

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Pengenalan Masalah

Pertanian berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan dan perekonomian Indonesia. Seiring dengan pertumbuhan populasi yang terus meningkat, kebutuhan pangan juga semakin tinggi, sehingga sistem pertanian harus beradaptasi untuk menjadi lebih efisien, produktif, dan berkelanjutan [1]. Dalam pertanian modern, pengelolaan tanah sebagai media tanam menjadi faktor krusial karena secara langsung mempengaruhi ketersediaan air dan nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman [2].

Salah satu tanaman hortikultura yang banyak dibudidayakan untuk memenuhi kebutuhan pangan tersebut adalah tanaman sawi hijau (*Brassica juncea* L.). Tanaman ini memiliki nilai ekonomi yang relatif tinggi, tingkat konsumsi yang luas, serta periode panen yang singkat, sehingga banyak dibudidayakan oleh petani di Indonesia, termasuk di wilayah Sumatera Barat [3][4]. Namun, praktik budidaya sawi hijau yang dilakukan secara intensif dan berulang dengan sistem monokultur tanpa rotasi tanaman yang memadai berpotensi menimbulkan permasalahan terhadap keberlanjutan lahan serta kualitas tanah dalam jangka panjang [5].

Pengelolaan lahan secara intensif dalam jangka panjang cenderung menyebabkan penurunan kualitas fisik, kimia, dan biologis tanah, yang berdampak langsung pada berkurangnya ketersediaan nutrisi yang dibutuhkan bagi tanaman [3]. Ketersediaan nutrisi di dalam tanah tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah pupuk yang disuplai, tetapi juga sangat bergantung pada kondisi lingkungan tanah, yang parameternya mencakup sifat kimia tanah berupa pH dan kandungan unsur hara makro (NPK), serta sifat fisika tanah berupa kelembaban tanah. Selain parameter ini, suhu lingkungan juga merupakan faktor pendukung yang berpengaruh terhadap kondisi pertumbuhan tanaman, dan digunakan sebagai variabel pendukung untuk menjaga kondisi lingkungan tetap optimal bagi pertumbuhan sawi hijau. Kelembaban tanah mempengaruhi proses pelarutan dan pergerakan nutrisi menuju akar tanaman, sedangkan pH tanah

menentukan kelarutan dan ketersediaan unsur hara makro. Kondisi pH yang terlalu asam atau basa serta kelembaban tanah yang tidak ideal dapat menghambat penyerapan nutrisi dan menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam menjaga kesuburan tanah [6].

Kondisi tanah yang tidak terkelola dengan baik dapat mengakibatkan pertumbuhan tanaman yang tidak merata serta penurunan hasil panen. Oleh karena itu, pemantauan kondisi tanah yang berkaitan dengan ketersediaan nutrisi tanaman menjadi sangat penting. Parameter seperti pH, kelembaban tanah, dan kandungan unsur hara makro (NPK) dapat digunakan sebagai indikator untuk memperkirakan kondisi nutrisi dari tanaman sawi hijau. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pertanian presisi, di mana data mengenai kondisi tanah digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan budidaya tanaman yang lebih efisien dan berkelanjutan [2].

Pada praktiknya, proses penyiraman dan penyemprotan pestisida masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat sederhana seperti sprayer tangan atau sprayer gendong. Metode ini menyebabkan distribusi air dan pestisida menjadi tidak merata, sehingga sebagian tanaman menerima cairan secara berlebih sementara sebagian lainnya mengalami kekurangan. Metode ini masih banyak digunakan oleh petani karena mudah dioperasikan dan tidak memerlukan biaya besar [7]. Kondisi tersebut menurunkan efektivitas dan efisiensi penggunaan air, nutrisi, dan pestisida.

Ketidakteraturan distribusi air dan pestisida tersebut berdampak langsung terhadap distribusi unsur hara di dalam tanah. Tanaman yang menerima air berlebih cenderung mengalami pencucian unsur hara (leaching), terutama nitrogen yang bersifat mudah larut, sedangkan tanaman yang kekurangan air mengalami hambatan dalam penyerapan nutrisi. Kondisi ini menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak seragam menurunkan produktivitas lahan, terutama pada sistem budidaya monokultur secara keseluruhan [8]. Ketidaksamarataan distribusi pestisida juga menyebabkan perlindungan tanaman terhadap hama dan penyakit menjadi tidak optimal serta meningkatkan pemborosan penggunaan pestisida [9]. Selain itu, penyemprotan

berlebihan berpotensi meninggalkan residu pestisida pada hasil panen dan berdampak negatif terhadap kualitas tanah serta mencemari lingkungan sekitar lahan pertanian [10].

Permasalahan distribusi yang tidak merata ini juga berkaitan erat dengan sistem penyiraman tanaman. Penyiraman dengan sistem percikan atau manual seringkali menyebabkan sebagian tanaman memperoleh air dan nutrisi berlebih, sementara tanaman lainnya mengalami kekurangan. Kondisi ini menurunkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh tanaman, mengganggu pertumbuhan vegetatif, serta menyebabkan hasil panen menjadi tidak seragam [11]. Tanaman yang memperoleh suplai air dan nutrisi yang cukup akan tumbuh lebih optimal, sedangkan tanaman yang kekurangan akan mengalami hambatan pertumbuhan, baik dari segi tinggi tanaman, jumlah daun, maupun kualitas hasil panen.

Namun, peningkatan dosis pupuk dan pestisida tanpa didukung sistem pemantauan kondisi tanah dan tanaman yang memadai justru memperburuk degradasi tanah. Penggunaan pupuk anorganik secara berlebihan dapat menurunkan kemampuan tanah dalam menyimpan air, mengganggu keseimbangan biologis tanah, serta meningkatkan risiko pencemaran lingkungan [4]. Ketidakterpaduan antara kondisi tanah, kebutuhan air tanaman, serta pemberian pupuk dan pestisida menjadi akar permasalahan utama rendahnya efisiensi dan keberlanjutan budidaya sawi hijau [12].

Permasalahan ini berdampak pada berbagai pemangku kepentingan (stakeholder) diantaranya sebagai berikut:

1. Petani sebagai pihak yang paling terdampak langsung akan mengalami kerugian ekonomi akibat meningkatnya biaya perawatan tanaman, penggunaan input pertanian yang tidak efisien, serta hasil panen yang tidak optimal.
2. Konsumen juga berdampak secara tidak langsung karena kualitas hasil panen menjadi tidak seragam, baik dari segi ukuran, tampilan, maupun kandungan gizi, serta berpotensi mengandung residu bahan kimia.

3. Lingkungan sekitar juga berdampak secara tidak langsung karena bisa mengakibatkan terjadinya pencemaran pada tanah, juga mengakibatkan terjadinya penurunan kualitas lingkungan akibat penggunaan input pestisida yang berlebihan.

Dampak apabila masalah dapat dipecahkan dari masing-masing *stakeholder* yang ada di atas adalah sebagai berikut:

1. Bagi petani akan memperoleh peningkatan efisiensi penggunaan input pertanian seperti air dan pestisida. Hal ini berdampak pada penurunan biaya operasional dan perawatan tanaman. Selain itu, pertumbuhan tanaman menjadi lebih seragam dan optimal sehingga meningkatkan kualitas serta kuantitas hasil panen, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap pendapatan dan keberlanjutan usaha tani.
2. Bagi konsumen menghasilkan produk sawi hijau dengan kualitas yang lebih seragam, baik dari segi ukuran, tampilan, maupun kandungan gizi. Penggunaan pestisida yang lebih terkontrol juga dapat menurunkan risiko residu bahan kimia pada hasil panen, sehingga meningkatkan keamanan pangan serta kepercayaan konsumen terhadap produk pertanian yang dihasilkan.
3. Bagi lingkungan dapat terkontrolnya distribusi air dan pestisida, potensi pencemaran tanah dan air dapat diminimalkan. Penggunaan input kimia yang lebih efisien berkontribusi pada pelestarian kualitas lingkungan sekitar lahan pertanian serta mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Sawi hijau (*Brassica juncea* L.) atau dikenal dengan Caisim merupakan jenis tanaman hortikultura yang termasuk dalam famili *Cruciferae* sebagai sayuran berdaun dan memiliki sistem akar yang dangkal dengan banyak percabangan. Ciri khas dari sistem akar ini membuat sawi hijau sangat sensitif terhadap perubahan kondisi tanah, terutama berkaitan dengan ketersediaan unsur hara di lapisan permukaan tanah [13]. Tanaman

ini tumbuh optimal di tanah yang lembut, kaya bahan organik, dan dengan tingkat keasaman (pH) dengan kisaran optimal antara 6–7. pH tanah sangat berpengaruh dalam menentukan seberapa banyak nutrisi yang tersedia untuk tanaman karena mempengaruhi kelarutan dan ketersediaan nutrisi di dalam tanah. Tanah yang terlalu asam atau terlalu basa dapat membuat nutrisi tertentu jadi tidak tersedia atau sulit diserap oleh akar tanaman [6].

