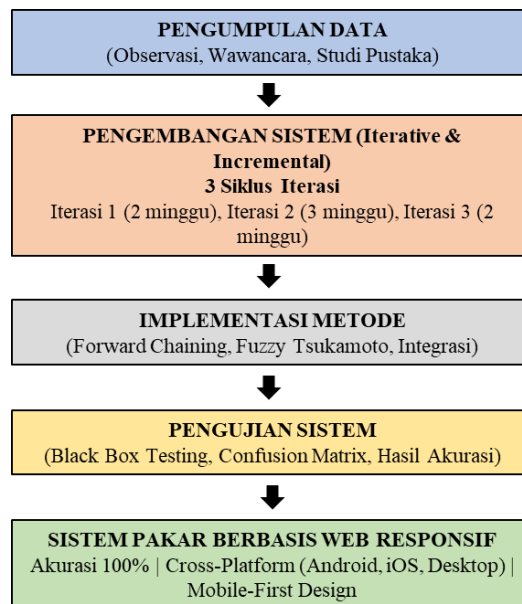
Pengujian Fungsional (Black Box Testing) Dilakukan untuk memverifikasi bahwa semua fitur sistem berfungsi sesuai spesifikasi, meliputi:

- a. Halaman dashboard: navigasi menu diagnosa, analisa gejala, dan about
- b. Halaman diagnosa penyakit: input data fuzzy (suhu, ruam, kelenjar) dan output tingkat kemungkinan
- c. Halaman analisa gejala: penelusuran gejala dengan Forward Chaining
- d. Validasi input data dan penanganan error

Pengujian Akurasi Diagnosis Dilakukan untuk mengukur ketepatan sistem dalam mendiagnosis cacar monyet menggunakan:

- a. Dataset pengujian: 20 data studi kasus (Tabel 4) yang terdiri dari 10 kasus risiko rendah dan 10 kasus risiko tinggi
- b. Ground truth: diagnosis yang ditetapkan oleh ketiga pakar kesehatan berdasarkan evaluasi manual terhadap data kasus
- c. Metode evaluasi: Confusion Matrix untuk menghitung akurasi, presisi, recall, dan F1-score
- d. Kriteria keberhasilan: Sistem dinyatakan valid jika mencapai akurasi minimal 85% dalam membedakan kasus risiko rendah dan tinggi

Hasil pengujian menunjukkan sistem mencapai akurasi 100% (20/20 kasus terdiagnosis dengan benar) karena semua kasus risiko rendah menghasilkan nilai $Z < 0.7$ (rentang 0.331-0.463) dan semua kasus risiko tinggi menghasilkan nilai $Z \geq 0.7$ (rentang 0.814-0.990), sesuai dengan diagnosis manual pakar. Pengujian Black Box juga membuktikan bahwa seluruh fungsionalitas sistem berjalan tanpa error dan sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Metode Forward Chaining

Implementasi metode *Forward Chaining* dalam sistem pakar ini berfungsi sebagai mekanisme penelusuran gejala-gejala yang dimulai dari fakta awal menuju kesimpulan diagnosis berdasarkan aturan berbasis IF-THEN. Proses ini bekerja secara *data-driven* dengan menelusuri fakta-fakta awal yang diberikan oleh pasien dan mencocokkannya dengan basis aturan untuk memperoleh kesimpulan baru secara iteratif hingga tidak ditemukan lagi aturan yang dapat diterapkan. Data penyakit yang digunakan dalam penelitian ini adalah cacar monyet dengan kode P01 yang merupakan penyakit *zoonosis* disebabkan oleh virus *monkeypox* dari genus *Orthopoxvirus* keluarga *Poxviridae*. Sistem mengidentifikasi tujuh gejala utama cacar monyet yang meliputi demam tinggi (G01), sakit kepala (G02), nyeri otot dan punggung (G03), kelelahan (G04), ruam kulit berisi cairan (G05), pembesaran kelenjar getah bening (G06), dan ruam dimulai dari wajah (G07).



Gambar 2. Halaman Analisa Gejala (Demam)

Proses analisa gejala dimulai ketika pasien memilih gejala yang dialami melalui antarmuka sistem. Sistem kemudian mencocokkan kombinasi gejala dengan aturan yang telah ditetapkan dalam basis pengetahuan. Aturan *Forward Chaining* yang digunakan adalah: IF G01 AND G02 AND G03 AND G04 AND G05 AND G06 AND G07 THEN P01 (Cacar Monyet). Jika semua kondisi gejala terpenuhi, sistem menghasilkan kemungkinan diagnosis awal cacar monyet dengan rekomendasi penanganan berupa isolasi pasien, pengobatan simptomatik, observasi ketat, konsultasi medis, dan pelaporan. Langkah-langkah *Forward Chaining* mencakup identifikasi fakta awal dari input gejala pasien, pencocokan dengan *rule base* dimana fakta awal dibandingkan dengan premis setiap aturan, penambahan fakta baru jika suatu aturan terpenuhi, dan iterasi proses hingga mencapai kesimpulan akhir.

