

PERANCANGAN SISTEM PAKAR *FUZZY* UNTUK PENENTUAN EFEKTIVITAS KULTIVASI CENDAWAN MIKORIZA ARBUSKULA SEBAGAI PUPUK HAYATI

DESIGN OF FUZZY EXPERT SYSTEM FOR DETERMINATION OF CULTIVATION EFFECTIVENESS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AS BIOFERTILIZER

Aziz Kustiyo¹⁾, Nur Aziza Azis^{1)*}, Marimin²⁾

¹⁾Departemen Ilmu Komputer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680
Email: nurazizaazis@gmail.com

²⁾Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor

ABSTRACT

*The use of biofertilizer provides many benefits, including the increase of agricultural production, quality improvement of agricultural products, as well as reduce of the use of artificial fertilizer. One of such biofertilizer is Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF). In cultivation of AMF, there are some environment factors which influence cultivation effectiveness, such as soil pH, mean temperature, soil water content, and suitability of host plant. Incompatible factor can give negative impact on AMF cultivation. This research designed an expert system to observe effectiveness value of AMF cultivation based on certain environment factors. This research focused on three AMF species, namely *Entrophospora columbiana*, *Glomus fasciculatum*, and *Glomus manihotis*. This system was built using Fuzzy Inference System (FIS) with four fuzzy parameters: suitability of host plant, soil pH, mean temperature, and soil water content. Rules as knowledge base had been built with total 144 rules for each AMF species. Mamdani method was used as inference process. The system gave cultivation effectiveness value as output. The effectiveness value showed how effective cultivation process on certain input condition as compared to its best condition. The effectiveness value was also divided into four categories: not effective, slightly effective, moderately effective, and effective. Based on verification result, the system was still unable to gives an accurate effectiveness percentage, although it was quite good on giving right effectiveness category. To be used in real condition, this system must still be developed further. For example, the reasoning system should be added with other factors, such as cultivation time and type of cultivation media.*

Keywords: biofertilizer, arbuscular mycorrhizal fungi, fuzzy expert system, Mamdani method

ABSTRAK

Penggunaan pupuk hayati banyak memberikan manfaat, di antaranya meningkatkan hasil produksi pertanian, meningkatkan kualitas produk pertanian, dan mengurangi penggunaan pupuk buatan. Diantara pupuk hayati adalah Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA). Dalam kultivasi CMA terdapat sejumlah faktor yang mempengaruhi efektivitasnya, misalnya pH tanah, suhu rata-rata, kandungan air tanah, dan kesesuaian tanaman inang. Faktor yang tidak cocok bisa berpengaruh negatif terhadap efektivitas kultivasi CMA. Penelitian ini merancang sebuah sistem pakar untuk melihat efektivitas kultivasi CMA berdasarkan faktor lingkungan tertentu. Penelitian berfokus pada tiga spesies CMA yaitu *Entrophospora columbiana*, *Glomus fasciculatum*, dan *Glomus manihotis*. Sistem dibangun menggunakan Sistem Inferensi *Fuzzy* dengan empat parameter *fuzzy*, yaitu: kesesuaian tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata dan kandungan air tanah. Aturan-aturan sebagai basis pengetahuan sistem telah dibangun dengan jumlah 144 aturan untuk setiap spesies CMA. Metode Mamdani digunakan sebagai proses inferensi. Keluaran dari sistem adalah persentase efektivitas kultivasi yang memiliki makna seberapa besar efektivitas kultivasi pada kondisi input dibandingkan dengan kondisi terbaiknya. Nilai efektivitas kultivasi dibagi menjadi empat kategori yakni: tidak efektif, kurang efektif, cukup efektif, dan efektif. Berdasarkan hasil verifikasi, sistem belum mampu memberikan nilai persentase efektivitas secara akurat, namun cukup baik dalam melihat kategori efektivitas. Untuk dapat digunakan pada kondisi sesungguhnya, sistem ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Sebagai contoh dengan menambahkan faktor lainnya seperti lama waktu kultivasi atau jenis media kultivasi.

Kata kunci: pupuk hayati, cendawan mikoriza arbuskula, sistem pakar *fuzzy*, metode Mamdani

PENDAHULUAN

Istilah pupuk hayati digunakan sebagai nama kolektif untuk semua kelompok fungsional mikroba

tanah yang dapat berfungsi sebagai penyedia hara dalam tanah, sehingga dapat tersedia bagi tanaman (Suriadikarta dan Simanungkalit 2006). Penggunaan mikroba bermanfaat sebagai salah satu komponen

teknologi pertanian merupakan teknologi ramah lingkungan, berkelanjutan, dan komplementer terhadap komponen teknologi lain, layak digunakan dalam program peningkatan produktivitas pertanian (Saraswati dan Sumarno, 2008).

Diantara jenis mikroba tanah yang termasuk pupuk hayati ini adalah cendawan mikoriza arbuskula (CMA) (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi*). Cendawan ini membentuk simbiosis mutualisme dengan akar tumbuhan. Cendawan memperoleh karbohidrat dalam bentuk gula sederhana (glukosa) dari tumbuhan. Sebaliknya, cendawan menyalurkan air dan hara tanah untuk tumbuhan (Novriani dan Madjid, 2009). Selain membantu meningkatkan serapan air dan hara tanah, CMA juga berperan sebagai pengendali hayati, pereduksi stres abiotik pada tumbuhan, dan sebagai pembenah tanah (Simanungkalit, 2006). Keunggulan lain dari CMA adalah luasnya distribusi mikroba ini. Tipe cendawan ini ditemukan pada kondisi alami pada hampir seluruh lahan tropis dan subtropis (Sieverding, 1991).

Efektivitas mikoriza dipengaruhi oleh interaksi antar sejumlah faktor diantaranya genom cendawan, genom tanaman inang, tipe tanah, dan faktor-faktor edafik (Gupta *et al.*, 2000). Novriani dan Madjid (2009) juga menyebutkan faktor pengaruh dalam perkembangan CMA yaitu suhu, kadar air tanah, pH, bahan organik tanah, intensitas cahaya, ketersediaan hara, logam berat dan fungsida.

Pada operasi kultivasi, mekanisme reaksi biokimia adalah sangat kompleks sehingga pengetahuan dan pengalaman dari operator manusia memegang peranan yang sangat penting dalam pengambilan keputusan (Asama *et al.*, 1990). Demikian halnya dalam kultivasi CMA, sifat respon spesies CMA yang berbeda-beda terhadap keadaan lingkungan dan tanaman inang secara sensitif membuat penentuan efektivitas kultivasi CMA pada lingkungan tertentu menjadi hal yang memerlukan kepakaran dalam mengetahuinya. Teknologi kecerdasan buatan dapat dimanfaatkan dalam permasalahan ini khususnya dalam mengadopsi kemampuan kepakaran untuk kultivasi CMA.

Sistem pakar merupakan sistem komputer yang dapat melakukan emulasi terhadap kemampuan pakar dalam mengambil keputusan. Sistem pakar merupakan cabang dari kecerdasan buatan yang menggunakan pengetahuan yang terspesialisasi untuk menyelesaikan masalah pada tingkatan pakar manusia (Giarratano dan Riley, 1998).

Teknologi kecerdasan buatan khususnya sistem pakar telah dicoba diimplementasikan pada ruang lingkup CMA. Diantaranya adalah pada penelitian yang dilakukan Dodd dan Rosendahl (1996). Dodd dan Rosendahl (1996) membangun sebuah sistem pakar berbasis multimedia yang digunakan untuk mengidentifikasi CMA. Sistem pakar juga telah dicoba diterapkan dalam proses

penumbuhan/ kultivasi, diantaranya dilakukan oleh Votrovski dan Jablonska (2007). Votrovski dan Jablonska (2007) mencoba membangun suatu sistem pakar untuk membantu dalam penumbuhan jamur tiram dengan menggunakan kaidah produksi.

