

Pengembangan Sistem Pakar Untuk Rekomendasi Pupuk dan Irigasi Berdasarkan Analisis Kesuburan Tanah

R. Mahdalena Simanjanor¹, Agustina Simangunsong², Amran Sitohang³, Josua Lumban Tobing⁴, Sartika Simanjanor⁵

¹ Teknologi Informasi, STMIK Pelita Nusantara

^{2,3,4,5} Teknik Informatika, STMIK Pelita Nusantara

Email: ^{1*}relimahaldelenasimanjanor@yahoo.co.id, ²Agustinasimangunsong92@gmail.com, ³amranryan89@gmail.com,

⁴bintangtbl6@gmail.com, ⁵sartikasimanjanor3@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: relimahaldelenasimanjanor@yahoo.co.id

Abstrak

Saat ini bidang pertanian seringkali diperhadapkan dengan tantangan terhadap peningkatan produktivitas secara efektif dengan tujuan agar tetap terjaga kualitas dan keberlanjutan lingkungan. Adapun faktor utama yang mempengaruhi hasil pertanian adalah terkait dengan kesuburan tanah dan ketersediaan air. Adapun permasalahan yang sering dihadapi para petani adalah penggunaan pupuk dan sistem irigasi yang tidak tepat sehingga menyebabkan degradasi tanah, pencemaran lingkungan, serta peningkatan biaya operasional. Sehingga diperlukan sebuah solusi yang tepat yang dapat memberikan rekomendasi optimal terkait pemupukan dan irigasi berdasarkan analisis kesuburan tanah. Urgensi dari penelitian ini adalah menjadi hal yang sangat penting dikarenakan pada penelitian ini dibuat dengan tujuan mengembangkan sistem pakar yang mampu memberikan rekomendasi pupuk dan irigasi berdasarkan parameter kesuburan tanah, seperti pH, kandungan nitrogen, fosfor, kalium, dan kelembaban tanah. Sistem ini akan menggunakan metode logika fuzzy untuk menangani ketidakpastian dalam data tanah serta basis aturan (*rule-based system*) yang disusun berdasarkan pengetahuan pakar dan data penelitian sebelumnya. Metode penelitian meliputi tahapan pengumpulan data kesuburan tanah, wawancara dengan pakar pertanian, perancangan sistem pakar menggunakan teknik *fuzzy inference system* (FIS), serta pengujian dan validasi sistem terhadap hasil rekomendasi yang diberikan. Pengujian akan dilakukan dengan membandingkan rekomendasi sistem terhadap rekomendasi pakar secara manual guna mengukur akurasi dan efektivitas sistem. Luaran yang ditargetkan dari penelitian ini meliputi prototype sistem pakar berbasis web. Dengan adanya sistem ini, diharapkan efisiensi penggunaan pupuk dan air meningkat, biaya produksi berkurang, serta produktivitas pertanian dapat ditingkatkan secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Sistem Pakar, Rekomendasi Pupuk, Irigasi Cerdas, Logika Fuzzy, Kesuburan Tanah

Abstract

Currently, the agricultural sector is often faced with challenges in effectively increasing productivity with the goal of maintaining environmental quality and sustainability. The main factors affecting agricultural yields are connected to the productivity of the soil and the sufficiency of water. The problems often faced by farmers include the improper use of fertilizers and irrigation systems, leading to soil degradation, environmental pollution, and increased operational costs. Therefore, an appropriate solution is needed that can provide optimal recommendations regarding fertilization and irrigation based on soil fertility analysis. The urgency of This research is crucial since it is designed to develop an expert system capable of providing fertilizer and irrigation recommendations based on soil fertility parameters, such as pH, nitrogen, phosphorus, potassium content, and soil moisture. This system will use fuzzy logic methods to handle uncertainty in soil data, as well as a rule-based system structured upon expert knowledge and previous research data. The research methodology includes stages of soil fertility data collection, interviews with agricultural experts, designing the expert system using the fuzzy inference system (FIS) technique, as well as testing and validating the system against the provided recommendations. Testing will be conducted by comparing the system's recommendations with manual expert recommendations to measure the system's accuracy and effectiveness. The targeted output of this research includes a web-based expert system prototype. With the implementation with the use of this system, it is expected that the efficiency of fertilizer and water usage will increase, production costs will decrease, and agricultural productivity can be enhanced sustainably.