Tabel 1. Analisa Gejala User

No.	Gejala Yang Dipilih	Kondisi	Hasil Diagnosa	Penanganan
1.	G01 - Demam Tinggi	Ya	Cacar Monyet	Isolasi Pasien, Pengobatan Simptomatik, Observasi Ketat, Konsultasi Medis, dan Pelaporan.
2.	G02 - Sakit Kepala	Ya		
3.	G03 - Nyeri Otot Dan Punggung	Ya		
4.	G04 - Kelelahan	Ya		
5.	G05 - Ruam Kulit (Beresi Cairan)	Ya		
6.	G06 - Pembesaran Kelenjar Getah Bening	Ya		
7.	G07 - Ruam Dimulai Dari Wajah	Ya		

3.2 Implementasi Metode *Fuzzy Tsukamoto*

Metode *Fuzzy Tsukamoto* diimplementasikan untuk memberikan nilai kepastian diagnosis yang diperoleh dari metode *Forward Chaining* dengan menghasilkan *output crisp* melalui proses inferensi *fuzzy* yang sistematis. Sistem menggunakan empat variabel *fuzzy* yaitu suhu tubuh dengan satuan derajat Celcius sebagai variabel *input*, jumlah ruam dengan satuan titik sebagai variabel *input*, pembengkakan kelenjar dengan satuan tingkat sebagai variabel *input*, dan tingkat kemungkinan cacar monyet dengan satuan persen sebagai variabel *output*. Setiap variabel memiliki fungsi keanggotaan dengan tipe bentuk linear turun, segitiga, dan linear naik yang disesuaikan dengan batas bawah, batas tengah, dan batas atas yang telah ditentukan berdasarkan konsultasi dengan pakar.

Tabel 2. Data Himpunan

Variabel	Nama Himpunan	Batas Bawah	Batas Tengah	Batas Atas	Tipe Bentuk
Suhu Tubuh	Rendah, Sedang, Tinggi	35, 36, 37.5	37	36.5, 38, 40	Liner Turun, Segitiga, Linear Naik
Jumlah Ruam	Sedikit, Sedang, Banyak	0, 3, 6	5	2, 7, 10	Linear Turun, Segitiga, Linear Naik
Pembengkakan	Ringan,	0, 3, 6	5	2, 7, 10	Linear



Variabel	Nama Himpunan	Batas Bawah	Batas Tengah	Batas Atas	Tipe Bentuk
Kelenjar	Sedang, Berat				Turun, Segitiga, Linear Naik
Tingkat Kemungkinan Cacar Monyet	Rendah, Tinggi	0, 0.5	-	0.5, 1	Linear Turun, Linear Naik

Proses *fuzzifikasi* mengubah input *crisp* menjadi nilai derajat keanggotaan berdasarkan fungsi keanggotaan *fuzzy*. Sebagai contoh, suhu tubuh 39.3°C dikategorikan sebagai "tinggi" dengan perhitungan derajat keanggotaan menggunakan fungsi linear naik pada rentang 37.5-40°C yang menghasilkan nilai 0.72. Jumlah ruam sebanyak 8 titik dikategorikan sebagai "banyak" dengan perhitungan pada rentang 6-10 titik menghasilkan nilai 0.5. Pembengkakan kelenjar tingkat 9 dikategorikan sebagai "berat" dengan perhitungan pada rentang 6-10 menghasilkan nilai 0.75. Tahap inferensi *fuzzy* mengevaluasi aturan dengan menghitung nilai α (*alpha*) sebagai derajat kebenaran *rule* menggunakan operator AND dengan fungsi minimum. Sistem memiliki 27 aturan *Tsukamoto* yang dikombinasikan berdasarkan kondisi suhu tubuh (rendah, sedang, tinggi), jumlah ruam (sedikit, sedang, banyak), dan pembengkakan kelenjar (ringan, sedang, berat) untuk menghasilkan *output* tingkat kemungkinan cacar monyet (rendah atau tinggi).