Penelitian ini merancang sebuah sistem pakar dalam memperkirakan efektivitas kultivasi CMA. Penelitian ini bertujuan merumuskan basis pengetahuan mengenai faktor lingkungan yang mempengaruhi efektivitas kultivasi cendawan mikoriza arbuskula serta mengimplementasikannya menjadi sistem pakar untuk penentuan efektivitas kultivasi cendawan mikoriza arbuskula. Sistem ini selanjutnya diberi nama ESCULAMBO yang merupakan akronim dari *Expert System for Cultivation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Biofertilizer*.

Sistem pakar yang dibangun dibatasi pada tiga spesies CMA: *Entrophospora columbiana*, *Glomus manihotis*, dan *Glomus fasciculatum*. Faktor pengaruh lingkungan yang dihitung pada sistem ini dibatasi pada empat faktor, yaitu kecocokan tanaman inang, keasaman (pH) tanah, suhu rata-rata, dan persentase kadar air tanah. Tanaman inang dibatasi menjadi delapan jenis tanaman inang berikut: buncis (*Phaseolus vulgaris*), jagung (*Zea mays*), kopi (*Coffea robusta*), kedelai (*Glycine max*), padi (*Oryza sativa*), singkong (*Manihot esculenta*), sorgum (*Sorghum bicolor*), teh (*Camelia sinensis*).

Sistem pakar tersebut mampu membantu petani dan pihak industri pupuk hayati untuk memprediksi nilai efektivitas lingkungan tumbuh pada kultivasi cendawan mikoriza arbuskula (CMA). Sistem pakar ini dilengkapi dengan informasi mengenai lingkungan tumbuh yang efektif bagi setiap spesies CMA serta keterangan responsivitas dan lingkungan tumbuh dari setiap jenis tanaman inang.

METODE PENELITIAN

Kerangka Pemikiran

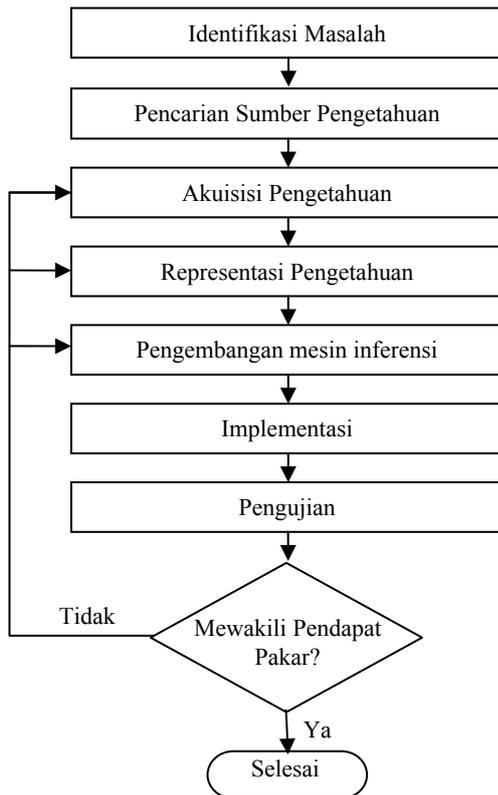
Cendawan mikoriza arbuskula (CMA) sebagai pupuk hayati merupakan alternatif teknologi dalam membantu pertumbuhan, meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman. Cendawan mikoriza arbuskula dalam proses perkembangannya dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan. Faktor-faktor tersebut antara lain tanaman inang, suhu rata-rata, pH tanah, dan kandungan air tanah. Setiap jenis spesies CMA sendiri berbeda-beda responnya terhadap faktor-faktor tersebut. Faktor lingkungan yang tidak cocok untuk spesies CMA bisa berpengaruh negatif terhadap efektivitas kultivasinya.

Sistem pakar ini dibangun untuk memberikan penilaian terhadap efektivitas kultivasi CMA bila dikembangkan pada kondisi lingkungan tertentu. Faktor lingkungan yang dihitung pada sistem ini adalah: kecocokan tanaman inang, pH tanah, suhu

rata-rata, dan kandungan air tanah. Teknik yang digunakan adalah sistem inferensi *fuzzy*. Penentuan efektivitas merupakan hasil inferensi *fuzzy* dari aturan-aturan (*rules*) yang dimiliki spesies CMA tertentu terhadap kombinasi faktor lingkungannya.

Tahap Pengembangan Sistem

Penelitian ini dilaksanakan dengan mengacu pada metode pengembangan sistem pakar dalam Marimin (2005). Skema tahap pengembangan ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahap pengembangan sistem pakar (Marimin, 2005)

Identifikasi Masalah

Proses pengembangan sistem pakar dimulai dengan identifikasi bidang masalah yang dikaji serta tugas spesifik yang akan ditangani (Marimin, 2005). Pada awalnya, sistem pakar yang dibangun bertujuan untuk membantu pengguna dalam mengkultivasi pupuk hayati sebelum ditentukan tugas yang lebih spesifik. Tahap berikutnya adalah penentuan jenis pupuk hayati yang akan digunakan yaitu CMA. Spesifikasi jenis pupuk hayati ini mengakibatkan beberapa perubahan pada identifikasi masalah awal sehingga perlu dilakukan penyesuaian. Sebagai contoh, sifat cendawan mikoriza arbuskula (CMA) yang harus bersimbiosis membuat perlu dipertimbangkannya variabel kecocokan tanaman inang sebagai parameter. Sistem kemudian dispesifikasi tugasnya menjadi penentuan efektivitas

kultivasi CMA berdasarkan faktor-faktor yang mempengaruhi kultivasi pada CMA.

Pencarian Sumber Pengetahuan

Pencarian sumber pengetahuan meliputi kegiatan pencarian pakar, literatur, dan data praktis kultivasi CMA di lapangan. Pakar merupakan seseorang yang mempunyai keahlian dan pengetahuan dalam bidang yang dikaji yang dalam hal ini adalah mengenai kultivasi CMA. Studi literatur merupakan kajian yang menjadi modal dalam berkomunikasi dengan pakar mengenai domain permasalahan kultivasi CMA.

Sumber pengetahuan yang digunakan pada pembangunan sistem pakar ini berasal dari pakar (*experts*), buku referensi, jurnal serta sumber-sumber dari internet. Pakar untuk sistem ini berasal dari Departemen Teknologi Industri Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian IPB dan Departemen Biologi Fakultas MIPA IPB.

Akuisisi Pengetahuan

Buchanan *et al.* (1983) dalam Jackson (1999) mendefinisikan akuisisi pengetahuan sebagai proses transfer dan transformasi kepakaran untuk menyelesaikan masalah dari beberapa sumber pengetahuan kepada program. Tahap ini merupakan tahap penting, kritis, dan sangat menentukan keberhasilan sistem pakar yang dibangun (Marimin, 2005).

Proses akuisisi pengetahuan pada sistem ini dilakukan dengan wawancara, diskusi, serta pengisian kuesioner. Akuisisi dimulai dengan studi literatur kemudian disusun pertanyaan inti dan kerangka akuisisi kepada pakar. Akuisisi juga dilakukan dengan mengambil pengetahuan dari sumber literatur kemudian melakukan konfirmasi kepada pakar berdasarkan hasil studi literatur. Berdasarkan proses akuisisi ini diperoleh pengetahuan mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas kultivasi CMA, yaitu: kecocokan tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata dan kandungan air tanah. Selain itu juga diperoleh pengetahuan mengenai bagaimana faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap efektivitas kultivasi CMA.

Ada banyak cara yang digunakan untuk mengukur efektivitas kultivasi CMA. Salah satunya adalah perbandingan respon tumbuh dari tanaman inang yang dikolonisasi CMA dengan tanaman inang yang tidak dikolonisasi CMA (kontrol). Ukuran lainnya dalam mengukur efektivitas adalah persentase kolonisasi akar tanaman inang.