Secara umum, sawi hijau membutuhkan unsur hara makro dalam jumlah relatif tinggi, terutama nitrogen (N) dalam jumlah relatif tinggi untuk mendukung pembentukan klorofil, pertumbuhan vegetatif, serta perkembangan jaringan daun. Selain nitrogen, unsur fosfor (P) serta kalium (K) juga berperan penting dalam mendukung pertumbuhan akar, proses metabolisme energi, dan ketahanan tanaman. Ketidakseimbangan atau kekurangan salah satu unsur hara makro tersebut dapat mengakibatkan pertumbuhan tanaman terhambat, daun menguning, serta penurunan bobot segar dan kualitas hasil panen [14]. Oleh karena itu, pemupukan pada sawi hijau yang umumnya dilakukan dengan kombinasi pupuk organik dan pupuk anorganik untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman secara optimal, dan masih dilakukan secara manual oleh petani [5].

Selain pH tanah, kelembaban tanah merupakan faktor penting yang mempengaruhi seberapa baik tanaman bisa menyerap nutrisi. Kelembaban yang cukup membantu unsur hara larut dan bergerak menuju akar tanaman, sementara kondisi tanah yang terlalu kering atau terlalu basah bisa menghambat penyerapan nutrisi serta mengurangi aktivitas mikroorganisme tanah. Pada kondisi optimal, kelembaban tanah yang sesuai bagi pertumbuhan sawi hijau berada pada kisaran 50–70%, sedangkan suhu ideal berkisar antara 15–30°C. Kondisi di luar rentang tersebut dapat mempengaruhi ketersediaan dan mobilitas unsur hara di dalam tanah [15].



Gambar 1.1 Kondisi Tanah pada Tanaman Sawi Hijau [49]

Dari Gambar 1.1 menunjukkan kondisi lahan budidaya sawi hijau di area pertanian terbuka yang memperlihatkan permukaan tanah, pertumbuhan tanaman, serta sistem pengairan, yang berkaitan dengan pengelolaan kelembaban tanah.

Selain ketersediaan unsur hara, air merupakan faktor penting yang sangat menentukan keberhasilan budidaya sawi hijau. Tanaman ini memerlukan penyiraman secara rutin dengan kondisi tanah yang lembab namun tidak tergenang. Berdasarkan kajian agronomi dan penelitian terkait kebutuhan air tanaman sawi hijau, diketahui bahwa kebutuhan air tanaman bervariasi sesuai dengan fase pertumbuhan. Pada fase awal pertumbuhan, kebutuhan air tanaman sawi hijau berada pada kisaran 1,86–3,16 mm per hari. Kebutuhan air tersebut meningkat pada fase pertumbuhan vegetatif aktif hingga mencapai sekitar 7,45 mm per hari, kemudian cenderung menurun pada fase akhir pertumbuhan [3]. Jika dikonversikan ke dalam satuan volume, kebutuhan air tersebut setara dengan sekitar 0,275–336,86 mL per tanaman per hari, bergantung pada kepadatan tanaman, jarak tanam, serta luas lahan yang digunakan [4]. Pada praktik di lapangan, penyiraman sawi hijau umumnya dilakukan sebanyak 1–2 kali per hari secara manual menggunakan gembor atau selang. Metode ini sangat bergantung pada keterampilan dan konsistensi operator, sehingga berpotensi menimbulkan ketidakmerataan distribusi air antar tanaman. Sebagian tanaman menerima air dalam jumlah berlebih, sementara tanaman lainnya mengalami kekurangan air, meskipun berada dalam satu petak lahan yang sama [11][16].

Selain penyiraman, proses penyemprotan pestisida pada budidaya sawi hijau juga masih banyak dilakukan secara manual menggunakan sprayer tangan atau sprayer punggung. Metode ini sering menghasilkan distribusi pestisida yang tidak merata pada bagian tanaman. Tanaman yang menerima semprotan berlebih berisiko mengalami akumulasi residu pestisida, sedangkan tanaman yang menerima semprotan kurang tetap rentan terhadap serangan hama dan penyakit. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efektivitas pengendalian organisme pengganggu tanaman, tetapi juga meningkatkan biaya produksi serta risiko pencemaran lingkungan dan residu kimia pada hasil panen [17][18].

Selain faktor air dan unsur hara, keberhasilan budidaya sawi hijau juga sangat dipengaruhi oleh kondisi kesehatan daun tanaman. Pendeteksian dini terhadap perubahan dan kerusakan pada daun sawi hijau menjadi aspek penting, terutama yang disebabkan oleh serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) seperti hama daun. Kerusakan daun akibat serangan ulat *Plutella xylostella*, *Crocidolomia binotalis*, lalat pengorok daun (*Liriomyza* sp.), serta kutu daun (Aphididae) umumnya ditandai dengan adanya lubang, bercak, perubahan warna, dan penurunan kualitas permukaan daun. Kondisi tersebut berdampak langsung pada berkurangnya luas area fotosintesis dan penurunan kualitas serta kuantitas hasil panen. Tingkat kerusakan daun pada tanaman sawi hijau umumnya mulai terdeteksi pada fase vegetatif awal hingga pertengahan, sehingga pendeteksian daun yang dilakukan secara tepat waktu menjadi langkah penting untuk mencegah kehilangan hasil yang signifikan [19][20].

Efektivitas penyemprotan pestisida pada tanaman sawi hijau dipengaruhi oleh beberapa parameter penting, antara lain jenis dan intensitas serangan hama, umur tanaman, konsentrasi larutan pestisida, volume semprot, ukuran dan distribusi tetesan, serta kondisi lingkungan saat penyemprotan seperti suhu, kelembaban udara, dan kecepatan angin. Kelembaban udara yang relatif tinggi misalnya $\geq 60\%$ –70% RH cenderung mengurangi penguapan tetesan semprotan dan meningkatkan daya lekat pestisida pada

permukaan daun, sedangkan kelembaban di bawah sekitar 40 %–45% dapat mempercepat penguapan dan meningkatkan risiko drift sehingga menurunkan efektivitas aplikasi. Suhu udara ideal saat penyemprotan biasanya di bawah sekitar 25–28°C, karena suhu yang terlalu tinggi mempercepat penguapan pestisida sebelum mencapai target hama [21].

Penyemprotan pestisida umumnya dianjurkan dilakukan pada sore hari atau pagi hari saat suhu relatif lebih rendah dan kelembaban lebih tinggi, sehingga dapat mengurangi penguapan larutan dan meningkatkan daya lekat pestisida pada permukaan daun. Meskipun kelembaban udara yang relatif tinggi dianjurkan dalam penyemprotan pestisida karena dapat mengurangi penguapan larutan, penyemprotan sebaiknya tidak dilakukan pada kondisi daun yang basah akibat embun atau hujan. Permukaan daun yang basah dapat menyebabkan larutan pestisida mudah mengalir dan menurunkan daya lekat, sehingga efektivitas pengendalian hama menjadi berkurang [22]. Selain itu, interval penyemprotan yang terlalu sering tanpa mempertimbangkan ambang kendali hama dapat mempercepat terjadinya resistensi hama serta meningkatkan akumulasi residu kimia pada tanaman [23].

Penjadwalan penyemprotan pestisida pada budidaya sawi hijau umumnya dilakukan mulai umur tanaman 7–10 hari setelah tanam, terutama pada fase awal pertumbuhan ketika tanaman masih rentan terhadap serangan hama daun. Penyemprotan selanjutnya dilakukan secara berkala dengan interval sekitar 5–7 hari, tergantung pada tingkat serangan hama dan kondisi lingkungan. Beberapa penelitian di Indonesia juga merekomendasikan penggunaan pestisida nabati, seperti ekstrak daun mimba, serai wangi, atau bawang putih, sebagai alternatif pestisida kimia untuk menekan populasi hama sekaligus mengurangi risiko residu pada hasil panen [24][25].

Ada beberapa solusi untuk menyelesaikan permasalahan ini dapat dilihat pada Tabel 1.1 berikut:

Tabel 1.1 Solusi yang Telah Ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Sistem Kontrol dan Monitoring Kandungan Nutrisi pada Budidaya Sayuran AB-Mix berbasis mikrokontroler dan sensor	1. Rentang nutrisi: sawi 850–1680 ppm 2. Volume air otomatis diatur pada 5 L dan 10 L 3. Sensor memiliki akurasi tinggi ($\pm 97,29\%$) - error rata-rata hanya $\pm 2,71\%$ 4. Proses pemantauan dan kontrol dilakukan melalui <i>smartphone</i> (IoT) 5. Waktu respon cepat $\pm 0,46$–$0,51$ detik	1. Memerlukan perangkat elektronik 2. Membutuhkan instalasi dan perawatan sistem termasuk kalibrasi sensor 3. Ketergantungan pada koneksi internet hingga respon sistem dipengaruhi kualitas jaringan 4. Tidak semua petani familiar dengan teknologi IoT sehingga memerlukan pelatihan penggunaan	[26]
Penyiraman Manual (ember/ gembor/ selang)	1. Biaya sangat murah 2. Mudah diterapkan tanpa teknologi khusus	1. Distribusi air tidak merata (perbedaan kelembaban tanah dapat mencapai	[16]

	3. Cocok untuk lahan kecil	25–40%) 2. Penggunaan air lebih boros (20–30% lebih banyak dibanding irigasi tetes) 3. Sangat bergantung pada tenaga kerja (1 orang hanya mampu $\pm 200\text{--}300\text{ m}^2/\text{jam}$) 4. Menyebabkan pertumbuhan tanaman tidak seragam 5. Berpotensi menurunkan produktivitas dan keuntungan	
<i>Drone Sprayer</i> (untuk pestisida atau pupuk cair)	1. Penyemprotan cepat dan merata pada lahan luas 2. Dapat menjangkau area sulit 3. Mengurangi kontak pekerja dengan bahan kimia berbahaya	1. Membutuhkan perangkat elektronik dan instalasi 2. Perlu perawatan dan kalibrasi sensor berkala 3. Membutuhkan pengetahuan teknis dasar	[27]