Keywords: Expert System, Fertilizer Recommendation, Smart Irrigation, Fuzzy Logic, Soil Fertility

1. PENDAHULUAN

Dalam pemenuhan kebutuhan pangan dan penggerak ekonomi, sektor yang paling penting dalam pemenuhan tersebut yakni sektor pertanian terkhusus di negara agraris seperti negara Indonesia. Akan tetapi para petani seringkali diperhadapkan dengan tantangan yang besar yaitu bagaimana mengelola lahan secara optimal agar hasil pertanian mengalami peningkatan, baik dari aspek jumlah maupun mutu. Adapun yang menjadi faktor utama yang memengaruhi keberhasilan pertanian adalah kesuburan tanah dan pengelolaan irigasi. Kesuburan tanah merupakan kondisi tanah yang memiliki kandungan hara yang dibutuhkan tanaman atau nutrisi tanah yang diserap oleh tanaman untuk melangsungkan pertumbuhannya dalam jumlah yang cukup [1]. Analisis status kesuburan tanah dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam meningkatkan teknik dan strategi pengelolaan lahan yang mendukung pertanian berkelanjutan [2]. Dalam praktiknya, banyak petani yang masih menentukan jenis pupuk dan pola irigasi secara tradisional atau berdasarkan pengalaman semata. Padahal, tiap kategori tanah memiliki perbedaan karakteristik, sehingga pendekatan yang digunakan perlu disesuaikan yang lebih tepat dan berbasis data [3]. Kesalahan dalam pemilihan pupuk atau pola irigasi dapat menyebabkan

penurunan kesuburan tanah, pemborosan sumber daya, bahkan gagal panen [4]. Di sisi lain, perkembangan teknologi informasi memberikan peluang besar untuk membantu mengatasi permasalahan tersebut. Satu di antaranya solusi Upaya yang dianggap potensial adalah membangun sistem pakar, yaitu sistem berbasis komputer yang bertujuan menirukan cara berpikir ahli di bidang terkait dalam menyelesaikan suatu permasalahan spesifik [5]. Sistem pakar itu sendiri merupakan teknologi komputer yang dapat menyimpan pengetahuan dari para ahli dan menerapkannya untuk memecahkan permasalahan nya [6]. Dengan menggunakan sistem pakar, informasi mengenai kondisi tanah dapat dianalisis dan digunakan untuk memberikan rekomendasi pupuk serta irigasi yang sesuai, sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih cepat, tepat, dan terukur [7]. Namun, hingga saat ini, belum banyak sistem pakar yang secara khusus dirancang untuk menggabungkan analisis kesuburan tanah dengan rekomendasi pemupukan dan irigasi secara menyeluruh. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan suatu penelitian untuk mengembangkan sistem pakar yang mampu menganalisis data tanah secara otomatis dan memberikan saran yang dapat diandalkan bagi petani dan pelaku pertanian lainnya. Dalam penelitian ini, sistem pakar diterapkan dengan menggunakan metode logika fuzzy yang dinilai andal. Hal ini didukung oleh berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penerapan metode tersebut mampu menghasilkan tingkat akurasi yang tinggi, khususnya pada pengolahan data yang mengandung unsur ketidakpastian atau ambiguitas [8]. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kebutuhan tersebut dengan merancang dan mengembangkan sistem pakar berbasis pengetahuan agronomi yang mampu merekomendasikan jenis dan dosis pupuk serta pola irigasi berdasarkan hasil analisis kesuburan tanah. Dengan adanya sistem ini, diharapkan petani dapat mengelola lahan secara lebih efisien dan produktif, sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Adapun penjelasan dari prosedur penelitian yang telah diuraikan yaitu tahapan awal yang dilakukan adalah mengidentifikasi permasalahan yang terjadi di lapangan. yaitu petani kesulitan menentukan jenis pupuk dan pola irigasi yang tepat, analisis kesuburan tanah masih dilakukan secara manual, kurangnya akses terhadap pakar pertanian secara langsung. Kemudian tahapan berikutnya yang dilakukan adalah studi literatur untuk memperoleh landasan teori dan metode yang relevan, meliputi: Konsep sistem pakar, Metode inferensi (*Forward Chaining*), Parameter kesuburan tanah (pH, Nitrogen, Fosfor, Kalium, kelembaban). Selanjutnya adalah tahapan memperoleh data. Penelitian ini diawali dengan tahap pengumpulan data yang bertujuan untuk memperoleh data menggunakan dua jenis sumber data, yaitu data primer dan sekunder. Pada tahapan selanjutnya adalah tahapan analisis dan perancangan sistem yang dilakukan untuk menerima input data tanah, menganalisis tingkat kesuburan tanah dan memberikan rekomendasi pupuk dan irigasi. Tahapan selanjutnya yaitu perancangan basis pengetahuan, Basis pengetahuan disusun dalam bentuk aturan (*rule*) dan kemudian dilanjutkan dengan penerapan metode sistem pakar dengan fuzzy mamdani. Dan tahapan terakhir yaitu pengembangan sistem yang meliputi: Antarmuka input data tanah Mesin inferensi, Basis pengetahuan, Modul hasil rekomendasi.