Pada penelitian ini, karena terbatasnya data yang berkelanjutan mengenai efektivitas kultivasi baik dengan ukuran respon tumbuh tanaman inang maupun persen kolonisasi akar, maka digunakan ukuran efektivitas persentase kondisi lingkungan pada input terhadap kondisi lingkungan yang memberikan efektivitas terbaik, sehingga dapat

diberlakukan baik pada ukuran persen kolonisasi akar maupun respon tumbuh tanaman inang. Dengan kata lain, makna efektivitas pada sistem ini adalah seberapa baik kondisi lingkungan yang diberikan pada input dibandingkan dengan kondisi lingkungan pada keadaan terbaiknya (keadaan yang memaksimalkan respon tumbuh tanaman inang atau persen kolonisasi akar). Perumusannya adalah sebagai berikut (Sieverding, 1991):

$$\text{Efektivitas} = \frac{(M : NM) - 1}{(M_{\max} : NM) - 1} \times 100 \%$$

Keterangan:

- M : pertumbuhan tanaman dengan mikoriza pada datum yang dihitung efektivitasnya
 NM : pertumbuhan tanaman tanpa mikoriza (pada datum kontrol)
 Mmax : pertumbuhan tanaman dengan mikoriza pada kondisi maksimum (pada datum yang memberikan nilai pertumbuhan atau persen kolonisasi tertinggi).

Representasi Pengetahuan

Pengetahuan yang diperoleh dari proses akuisisi kemudian direpresentasikan untuk membentuk basis pengetahuan. Basis pengetahuan terdiri atas pengetahuan yang dimaksud dan spesifikasi dari pokok persoalan yang akan diselesaikan (Marimin, 2005). Metode representasi pengetahuan yang digunakan dalam sistem ini adalah representasi *fuzzy*. Penggunaan representasi *fuzzy* adalah karena faktor-faktor lingkungan sebagai input pada sistem ini memiliki sifat ambiguitas dan ketidakpastian.

Penggabungan sistem pakar dengan sistem *fuzzy* dikenal dengan sistem pakar *fuzzy*. Sistem tersebut merupakan pengembangan sistem pakar yang menggunakan logika *fuzzy* secara keseluruhan, yang meliputi himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy if-then*, serta proses inferensi (Marimin, 2005).

Pada tahap representasi pengetahuan ini disusun himpunan *fuzzy* dan aturan-aturan (*rules*) *fuzzy if-then* sebagai basis pengetahuan bagi sistem. Setiap spesies CMA memiliki aturan yang berbeda-beda untuk kombinasi input lingkungannya. Untuk setiap spesies CMA terdapat 144 aturan IF-THEN *fuzzy* sehingga total *rules* pada sistem ini berjumlah 432 aturan. Aturan ini diperoleh berdasarkan proses akuisisi pengetahuan yang didapatkan dari data literatur dan diskusi dengan pakar.

Pengembangan Mesin Inferensi

Mesin inferensi merupakan komponen sistem pakar yang mengarahkan pengetahuan dari basis pengetahuan sehingga tercapai kesimpulan

(Marimin, 2005). Elemen lainnya dari suatu sistem inferensi *fuzzy*, selain himpunan *fuzzy* dan aturan *fuzzy if-then* yang telah disusun pada tahap sebelumnya, adalah proses inferensi. Proses inferensi pada sistem ini menggunakan metode Mamdani. Pada metode ini, baik anteseden maupun konsekuen berupa himpunan *fuzzy*. Dengan konsep tersebut metode Mamdani memiliki kelebihan antara lain: lebih intuitif, lebih diterima oleh banyak pihak, dan lebih cocok apabila input diterima dari manusia (bukan mesin) (Kusumadewi, 2002).

Proses inferensi *fuzzy* Mamdani dilakukan dalam empat langkah (Negnevitsky 2002) :

1. Fuzifikasi variabel input. Pada tahap ini input dihitung derajat keanggotaannya terhadap setiap himpunan *fuzzy*.
2. Evaluasi aturan-aturan (*rules*)
3. Agregasi output hasil evaluasi aturan
4. Defuzifikasi himpunan *fuzzy* output menjadi nilai tunggal (*crisp*).

Implementasi

Proses implementasi dilaksanakan pada lingkup berikut:

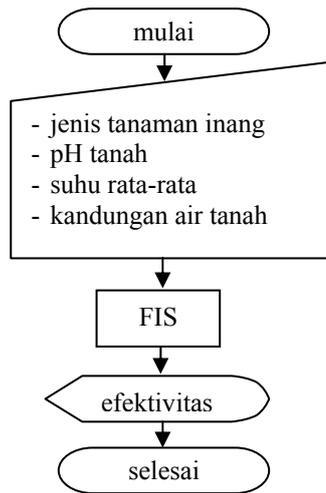
- Perangkat keras : *Processor* Intel Pentium Dual Core, *Memory* 1 GB, *Harddisk* 80 GB.
- Perangkat lunak : Sistem Operasi Windows XP Professional SP 2, MATLAB 7.0.4

Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengujicobakan sistem kepada pakar. Pada pengujian juga dilakukan verifikasi dan validasi hasil keluaran sistem tentang kombinasi faktor lingkungan dalam kultivasi CMA kepada pakar dan sumber pengetahuan. Tujuan tahap ini adalah untuk memeriksa apakah sistem pakar yang dibangun telah cukup mewakili *human expert*. Tahapan kegiatan dapat diulangi pada proses akuisisi untuk menambah pengetahuan, perbaikan pada representasi pengetahuan, ataupun perbaikan pada mesin inferensi bila sistem belum cukup mewakili *human expert*.

Rancang Bangun Sistem

Diagram alir cara kerja sistem diperlihatkan pada Gambar 2. Pengguna menginputkan nilai *crisp* dari faktor-faktor lingkungan dalam kultivasi yang meliputi: tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata dan kadar air tanah. Sistem kemudian memproses input pengguna ke dalam FIS yang sesuai dengan pilihan jenis spesies CMA pengguna. Sistem kemudian memberikan output berupa perkiraan nilai efektivitas kultivasi berdasarkan input faktor lingkungan.



Gambar 2. Diagram alir kerja sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Sistem

Sistem pakar kultivasi cendawan mikoriza arbuskula (CMA) sebagai pupuk hayati ini dikembangkan untuk melihat perkiraan nilai efektivitas kultivasi CMA pada kondisi lingkungan tertentu. Kondisi lingkungan yang dipertimbangkan meliputi empat variabel *input* yang bersifat *fuzzy* yaitu: kecocokan tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata, dan kandungan air tanah. Satu *input* lainnya adalah jenis spesies CMA yang bersifat *non-fuzzy*. Variabel *output* pada sistem ini adalah efektivitas kultivasi. Keterangan variabel pada ESCULAMBO dapat dilihat pada Tabel 1. Basis pengetahuan yang dibangun berupa aturan (*rules*) IF-THEN *fuzzy*. Pada setiap spesies CMA terdapat 144 aturan IF-THEN *fuzzy*.