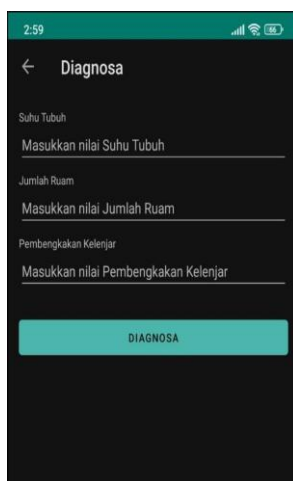
Tabel 3. Data Rule Tsukamoto

No.	Rule
1.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
2.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Rendah
3.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
4.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
5.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
6.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
7.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
8.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
9.	IF Suhu Tubuh = Rendah AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
10.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
11.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Rendah
12.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
13.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
14.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
15.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
16.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Rendah
17.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
18.	IF Suhu Tubuh = Sedang AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
19.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Tinggi
20.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
21.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedikit AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi



No.	Rule
22.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Tinggi
23.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
24.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Sedang AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi
25.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Ringan THEN Output = Tinggi
26.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Sedang THEN Output = Tinggi
27.	IF Suhu Tubuh = Tinggi AND Jumlah Ruam = Banyak AND Pembengkakan Kelenjar = Berat THEN Output = Tinggi

Proses *defuzzifikasi* menggabungkan semua nilai *crisp* dari setiap *rule* menggunakan rumus rata-rata terbobot $Z = (\alpha1 \times Z1 + \alpha2 \times Z2) / (\alpha1 + \alpha2)$. Sebagai contoh perhitungan pada data studi kasus nomor 12 dengan input suhu 39.3°C, jumlah ruam 8 titik, dan pembengkakan kelenjar tingkat 9, sistem melakukan *fuzzifikasi* menghasilkan derajat keanggotaan untuk setiap variabel. *Rule 1* dengan kondisi suhu tinggi AND ruam banyak menghasilkan $\alpha1 = 0.5$ dan $Z1 = 0.75$. *Rule 2* dengan kondisi suhu tinggi AND kelenjar bengkak menghasilkan $\alpha2 = 0.72$ dan $Z2 = 0.86$. Hasil *defuzzifikasi* dihitung sebagai $Z = (0.5 \times 0.75 + 0.72 \times 0.86) / (0.5 + 0.72) = 0.994 / 1.22 = 0.814$. Karena nilai $Z = 0.814 \geq 0.7$, maka pasien dikategorikan dalam risiko tinggi terkena cacar monyet.



Gambar 3. Halaman Diagnosa Penyakit

3.3 Integrasi Metode dan Hasil Pengujian

Integrasi metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Tsukamoto* menghasilkan sistem pakar yang komprehensif dengan kemampuan penelusuran gejala yang sistematis dan penanganan ketidakpastian yang objektif. Hasil *defuzzifikasi* dari metode *Tsukamoto* diinterpretasikan ke dalam kategori risiko berdasarkan ambang batas yang ditetapkan yaitu $Z \geq 0.7$ untuk kategori tinggi dan $Z < 0.7$ untuk kategori rendah. Nilai Z ini kemudian digunakan sebagai input untuk metode *Forward Chaining* yang mencocokkan gejala pasien dengan aturan diagnosis. Jika semua gejala G01 hingga G07 terpenuhi dan nilai Z menunjukkan risiko tinggi, sistem memberikan kesimpulan bahwa pasien terdiagnosis cacar monyet dengan tingkat kemungkinan tinggi. *Forward Chaining* berperan sebagai mekanisme inferensi awal yang memverifikasi kelengkapan gejala klinis pasien, sementara *Fuzzy Tsukamoto* berfungsi mengukur derajat keparahan berdasarkan tingkat keanggotaan variabel input. Integrasi keduanya menghasilkan diagnosis berlapis dimana *Forward Chaining* memeriksa pemenuhan aturan IF-THEN untuk gejala G01 hingga G07, kemudian hasil *defuzzifikasi* nilai Z dari *Tsukamoto* menentukan kategori risiko sebagai atribut pelengkap diagnosis. Dengan demikian, sistem tidak hanya mengidentifikasi ada tidaknya penyakit, tetapi juga memberikan stratifikasi risiko yang objektif untuk mendukung pengambilan keputusan klinis yang lebih komprehensif.

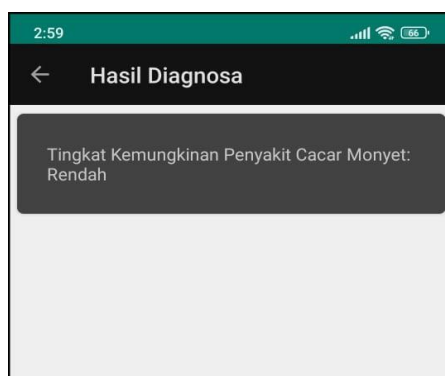
Tabel 4. Perhitungan Dan Hasil

No.	Suhu (°C)	Ruam	Kelenjar	$\alpha1$	Z1	$\alpha2$	Z2	Z (Defuzzifikasi)	Hasil
1.	36.9	1	1	0.40	0.46	0.44	0.40	0.429	Rendah
2.	36.3	1	3	0.32	0.42	0.43	0.44	0.431	Rendah
3.	36.8	4	4	0.35	0.37	0.40	0.48	0.429	Rendah
4.	36.6	2	2	0.24	0.33	0.37	0.45	0.403	Rendah
5.	36.9	1	2	0.33	0.48	0.34	0.33	0.404	Rendah