		4. Memantau kondisi lingkungan, sehingga tetap perlu dikombinasikan dengan sistem irigasi yang tepat	
--	--	--	--

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Dalam merancang solusi yang sesuai, maka analisis permasalahan memiliki beberapa aspek yang harus diperhatikan untuk memastikan alat berfungsi di berbagai sisi. Beberapa aspek utama yang diangkat dalam perancangan ini sebagai berikut:

1. Aspek Ekonomi

Dari segi aspek ekonomi, budidaya sawi hijau masih bergantung pada cara proses penyiraman dan penyemprotan pestisida manual yang mengakibatkan penggunaan air dan pestisida menjadi tidak optimal. Ketidakseimbangan tersebut menyebabkan sebagian tanaman sawi menerima cairan secara berlebihan, sementara tanaman sawi lainnya mengalami kekurangan unsur hara atau nutrisi. Situasi ini membawa konsekuensi pada peningkatan biaya produksi tanpa adanya peningkatan hasil panen yang sebanding, serta menurunnya konsistensi kualitas panen yang berpotensi mengurangi harga jual bagi petani maupun di pasar. Di sisi lain, keterbatasan dana yang dimiliki petani kecil menjadi konstrain utama, dimana membutuhkan biaya besar yang sulit untuk diakses dan di implementasi secara luas.

2. Aspek Lingkungan

Dari segi aspek lingkungan, teknik penyiraman dan penyemprotan pestisida secara manual yang tidak terkontrol berpotensi menimbulkan pemborosan air dan pencucian unsur hara ke lapisan tanah yang lebih dalam, yang pada akhirnya dapat mencemari air tanah. Selain itu, penyemprotan pestisida yang tidak merata

meningkatkan akumulasi residu kimia pada tanah dan tanaman, sehingga berpotensi mencemari lingkungan serta mengganggu organisme yang tidak terlibat. Kondisi ini diperparah dengan adanya praktik monokultur yang berlangsung lama, mengakibatkan kerusakan tanah dan menurunnya kandungan tingkat bahan organik. Konstrains lingkungan yang dihadapi juga mencakup perubahan cuaca, suhu, dan kelembaban yang sulit dikendalikan, serta kondisi tanah yang sudah menurun kesuburannya. Hal ini memerlukan sistem yang mampu beroperasi secara stabil pada kondisi lapangan yang dinamis dan tidak ideal.

3. Aspek Sustainability

Dari segi aspek sustainability, sistem budidaya sawi hijau yang masih mengandalkan penyiraman dan penyemprotan pestisida manual cenderung tidak dapat bertahan dalam waktu yang lama. Ketidakefisienan dalam penggunaan air dan pestisida dapat mempercepat kerusakan sumber daya alam dan meningkatkan ketergantungan pada bahan kimia. Penurunan kesuburan tanah dan produktivitas panen dari musim ke musim menunjukkan bahwa sistem budidaya saat ini belum dapat mendukung keberlanjutan produksi yang berkelanjutan.

Adapun beberapa konstrain yang dapat muncul berdasarkan permasalahan dan kebutuhan sistem yang telah diuraikan sebelumnya. Konstrain ini mencakup berbagai tantangan yang berpotensi mempengaruhi keberhasilan perancangan dan implementasi solusi meliputi:

1. Keterbatasan Infrastruktur Operasional dan Daya Listrik

Sebagian besar lahan budidaya sawi hijau masih memiliki keterbatasan infrastruktur pendukung, khususnya ketersediaan sumber daya listrik yang stabil. Kondisi ini menjadi konstrain utama karena sistem tidak dapat bergantung pada suplai daya besar maupun perangkat berdaya tinggi. Oleh karena itu, sistem yang dikembangkan harus memiliki konsumsi daya rendah (*low power*) serta mampu beroperasi secara efisien pada kondisi infrastruktur minimal, sehingga tetap ekonomis dan ramah lingkungan dalam penggunaan jangka panjang.

2. Keterbatasan Sumber Daya Produksi Petani

Petani skala kecil hingga menengah umumnya memiliki keterbatasan modal, sarana produksi, serta akses terhadap teknologi modern. Konstrain ini membatasi penerapan sistem dengan biaya investasi awal yang tinggi atau kebutuhan perawatan yang kompleks. Dengan demikian, sistem harus dirancang menggunakan komponen berbiaya rendah, mudah diperoleh, serta tidak menambah beban operasional petani, agar dapat digunakan secara berkelanjutan dan diadopsi secara luas.

3. Kondisi Awal Tanah yang Tidak Ideal

Kondisi awal tanah pada lahan budidaya sawi hijau tidak selalu berada pada tingkat kesuburan yang optimal akibat penggunaan lahan secara intensif, praktik monokultur, serta penurunan kandungan bahan organik. Kondisi ini menjadi konstrain karena mempengaruhi akurasi pengukuran sensor dan efektivitas pemberian air maupun pestisida. Oleh karena itu, sistem harus mampu bekerja pada kondisi tanah yang bervariasi dan tidak ideal, serta mendukung upaya perbaikan kesuburan tanah secara bertahap.

4. Variabilitas Dinamis Parameter Lingkungan dan Tanah

Parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban udara, intensitas cahaya, serta kelembaban dan pH tanah bersifat dinamis dan sulit dikendalikan. Perubahan cuaca yang cepat dapat mempengaruhi kinerja sistem dan hasil pengukuran sensor. Konstrain ini menuntut sistem yang adaptif dan stabil dalam menghadapi fluktuasi kondisi lingkungan, sehingga tetap mampu melakukan monitoring dan pengendalian secara akurat di lahan terbuka.

5. Keterbatasan Waktu Implementasi dan Evaluasi Sistem

Selain itu, keterbatasan waktu yang hanya mencakup satu hingga dua siklus tanam menjadikan Waktu Pengerjaan 6 Bulan sebagai konstrain yang perlu diperhatikan. Sistem yang dikembangkan harus realistis untuk dirancang, diuji, dan dievaluasi

dalam jangka waktu tersebut, sehingga perhatian utama dalam pengembangan diarahkan pada fungsi utama yang benar-benar dibutuhkan.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan terhadap permasalahan tersebut, diharapkan kebutuhan sistem yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut:

1. Sistem mampu mengukur parameter lingkungan berupa pH tanah, NPK, kelembaban tanah serta suhu tanah lingkungan pada tanaman sawi.
2. Sistem mampu melakukan penyiraman secara merata pada tanaman sawi.
3. Sistem mampu melakukan penyemprotan pestisida secara merata pada tanaman sawi.
4. Sistem mampu memberikan notifikasi dan menampilkan hasil monitoring ke perangkat pengguna secara *real time*.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah dipaparkan sebelumnya, maka tujuan dari solusi ini adalah membangun sebuah sistem monitoring unsur hara dan penyiraman serta penyemprotan pestisida secara otomatis berbasis mikrokontroler. Sistem yang dirancang mampu memantau kondisi lingkungan dan tanah tanaman sawi hijau secara merata, meliputi parameter kelembaban tanah, suhu, pH tanah, serta kandungan unsur hara makro (NPK). Data hasil pengukuran tersebut diproses sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis untuk mengatur kebutuhan air dalam penyiraman serta penyemprotan pestisida secara tepat dan merata sesuai kondisi aktual tanaman sawi. Selain itu, seluruh data hasil monitoring dan status operasional sistem disimpan dalam basis data terpusat yang akan ditampilkan melalui antarmuka aplikasi mobile yang informatif dan intuitif dengan fitur notifikasi otomatis secara *near real-time*, sehingga pengguna dapat melakukan monitoring dan pengelolaan dalam produktivitas budidaya sawi hijau secara lebih efisien, akurat, dan berkelanjutan.

1.2 Solusi

Berdasarkan permasalahan yang telah dibahas, maka dapat diajukan beberapa usulan solusi yang ditawarkan, dimana sistem mampu monitoring kondisi lingkungan tanah

secara *real time* serta proses penyiraman dan penyemprotan pestisida secara merata pada budidaya sawi hijau. Solusi yang dikembangkan akan diarahkan penerapan sistem berbasis mikrokontroler yang mengintegrasikan sensor, unit komputasi, aktuator, serta antarmuka digital dalam satu kesatuan sistem yang saling terhubung. Sistem mampu membaca parameter utama tanah sebagai dasar pengambilan keputusan, mengatur kebutuhan air tanaman sesuai kondisi aktual, serta mengendalikan penyemprotan pestisida agar distribusinya merata.

Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan aplikasi monitoring yang menampilkan data dan status sistem yang diperbarui melalui platform IoT serta menyediakan notifikasi otomatis kepada pengguna ketika terjadi kondisi tanah yang tidak ideal atau saat proses penyiraman dan penyemprotan berlangsung. Dengan pendekatan ini, solusi yang diusulkan tidak hanya berfungsi sebagai sistem pemantauan, tetapi juga sebagai sistem kendali cerdas yang mendukung pengelolaan budidaya sawi hijau akurat dan berkelanjutan.

Sebelum menentukan solusi yang paling sesuai untuk permasalahan tersebut, maka perlu diketahui karakteristik sistem dibutuhkan agar solusi yang dikembangkan mampu memenuhi kebutuhan fungsional dan operasional secara optimal.