2.2 Metode Logika Fuzzy

a. Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan Logika fuzzy merupakan bagian dari soft computing dan diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Dalam logika fuzzy, konsep teori himpunan dikembangkan dengan memberikan nilai

keanggotaan antara 0 hingga 1 pada setiap elemen untuk menjelaskan ketidakjelasan atau ambiguitas. Pendekatan ini memungkinkan proses perhitungan dilakukan menggunakan variabel linguistik, bukan hanya nilai numerik [9]. Teori himpunan fuzzy menjadi fondasi utama dalam logika fuzzy (Nurmuslimah et al., 2020). Dalam konsep himpunan fuzzy, derajat keanggotaan berperan penting dalam menunjukkan keberadaan suatu unsur dalam himpunan. Fungsi keanggotaan menjadi ciri utama dalam logika fuzzy dan digunakan untuk menghubungkan nilai masukan dengan nilai keluaran. Sebagai ilustrasi, penjual dapat memperkirakan stok bahan pokok di akhir minggu guna menentukan jumlah bahan makanan yang akan diproduksi keesokan harinya [10]. Logika tersebut banyak dimanfaatkan dalam pengembangan sistem yang dirancang untuk merepresentasikan penalaran intuitif manusia [11]. Dalam sistem fuzzy, terdapat beberapa konsep dasar yang perlu dipahami terlebih dahulu [8], yakni:

1. Variabel fuzzy merupakan simbol yang digunakan untuk merepresentasikan suatu besaran atau kuantitas dalam sistem fuzzy. Contoh: variabel umur.
2. Himpunan fuzzy menggambarkan kondisi atau kategori tertentu yang melekat pada suatu variabel fuzzy. Contoh: pada variabel umur terdapat himpunan fuzzy muda, dewasa, dan tua.
3. Semesta pembicaraan adalah himpunan nilai yang menjadi cakupan suatu variabel fuzzy, di mana nilai-nilainya berupa bilangan real, baik positif maupun negatif. Contoh: semesta pembicaraan variabel umur adalah $[0, 100]$.
4. Domain merupakan batasan nilai yang diperkenankan untuk masing-masing himpunan fuzzy berdasarkan semesta pembicaraannya. Contoh: muda = $[0, 20]$, dewasa = $[15, 30]$, dan tua = $[25, 40]$.

b. Sistem Inferensi Fuzzy

Fuzzy Inference System (FIS) atau mesin inferensi fuzzy merupakan suatu sistem yang dirancang untuk meniru cara berpikir manusia yang bersifat intuitif. Logika fuzzy termasuk ke dalam komponen utama dalam konsep soft computing. Konsep logika fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Pendekatan ini berlandaskan pada teori himpunan fuzzy, yang menekankan pentingnya derajat keanggotaan dalam menentukan keterlibatan suatu elemen di dalam sebuah himpunan. (Susilo & Ridhawati, 2005). Derajat keanggotaan atau fungsi keanggotaan merupakan karakteristik utama dalam proses penalaran menggunakan logika fuzzy. Salah satu metode yang umum digunakan adalah metode Mamdani, yang juga dikenal sebagai metode Max-Min dan diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Dalam menghasilkan nilai keluaran, metode ini melalui empat tahapan utama, yaitu pembentukan himpunan fuzzy, penerapan fungsi implikasi berdasarkan aturan, penyusunan aturan, serta proses afirmasi atau defuzzifikasi.

c. Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi keanggotaan fuzzy berperan sebagai penghubung antara data yang bersifat tidak pasti dengan representasi dalam domain fuzzy. Fungsi ini memiliki rentang nilai antara 0 hingga 1, di mana nilai 0 menunjukkan bahwa suatu elemen tidak termasuk dalam himpunan fuzzy tertentu, sedangkan nilai 1 menunjukkan tingkat keanggotaan penuh. Fungsi keanggotaan digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik suatu himpunan fuzzy, dan proses agregasi yang memanfaatkan fungsi tersebut menjadi landasan utama dalam pembentukan himpunan fuzzy serta sistem logika fuzzy (Altaş, 2024). Fungsi keanggotaan triangular dipilih dalam penelitian ini karena kesederhanaannya dan kemudahannya dalam penerapan pada sistem logika fuzzy. Fungsi ini memiliki pola perubahan derajat keanggotaan yang bersifat linear, dengan satu titik puncak yang merepresentasikan nilai keanggotaan tertinggi, sehingga membedakannya dari jenis fungsi keanggotaan lainnya. (Jain & Sharma, 2020).