Tabel 1. Variabel pada ESCULAMBO

No.	Variabel	Input/ output	Keterangan
1.	Spesies CMA	Input	Non-fuzzy
2.	Kecocokan tanaman inang	Input	fuzzy
3.	pH tanah	Input	fuzzy
4.	Suhu rata-rata	Input	fuzzy
5.	Kandungan air tanah	Input	fuzzy
6.	Efektivitas	Output	fuzzy

Himpunan Fuzzy

Sebuah sistem inferensi *fuzzy* dibangun untuk setiap spesies CMA dengan melibatkan empat variabel sebagaimana disebutkan sebelumnya. Himpunan *fuzzy* pada keempat variabel *input* tersebut sebagai berikut:

Kecocokan tanaman inang

Cendawan mikoriza arbuskula tidak dapat tumbuh tanpa tanaman inang atau bila tanaman inangnya tidak dapat dikolonisasi oleh CMA (non-mikotrofik). Tanaman inang yang mikotrofik (memiliki mikoriza) sendiri memiliki dependensi yang beragam terhadap CMA. Lebih jauh, tanaman mikotrofik ini dibedakan berdasarkan ketergantungannya terhadap asosiasi dengan CMA menjadi dua: tanaman mikotrofik obligat dan fakultatif. Tanaman mikotrofik obligat tidak dapat tumbuh tanpa adanya mikoriza meskipun pada tanah yang sangat subur, sedangkan tanaman mikotrofik yang fakultatif dapat tumbuh tanpa berasosiasi dengan mikoriza pada tingkat kesuburan tanah tertentu (Sieverding, 1991). Dependensi ini harus dibedakan dengan responsivitas tanaman inang. Responsivitas menunjukkan tingkat respon tanaman inang dalam berasosiasi dengan CMA.

Kecocokan tanaman inang dinilai berdasarkan dependensi dan tingkat responsivitas tanaman inang tersebut terhadap CMA, serta melihat kecocokannya berdasarkan laporan data penelitian yang tersedia. Nilai kecocokan kemudian ditentukan dengan diskusi dengan pakar dan studi literatur. Sebagai *input*, pengguna memilih jenis tanaman inang yang tersedia, dan sistem telah menyimpan nilai kecocokan tanaman inang tersebut terhadap spesies CMA terpilih (Tabel 2). Nilai kecocokan ini yang kemudian akan difuzifikasi.

Tabel 2. Kecocokan tanaman inang terhadap setiap spesies CMA

Tanaman Inang	Skor kecocokan untuk spesies:		
	<i>E. Colum-biana</i>	<i>G. fascicula-tum</i>	<i>G. maniho-tis</i>
Buncis	80	90	80
Jagung	70	80	85
Kedelai	75	90	80
Kopi	55	65	55
Padi	3	3	5
Sing-kong	95	90	100
Sorgum	75	85	80
The	65	65	65

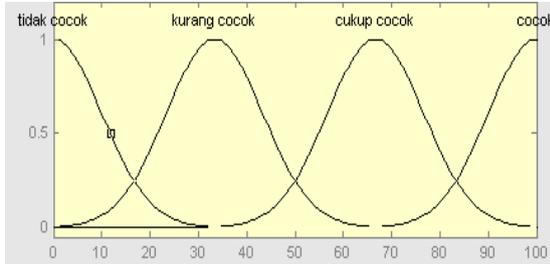
Kecocokan tanaman inang dikelompokkan menjadi empat kategori linguistik yaitu: tidak cocok, kurang cocok, cukup cocok dan cocok. Rentang nilai kecocokan tanaman inang ini adalah 0 – 100. Derajat keanggotaan direpresentasikan menggunakan kurva Gaussian seperti dapat dilihat pada Gambar 3. Fungsi keanggotaan untuk *input* kecocokan tanaman inang sebagai berikut:

$$\mu_{\text{tidak cocok}} [x] = e^{-\frac{(x-0)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{kurang cocok}} [x] = e^{-\frac{(x-33,33)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{cukup cocok}} [x] = e^{-\frac{(x-66,67)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{cocok}} [x] = e^{-\frac{(x-100)^2}{2(10)^2}}$$



Gambar 3. Representasi kurva Gaussian untuk parameter kecocokan tanaman inang

pH tanah

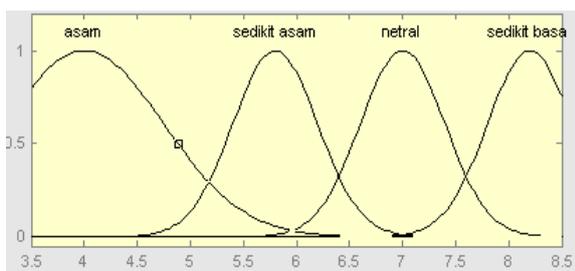
Faktor lain yang diperhitungkan untuk mengevaluasi nilai efektivitas kultivasi adalah pH tanah. Pengguna memasukkan *input* berupa nilai numerik pH tanah. Nilai pH tanah pada sistem ini dibatasi pada kisaran 3,5 – 8,5. Pada Supardi (1983) kisaran ini adalah untuk tanah yang tingkat keasamannya kuat, sedang, dan sedikit, serta tanah yang tingkat kealkalinannya sedang dan sedikit. Pada sistem ini nilai pH tanah dikelompokkan menjadi empat kategori linguistik yaitu: asam, sedikit asam, netral dan sedikit basa. Derajat keanggotaan untuk pH dipetakan menggunakan kurva Gaussian seperti dapat dilihat pada Gambar 4. Fungsi keanggotaan untuk setiap kategori pada pH dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu_{\text{asam}} [x] = e^{-\frac{(x-4)^2}{2(7,5)^2}}$$

$$\mu_{\text{sedikit asam}} [x] = e^{-\frac{(x-5,8)^2}{2(0,4)^2}}$$

$$\mu_{\text{netral}} [x] = e^{-\frac{(x-7)^2}{2(0,4)^2}}$$

$$\mu_{\text{sedikit basa}} [x] = e^{-\frac{(x-8,2)^2}{2(0,4)^2}}$$



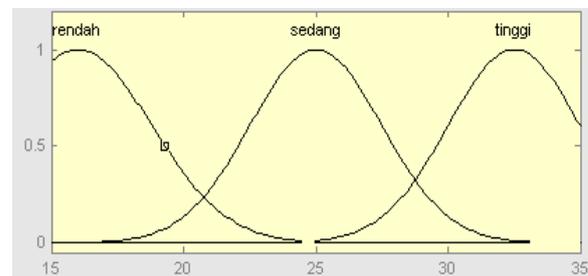
Gambar 4. Representasi kurva Gaussian untuk pH tanah
Suhu rata-rata

Pengguna memasukkan input berupa nilai numerik dari suhu rata-rata yang diukur dalam derajat Celcius (°C). Rentang nilai suhu rata-rata dibatasi pada kisaran 15 – 35 °C mereferensi pada Supardi (1983). Suhu rata-rata dikelompokkan menjadi tiga ketegori yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Derajat keanggotaan direpresentasikan menggunakan kurva Gaussian seperti digambarkan pada Gambar 5. Fungsi keanggotaannya sebagai berikut:

$$\mu_{\text{rendah}} [x] = e^{-\frac{(x-16)^2}{2(2,8)^2}}$$

$$\mu_{\text{sedang}} [x] = e^{-\frac{(x-25)^2}{2(2,5)^2}}$$

$$\mu_{\text{tinggi}} [x] = e^{-\frac{(x-32,5)^2}{2(2,5)^2}}$$



Gambar 5. Representasi kurva Gaussian untuk suhu rata-rata

Kandungan air tanah

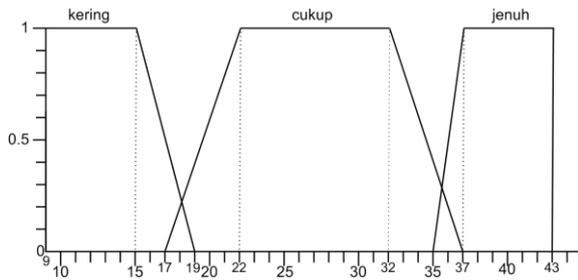
Faktor lainnya yang berpengaruh pada efektivitas kultivasi CMA adalah kandungan air tanah. Spesies CMA berbeda-beda ketahanannya dalam mentoleransi kekeringan air tanah, karenanya faktor kandungan air tanah ini merupakan salah satu faktor yang penting. Tanah pada sistem ini diasumsikan memiliki tekstur lempung. Asumsi lempung digunakan karena data yang tersedia mayoritas menggunakan tekstur tanah lempung dalam penelitiannya. Asumsi tekstur tanah ini digunakan untuk menentukan rentang nilai persentase kadar air tanah. Menurut Supardi (1983), persentase kandungan air pada tanah bertekstur lempung memiliki kisaran nilai 9 – 43%.