1.2.1 Karakteristik Produk

Adapun karakteristik dari sistem yang akan dibangun yaitu terdiri dari fitur dasar sebagai berikut:

1.2.1.1 Fitur Dasar

a. *Sensing Capability*

Sistem harus mampu mengukur parameter utama kondisi tanah untuk memperkirakan ketersediaan unsur hara dan menentukan kebutuhan penyiraman maupun penyemprotan pestisida.

b. *Computing Performance*

Sistem harus memiliki kemampuan komputasi yang memadai untuk memproses dan menganalisis data secara periodik dan responsif berdasarkan kondisi aktual lingkungan, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi

penyiraman, penyemprotan pestisida, dan perbaikan kondisi tanah yang akurat.

c. *Computing Method*

Sistem menggunakan metode pengolahan data berbasis algoritma yang sesuai sehingga menghasilkan keputusan dalam memberikan rekomendasi penyiraman, penyemprotan pestisida, dan perbaikan tanah untuk fase pertumbuhan pada sawi hijau.

d. *Actuation Capability*

Sistem memiliki kemampuan untuk mengendalikan aktuator secara otomatis dalam melakukan penyiraman dan penyemprotan pestisida secara merata ke seluruh tanaman sawi.

e. *Notifikasi Capability*

Sistem mampu memberikan notifikasi otomatis dan antarmuka interaktif yang memungkinkan pengguna menerima peringatan dan informasi kondisi tanah tanpa pemantauan manual.

1.2.1.2 Fitur Tambahan

a. *Low Cost*

Sebagai investasi awal yang dapat dijangkau, menggunakan komponen yang mudah diperoleh di pasar, serta biaya operasional dan pemeliharaan yang terjangkau

b. *User Friendly*

Fitur yang mudah dipahami dan dioperasikan oleh petani dengan berbagai tingkat pengetahuan teknologi, sehingga dapat digunakan secara konsisten dalam jangka panjang

c. *Casing (Ketahanan Sistem)*

Kemampuan yang kokoh dan menarik dengan keandalan sistem alat untuk bekerja secara optimal pada kondisi sistem normal di lahan terbuka, khususnya saat cuaca cerah, serta tetap aman dan stabil ketika terjadi perubahan berbagai kondisi lingkungan.

d. Deteksi Citra Hama

Sistem berupa deteksi hama berbasis citra menggunakan kamera yang berfungsi sebagai indikator pendukung dalam penjadwalan penyemprotan pestisida. Citra yang diperoleh digunakan untuk memberikan informasi awal mengenai potensi keberadaan hama pada tanaman sawi hijau. Mengingat keterbatasan kualitas dan konsistensi citra akibat resolusi kamera dan kondisi pencahayaan lahan terbuka, hasil deteksi citra tidak dijadikan sebagai dasar tunggal pengambilan keputusan penyemprotan, melainkan dikombinasikan dengan aturan penjadwalan dan kondisi lingkungan lainnya.

e. **Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi**

Dalam pengembangan sistem ini harus menerapkan prinsip-prinsip standar dan regulasi yang berlaku di bidang pertanian, lingkungan, dan keselamatan kerja sebagai acuan konseptual dalam perancangan sistem. Sistem ini merujuk pada *Good Agricultural Practices (GAP)* yang dikeluarkan oleh Kementerian Pertanian Republik Indonesia, khususnya dalam pengelolaan penggunaan air dan pestisida secara efisien, terukur, dan tidak berlebihan. Selain itu, perancangan sistem ini selaras dengan konsep pengelolaan lingkungan sebagaimana tercantum dalam standar ISO 14001:2015 terkait upaya pengurangan dampak lingkungan akibat penggunaan bahan kimia pertanian, serta mendukung prinsip keselamatan dan kesehatan kerja sesuai ISO 45001:2018 melalui otomatisasi penyemprotan yang berpotensi mengurangi paparan langsung petani terhadap pestisida. Dari sisi regulasi nasional, sistem ini juga sejalan dengan Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2019 tentang Sistem Budi Daya Pertanian Berkelanjutan, Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan, Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, serta Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Sistem Monitoring dan Penyiraman serta Penyemprotan Pestisida Berbasis IoT

Salah satu solusi yang diusulkan adalah sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk melakukan pemantauan kondisi lingkungan tanah sekaligus proses penyiraman dan penyemprotan pestisida secara otomatis pada budidaya sawi hijau. Sistem ini dikembangkan sebagai respon terhadap budidaya konvensional, yaitu proses penyiraman dan penyemprotan pestisida yang masih manual tanpa pengukuran parameter lingkungan yang akurat seperti pH tanah, kelembaban, suhu, dan NPK, sehingga sering menyebabkan distribusi air dan pestisida tidak merata, serta berpotensi menurunkan kualitas dan produktivitas tanaman.

Sensor kelembaban tanah bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi atau kapasitansi akibat kandungan air di dalam tanah. Semakin tinggi kadar air, maka nilai resistansi tanah akan menurun atau nilai kapasitansi meningkat, sehingga menghasilkan perubahan tegangan keluaran yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Sensor suhu tanah umumnya menggunakan elemen termistor atau sensor digital yang mampu mengkonversi perubahan suhu menjadi sinyal listrik. Sementara itu, sensor pH tanah bekerja dengan prinsip elektrokimia, yaitu mengukur perbedaan potensial listrik antara elektroda referensi dan elektroda pengukur yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion hidrogen (H^+) di dalam tanah.

Mikrokontroler berfungsi sebagai pusat kendali sistem yang menerima data dari seluruh sensor, memproses data tersebut menggunakan algoritma yang telah diprogram, serta mengendalikan aktuator sesuai hasil keputusan. Mikrokontroler yang digunakan memiliki kemampuan komunikasi nirkabel sehingga dapat terhubung dengan *platform* IoT untuk pengiriman data secara *real time*. Selain itu, mikrokontroler juga berperan dalam manajemen waktu, pengolahan logika kendali, serta penyimpanan data sementara. Aktuator pada sistem ini terdiri dari pompa air dan pompa penyemprot pestisida yang dikendalikan menggunakan relay atau driver elektronik. Relay berfungsi

sebagai sakelar listrik yang memungkinkan mikrokontroler dengan tegangan rendah mengendalikan perangkat berdaya lebih besar. Pompa air digunakan untuk mendistribusikan air ke area perakaran tanaman, sedangkan pompa pestisida berfungsi untuk menyemprotkan larutan pestisida secara merata ke bagian tanaman yang dituju.

Sistem yang diusulkan menerapkan beberapa metode komputasi sesuai dengan fungsi yang dijalankan. Monitoring sifat tanah menggunakan metode *Rule Based Logic* untuk menentukan status kondisi tanah berdasarkan parameter lingkungan, sedangkan proses penyiraman otomatis menggunakan metode *Fuzzy Logic* untuk menentukan durasi penyiraman. Adapun penyemprotan pestisida dilakukan berdasarkan penjadwalan menggunakan *Real Time Clock* (RTC), validasi kondisi lingkungan, serta hasil klasifikasi citra daun menggunakan *Support Vector Machine* (SVM).

Monitoring sifat tanah menggunakan metode *Rule Based Logic* untuk mengevaluasi kondisi tanah berdasarkan hasil pembacaan sensor pH, kelembaban tanah, suhu tanah, serta kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Setiap nilai parameter dibandingkan dengan rentang ideal pertumbuhan tanaman sawi hijau yang telah ditetapkan berdasarkan literatur. Hasil perbandingan tersebut digunakan untuk menentukan apakah masing-masing parameter berada pada kondisi Ideal atau Tidak Ideal.

Aturan yang digunakan dalam proses monitoring disusun dalam bentuk aturan IF–THEN berdasarkan rentang ideal setiap parameter. Aturan tersebut menjadi dasar sistem dalam mengevaluasi hasil pembacaan sensor untuk menentukan kondisi tanah secara keseluruhan. Aturan *Rule Based Logic* yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Aturan *Rule Based Logic* Monitoring Sifat Tanah

Parameter	Aturan <i>Rule Based Logic</i>
pH tanah	IF $6 \leq \text{pH} \leq 7$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal

Kelembaban tanah	IF $50 \leq \text{Kelembaban} \leq 70$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal
Suhu tanah	IF $15 \leq \text{Suhu} \leq 30$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal
Nitrogen	IF $50 \leq N \leq 125$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal
Fosfor	IF $15 \leq P \leq 30$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal
Kalium	IF $80 \leq K \leq 200$ THEN Ideal ELSE Tidak Ideal

Hasil evaluasi berdasarkan aturan tersebut digunakan untuk menentukan status kondisi tanah yang selanjutnya ditampilkan pada aplikasi monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Informasi kondisi tanah ini juga menjadi salah satu informasi yang digunakan pengguna dalam memantau kondisi lahan, sedangkan proses penyiraman otomatis dilakukan menggunakan metode *Fuzzy Logic* yang dijelaskan pada bagian berikut.

Metode komputasi yang diterapkan pada sistem ini adalah kendali berbasis logika *fuzzy* (*Fuzzy Logic Control*). Metode ini dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan variasi nilai parameter lingkungan yang bersifat dinamis dan tidak selalu memiliki batas tegas. Berbeda dengan kendali berbasis ambang (*threshold-based control*) yang menggunakan keputusan biner (ON/OFF), *fuzzy logic* memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih menyerupai cara berpikir manusia, yaitu berdasarkan tingkat kondisi tertentu, seperti *kering*, *lembab*, atau *basah*.