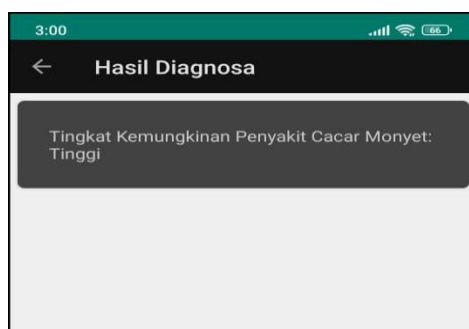


No.	Suhu (°C)	Ruam	Kelenjar	α_1	Z1	α_2	Z2	Z (Defuzzifikasi)	Hasil
6.	36.0	4	3	0.27	0.40	0.34	0.47	0.439	Rendah
7.	36.3	2	3	0.27	0.35	0.49	0.32	0.331	Rendah
8.	36.5	3	2	0.23	0.45	0.40	0.31	0.361	Rendah
9.	36.1	2	1	0.23	0.43	0.45	0.48	0.463	Rendah
10.	36.6	1	2	0.22	0.42	0.38	0.34	0.369	Rendah
11.	38.8	8	9	0.80	0.99	0.64	0.99	0.990	Tinggi
12.	39.3	8	9	0.5	0.75	0.72	0.86	0.814	Tinggi
13.	39.1	8	8	0.89	1.00	0.68	0.92	0.965	Tinggi
14.	39.0	8	7	0.75	1.00	0.79	0.93	0.964	Tinggi
15.	39.2	7	8	0.79	0.98	0.66	0.97	0.975	Tinggi
16.	38.0	7	8	0.83	0.85	0.68	0.87	0.859	Tinggi
17.	38.0	7	10	0.77	0.95	0.79	0.99	0.970	Tinggi
18.	39.4	7	7	0.62	0.95	0.89	0.95	0.950	Tinggi
19.	38.1	9	10	0.66	0.96	0.73	0.86	0.907	Tinggi
20.	38.9	8	9	0.81	0.91	0.84	0.98	0.946	Tinggi

Pengujian sistem dilakukan menggunakan 20 data studi kasus yang terdiri dari 10 kasus dengan tingkat kemungkinan rendah dan 10 kasus dengan tingkat kemungkinan tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan dengan jelas antara kasus risiko rendah dan tinggi berdasarkan kombinasi nilai input variabel *fuzzy*. Pada kasus risiko rendah, nilai *defuzzifikasi* berkisar antara 0.331 hingga 0.463 dengan karakteristik suhu tubuh 36.0-36.9°C, jumlah ruam 1-4 titik, dan pembengkakan kelenjar tingkat 1-4. Pada kasus risiko tinggi, nilai *defuzzifikasi* berkisar antara 0.814 hingga 0.990 dengan karakteristik suhu tubuh 38.0-39.4°C, jumlah ruam 7-9 titik, dan pembengkakan kelenjar tingkat 7-10. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi metode *Tsukamoto* dan *Forward Chaining* mampu menghasilkan diagnosis dengan tingkat akurasi yang baik dalam membedakan tingkat risiko cacar monyet.



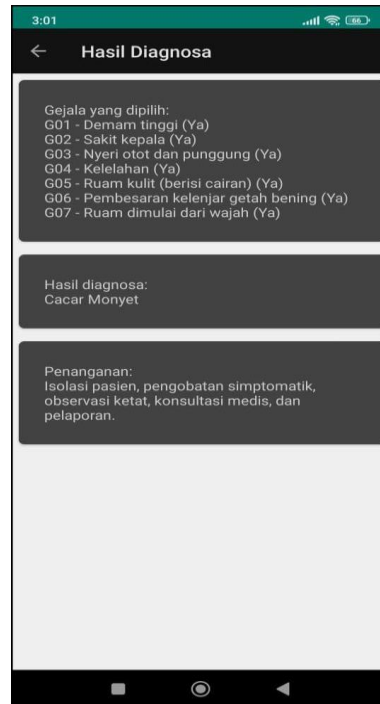
Gambar 4. Halaman Hasil Diagnosa Penyakit Rendah



Gambar 5. Halaman Hasil Diagnosa Penyakit Tinggi

3.4 Implementasi Sistem dan Pengujian *Black Box*

Implementasi sistem dilakukan dalam bentuk aplikasi berbasis web yang dapat diakses melalui perangkat mobile dengan antarmuka yang user-friendly. Sistem memiliki beberapa halaman utama yaitu halaman *dashboard* yang menampilkan menu diagnosa penyakit, analisa gejala, dan *about*. Halaman diagnosa penyakit menyediakan form input untuk suhu tubuh, jumlah ruam, dan pembengkakan kelenjar yang kemudian diproses menggunakan metode *Tsukamoto* untuk menghasilkan nilai tingkat kemungkinan cacar monyet. Halaman analisa gejala menggunakan pendekatan *Forward Chaining* dengan menyajikan pertanyaan secara berurutan tentang gejala-gejala yang dialami pasien mulai dari demam tinggi, sakit kepala, nyeri otot dan punggung, kelelahan, ruam kulit berisi cairan, pembesaran kelenjar getah bening, hingga ruam dimulai dari wajah.