Pengguna memasukkan input berupa nilai estimasi kandungan air tanah dari tanah yang digunakan untuk kultivasi. Nilai kandungan air tanah dikelompokkan ke dalam tiga kategori linguistik yaitu: kering, cukup, dan jenuh. Derajat keanggotaan dipetakan menggunakan kurva trapesium seperti dapat dilihat pada Gambar 6. Fungsi keanggotaannya sebagai berikut:

$$\mu_{\text{kering}} [x] = \begin{cases} 0 & x < 9 \text{ atau } x > 19 \\ 1 & 9 \leq x \leq 15 \\ \frac{19-x}{19-15} & 15 < x \leq 19 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{cukup}} [x] = \begin{cases} 0 & x < 17 \text{ atau } x > 37 \\ \frac{x-17}{22-17} & 17 \leq x < 22 \\ 1 & 22 \leq x \leq 32 \\ \frac{37-x}{37-32} & 32 < x \leq 37 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{jenuh}} [x] = \begin{cases} \frac{x-35}{37-35} & 35 \leq x < 37 \\ 1 & 37 \leq x \leq 43 \\ 0 & x < 35 \text{ atau } x > 43 \end{cases}$$



Gambar 6. Representasi kurva trapesium untuk persentase kandungan air tanah

Rangkuman keempat himpunan fuzzy masukan disajikan pada Tabel 3. Setiap himpunan fuzzy yang telah dijelaskan adalah sama untuk setiap spesies CMA. Pembeda antarspesies CMA adalah rules atau aturan-aturan terkait bagaimana spesies CMA merespon terhadap faktor lingkungan tertentu.

Tabel 3. Rangkuman variabel fuzzy input

No.	Variabel	Tipe	Nilai
1.	Tanaman inang	nominal	[buncis, jagung, kopi, kedelai, padi, singkong, sorgum, teh]
2.	pH tanah	numerik	Rentang nilai 3,5 – 8,5
3.	Suhu rata-rata	numerik	Rentang nilai 15 – 35 °C
4.	Kandungan air tanah	numerik	Rentang nilai 9 – 43%

Aturan IF-THEN Fuzzy

Setiap spesies CMA memiliki aturan masing-masing dalam penentuan efektivitas kultivasi. Aturan ini merupakan dasar pengetahuan bagi sistem. Untuk setiap spesies CMA terdapat 144 aturan. Sebagai contoh, untuk spesies *Entrophospora columbiana* terdapat aturan fuzzy berikut:

IF kecocokan_inang IS 'cukup_cocok' AND pH_tanah IS 'sedikit_asam' AND suhu IS 'sedang' AND kandungan_air_tanah IS 'cukup' THEN efektivitas IS 'cukup_efektif'

Output dari sistem ini adalah nilai efektivitas kultivasi CMA bila dikultivasi pada kondisi

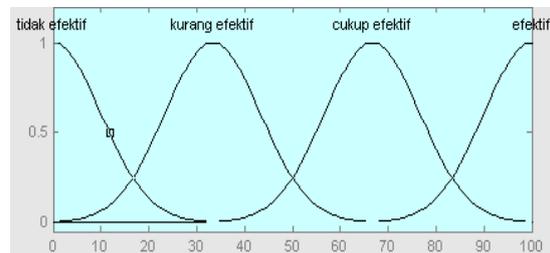
lingkungan sesuai input. Efektivitas memiliki makna seberapa baik CMA ditumbuhkan pada kondisi input bila dibandingkan dengan kondisi terbaiknya. Efektivitas dibagi menjadi empat kelompok yaitu: tidak efektif, kurang efektif, cukup efektif dan efektif. Rentang nilai untuk efektivitas adalah 0-100. Fungsi keanggotaan untuk efektivitas direpresentasikan menggunakan kurva Gaussian (Gambar 7) dan dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu_{\text{tidak efektif}} [x] = e^{-\frac{(x-0)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{kurang efektif}} [x] = e^{-\frac{(x-33,33)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{cukup efektif}} [x] = e^{-\frac{(x-66,67)^2}{2(10)^2}}$$

$$\mu_{\text{efektif}} [x] = e^{-\frac{(x-100)^2}{2(10)^2}}$$



Gambar 7. Representasi kurva Gaussian untuk output efektivitas kultivasi

Proses Inferensi

Proses inferensi dilakukan dengan menerapkan metode Mamdani. Pengguna memasukkan input untuk setiap parameter fuzzy. Untuk parameter kecocokan tanaman inang, pengguna hanya memilih jenis tanaman inang yang ada, sistem telah menyimpan nilai kecocokan (Tabel 2) yang kemudian difuzifikasi. Untuk parameter pH tanah, suhu rata-rata dan kandungan air tanah, pengguna memasukkan nilai numerik.

Input kemudian dihitung derajat keanggotaannya terhadap setiap himpunan fuzzy. Derajat keanggotaan yang diperoleh kemudian digunakan untuk mengevaluasi aturan pada basis pengetahuan. Aturan pada sistem ini dihubungkan oleh operator AND sehingga sebagai nilai consequent diambil derajat keanggotaan minimum dari setiap antecedent untuk sebuah aturan. Metode implikasi yang digunakan adalah fungsi minimum (Clipping). Nilai-nilai consequent yang diperoleh kemudian diagregasi sehingga diperoleh himpunan fuzzy output, yaitu himpunan fuzzy efektivitas. Himpunan fuzzy efektivitas ini kemudian didefuzifikasi sehingga diperoleh nilai crisp efektivitas kultivasi CMA.

Metode defuzifikasi yang digunakan adalah metode centroid. Proses defuzifikasi menghasilkan suatu keluaran nilai tunggal mengenai efektivitas kultivasi. Sistem juga memberikan keluaran kategori

linguistik apakah kultivasi termasuk tidak efektif, kurang efektif, cukup efektif, ataukah efektif.

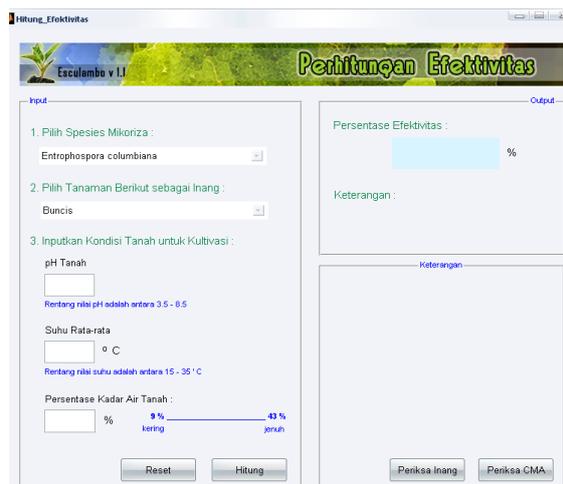
Antarmuka Pengguna

Setelah melalui tahap representasi pengetahuan dan pembangunan mesin inferensi, dilakukan implementasi sistem pakar penentuan efektivitas kultivasi CMA. Adapun tampilan awal pada sistem dapat dilihat pada Gambar 8. Terdapat dua menu utama, yaitu menu 'Menu' dan menu 'Bantuan'. Pada menu 'Menu' terdapat tiga submenu yaitu: 'Hitung Efektivitas', 'Cek Tanaman Inang', dan 'Cek Spesies Mikoriza Arbuskula'.