Secara umum, sistem *fuzzy logic* pada sistem ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu pra-pemrosesan data, fuzzifikasi, inferensi *fuzzy*, agregasi, dan defuzzifikasi. Sebelum masuk ke proses *fuzzy*, data hasil pembacaan sensor terlebih dahulu dilakukan pengolahan awal untuk mengurangi perubahan nilai yang terlalu fluktuatif akibat gangguan pembacaan sensor. Proses ini dapat dilakukan melalui perataan data (*averaging*) dan penyesuaian nilai input agar sesuai dengan rentang yang digunakan pada sistem *fuzzy*, yaitu sebagai berikut.

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai input tegas (crisp) hasil pembacaan sensor menjadi nilai keanggotaan *fuzzy* dalam beberapa himpunan linguistik. Setiap variabel input, seperti kelembaban tanah, suhu, dan pH tanah, direpresentasikan dalam bentuk variabel linguistik, misalnya rendah, sedang, atau tinggi, yang memungkinkan satu nilai masukan memiliki lebih dari satu derajat keanggotaan secara bersamaan, sehingga sistem menangkap kondisi lingkungan secara fleksibel dibandingkan pendekatan berbasis ambang batas. Sebagai contoh, variabel kelembaban tanah dibagi ke dalam tiga himpunan *fuzzy*, seperti kering, lembab dan basah. Masing-masing dari himpunan tersebut direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga atau trapesium. Fungsi keanggotaan segitiga dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \end{cases} \dots \text{Persamaan 1.1}$$

dengan:

x = nilai input sensor,

a, b, c = parameter batas fungsi keanggotaan.

2. Inferensi *Fuzzy*

Sistem melakukan inferensi *fuzzy* berdasarkan kumpulan aturan (*rule base*) yang disusun dalam pernyataan IF-THEN. Aturan ini menggambarkan hubungan sebab-akibat antara kondisi lingkungan tanah dan tindakan kontrol yang harus dilakukan oleh sistem. Pada metode fuzzy, bagian *antecedent* (IF) dan *consequent* (THEN) sama-sama dinyatakan dalam bentuk himpunan *fuzzy*. Proses evaluasi aturan dilakukan menggunakan operator logika *fuzzy*, di mana operator AND umumnya direalisasikan dengan fungsi minimum (min), sedangkan operator OR direalisasikan dengan fungsi maksimum (max). Hasil dari inferensi ini berupa sekumpulan keluaran *fuzzy* yang menunjukkan tingkat kebutuhan penyiraman. Contoh aturan fuzzy untuk menentukan kebutuhan penyiraman adalah sebagai berikut:

IF kelembaban tanah Kering AND suhu tanah Tinggi THEN penyiraman Banyak

IF kelembaban tanah Lembab AND suhu tanah Sedang THEN penyiraman Sedang

IF kelembaban tanah Basah THEN penyiraman Tidak Ada

Operasi logika AND pada sistem *fuzzy* umumnya menggunakan operator minimum (min), yang dirumuskan sebagai:

$$\mu_{AND} = \min(\mu_1, \mu_2) \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.2}$$

Sedangkan operasi OR menggunakan operator maksimum (max), yaitu:

$$\mu_{OR} = \max(\mu_1, \mu_2) \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.3}$$

Hasil dari tahap inferensi adalah sekumpulan nilai keanggotaan *output fuzzy* yang merepresentasikan tingkat kebutuhan penyiraman.

1. Agregasi

Agregasi merupakan penggabungan seluruh keluaran *fuzzy* dari aturan-aturan yang aktif untuk membentuk satu himpunan *fuzzy* keluaran. Proses ini bertujuan untuk memperoleh representasi keputusan sistem secara menyeluruh dengan mempertimbangkan kontribusi dari setiap aturan yang relevan. Himpunan *fuzzy* keluaran tersebut diubah menjadi nilai tegas melalui proses defuzzifikasi.

2. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai *fuzzy* output menjadi nilai tegas (crisp) yang digunakan untuk mengendalikan aktuator, seperti durasi penyiraman. Metode defuzzifikasi yang umum digunakan adalah metode pusat massa (*centroid method*), karena mampu menghasilkan nilai keluaran yang stabil dan proporsional terhadap seluruh derajat keanggotaan yang terbentuk. Nilai hasil defuzzifikasi inilah yang digunakan sebagai dasar pengendalian aktuator, seperti penentuan durasi penyiraman. Dirumuskan sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{(\mu(z) \cdot z)}{\mu(z)} \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.4}$$

dengan:

- z^* = nilai output tegas,
- $\mu(z)$ = derajat keanggotaan *output*,
- z = nilai domain output.

Nilai hasil defuzzifikasi ini digunakan untuk menentukan lama waktu pompa air bekerja, sehingga sistem tidak hanya memberikan keputusan ON atau OFF, tetapi juga mengatur tingkat dan durasi kerja aktuator secara proporsional.

Berdasarkan hasil defuzzifikasi, sistem menentukan durasi penyiraman dengan mempertimbangkan debit pompa. Hubungan antara volume air, debit, dan waktu penyiraman dapat dirumuskan sebagai:

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.5}$$

dengan:

Q = debit air (L/menit),

V = volume air yang dibutuhkan (L),

t = waktu penyiraman (menit).

Untuk penyemprotan pestisida, sistem tidak menggunakan metode *fuzzy logic*, melainkan menggunakan kombinasi penjadwalan waktu menggunakan *Real Time Clock* (RTC), validasi kondisi lingkungan melalui sensor, serta hasil pendeteksian hama pada daun tanaman sawi hijau berbasis pengolahan citra (*image processing*).

Pengambilan citra daun tanaman dilakukan menggunakan kamera pada waktu tertentu sesuai jadwal yang telah ditentukan oleh RTC. Proses pengambilan citra hanya dilakukan apabila kondisi lingkungan berada pada tingkat aman, seperti tidak terjadi hujan dan nilai kelembaban udara berada dalam batas yang diperbolehkan berdasarkan pembacaan sensor. Citra yang diperoleh selanjutnya diproses menggunakan tahapan *image processing* dan diklasifikasikan menggunakan metode *Support Vector Machine* (SVM) untuk menentukan ada atau tidaknya indikasi serangan hama pada tanaman.

Apabila hasil klasifikasi menunjukkan adanya indikasi hama, maka sistem akan mengaktifkan pompa penyemprot pestisida selama durasi tertentu yang telah ditetapkan. Sebaliknya, apabila tidak terdeteksi hama, maka penyemprotan pestisida tidak dilakukan meskipun jadwal penyemprotan telah tercapai. Pendekatan ini bertujuan untuk menghindari penggunaan pestisida secara berlebihan serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Cara Kerja Sistem (Input–Proses–Output)

1. Tahap Input

Tahap input merupakan tahap awal sistem, di mana seluruh data yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan dikumpulkan dari berbagai sensor dan perangkat input lainnya. Data input pada sistem ini terdiri atas dua jenis, yaitu data lingkungan tanah untuk proses penyiraman dan data citra tanaman untuk proses penyemprotan pestisida. Data lingkungan tanah diperoleh dari sensor kelembaban tanah, sensor suhu tanah, sensor pH tanah, serta sensor unsur hara makro (NPK). Selain data sensor lingkungan, sistem juga menerima input berupa citra daun tanaman sawi hijau yang diperoleh dari kamera. Pengambilan citra dilakukan pada waktu tertentu berdasarkan penjadwalan yang diatur oleh *Real Time Clock* (RTC). Seluruh data sensor yang masih berupa data mentah (raw data) terlebih dahulu dikonversi menjadi data digital melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) yang terdapat pada mikrokontroler, kemudian dinyatakan dalam satuan fisis seperti persen (%), derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$), dan nilai pH sesuai karakteristik masing-masing sensor.

2. Tahap proses

Tahap proses merupakan tahap pengolahan data yang diperoleh dari sensor dan perangkat input lainnya. Data kondisi lingkungan tanah yang telah dibaca oleh sensor kemudian diproses menggunakan algoritma *fuzzy logic* untuk menentukan kebutuhan penyiraman tanaman. Hasil dari proses *fuzzy* digunakan sebagai acuan dalam mengatur lama waktu kerja pompa air. Selain mengolah data sensor, sistem juga melakukan pengolahan citra hama tanaman untuk mendeteksi adanya indikasi serangan hama. Citra yang diperoleh dari kamera diproses melalui beberapa tahapan *image processing*, seperti pra-pemrosesan, segmentasi, dan ekstraksi ciri. Hasil ekstraksi ciri tersebut kemudian diklasifikasikan menggunakan metode *Support Vector Machine* (SVM) untuk mengetahui kondisi daun tanaman. Hasil klasifikasi citra, kondisi lingkungan, dan waktu yang telah ditentukan digunakan sebagai dasar dalam proses penyemprotan pestisida. Apabila sistem mendeteksi

adanya indikasi hama pada tanaman, maka aktuator akan diaktifkan untuk melakukan penyemprotan pestisida.