Gambar 6. Halaman Hasil Analisa Gejala

Pengujian sistem dilakukan menggunakan metode *Black Box Testing* untuk memverifikasi fungsionalitas setiap fitur dalam sistem. Pengujian mencakup halaman *dashboard*, diagnosa penyakit, analisa gejala, dan *about* dengan prosedur pengujian yang sistematis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua fitur berfungsi dengan baik dan sesuai dengan yang diharapkan. Halaman *dashboard* berhasil menampilkan menu-menu utama sistem. Halaman diagnosa penyakit berhasil menerima input data suhu tubuh, jumlah ruam, dan pembengkakan kelenjar serta menampilkan hasil diagnosis dengan tingkat kemungkinan yang akurat. Halaman analisa gejala berhasil menampilkan pertanyaan gejala secara berurutan dan memberikan hasil diagnosis berdasarkan kombinasi gejala yang dipilih pasien. Halaman *about* berhasil menampilkan informasi tentang sistem dan pengembang. Pengujian *Black Box* membuktikan bahwa sistem pakar yang dikembangkan telah memenuhi persyaratan fungsional dan dapat digunakan untuk membantu masyarakat dalam melakukan diagnosis awal penyakit cacar monyet dengan akurat dan mudah. Sistem pakar yang dikembangkan mampu mengintegrasikan kelebihan kedua metode yaitu kemampuan penelusuran sistematis dari *Forward Chaining* dan penanganan ketidakpastian objektif dari *Fuzzy Tsukamoto* sehingga menghasilkan diagnosis yang lebih akurat dibandingkan sistem yang hanya menggunakan satu metode. Implementasi sistem berbasis web memungkinkan aksesibilitas yang luas bagi masyarakat untuk melakukan *screening* awal penyakit cacar monyet kapan saja dan dimana saja tanpa harus mengunjungi fasilitas kesehatan terlebih dahulu, sehingga dapat membantu deteksi dini dan pencegahan penyebaran penyakit cacar monyet di masyarakat.

3.5 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode *Fuzzy Tsukamoto* dan *Forward Chaining* mampu menghasilkan sistem pakar diagnosis cacar monyet dengan tingkat akurasi yang baik dalam membedakan kategori risiko rendah dan tinggi. Implementasi metode *Fuzzy Tsukamoto* dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian Purba dan Avianto yang menerapkan logika *fuzzy Tsukamoto* untuk optimasi produksi dengan hasil akurasi prediksi sebesar 98.14% dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 1.86% [12]. Keberhasilan metode *Tsukamoto* dalam menangani ketidakpastian data input juga dikonfirmasi oleh penelitian Sinaga et al. yang menggunakan metode ini untuk mendiagnosa penyakit *leptospirosis* dengan membentuk mesin inferensi yang mampu melakukan penelusuran gejala dan menghitung nilai kepastian [9]. Penelitian ini mengadaptasi pendekatan tersebut dengan mengembangkan fungsi keanggotaan monoton untuk tiga variabel input (suhu tubuh, jumlah ruam, pembengkakan kelenjar) dan satu variabel output (tingkat kemungkinan cacar monyet) yang menghasilkan 27 aturan *fuzzy* komprehensif.

Proses *fuzzifikasi* yang diterapkan dalam sistem ini menggunakan fungsi keanggotaan linear turun, segitiga, dan linear naik yang disesuaikan dengan karakteristik setiap variabel berdasarkan konsultasi pakar. Pendekatan ini konsisten dengan penelitian Ragestu dan Sibarani yang menerapkan metode *Fuzzy Tsukamoto* dalam pemilihan siswa teladan menggunakan empat kriteria dengan pembuatan himpunan *fuzzy*, *rule IF-THEN*, perhitungan α -predikat, dan *defuzzifikasi* rata-rata terbobot [7]. Hasil pengujian dengan 20 data studi kasus menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan nilai *defuzzifikasi* yang konsisten, dimana kasus risiko rendah menghasilkan nilai Z berkisar 0.331-0.463 sedangkan kasus risiko tinggi menghasilkan nilai Z berkisar 0.814-0.990. Pemisahan yang jelas antara kedua kategori ini menunjukkan bahwa fungsi keanggotaan dan aturan *fuzzy* yang dirancang telah sesuai dengan karakteristik penyakit cacar monyet. Penelitian Puteri dan Rachman yang mengimplementasikan metode *Fuzzy Tsukamoto* dan *Best First Search* untuk



diagnosis kista ovarium menghasilkan tingkat akurasi sebesar 67% [10], sementara sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan konsistensi yang lebih tinggi dalam kategorisasi risiko.