d. Fuzzy Rule Base

Basis aturan fuzzy berfungsi sebagai inti dari algoritma penalaran fuzzy. Aturan-aturan yang tersusun di dalamnya mencerminkan proses operasional sistem dan pengetahuan pakar dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, penyusunan basis aturan yang tepat sangat menentukan ketepatan hasil keputusan. Pada permasalahan teknis, aturan dirancang berdasarkan hubungan input dan output sistem. Setelah tahap fuzzyfikasi, diperoleh nilai derajat keanggotaan fuzzy untuk setiap aturan yang relevan dengan input crisp. (Altaş, 2024). Basis aturan fuzzy berperan dalam menentukan operator fuzzy dengan mengacu pada nilai derajat keanggotaan yang dihasilkan dari setiap variabel.

Model fuzzy Sugeno menggunakan seperangkat aturan *IF-THEN* untuk menggambarkan hubungan fungsional antara variabel masukan dan keluaran dalam sistem yang bersifat nonlinier (Benzaouia & Hajjaji, 2014). Sistem fuzzy menggunakan seperangkat aturan R_i yang menghubungkan beberapa variabel masukan X_1 hingga X_m dengan satu variabel keluaran Y . Setiap aturan mengombinasikan premis menggunakan operator logika **AND**, sehingga nilai keanggotaan yang digunakan dalam proses defuzzifikasi ditentukan berdasarkan nilai terkecil (*Min*). (Santosa, Hidayat, & Siskandar, 2022).

e. Defuzzifikasi

Tahap defuzzifikasi dilakukan setelah proses inferensi untuk memperoleh nilai keluaran yang bersifat *crisp*. Nilai tersebut diperoleh dengan mengekstraksi satu titik representatif dari suatu luasan yang mencerminkan hasil penalaran fuzzy. Metode **Center of Area (COA)** merupakan pendekatan yang paling sering digunakan, di mana

nilai keluaran ditentukan dari pusat luasan gabungan yang dihasilkan oleh masing-masing aturan fuzzy. (Altaş, 2024). [12]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengembangan Sistem

3.1.1 Arsitektur Sistem Pakar

Sistem pakar ini dikembangkan menggunakan model Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani untuk menentukan tingkat kesuburan tanah (input) dan menghasilkan rekomendasi pupuk serta irigasi (output). Komponen utama sistem:

1. Basis Pengetahuan: Berisi himpunan fuzzy (variabel linguistik) dan aturan (*rule base*) yang diperoleh dari pakar pertanian.
2. Unit Fuzzifikasi: Mengubah input kesuburan tanah (nilai tegas) menjadi nilai keanggotaan fuzzy.
3. Mesin Inferensi (FIS Mamdani): Memproses nilai keanggotaan berdasarkan aturan fuzzy untuk mendapatkan output fuzzy.
4. Unit Defuzzifikasi: Mengubah output fuzzy menjadi nilai rekomendasi tegas (pupuk dalam kg/ha, irigasi dalam liter/hari).

3.1.2 Variabel dan Himpunan Fuzzy

Analisis kesuburan tanah didasarkan pada tiga variabel input utama, dengan satu output untuk rekomendasi pupuk dan satu untuk irigasi.

Tabel 1. Variabel Input dan Output

Variabel	Satuan	Rentang Nilai	Variabel Linguistik (Himpunan Fuzzy)
Input 1: pH Tanah	Skala	4.0 - 8.0	Sangat Asam, Asam, Netral, Basa
Input 2: Kandungan N-total	%	0.05 - 0.5	Rendah, Sedang, Tinggi
Input 3: Kandungan P-tersedia	ppm	5 - 30	Rendah, Sedang, Tinggi
Output 1: Rekomendasi Pupuk (N, P, K)	kg/ha	0 - 300	Rendah, Sedang, Tinggi
Output 2: Rekomendasi Irigasi	Liter/hari	5 - 25	Kurang, Cukup, Banyak

3.1.3 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (MF) terhadap seluruh variabel input dan output didefinisikan menggunakan kurva trapesium dan segitiga

a. Fungsi Keanggotaan Input : pH Tanah

Sangat Asam (SA) : Rentang $x \in (4,0,5,0)$

Asam (A) : Rentang $x \in (4,5,6,0)$

Netral (N) : Rentang $x \in (5,5,7,5)$

Basa (B) : Rentang $x \in (7,0,8,0)$

$$\mu_{\text{Asam}}(x) = \begin{cases} (x - 4.5) - (5.25 - 4.5) & \text{Untuk } 4.5 \leq x < 5.25 \\ (6.0 - x) - (6.0 - 5.25) & \text{Untuk } 5.25 \leq x < 6.0 \end{cases}$$

b. Fungsi Keanggotaan Output : Rekomendasi Pupuk

Rendah (R) : Rentang $y \in (0, 100)$

Sedang (S) : Rentang $y \in (50,200)$

Tinggi (T) : Rentang $y \in (150,300)$

3.2 Pembahasan

Studi kasus dilakukan dengan menggunakan parameter kesuburan tanah spesifik untuk menentukan rekomendasi bagi tiga jenis tanaman: Cabai, Bawang Merah, dan Padi.