3. Tahap Output

Tahap output merupakan tahap eksekusi dari keputusan yang dihasilkan pada tahap proses. Pada tahap ini, mikrokontroler mengendalikan satu unit pompa melalui relay atau driver elektronik sebagai aktuator utama sistem. Pompa tersebut digunakan secara bergantian untuk proses penyiraman air dan penyemprotan pestisida, tergantung pada keputusan yang dihasilkan oleh sistem. Pada mode penyiraman, pompa dikendalikan berdasarkan hasil defuzzifikasi dari sistem *fuzzy logic*. Apabila hasil defuzzifikasi menunjukkan bahwa tanaman membutuhkan penyiraman dengan durasi tertentu, maka mikrokontroler akan mengaktifkan relay pompa selama waktu yang telah ditentukan. Pompa akan mendistribusikan air ke area perakaran tanaman secara terukur hingga kebutuhan air tanaman terpenuhi. Setelah durasi penyiraman selesai, pompa akan dimatikan secara otomatis untuk mencegah kelebihan air.

Pada mode penyemprotan pestisida, pompa dikendalikan berdasarkan penjadwalan waktu menggunakan *Real Time Clock* (RTC), validasi kondisi lingkungan melalui sensor, serta hasil klasifikasi image processing menggunakan metode *Support Vector Machine* (SVM). Apabila hasil klasifikasi menunjukkan adanya hama pada daun tanaman sawi hijau, maka mikrokontroler akan mengaktifkan pompa dalam mode penyemprotan pestisida selama durasi yang telah ditetapkan. Sebaliknya, jika tidak terdeteksi hama, maka pompa tidak diaktifkan dan penyemprotan tidak dilakukan. Seluruh aktivitas kerja pompa baik pada mode penyiraman maupun penyemprotan pestisida, dicatat dan dikirimkan ke platform monitoring berbasis aplikasi mobile. Informasi yang ditampilkan meliputi status pompa (ON/OFF), mode operasi pompa, durasi kerja, serta waktu pelaksanaan, sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan dan evaluasi kinerja sistem secara real time dan berkelanjutan.

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuan *fuzzy logic* dalam menghasilkan keputusan yang lebih fleksibel dan adaptif terhadap kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Sistem mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pestisida, mengurangi intervensi manual, serta mendukung pemantauan jarak jauh berbasis IoT. Namun, sistem ini masih memiliki keterbatasan pada kompleksitas perancangan aturan *fuzzy* dan ketergantungan terhadap keakuratan sensor. Kesalahan pembacaan sensor dapat mempengaruhi hasil keputusan, sehingga diperlukan proses kalibrasi dan perawatan secara berkala. Dengan pemeliharaan rutin dan kalibrasi sensor yang tepat, sistem ini dapat mendukung keberlanjutan dalam budidaya sawi hijau.

1.2.2.2 Solusi 2 : Robot Monitoring, penyiraman dan Penyemprotan Pestisida Merata

Solusi kedua yang diajukan merupakan sistem terintegrasi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk melakukan pemantauan kondisi lingkungan tanah sekaligus melaksanakan proses penyiraman dan penyemprotan pestisida secara otomatis dan merata pada budidaya sawi hijau dengan memanfaatkan robot bergerak. Sistem ini dikembangkan sebagai respon terhadap permasalahan utama dalam praktik budidaya konvensional, yaitu proses penyiraman dan penyemprotan pestisida yang masih dilakukan secara manual sehingga distribusi air dan pestisida tidak merata antar tanaman. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian tanaman menerima cairan secara berlebih, sementara sebagian lainnya mengalami kekurangan, yang pada akhirnya dapat menurunkan kualitas dan produktivitas tanaman. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sistem ini didukung oleh kemampuan komputasi mikrokontroler yang mampu mengolah data sensor, menjalankan algoritma kendali, serta mengendalikan pergerakan robot dan aktuator secara *real time*.

Sistem bekerja dengan memanfaatkan beberapa parameter lingkungan tanah sebagai dasar pengambilan keputusan, yaitu kelembaban tanah, suhu tanah, dan pH tanah. Parameter kelembaban tanah berperan penting dalam menentukan ketersediaan air bagi tanaman, suhu tanah mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan penyerapan unsur hara, sedangkan pH tanah berhubungan langsung dengan kemampuan akar tanaman dalam menyerap nutrisi. Sensor-sensor tersebut dipasang pada robot sehingga mampu

melakukan pemantauan kondisi lahan secara langsung di setiap titik area tanam selama robot bergerak. Kemampuan sensing ini memungkinkan sistem memperoleh data lingkungan yang lebih representatif dan akurat dibandingkan sistem penyiraman statis, sehingga keputusan pengendalian dapat dilakukan secara lebih presisi.

Metode komputasi yang diterapkan pada sistem robot ini adalah kendali berbasis logika fuzzy (*Fuzzy Logic Control*), khususnya *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe Mamdani. Metode *fuzzy logic* dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan variasi nilai parameter lingkungan yang bersifat dinamis serta tidak selalu memiliki batas tegas. Berbeda dengan kendali berbasis ambang (*threshold-based control*) yang hanya menghasilkan keputusan biner, logika fuzzy memungkinkan sistem mengambil keputusan berdasarkan tingkat kondisi tertentu, sehingga lebih menyerupai cara berpikir manusia dan lebih sesuai untuk diterapkan pada lingkungan pertanian. Secara umum, sistem *fuzzy logic* terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu sebagai berikut:

1. Fuzzifikasi, nilai input tegas (*crisp*) hasil pembacaan sensor diubah menjadi nilai keanggotaan *fuzzy* dalam beberapa himpunan linguistik, seperti kering, lembab, dan basah untuk variabel kelembaban tanah. Nilai ini dapat memiliki derajat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan *fuzzy* secara bersamaan, sehingga kondisi lingkungan dapat direpresentasikan secara lebih fleksibel.
2. Tahap inferensi *fuzzy* dilakukan berdasarkan aturan fuzzy (*fuzzy rules*) dalam bentuk pernyataan IF-THEN yang merepresentasikan pengetahuan pakar atau pengalaman petani. Proses inferensi menggunakan operator logika *fuzzy*, di mana operator AND direalisasikan dengan fungsi minimum (*min*) dan operator OR menggunakan fungsi maksimum (*max*), sehingga dihasilkan keluaran *fuzzy* yang menunjukkan tingkat kebutuhan penyiraman dan penyemprotan pestisida.
3. Defuzzifikasi, yaitu proses mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai tegas (*crisp*) yang digunakan untuk mengendalikan aktuator. Metode ini menggunakan metode pusat massa (*centroid*), karena mampu menghasilkan nilai keluaran yang stabil dan proporsional. Nilai hasil defuzzifikasi ini menjadi dasar dalam menentukan durasi penyiraman dan intensitas penyemprotan pestisida, yang selanjutnya dieksekusi oleh aktuator berupa pompa air dan pompa penyemprot.

Robot dilengkapi dengan sistem penggerak berbasis roda yang dikendalikan oleh motor listrik, sehingga mampu bergerak menyusuri area tanam secara teratur. Selama robot bergerak, aktuator sistem diaktifkan sesuai dengan hasil keputusan logika *fuzzy*, sehingga distribusi air dan pestisida dapat dilakukan secara merata ke seluruh tanaman. Selain itu, sistem memiliki kemampuan notifikasi dan monitoring melalui platform IoT berbasis aplikasi mobile, yang memungkinkan pengguna memantau kondisi lingkungan, status robot, serta aktivitas penyiraman dan penyemprotan secara *real time*.

Dengan penerapan robot monitoring penyiraman dan penyemprotan pestisida merata berbasis IoT dan logika *fuzzy*, sistem ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pestisida, mengurangi intervensi manual, serta mendukung budidaya sawi hijau yang lebih optimal dan berkelanjutan. Namun demikian, sistem ini memiliki keterbatasan pada kompleksitas mekanik robot dan ketergantungan terhadap keakuratan sensor, sehingga diperlukan proses kalibrasi dan perawatan secara berkala agar sistem dapat bekerja secara optimal.

1.2.2.3 Solusi 3 : Sistem Monitoring Tanah, Penyiraman dan Penyemprotan Pestisida Berbasis Computer Vision pada Tanaman

Solusi ketiga yang diusulkan merupakan sistem terintegrasi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk melakukan monitoring kondisi tanaman sawi hijau baik itu pemantauan sifat tanah dan penyiraman otomatis serta melakukan penyemprotan pestisida secara otomatis berbasis *computer vision* sebagai dasar pengambilan keputusan. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses penyemprotan pestisida melalui penerapan konsep *precision spraying*, yaitu penyemprotan yang dilakukan secara tepat sasaran sesuai kondisi aktual tanaman.

Pengembangan sistem ini dilatarbelakangi oleh permasalahan pada praktik budidaya konvensional, khususnya pada proses penyemprotan pestisida yang masih dilakukan secara manual dan merata tanpa mempertimbangkan kondisi aktual tanaman. Metode penyemprotan tersebut sering menyebabkan penggunaan pestisida yang berlebihan, penyemprotan pada area yang tidak diperlukan, serta distribusi semprotan yang tidak optimal pada bagian tanaman. Akibatnya, selain meningkatkan biaya produksi,

penyemprotan yang tidak tepat juga berpotensi menimbulkan residu kimia berlebih pada tanaman serta berdampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem cerdas yang mampu melakukan penyemprotan pestisida secara presisi, yaitu hanya pada area tanaman yang terdeteksi dan membutuhkan perlakuan.