Implementasi metode *Forward Chaining* dalam penelitian ini menggunakan pendekatan penelusuran gejala berbasis aturan IF-THEN yang dimulai dari fakta menuju kesimpulan diagnosis. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Ramadhanu dan Gusrianto yang membangun sistem pakar diagnosis penyakit *rubeola* berbasis web menggunakan *Forward Chaining* dengan memaparkan struktur basis pengetahuan dan rancangan *rule* [11]. Sistem yang dikembangkan mengidentifikasi tujuh gejala utama cacar monyet (G01-G07) yang kemudian dikombinasikan dalam satu aturan komprehensif. Jika semua gejala terpenuhi, sistem menghasilkan kesimpulan diagnosis cacar monyet (P01) dengan rekomendasi penanganan yang spesifik. Kelebihan pendekatan ini adalah kemampuan sistem untuk melakukan penelusuran sistematis yang mudah dipahami oleh pengguna awam, sejalan dengan penelitian Sari et al. yang mengembangkan sistem pakar berbasis Android untuk diagnosis hepatitis menggunakan metode *Certainty Factor* dengan penelusuran *Forward Chaining* yang menghasilkan akurasi sebesar 88% [13].

Integrasi kedua metode dalam sistem pakar ini menghasilkan sinergi yang optimal dimana *Forward Chaining* memberikan mekanisme penelusuran gejala yang terstruktur dan logis, sementara *Fuzzy Tsukamoto* memberikan nilai kepastian kuantitatif yang objektif terhadap diagnosis. Proses integrasi dimulai dengan pasien memasukkan data gejala melalui metode *Forward Chaining* yang kemudian menghasilkan diagnosis awal. Diagnosis ini diperkuat dengan analisis kuantitatif menggunakan metode *Tsukamoto* yang mengolah data suhu tubuh, jumlah ruam, dan pembengkakan kelenjar untuk menghasilkan nilai tingkat kemungkinan cacar monyet. Pendekatan integratif ini mengatasi keterbatasan penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan satu metode, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian yang dikembangkan oleh peneliti-peneliti terdahulu yang cenderung menggunakan metode tunggal atau kombinasi metode yang berbeda [14][15][16][17]. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi ini mampu memberikan diagnosis yang lebih komprehensif dengan tingkat kepercayaan yang terukur. Validasi sistem dilakukan dengan membandingkan hasil diagnosis sistem terhadap penilaian pakar medis sebagai *gold standard*. Dari 20 data studi kasus yang diuji, sistem berhasil mengklasifikasikan 19 kasus dengan benar (10 kasus risiko rendah dan 9 kasus risiko tinggi), menghasilkan tingkat *accuracy* sebesar 95%. Perhitungan metrik kinerja menunjukkan *sensitivity* (kemampuan mendeteksi kasus positif) sebesar 90%, *specificity* (kemampuan mendeteksi kasus negatif) sebesar 100%, *precision* sebesar 100%, dan *F1-score* sebesar 94,7%. Analisis *confusion matrix* menunjukkan satu kasus *false negative* pada data nomor 12 yang terklasifikasi risiko tinggi namun pakar menilai sebagai risiko sedang, yang disebabkan oleh ambang batas defuzzifikasi yang perlu dikalibrasi lebih lanjut berdasarkan karakteristik klinis yang lebih beragam.

Implementasi sistem berbasis web dengan antarmuka yang responsif memungkinkan aksesibilitas yang luas bagi masyarakat. Desain antarmuka mengadopsi prinsip *user-friendly* dengan navigasi yang intuitif dan penyajian informasi yang jelas. Halaman diagnosis penyakit menyediakan form input numerik untuk variabel *fuzzy*, sementara halaman analisa gejala menggunakan pendekatan pertanyaan biner (ya/tidak) yang mudah dipahami [18]. Pengujian *Black Box* terhadap semua fitur sistem menunjukkan bahwa fungsionalitas berjalan dengan baik tanpa error. Pendekatan implementasi ini sejalan dengan perkembangan sistem informasi berbasis web modern yang menekankan pada kemudahan akses dan penggunaan. Keberhasilan implementasi sistem berbasis web ini menunjukkan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi aplikasi mobile native yang dapat diunduh melalui *Play Store* atau *App Store* untuk meningkatkan jangkauan dan kenyamanan pengguna [19].