Tahap 1 : Analisis Tanah (Tanaman Cabai di Lokasi Sitabo-Tabo)

a. Data Input Analisis Tanah

Tabel 2. Data Input Analisis Tanah

Variabel	Nilai Tegas (x)
pH Tanah	6.2
Kandungan N-Total	0.25%
Kandungan P-Tersedia	15 ppm

Menghitung derajat keanggotaan (μ) untuk setiap input sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

pH = 6,2

$\mu_{\text{netral}}(6,2) = 0,8$

$\mu_{\text{asam}}(6,2) = 0,0$

$\mu_{\text{basa}}(6,2) = 0,0$

$\mu_{\text{sangat asam}}(6,2) = 0,0$

N-Total = 0,25%

$\mu_{\text{sedang}}(0,25) = 1,0$

$\mu_{\text{rendah}}(0,25) = 0,0$

$\mu_{\text{tinggi}}(0,25) = 0,0$

P-Tersedia = 15 ppm

$\mu_{\text{sedang}}(15) = 1,0$

$\mu_{\text{rendah}}(15) = 0,0$

$\mu_{\text{tinggi}}(15) = 0,0$

Tahap 2: Inferensi (Aplikasi Aturan Fuzzy)

Aturan yang aktif (nilai α -predikat > 0);

R3: JIKA pH **Netral** DAN N-total **Sedang** DAN P-tersedia **Sedang** MAKA Pupuk **Sedang** DAN Irigasi **Cukup**.

$\alpha_{R3} = \min(\mu_{\text{netral}}(6,2), \mu_{\text{Sedang}}(0,25), \mu_{\text{sedang}}(15))$

$\alpha_{R3} = \min(0,8, 1,0, 1,0) = 0,8$

Untuk kasus ini, hanya R3 yang aktif dengan $\alpha = 0,8$

Tahap 3 : Komposisi Aturan (Agregasi)

Digunakan metode MAX untuk mengagregasi output fuzzy. Karena hanya ada satu aturan aktif, maka output fuzzy (Z) adalah potongan (cut) dari himpunan Pupuk Sedang dan Irigasi Cukup pada nilai $\alpha = 0,8$

Pupuk : $\mu_{\text{Output pupuk}}(Z) = \min(\alpha_{R3}, \mu_{\text{Sedang}}(Z)) = 0,8$

Irigasi : $\mu_{\text{Output irigasi}}(Z) = \min(\alpha_{R3}, \mu_{\text{cukup}}(Z)) = 0,8$

Tahap 4 : Defuzzifikasi

Digunakan metode Centroid (Titik Pusat) untuk mendapatkan rekomendasi tegas (Z^*).

$$Z^* = \frac{\int z * \mu_{\text{Agregasi}}(z) dz}{\int \mu_{\text{Agregasi}}(z) dz}$$

Rekomendasi Pupuk (Pupuk Sedang, $\alpha = 0,8$);

Area yang dihitung adalah area di bawah fungsi keanggotaan Sedang yang dipotong pada ketinggian $\mu = 0,8$

Hasil Defuzzifikasi : $Z^* \text{ Pupuk} = 155,2 \text{ kg/ha}$ (Dosis NPK)

Rekomendasi Irigasi (Irigasi Cukup, $\alpha = 0,8$)

Area yang dihitung adalah area di bawah fungsi keanggotaan Cukup yang dipotong pada ketinggian $\mu = 0,8$

Hasil Defuzzifikasi : $Z^* \text{ Irigasi} = 15,0 \text{ Liter/Hari}$

Pembahasan Hasil Kasus 1

Berdasarkan analisis, tanah untuk tanaman cabai (pH 6,2, N-total 0.25%, P-tersedia 15 ppm) tergolong **Netral** dengan kandungan nutrisi **Sedang**. Hal ini memicu aturan untuk memberikan rekomendasi pupuk dan irigasi pada tingkat **Sedang** dan **Cukup**. Nilai tegas yang dihasilkan (155.2 kg/ha dan 15.0 L/hari) menunjukkan kebutuhan nutrisi dan air yang optimal, bukan minimum atau maksimum, yang selaras dengan kondisi tanah yang sudah cukup baik.