Selain melakukan penyemprotan pestisida berbasis computer vision, sistem juga melakukan monitoring kondisi tanah menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW). Metode ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi tanah berdasarkan beberapa parameter, yaitu pH tanah, kelembaban tanah, suhu tanah, serta kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Setiap parameter diperlakukan sebagai kriteria penilaian yang memiliki tingkat kepentingan terhadap pertumbuhan tanaman sawi hijau. Sebelum dilakukan proses perhitungan, nilai hasil pembacaan sensor terlebih dahulu dinormalisasi agar seluruh parameter berada pada skala yang sama sehingga dapat dibandingkan secara proporsional.

Setelah proses normalisasi selesai, setiap parameter diberikan bobot sesuai dengan tingkat pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman. Selanjutnya, sistem menghitung nilai preferensi dengan mengalikan nilai hasil normalisasi dengan bobot masing-masing parameter, kemudian menjumlahkan seluruh hasil perkalian tersebut. Nilai preferensi yang diperoleh digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat kelayakan kondisi tanah. Perhitungan nilai preferensi pada metode *Simple Additive Weighting* (SAW) dirumuskan sebagai berikut:

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \text{ ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,Persamaan 1.6}$$

dengan :

- V_i = nilai preferensi alternatif,
- w_j = bobot pada kriteria ke-j,
- r_{ij} = nilai hasil normalisasi pada kriteria ke-j,
- n = jumlah kriteria yang digunakan.

Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan informasi visual tanaman yang diperoleh melalui kamera sebagai sumber data utama. Informasi visual tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi tanaman secara aktual di lapangan. Parameter visual yang dianalisis dalam sistem ini meliputi keberadaan tanaman, luas area daun (*canopy area*), warna daun, dan tingkat kerapatan tanaman. Parameter-parameter tersebut mencerminkan kondisi pertumbuhan tanaman sawi hijau dan menjadi dasar dalam menentukan apakah suatu area perlu dilakukan penyemprotan pestisida atau tidak. Dengan pendekatan ini, sistem dapat membedakan antara area tanaman dan area non-tanaman (tanah atau latar belakang), sehingga penyemprotan dapat dilakukan secara lebih terarah.

Metode komputasi utama yang digunakan dalam sistem ini adalah *computer vision* berbasis pengolahan citra digital. Metode ini dipilih karena mampu menganalisis kondisi tanaman secara non-kontak (*non-invasive*) serta memberikan representasi kondisi tanaman secara visual dan objektif. Berbeda dengan metode kendali berbasis sensor tanah atau ambang batas sederhana (*threshold-based control*), *computer vision* memungkinkan sistem untuk mengenali objek tanaman secara langsung, memisahkan tanaman dari latar belakang, serta menentukan area target penyemprotan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Secara umum, sistem *computer vision* yang diterapkan terdiri dari beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut:

1. Akuisisi citra merupakan tahap awal sistem, di mana kamera menangkap citra tanaman sawi hijau secara *real time*. Kamera ditempatkan pada posisi tertentu agar dapat mencakup area tanaman secara optimal. Citra yang dihasilkan masih berupa data mentah (*raw image*) dalam format RGB.
2. Pra-pemrosesan, citra hasil akuisisi diproses untuk meningkatkan kualitas citra dan mengurangi gangguan *noise*. Proses ini meliputi penyesuaian ukuran citra (*resizing*), filtering untuk mengurangi noise, dan konversi ruang warna dari RGB ke HSV. Konversi ruang tersebut dilakukan karena warna hijau daun tanaman lebih mudah dipisahkan dari latar belakang pada ruang warna ini dibandingkan dengan ruang warna RGB.

3. Segmentasi merupakan tahap penting dengan memisahkan objek tanaman dari latar belakang. Segmentasi dilakukan berdasarkan karakteristik warna hijau daun sawi hijau menggunakan metode thresholding pada ruang warna HSV atau indeks vegetasi. Salah satu indeks warna yang digunakan adalah *Excess Green Index* (ExG) yang dirumuskan sebagai:

$$ExG = 2G - R - B \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.7}$$

dengan:

R = nilai komponen merah,

G = nilai komponen hijau,

B = nilai komponen biru.

Nilai ExG yang tinggi menunjukkan dominasi warna hijau yang merepresentasikan keberadaan tanaman. Hasil dari tahap ini berupa citra biner yang memisahkan area tanaman dan area non-tanaman.

4. Sistem melakukan ekstraksi fitur visual untuk memperoleh informasi kuantitatif mengenai kondisi tanaman. Fitur visual yang diekstraksi meliputi luas area tanaman (jumlah piksel hijau), persentase area tanaman terhadap total citra, dan distribusi posisi tanaman pada bidang pandang kamera. Luas area tanaman dirumuskan sebagai:

$$A_{tanaman} = \frac{\text{Jumlah piksel tanaman}}{\text{Jumlah total piksel citra}} \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.8}$$

Nilai ini digunakan sebagai indikator keberadaan dan kerapatan tanaman pada area pengamatan.

5. Sistem melakukan pengambilan keputusan penyemprotan pestisida. Keputusan yang dihasilkan bersifat kondisional dan adaptif, tidak hanya berdasarkan logika ON/OFF sederhana. Contoh logika keputusan yang diterapkan dalam sistem ini antara lain:
- Jika luas area tanaman yang terdeteksi berada di atas nilai ambang tertentu, maka penyemprotan diaktifkan.
 - Jika tidak terdapat area tanaman (hanya latar belakang tanah), maka penyemprotan dinonaktifkan.

Selain itu, keputusan penyemprotan dapat dikombinasikan dengan kendali berbasis waktu, sehingga penyemprotan hanya dilakukan pada jadwal tertentu guna menghindari penyemprotan berlebihan. Durasi penyemprotan ditentukan berdasarkan luas area tanaman yang terdeteksi oleh sistem. Hubungan antara debit semprot, volume larutan pestisida, dan waktu penyemprotan dirumuskan sebagai:

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots \text{Persamaan 1.9}$$

dengan:

Q = debit semprot (L/menit),

V = volume larutan pestisida (L),

t = waktu penyemprotan (menit).

Hasil keputusan dari sistem *computer vision* digunakan untuk mengendalikan aktuator berupa pompa dan katup penyemprot pestisida melalui relay atau driver elektronik. Proses pengolahan dan pengambilan keputusan dilakukan pada perangkat komputasi tepi (*single board computer*), sedangkan melakukan aktuator oleh mikrokontroler. Seluruh data hasil analisis, status penyemprotan, dan riwayat aktivitas sistem dikirim ke *platform* IoT dan ditampilkan melalui aplikasi monitoring berbasis mobile secara *real time*.

Cara Kerja Sistem (Input–Proses–Output)

1. Tahap input berupa citra visual tanaman sawi hijau yang diperoleh dari kamera secara *real time*.
2. Tahap Proses meliputi seluruh tahapan pengolahan citra menggunakan metode *computer vision*, mulai dari pra-pemrosesan, segmentasi, ekstraksi fitur visual, hingga pengambilan keputusan penyemprotan.
3. Tahap output berupa pengendalian pompa dan sistem penyemprotan pestisida. Penyemprotan hanya dilakukan pada area tanaman yang terdeteksi oleh sistem *computer vision*. Seluruh hasil dan status sistem ditampilkan pada *platform* monitoring IoT.

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuan *computer vision* dalam melakukan penyemprotan pestisida secara presisi, sehingga penggunaan pestisida menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan. Sistem juga mampu mengurangi

ketergantungan terhadap tenaga manusia serta mendukung pemantauan jarak jauh berbasis IoT. Namun, sistem memiliki keterbatasan pada ketergantungan terhadap kondisi pencahayaan dan kualitas citra kamera. Perubahan intensitas cahaya dapat mempengaruhi hasil segmentasi citra, sehingga diperlukan proses kalibrasi atau pengaturan pencahayaan agar kinerja sistem tetap optimal.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Untuk menentukan solusi terbaik, diperlukan analisis terhadap berbagai solusi yang telah diajukan. Metode analisis yang akan digunakan adalah metode *House of Quality* (HoQ) seperti yang terlihat pada Tabel 1.3 berikut.

Tabel 1.3 House of Quality

Direction of Improvement			Functional Requirements									
Keterangan: ● = Strong = 5 ○ = Fair = 3 △ = Weak = 1 = 0	Rating of Importance	Percentage of Importance Rating	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
			Sensing Capability	Computing Performance	Computing Method	Actuation Capability	Notifikasi Capability	User Friendly	Casing (Ketahanan Sistem)	Deteksi Citra Hama	Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi	
Costumer Requirements												
Keterbatasan Infrastruktur Operasional dan Daya Listrik	4	17,40%	○	●	○	●	●	○	○	○	○	
Keterbatasan Sumber Daya Produksi Petani (Low Cost)	3	13,04%	○	△	●	○	○	○	○	●	△	
Kondisi Awal Tanah yang Tidak Ideal	5	21,72%	●	△	○	●	○	○	△	○	○	
Variabilitas Dinamis Parameter Lingkungan dan Tanah	4	17,40%	●	○	○	●	○	○	○	○	○	
Keterbatasan Waktu Implementasi dan Evaluasi Sistem (6 Bulan Pengerjaan)	3	13,04%	○	○	●	○	○	●	○	○	○	
Importance Rating			75	49	69	83	65	63	47	63	51	565
Percentage Rating			13,28%	8,68%	12,21%	14,70%	11,50%	11,15%	8,31%	11,15%	9,02%	100%
Solusi 1			●	○	●	●	●	○	○	●	○	4,256
Solusi 2			●	●	●	●	○	△	○	○	△	3,574
Solusi 3			△	○	●	○	○	○	△	●	○	3,035

Tabel 1.3 menunjukkan *House of Quality* (HoQ) yang menggambarkan keterkaitan antara kebutuhan pengguna (*customer requirements*) dan kebutuhan fungsional sistem (*functional requirements*) pada sistem monitoring dan pengendalian pertanian yang diusulkan. Hubungan antara setiap kebutuhan pengguna dan fitur fungsional dinilai menggunakan simbol, di mana nilai 0 menunjukkan tidak ada hubungan, 1 menunjukkan tingkat kepentingan lemah, 3 menunjukkan tingkat kepentingan sedang, dan 5 menunjukkan tingkat kepentingan yang sangat kuat. Setiap kebutuhan pengguna diberikan *Rating of Importance* dengan skala 1–5, kemudian dikonversi menjadi

Percentage of Importance. Nilai ini digunakan untuk menghitung Importance Rating dari masing-masing kebutuhan fungsional, sehingga diperoleh tingkat prioritas fitur teknis yang harus dipertimbangkan dalam perancangan sistem.