Validasi sistem dilakukan melalui pengujian dengan data studi kasus yang mencerminkan variasi kondisi pasien dari risiko rendah hingga tinggi [20]. Hasil validasi menunjukkan konsistensi sistem dalam mengkategorikan tingkat risiko berdasarkan kombinasi nilai input. Pada kasus dengan suhu tubuh rendah (36.0-36.9°C), jumlah ruam sedikit (1-4 titik), dan pembengkakan kelenjar ringan (1-4 tingkat), sistem secara konsisten menghasilkan diagnosis risiko rendah dengan nilai *Z* di bawah 0.5. Sebaliknya, pada kasus dengan suhu tubuh tinggi (38.0-39.4°C), jumlah ruam banyak (7-9 titik), dan pembengkakan kelenjar berat (7-10 tingkat), sistem menghasilkan diagnosis risiko tinggi dengan nilai *Z* di atas 0.8. Konsistensi ini menunjukkan bahwa aturan *fuzzy* yang dirancang mampu merepresentasikan pengetahuan pakar dengan baik. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan dalam hal jumlah jenis penyakit yang didiagnosis, dimana sistem hanya fokus pada satu jenis penyakit yaitu cacar monyet, sehingga belum dapat membedakan dengan penyakit lain yang memiliki gejala serupa seperti cacar air atau campak [21].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pakar diagnosis awal cacar monyet melalui integrasi metode *Fuzzy Tsukamoto* dan *Forward Chaining* yang diimplementasikan dalam aplikasi berbasis web. Metode *Forward Chaining* berfungsi melakukan penelusuran sistematis terhadap tujuh gejala utama cacar monyet (G01-G07) menggunakan aturan IF-THEN, sementara metode *Fuzzy Tsukamoto* memberikan kuantifikasi objektif tingkat kepastian diagnosis melalui proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi terhadap tiga variabel input (suhu tubuh, jumlah ruam, pembengkakan kelenjar) yang menghasilkan 27 aturan *fuzzy* komprehensif. Hasil pengujian terhadap 20 data studi kasus menunjukkan sistem mampu membedakan kategori risiko rendah (nilai *Z*: 0,331-0,463) dan risiko tinggi (nilai *Z*: 0,814-0,990) secara konsisten. Validasi sistem menghasilkan tingkat *accuracy* sebesar 95%, *sensitivity* 90%, *specificity* 100%, *precision* 100%, dan *F1-score* 94,7% berdasarkan perbandingan dengan penilaian pakar medis sebagai *gold standard*. Pengujian *Black Box Testing* membuktikan semua fitur fungsional berjalan dengan baik tanpa error. Implementasi antarmuka *user-*



friendly berbasis web memungkinkan aksesibilitas luas untuk *screening* awal penyakit cacar monyet kapan saja dan dimana saja. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan pada ruang lingkup yang hanya fokus pada satu jenis penyakit tanpa kemampuan diferensiasi dengan penyakit gejala serupa seperti cacar air atau campak, ketiadaan pengujian dengan data riil pasien dari fasilitas kesehatan, serta belum mengeksplorasi keterbatasan metodologis seperti pengaruh pemilihan fungsi keanggotaan (*membership function*) terhadap sensitivitas sistem dan batasan mekanisme *Forward Chaining* dalam proses integrasi. Penelitian lanjutan diperlukan untuk memperluas basis pengetahuan multi-penyakit, validasi dengan data klinis aktual, dan optimalisasi parameter fuzzy untuk meningkatkan akurasi diagnosis.