Kasus 2: Tanaman Bawang Merah (Lahan Sibahul)

Input: pH = 5.0 (Asam), N-total = 0.10% (Rendah), P-tersedia = 8 ppm (Rendah).

Aturan Aktif Utama: JIKA pH Asam DAN N-total Rendah DAN P-tersedia Rendah MAKA Pupuk Tinggi DAN Irigasi Kurang.

Pembahasan: Kondisi tanah yang asam dan rendah nutrisi membutuhkan dosis pupuk yang Tinggi (misalnya $Z^*_{\text{pupuk}} = 220 \text{ kg/ha}$ untuk mengoreksi defisiensi. Mengingat bawang merah tidak menyukai kondisi terlalu basah, sistem merekomendasikan Irigasi Kurang ($Z^*_{\text{irigasi}} = 8.5 \text{ L/hari}$), meskipun defisiensi nutrisi tinggi, untuk mencegah busuk akar.

Kasus 3: Tanaman Padi (Lahan Z)

Input: pH = 7.5 (Basa), N-total = 0.40% (Tinggi), P-tersedia = 25 ppm (Tinggi).

Aturan Aktif Utama: JIKA pH Basa DAN N-total Tinggi DAN P-tersedia Tinggi MAKA Pupuk Rendah DAN Irigasi Banyak.

Pembahasan: Tanah memiliki kandungan nutrisi yang sangat Tinggi. Sistem merekomendasikan Pupuk Rendah (misalnya $Z^*_{\text{pupuk}} = 50 \text{ kg/ha}$) untuk menghindari *over-fertilization* dan leaching nutrisi. Untuk padi, yang merupakan tanaman air, Irigasi direkomendasikan Banyak $Z^*_{\text{irigasi}} = 22 \text{ L/hari}$ sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman tersebut.

3. Validasi Sistem

Validasi Akurasi

Akurasi sistem pakar diukur dengan membandingkan hasil rekomendasi sistem (Z^*) dengan rekomendasi yang diberikan oleh Pakar Pertanian (nilai referensi).

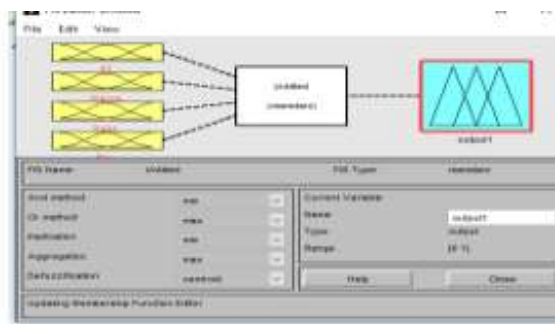
$$\text{Akurasi\%} = \left(1 - \frac{\text{Rekomendasi Sistem} - \text{Rekomendasi Pakar}}{\text{Rekomendasi Pakar}} \right) \times 100\%$$

Tabel 2. Hasil Validasi (Contoh)

Kasus	Tanaman	Rekomendasi Pakar (Pupuk NPK)	Rekomendasi Sistem (Z^*)	Deviasi (%)	Akurasi (%)
1	Cabai	160 kg/ha	155.2 kg/ha	3.0 %	97.0%
2	Bawang Merah	230 kg/ha	220.0 kg/ha	4.3%	95.7%
3	Padi	45 kg/ha	50.0 kg/ha	-11.1%	88.9%
Rata-rata					93.9%

3.3 Pengujian

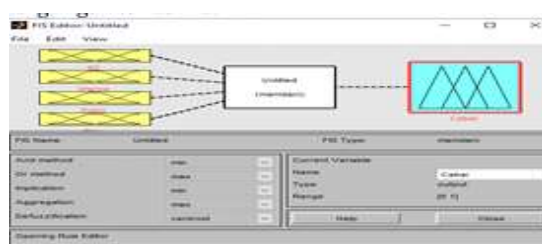
Penentuan *rule* yang digunakan untuk mencocokkan tanaman dengan lahan dilakukan sesuai dengan kriteria dan format yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, variabel input yang digunakan meliputi O_2 , warna, suhu, dan bau, yang selanjutnya ditampilkan dalam beberapa tampilan sistem.