Gambar 8. Tampilan awal sistem

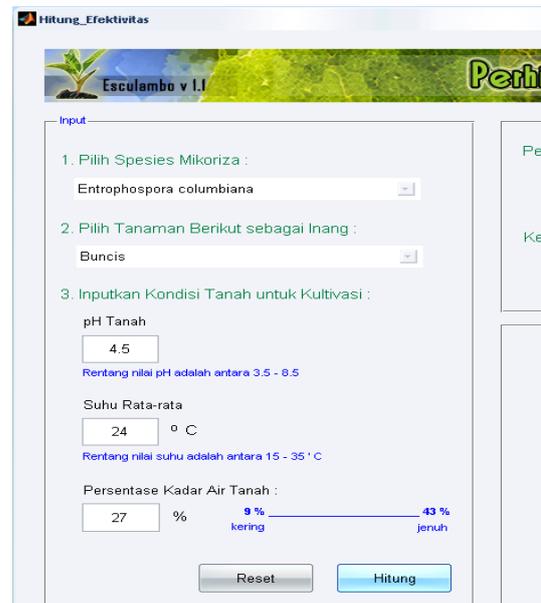
Proses perhitungan efektivitas dilakukan melalui submenu 'Hitung Efektivitas' atau dengan menekan tombol 'Hitung Efektivitas' pada tampilan awal. Antarmuka perhitungan efektivitas dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Antarmuka pengguna untuk perhitungan efektivitas

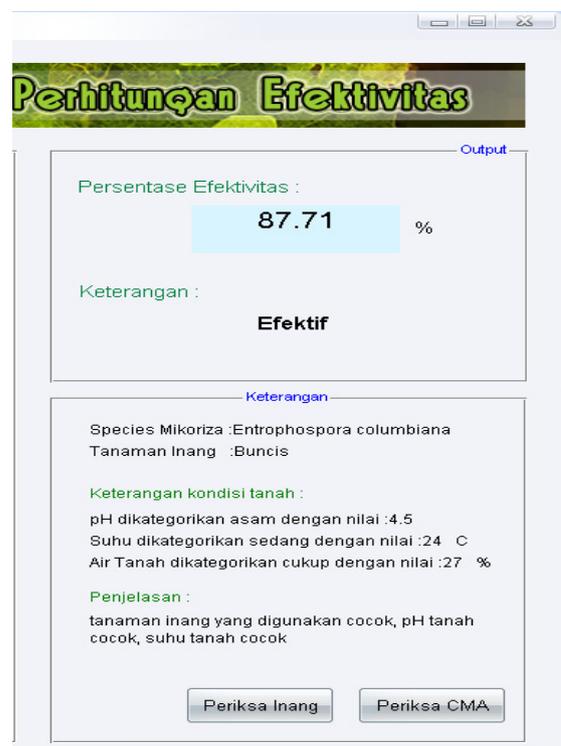
Pada panel input, pengguna melakukan pemilihan spesies CMA, pemilihan tanaman inang, dan memasukkan nilai-nilai numerik untuk pH

tanah, suhu rata-rata serta estimasi kandungan air tanah. Contoh input ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Contoh input pada sistem

Adapun contoh keluaran sistem pada panel output dan panel keterangan sebagai fasilitas penjelasan sederhana ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Contoh output dan penjelasan

Pengujian

Pengujian dilakukan dengan uji coba sistem langsung kepada pakar serta dengan memberikan kombinasi input kepada sistem kemudian melihat

outputnya. Sebagai contoh kasus, dipilih kombinasi input seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Contoh kasus pada pengujian sistem

No.	Spesies CMA	Tanaman inang	Faktor Lingkungan	Efektivitas
1.	<i>E. columbiana</i>	Buncis	pH : 4 suhu : 25 KAT: 27	88,5 % Efektif
2.	<i>G. manihotis</i>	Singkong	pH : 4 suhu : 25 KAT: 27	92,3 % Efektif
3.	<i>E. columbiana</i>	Jagung	pH : 4 suhu : 25 KAT : 27	52,3% Cukup efektif

Berdasarkan kasus pengujian pada Tabel 4, pada kasus No.1 dan No.2 pakar telah menyetujui keluaran sistem. Namun pada kasus No.3 (Tabel 4, spesies *E. columbiana* dengan tanaman inang jagung) pakar tidak menyetujui keluaran sistem. Hal ini disebabkan tanaman inang yang dipilih merupakan tanaman inang yang memiliki responsivitas tinggi, tetapi memberikan hasil efektivitas hanya 52,3%. Dari sisi sistem kesalahan ini disebabkan kecilnya nilai representasi kecocokan tanaman inang jagung untuk spesies *E. columbiana*, yaitu hanya bernilai 50. Untuk memperbaiki kesalahan ini nilai kecocokan tanaman inang jagung untuk spesies *E. columbiana* dinaikkan menjadi 70 (seperti dapat dilihat pada Tabel 2). Setelah nilai kecocokan diperbaiki, sistem memberikan efektivitas 90,9% untuk tanaman inang jagung dengan spesies CMA *E. columbiana*, dengan faktor lingkungan sama seperti pada Tabel 4.

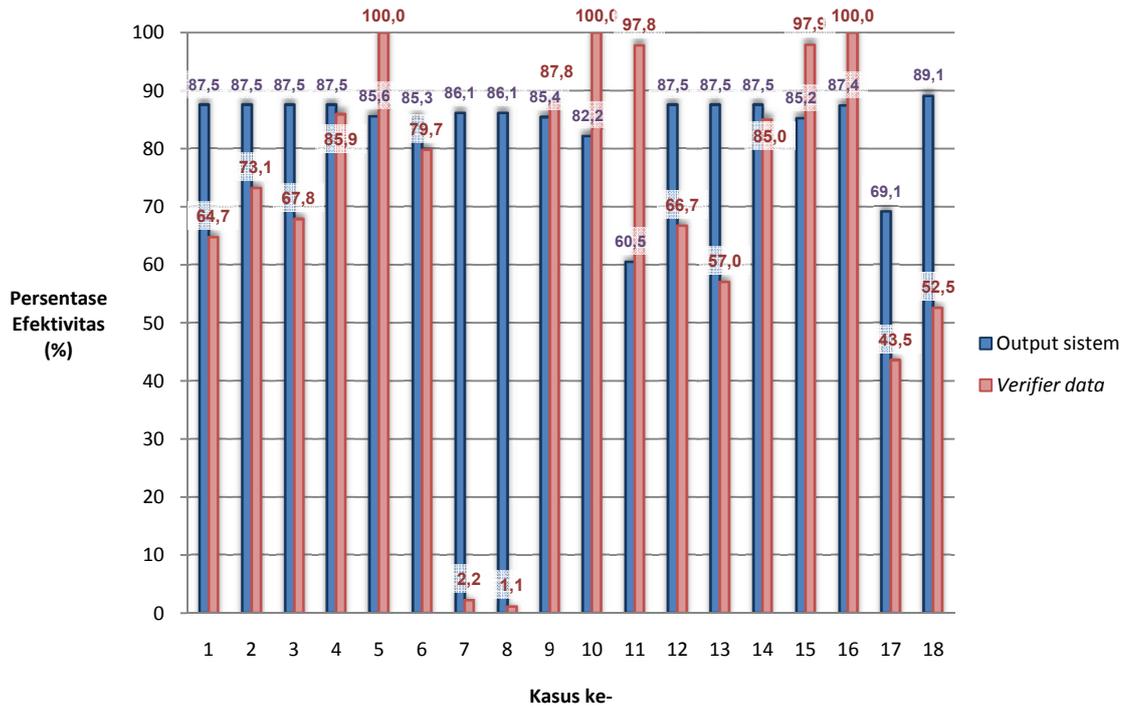
Pakar berpendapat masih perlu adanya perbaikan dan pengembangan sehingga sistem ini dapat diimplementasikan dalam keadaan sesungguhnya di lapangan. Perbaikan sistem terkait ukuran efektivitas kultivasi yang diberikan. Pada sistem, efektivitas kultivasi memiliki makna persentase efektivitas sesuai input faktor lingkungan yang diberikan dibandingkan dengan efektivitas kultivasi pada kondisi lingkungan yang terbaik (optimum) untuk kultivasi. Menurut pakar, ukuran efektivitas dapat dibuat lebih jelas dengan memberikan ukuran yang biasanya digunakan dalam kultivasi, misalnya persentase kolonisasi akar ataupun respon tumbuh tanaman inang (yang diantaranya diukur dari berat kering tajuk). Selain itu, faktor lingkungan lainnya seperti media tumbuh (tanah, zeolit, pasir, dan lain-lain), lama waktu kultivasi, pengaruh spesies CMA lain, pengaruh fumigasi dan lainnya masih belum dipertimbangkan

dalam penelitian ini sehingga sistem masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