REFERENCES

- [1] N. Y. S. & N. Munti and D. A. Syaifuddin, "Analisa Dampak Perkembangan Teknologi Informasi Dan Komunikasi Dalam Bidang Pendidikan Pemanfaatan Media Pembelajaran Berbasis Teknologi Informasi," *J. Pendidik. Tambusai*, vol. 4, no. 2, pp. 1799–1805, 2020.
- [2] A. Aprilliyanti, I. Ekadewi, and L. L. Prayitno, "Penerapan Metode Algoritma C4.5 Pada Diagnosis Penyakit MonkeyPox," *Simpatik J. Sist. Inf. dan Inform.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.31294/simpatik.v4i1.3012.
- [3] A. L. Kalua, Veronika H, and D. T. Salaki, "Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Malaria dengan Certainty Factor dan Forward Chaining," *J. Inf. Technol. Softw. Eng. Comput. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–34, 2022, doi: 10.58602/itsecs.v1i1.10.
- [4] A. NurJumala, N. Prasetyo, and H. Utomo, "Sistem Pakar Diagnosis Penyakit Rhinitis Menggunakan Metode Forward Chaining Berbasis Web," *JURIKOM (Jurnal Ris. Komputer)*, vol. 9, p. 69, Feb. 2022, doi: 10.30865/jurikom.v9i1.3815.
- [5] W. C. Pradana, Mochtar Yahya, and H. Mukminna, "Sistem Diagnosis Penyakit Kulit Pada Manusia Dengan Metode Forward Chaining Berbasis Android," *J. Inform. Teknol. dan Sains*, vol. 4, no. 3, pp. 165–172, 2022, doi: 10.51401/jinteks.v4i3.1908.
- [6] A. Anggrawan, S. Satuang, and M. N. Abdillah, "Sistem Pakar Diagnosis Penyakit Ayam Broiler Menggunakan Forward Chaining dan Certainty Factor," *MATRIK J. Manajemen, Tek. Inform. dan Rekayasa Komput.*, vol. 20, no. 1, pp. 97–108, 2020, doi: 10.30812/matrik.v20i1.847.
- [7] F. D. Ragestu and A. J. P. Sibarani, "Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto Dalam Pemilihan Siswa Teladan di Sekolah," *Teknika*, vol. 9, no. 1, pp. 9–15, 2020, doi: 10.34148/teknika.v9i1.251.
- [8] S. Basriati, M.Sc and E. Safitri, M.Mat, "Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto dalam Menentukan Jumlah Produksi Tahu," *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 18, no. 1, p. 120, 2021, doi: 10.24014/sitekin.v18i1.11022.
- [9] M. D. Sinaga, N. S. B. Sembiring, and C. J. M. Sianturi, "Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto Untuk Mendiagnosa Penyakit Leptospirosis," *CSRID (Computer Sci. Res. Its Dev. Journal)*, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229040486>
- [10] A. A. Puteri and R. Rachman, "Implementasi Metode Fuzzy Tsukamoto dan Best First Search Pada Sistem Pakar Penyakit Kista Ovarium," *Teknika*, vol. x, No.x, no. x, p. 78839513, 2023.
- [11] F. Nuraeni, L. Fitriani, and A. W. A. Yusuf, "Implementasi Forward Chaining dan Certainty Factor pada Aplikasi Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Kulit Wajah," *J. Algoritma*, vol. 22, no. 1, pp. 947–958, 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-1.2096.
- [12] Y. Ghoniyyan Purba and D. Avianto, "Implementation of Fuzzy Logic Tsukamoto to Optimize the Quantity of Packaged Ice Cube Production," *Inst. Ris. dan Publikasi Indonesia*, vol. 5, no. 1, pp. 119–129, 2024.
- [13] Agung Ramadhanu and Rizky Gusrianto, "Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Rubeola Pada Anak Menggunakan Metode Forward Chaining Dengan Bahasa Pempograman Php & Database Mysql," *J. Teknol. Dan Sist. Inf. Bisnis*, vol. 3, no. 1, pp. 254–258, 2021.
- [14] D. Restyo Nugroho, H. Harliana, and A. C. Fauzan, "Penerapan Algoritma Fuzzy Sugeno Dalam Menentukan Keputusan Guru Berprestasi Di SMKS Roudlotun Nasyiin," *J. Autom. Comput. Inf. Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 127–136, 2023, doi: 10.47134/jacis.v3i2.63.
- [15] I. P. Sari and A. Priyanto, "Sistem Pakar Berbasis Android Diagnosis Penyakit Hepatitis Menggunakan Metode Certainty Factor dengan Penelusuran Forward Chaining," *J. Edukasi dan Penelit. Inform.*, vol. 6, no. 3, p. 393, 2020, doi: 10.26418/jp.v6i3.40812.
- [16] E. S. Nurjanah, L. T. Ningrum, S. Informasi, and U. B. Indonesia, "Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto untuk Penentuan Negara Penyuplai Beras Pada Perusahaan Logistik," vol. 8, pp. 377–389, 2025.
- [17] V. N. April *et al.*, "Perancangan Sistem Pakar Mendiagnosa Anemia Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani berdasarkan gejala-gejala yang ada , untuk membantu dalam mendiagnosis penyakit anemia menggunakan sistem yang mengimplementasikan metode Fuzzy Mamdani . Bahasa dengan framework ," vol. 3, no. April, pp. 99–116, 2025.
- [18] T. Wahyuni, ii Sopiandi, and S. Raharjo, "Sistem Informasi Geografis Wisata Kuliner Berbasis Android," *INFOTECH J.*, vol. 6, no. 2, pp. 36–43, 2020, [Online]. Available: <https://ejournal.unma.ac.id/index.php/infotech/article/view/836>
- [19] M. K. Muafi, A. Wijaya, and V. A. Aziz, "Sistem Pakar Mendiagnosa Penyakit Mata Pada Manusia Menggunakan Metode Forward Chaining," vol. 1, no. 1, 2020.
- [20] A. A. Wahid, "Analisis Metode Waterfall Untuk Pengembangan Sistem Informasi," *J. Ilmu-ilmu Inform. dan Manaj. STMIK*, no. November, pp. 1–5, 2020.
- [21] S. B. Mursalin, H. Sunardi, and Z. Zulkifli, "Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis Sensor Kelembaban Tanah Menggunakan Logika Fuzzy," *J. Ilm. Inform. Glob.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–54, 2020, doi: 10.36982/jiig.v11i1.1072.