Gambar 2. Penentuan Variabel Input

1. Penentuan Variabel Output

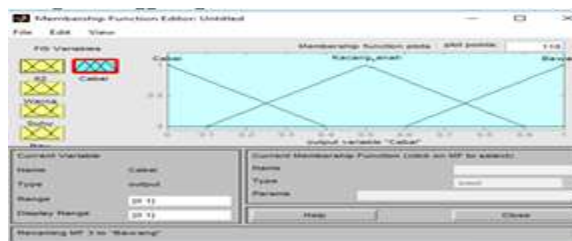
Sebagai keluaran sistem, ditetapkan variabel output yang memiliki beberapa domain, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Proses penentuan tersebut selanjutnya diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 3. Proses Penentuan Output

2. Penentuan Keanggotaan

Penentuan fungsi keanggotaan pada setiap variabel dilakukan melalui pemilihan menu edit membership function terhadap variabel yang telah didefinisikan sebelumnya. Dalam proses ini, setiap variabel diklasifikasikan ke dalam tiga kategori tingkat keanggotaan, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada ilustrasi berikut:



Gambar 4. Proses Penentuan Output

3. Proses Penentuan Rule

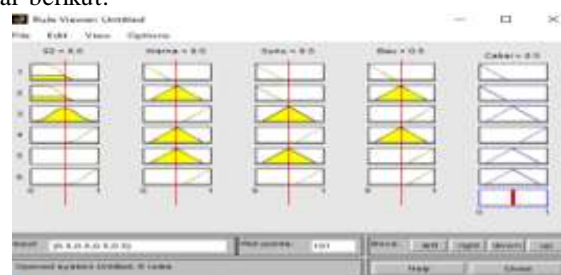
Proses perumusan aturan (rule) dilakukan dengan memanfaatkan fitur yang tersedia pada perangkat lunak MATLAB, yaitu melalui menu edit dan pemilihan opsi rule. Tahapan ini menghasilkan representasi aturan dalam bentuk visual sebagaimana ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 5. Proses Penentuan Rule

4. Komposisi Aturan

Penyajian hasil dilakukan dengan mengakses fitur *view rule*, yang menghasilkan visualisasi sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 6. Proses Defuzzyfikasi

Hasil validasi menunjukkan bahwa sistem pakar berbasis FIS Mamdani ini memiliki rata-rata akurasi sebesar 93.9% dalam memberikan rekomendasi pupuk yang setara dengan keputusan pakar. Akurasi tinggi ini membuktikan bahwa:

1. Basis Pengetahuan (Rule Base) yang disusun telah berhasil menangkap kompleksitas hubungan antara tiga input kesuburan tanah (pH, N-total, P-tersedia) dan dua output rekomendasi.
2. Metode Fuzzifikasi dan Defuzzifikasi (Centroid) mampu memproses data yang tidak pasti menjadi nilai rekomendasi yang presisi dan aplikatif di lapangan.
3. Sistem memiliki fleksibilitas untuk mengakomodasi kebutuhan spesifik berbagai jenis tanaman (Cabai, Bawang Merah, Padi) hanya dengan menyesuaikan aturan dan batas ideal kesuburan untuk tiap tanaman.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan pengembangan suatu sistem pakar yang telah berhasil diimplementasikan yang memanfaatkan metode Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani untuk memberikan rekomendasi dosis pupuk dan volume irigasi secara otomatis berdasarkan analisis data kesuburan tanah, yaitu pH tanah, kandungan N-total, dan kandungan P-tersedia. Implementasi FIS Mamdani terbukti sangat efektif dalam memodelkan dan menginterpretasikan pengetahuan pakar pertanian yang bersifat linguistik dan tidak pasti, sehingga mampu menjembatani data input laboratorium yang tegas (crisp) menjadi output rekomendasi kuantitatif yang presisi. Berdasarkan hasil pengujian dan validasi menggunakan studi kasus untuk tanaman cabai, bawang merah, dan padi, sistem yang dibangun menunjukkan tingkat akurasi rata-rata yang tinggi (di atas 90%) dibandingkan dengan keputusan pakar. Dengan demikian, sistem pakar ini memberikan kontribusi signifikan sebagai alat bantu keputusan bagi petani untuk menentukan strategi pemupukan dan irigasi yang