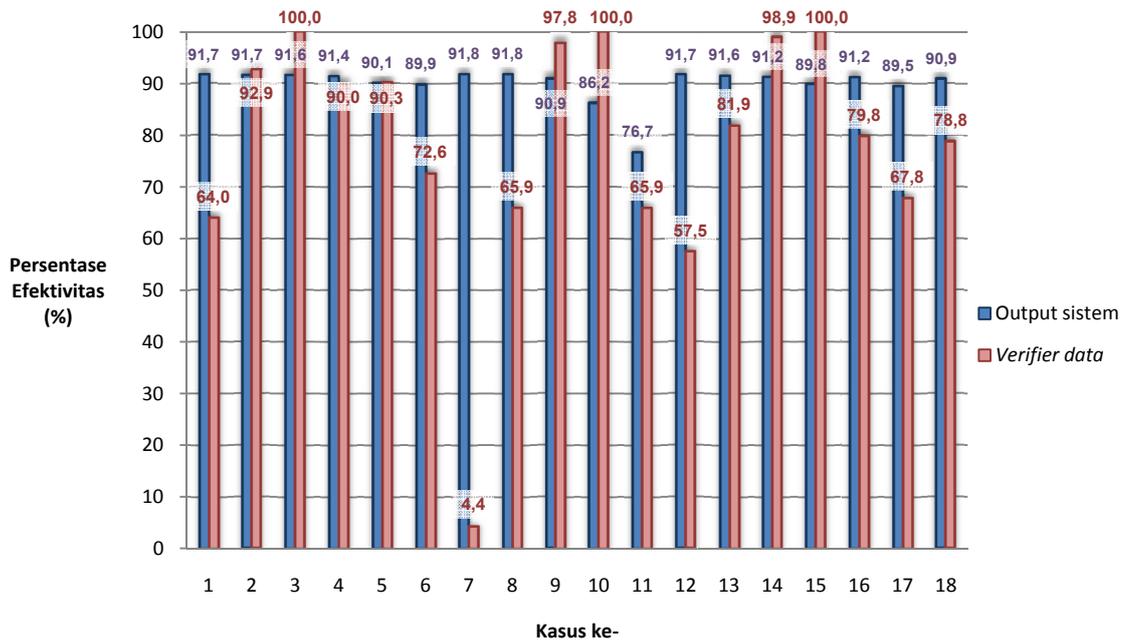
Pengujian juga dilakukan dengan mencocokkan keluaran sistem terhadap data praktis yang tersedia mengenai kultivasi CMA di lapangan (Sieverding, 1991 dan Howeler *et al.*, 1987 dalam Clark, 1997). Karena terbatasnya *verifier data* yang tersedia pengujian hanya dilakukan pada spesies *Entrophospora columbiana* dan *Glomus manihotis* dengan tanaman inang singkong. Dilakukan pengujian sebanyak delapan belas kasus baik untuk spesies *E. columbiana* maupun *G. manihotis* dengan input faktor lingkungan yang berbeda-beda, disesuaikan dengan data yang tersedia. Input yang dibedakan diantaranya pH tanah (kasus ke-1 s.d ke-16). Pada kasus ke-1 s.d kasus ke-6 serta kasus ke-12 s.d kasus ke-16, diberikan input dengan pH tanah yang berbeda-beda dengan kandungan air tanah cukup. Pada kasus ke-7 hingga kasus ke-11 selain input pH tanah yang dibedakan, input kandungan air tanah diberikan nilai kering. Input lain yang dibedakan adalah suhu rata-rata (kasus ke-17 dan ke-18).

Persentase efektivitas kultivasi berdasarkan output sistem dan persentase efektivitas kultivasi pada data pemverifikasi dibandingkan untuk mengetahui seberapa baik sistem memberikan nilai efektivitas kultivasi. Tampak pada Gambar 12 (untuk spesies *E. columbiana*) dan Gambar 13 (untuk spesies *G. manihotis*) grafik yang menggambarkan output sistem tentang persentase efektivitas kultivasi dibandingkan dengan data pemverifikasi. Berdasarkan grafik ini dapat dilihat bahwa sistem belum dapat memberikan nilai persentase efektivitas yang tepat. Grafik pada data pemverifikasi cenderung lebih peka terhadap perubahan dibandingkan grafik pada keluaran sistem. Hal ini disebabkan pada kondisi sesungguhnya seluruh faktor yang berpengaruh terhadap efektivitas kultivasi memberikan pengaruhnya, sedangkan pada sistem ini hanya empat faktor pengaruh yang dihitung.

Pengetahuan pada sistem yang dibangun dengan mengelaborasi pengetahuan dari pakar dan dari keseluruhan data yang ada menyebabkan mungkin terjadi kasus yang berbeda secara mencolok seperti pada kasus ke-7 dan 8 pada Gambar 12 dan kasus ke-7 pada Gambar 13. Perbedaan secara mencolok terjadi karena kasus tersebut diperoleh dari data tertentu yang memang memberikan hasil berbeda dengan data lain pada umumnya yang dijadikan dasar pembangunan pengetahuan sistem.



Gambar 12. Grafik pengujian terhadap data untuk spesies *E. columbiana*



Gambar 13. Grafik pengujian terhadap data untuk spesies *G. manihotis*

Berdasarkan nilai *crisp* output persentase efektivitas kultivasi, sistem memang belum mampu memberikan nilai yang akurat. Namun, selain melihat kebaikan sistem dalam memberikan nilai *crisp* persentase efektivitas kultivasi, dilihat juga kategori efektivitas yang diberikan oleh sistem. Kategori efektivitas hasil keluaran sistem dibandingkan dengan kategori efektivitas pada data.

Berdasarkan pengujian kategori efektivitas diketahui sistem telah mampu memberikan kategori yang sesuai dengan data dengan akurasi 44,44% serta mampu memberikan kategori yang berbeda satu tingkat dengan kategori pada data dengan akurasi 47,22%. Nilai ini masih kurang baik karena kecilnya persentase untuk kategori yang tepat sesuai dengan data, meskipun secara kumulatif 91,66%

sistem sejelek-jeleknya memberikan kategori efektivitas yang berbeda satu tingkat. Persentase yang kecil kemungkinan disebabkan masih kurangnya faktor lingkungan yang dilibatkan pada sistem ini di mana pada kondisi sesungguhnya seluruh faktor lingkungan yang berpengaruh terlibat. Selain itu keterbatasan data menjadi kendala sehingga proses verifikasi yang lebih menyeluruh tidak dapat dilakukan.

Selain melalui pakar dan verifikasi terhadap data, pengujian juga dilakukan kepada pakar lainnya dari mahasiswa dengan jumlah kasus pengujian 114 kasus. Penguji menyetujui keluaran kategori efektivitas sistem pada 110 kasus atau sebesar 96,5%. Berbeda dengan pengujian terhadap data, akurasi yang diperoleh pada pengujian ini cukup tinggi. Ini disebabkan manusia lebih melihat kasus secara tidak eksak, serta lebih banyak memberi pertimbangan pada faktor yang memang menonjol dalam mempengaruhi kultivasi yakni keempat faktor pengaruh yang telah dilibatkan pada sistem ini.

Keterbatasan Sistem

Sistem ESCULAMBO masih memiliki beberapa keterbatasan. Perlu pengembangan lebih lanjut agar sistem dapat digunakan pada keadaan sesungguhnya. Keterbatasan sistem diantaranya:

- Jenis spesies CMA yang dihitung efektivitasnya hanya tiga, yaitu: *Entrophospora columbiana*, *Glomus fasciculatum*, dan *Glomus manihotis*.
- Faktor lingkungan yang dipertimbangkan hanya ada empat, yaitu: kecocokan tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata dan kandungan air tanah. Faktor lainnya seperti jenis media tumbuh (tanah, pasir, zeolit, atau campuran), lama waktu kultivasi, penggunaan fumigasi, masih belum dipertimbangkan dalam sistem ini. Hal ini disebabkan minimnya data penelitian yang berkelanjutan tentang faktor-faktor tersebut dan *judgement* pakar yang umumnya baru dapat diberikan dengan adanya dasar hasil penelitian.
- Nilai efektivitas kultivasi pada output memiliki makna persentase efektivitas pada kondisi lingkungan sesuai *input* dibandingkan dengan efektivitas pada lingkungan kultivasi terbaiknya. Sistem belum dapat memberikan ukuran efektivitas yang lebih jelas dalam kultivasi, seperti persentase kolonisasi akar atau respon tumbuh.

Kompleksitas Sistem

Kompleksitas sistem diukur dengan melihat kompleksitas proses inferensi *fuzzy* pada sistem. Proses inferensi *fuzzy* sebagai berikut:

1. Fuzifikasi variabel input:

karena terdapat 4 variabel *fuzzy* maka proses ini memiliki kompleksitas $3C1+C2 = C$, $C1$ untuk proses fuzifikasi pada fungsi keanggotaan Gaussian dengan 3 variabel input, $C2$ untuk

proses fuzifikasi fungsi keanggotaan trapesium untuk variabel kandungan air tanah. $C1$, $C2$, dan C adalah konstanta.

2. Evaluasi aturan

misalkan m adalah jumlah aturan *fuzzy* yang memenuhi *tuple* himpunan *fuzzy* sesuai hasil fuzifikasi input. Maka proses evaluasi aturan dilakukan sebanyak m kali.

3. Agregasi output setiap aturan menjadi himpunan *fuzzy* output memiliki kompleksitas m , sesuai dengan banyak aturan yang dievaluasi.

4. Defuzifikasi himpunan *fuzzy* output menggunakan metode *centroid* memiliki kompleksitas n , dengan n adalah banyaknya titik yang digunakan pada himpunan *fuzzy* output.

Dengan demikian total kompleksitas sistem ini adalah $O(C + m + m + n) = O(2m + n)$.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Sistem pakar ESCULAMBO dibangun untuk membantu pengguna melihat efektivitas kultivasi cendawan mikoriza arbuskula (CMA) bila dikultivasi pada kondisi tertentu. Faktor pengaruh kultivasi yang dihitung pada sistem ini meliputi: kecocokan tanaman inang, pH tanah, suhu rata-rata dan kandungan air tanah. Basis pengetahuan mengenai bagaimana faktor pengaruh kultivasi mempengaruhi efektivitas dibangun menggunakan sistem inferensi *fuzzy*. Output sistem ini adalah nilai efektivitas kultivasi pada kondisi sesuai input pengguna.

Hasil pengujian sistem pada pakar menunjukkan masih diperlukan pengembangan agar sistem dapat digunakan pada kondisi sesungguhnya. Diantaranya dengan penambahan faktor pengaruh dan perbaikan makna efektivitas pada output.

Sistem belum memberikan keluaran nilai *crisp* persentase efektivitas secara akurat. Namun sistem mampu memberikan kategori efektivitas dengan cukup baik. Berdasarkan pengujian terhadap pakar mahasiswa, sistem memiliki akurasi 96,5% dalam memberikan kategori efektivitas yang tepat. Sedangkan verifikasi terhadap data menunjukkan bahwa 91,66% sistem sejelek-jeleknya memberikan kategori efektivitas yang berbeda satu tingkat.

Saran

Sistem dapat dikembangkan dengan menambah parameter lain yang juga turut mempengaruhi efektivitas kultivasi CMA seperti media tumbuh, lama waktu kultivasi, dan pengaruh fumigasi. Sistem juga dapat dikembangkan dengan memberikan representasi ukuran efektivitas yang lebih umum digunakan, misalnya persentase kolonisasi akar tanaman inang, atau respon tumbuh tanaman inang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dr. Nampiah dan Dr. Mulyorini Rahayuningsih atas pengetahuan yang telah diberikan dalam rangka penyusunan sistem pakar ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Asama H, Nagamune T, Hirata M, Hirata A, Endo I. 1990. An Expert System for Cultivating Operations. *Annals of the New York Acad of Sci* 589 (5): 569 – 579.
- Buchanan BG, Barstow D, Bechtel R, Bennet J, Clancey W, Kulikowski C, Mitchell TM, Waterman DA. 1983. Constructing Expert System. Di dalam Hayes-Roth F, Waterman DA, Levat D. (Eds.) *Building Expert System*. Reading MA: Addison Wesley.
- Clark RB. 1997. Arbuscular Mycorrhizal Adaptation, Spore Germination, Root Colonization, and Host Plant Growth and Mineral Acquisition at Low pH. *Plant and Soil*: 192: 15-22.
- Dodd JC, Rosendahl S. 1996. The BEG Expert System – a Multimedia Identification System for Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Mycorrhiza*: 6 : 275-278.
- Giarratano J, Gary R. 1998. Expert System Principles and Programming. Boston: PWS Publishing Company.
- Gupta V, Satyanarayana T, Sandeep G. 2000. General Aspect of Mycorrhiza. Di dalam K.G Mukerji *et al.* (eds.), *Mychorrizal Biology*. India: Kiewer Academic. p27-44.
- Howeler RH, Sieverding E, Saif S. 1987. Practical Aspects of Mycorrhizal Technology in Some Tropical Crops and Pastures. *Plant and Soil*: 100: 249 – 283.
- Jackson P. 1999. Introduction to Expert System. England: Addison Wesley Longman Limited.
- Kusumadewi S. 2002. Analisis dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Toolbox Matlab. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Marimin. 2005. Teori dan Aplikasi *Sistem Pakar* dalam Teknologi Manajerial. Bogor : IPB Press.
- Negnevitsky M. 2002. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent System. India: Pearson Education.
- Novriani, Madjid. 2009. Prospek Pupuk Hayati Mikoriza. <http://dasar2ilmutanah.blogspot.com/2009/05/prospek-pupuk-hayati-mikoriza.html> [19 Oktober 2010].
- Saraswati R, Sumarno. 2008. Pemanfaatan Mikroba Penyubur Tanah sebagai Komponen Teknologi Pertanian. *Iptek Tanaman Pangan* 3 (1).
- Sieverding E. 1991. Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystem. Germany: Deutshe GTZ Eshborn.
- Simanungkalit. 2006. Cendawan Mikoriza Arbuskuler. http://www.tanah.ub.ac.id/Kuliah/Tek_Pupuk/Pustaka/pupuk8_mikoriza.pdf [19 Oktober 2010].
- Supardi G. 1983. Sifat dan Ciri Tanah. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Suriadikarta, Didi A, Simanungkalit RDM. 2006. Pendahuluan. Di dalam Simanungkalit *et al.* (eds.), *Pupuk Organik dan Pupuk Hayati*. Bogor: Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. p1-9.
- Votrovski V, Jablonska E. 2007. Mushroom Growing with Information Support as Opportunity for the Developing Countries. *Agric Trop Subtrop*: 40: 120-125.