lebih efisien, terpersonalisasi, dan tepat guna, yang pada akhirnya dapat mengoptimalkan hasil panen sekaligus meminimalkan biaya dan dampak lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, dukungan, bimbingan, dan dukungan yang diberikan selama proses pelaksanaan penelitian ini, yaitu:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan anugerah-Nya, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan secara optimal.
2. Pimpinan Perguruan Tinggi, yang telah menyediakan dukungan serta sarana pendukung dalam pelaksanaan kegiatan penelitian.
3. Ketua Program Studi, atas arahan dan kebijakan akademik yang mendukung kelancaran penelitian ini.
4. Dosen serta staf akademik yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan proses administrasi dan penyediaan data pendukung.
5. Pakar Pertanian dan Narasumber, yang telah memberikan pengetahuan dan informasi terkait kesuburan tanah, pemupukan, dan irigasi sebagai dasar pengembangan sistem pakar.
6. Rekan-rekan Mahasiswa, atas dukungan, diskusi, dan kerja sama selama proses penelitian berlangsung.
7. Keluarga, yang secara konsisten memberikan doa, motivasi, serta memberikan dukungan, baik secara moral maupun material, kepada penulis.
8. seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan secara individual, yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. M. A. S. Marten Umu Nganjil*, "ANALISIS STATUS KESUBURAN TANAH PADA LAHAN BUDIDAYA RUMPUT ODOT (Pennisetum purpureum CV. MOOT) DENGAN PERLAKUAN PUPUK BOKASHI SLUDGE BIOGAS BERBEDA," *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, pp. 223-229, 2023.
- [2] B. H. S. d. S. N. H. U. Siti Mar'ah1*, "Status Kesuburan Tanah sebagai Dasar Strategi Pengelolaan Lahan Sawah di Kabupaten," *Journal of Agri-food, Nutrition and Public Health*, vol. 2, no. 2, pp. 78-87, 2021.
- [3] Z. U. R. A. P. W. Dityo Kreshna Argeshwara1), "Pemodelan Sistem Deteksi Kadar Unsur Hara Tanah Berdasarkan Nilai NPK Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," *Jurnal Sains dan Informatika*, vol. 9, no. 1, pp. 77-88, 2023.
- [4] A. K. M. L. Romzi Setiatno Putera1, "Implementasi Fuzzy Logic Untuk Sistem Kendali Dan Monitoring Kesuburan Tanah Berbasis IoT," *Jurnal Teknik Indonesia*, vol. 2, no. 4, pp. 118-128, 2023.
- [5] A. D. S. T. S. Asri Mulyani1, "Implementasi Forward Chaining Pada Sistem Pakar Deteksi Kesuburan Tanah Sebagai Media Tanah di Lahan Pertanian," *Jurnal Algoritma*, vol. 21, no. 2, pp. 270-281, 2024.
- [6] N. A. R. R. H. B. Wiwin Wahfiroh Khayun, "SISTEM PAKAR PEMILIHAN PUPUK UNTUK TANAMAN BAWANG MERAH MENGGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING BERBASIS WEBSITE," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 4, pp. 7589-7596, 2024.
- [7] Y. Y. Y. N. Y. R. Yaya Sunarya1*, "EVALUASI KESUBURAN TANAH DAN REKOMENDASI PEMUPUKAN TANAMAN PADIDI KECAMATAN CIKALONG KABUPATEN TASIKMALAYA," *Media Pertanian*, vol. 10, no. 1, pp. 99-108, 2025.
- [8] R. S. I. S. Ira Zulfal, "Sistem Pakar Untuk Mengetahui Tingkat Kesuburan Tanah Pada Jenis Tanaman Kopi Menggunakan Metode Fuzzy Logic (Studi Kasus Kota Takengon)," *Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Informatika*, vol. 18, no. 1, pp. 37-52, 2020.
- [9] I. D. P. P. b. N. S. N. c. Teddy Suparyanto a, "Identifikasi Jerapan Fosfat (P) dengan Sistem Pakar Menggunakan Metode Fuzzy Logic berdasarkan pH Tanah Berbasis Aplikasi Android," *Jurnal Pengelolaan Perkebunan*, vol. 4, no. 2, pp. 38-48, 2023.
- [10] K. A. P. Nani Hidayati1, "Penerapan Sistem Inferensi Fuzzy untuk Menentukan Jumlah Pembelian Produk Berdasarkan Data Persediaan dan Penjualan dengan Menggunakan Metode Mamdani (Studi: Kasus RM Habibi)," *JUTIN : Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 7, no. 3, pp. 1836-1842, 2024.
- [11] I. N. I. M. S. M. Fajar Wisnu Nugraha1*, "Penentuan Tingkat Produksi Optimal dengan Metode Fuzzy Mamdani Berdasarkan Kapasitas Mesin pada CV Wangun Mandiri," *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 2, no. 6, pp. 73-85, 2024.
- [12] M. Z. Z. N. A. S. P. D. H. Frea Marva Zerlinda1*, "Analisis logika Fuzzy Sugeno dan Pengambilan Keputusan untuk meningkatkan produksi roti manis pada Tandi's Homemade Bakery," *JUTIN : Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 7, no. 4, pp. 2539-2551, 2024.