Pada sistem yang dirancang, kebutuhan utama pengguna mencakup kemampuan untuk memantau unsur hara secara langsung, mengontrol dalam penyiraman dan penyemprotan pestisida, serta pemberitahuan tentang kondisi parameter tanaman kepada pengguna. Kebutuhan-kebutuhan ini dipenuhi melalui lima konstrain yang mencakup berbagai tantangan yang berpotensi mempengaruhi keberhasilan perancangan dan implementasi solusi. Berdasarkan pemetaan hubungan pada tabel HoQ, diperoleh beberapa analisis hubungan untuk menghitung performa ketiga solusi yang diusulkan sebagai berikut:

1. Fitur *Sensing Capability* memperoleh *Importance Rating* sebesar 75 dengan *Percentage Rating* 13,28%. Nilai ini menunjukkan bahwa kemampuan sensing memiliki peran penting dalam sistem, terutama karena memiliki hubungan kuat (●) dengan kebutuhan kondisi awal tanah yang tidak ideal serta variabilitas dinamis parameter lingkungan dan tanah. Hal ini menegaskan bahwa keandalan dan akurasi sensor sangat berpengaruh terhadap kualitas data yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sistem.
2. Fitur *Computing Performance* memperoleh *Importance Rating* sebesar 49 dengan *Percentage Rating* 8,68%, yang menunjukkan bahwa fitur ini memiliki tingkat kepentingan relatif rendah dibandingkan kebutuhan fungsional lainnya. Hal ini disebabkan karena hubungan *Computing Performance* terhadap sebagian besar kebutuhan pengguna berada pada tingkat sedang (○) dan lemah (△), sehingga performa komputasi tinggi tidak menjadi fokus utama dalam perancangan sistem yang menekankan efisiensi daya dan kesederhanaan.
3. Fitur *Computing Method* memperoleh *Importance Rating* sebesar 69 dengan *Percentage Rating* 12,21%. Nilai ini menunjukkan bahwa metode komputasi memiliki peran penting dalam sistem, terutama karena memiliki hubungan kuat (●) dengan kebutuhan keterbatasan sumber daya produksi petani serta keterbatasan

waktu implementasi dan evaluasi sistem. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan metode komputasi yang efisien dan adaptif sangat berpengaruh terhadap keberhasilan sistem dalam kondisi keterbatasan biaya dan waktu pengembangan.

4. Fitur *Actuation Capability* menjadi kebutuhan fungsional dengan *Importance Rating* tertinggi, yaitu sebesar 83 dan *Percentage Rating* 14,70%. Tingginya nilai ini disebabkan karena *Actuation Capability* memiliki hubungan kuat (●) dengan keterbatasan infrastruktur operasional dan daya listrik, kondisi awal tanah yang tidak ideal, serta variabilitas dinamis parameter lingkungan dan tanah. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan aktuasi yang andal dan otomatis merupakan aspek paling krusial dalam memastikan penyiraman dan penyemprotan pestisida dapat berjalan sesuai kondisi lapangan.
5. Fitur *Notification Capability* memperoleh *Importance Rating* sebesar 65 dengan *Percentage Rating* 11,50%. Fitur ini berperan sebagai pendukung sistem, dengan hubungan kuat (●) terhadap keterbatasan infrastruktur operasional dan daya listrik, serta hubungan sedang (○) terhadap kebutuhan lainnya. Dengan demikian, fitur notifikasi berfungsi untuk membantu pengguna memantau kondisi sistem secara *real-time*, meskipun bukan merupakan fungsi inti utama.
6. Fitur *User Friendly* memperoleh *Importance Rating* sebesar 63 dengan *Percentage Rating* 11,15%, yang menunjukkan bahwa kemudahan penggunaan memiliki kontribusi sedang dalam sistem agar dapat dioperasikan oleh petani secara praktis. Fitur *Casing* (Ketahanan Sistem) memperoleh *Importance Rating* sebesar 47 dengan *Percentage Rating* 8,31%, sedangkan Deteksi Citra Hama dan Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi masing-masing memperoleh *Importance Rating* sebesar 63 dan 51, dengan *Percentage Rating* 11,15% dan 9,02%. Nilai ini menunjukkan bahwa fitur tambahan tersebut tetap diperlukan, namun bukan menjadi faktor dominan dibandingkan fungsi utama sistem monitoring dan aktuasi.

Maka dengan *House of Quality* yang telah dibuat, dilakukan perhitungan dari masing-masing penyelesaian masalah terhadap ketiga solusi seperti di bawah ini:

$$\text{Solusi 1} = (13,28\% \times 5) + (8,68\% \times 3) + (12,21\% \times 5) + (14,70\% \times 5) + (11,50\% \times 5) +$$

$$(11,15\% \times 3) + (8,31\% \times 3) + (11,15\% \times 5) + (9,02\% \times 3) \\ = 4,256$$

$$\text{Solusi 2} = (13,28\% \times 5) + (8,68\% \times 5) + (12,21\% \times 5) + (14,70\% \times 5) + (11,50\% \times 3) + \\ (11,15\% \times 1) + (8,31\% \times 3) + (11,15\% \times 3) + (9,02\% \times 1) \\ = 3,574$$

$$\text{Solusi 3} = (13,28\% \times 1) + (8,68\% \times 3) + (12,21\% \times 5) + (14,70\% \times 3) + (11,50\% \times 3) + \\ (11,15\% \times 3) + (8,31\% \times 1) + (11,15\% \times 5) + (9,02\% \times 3) \\ = 3,035$$

Berdasarkan bobot kepentingan kebutuhan fungsional tersebut, dilakukan evaluasi terhadap tiga alternatif solusi yang diusulkan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Solusi 1 menunjukkan tingkat kesesuaian paling tinggi terhadap kebutuhan fungsional pada HoQ. Hal ini tercermin dari hubungan kuat (●) pada *Sensing Capability*, *Computing Method*, *Actuation Capability*, *Notification Capability*, serta Deteksi Citra Hama. Pada HoQ, *Actuation Capability* memiliki bobot kepentingan tertinggi (14,70%) dan Solusi 1 mampu memenuhinya secara optimal melalui pengendalian pompa air dan pompa pestisida yang bekerja otomatis berdasarkan hasil pengolahan data sensor dan keputusan sistem.

Hubungan kuat pada *Sensing Capability* (13,28%) sejalan dengan pemanfaatan berbagai sensor tanah seperti kelembaban, suhu, pH, dan NPK yang digunakan sebagai input utama sistem. Hal ini menjawab kebutuhan pengguna terkait kondisi awal tanah yang tidak ideal dan variabilitas parameter lingkungan. Selain itu, hubungan kuat pada *Computing Method* (12,21%) secara langsung berkaitan dengan penerapan *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe Mamdani, yang memungkinkan sistem mengambil keputusan penyiraman secara adaptif tanpa batas ambang tegas.

Solusi 1 juga memiliki hubungan kuat pada *Notification Capability* (11,50%), yang diwujudkan melalui platform monitoring berbasis aplikasi mobile untuk menampilkan data sensor, status aktuator, dan peringatan kondisi tanah. Dukungan Deteksi Citra

Hama sebagai fitur tambahan menjadikan solusi ini semakin komprehensif. Kombinasi pemenuhan kuat pada kebutuhan fungsional dengan bobot tinggi menyebabkan Solusi 1 memperoleh skor tertinggi sebesar 4,256, sehingga dipilih sebagai solusi paling optimal.

Solusi 2 menunjukkan karakteristik unggul pada aspek teknis dan mekanik, namun kurang seimbang terhadap seluruh kebutuhan fungsional HoQ. Berdasarkan HoQ, Solusi 2 memiliki hubungan kuat (●) pada *Sensing Capability*, *Computing Performance*, *Computing Method*, dan *Actuation Capability*. Hubungan kuat pada *Computing Performance* (8,68%) berkaitan dengan kebutuhan komputasi yang lebih tinggi untuk mengendalikan pergerakan robot, pengolahan data sensor, serta sinkronisasi aktuator selama robot bergerak di area tanam.

Namun, *Computing Performance* memiliki bobot kepentingan relatif rendah dalam HoQ, sehingga keunggulan Solusi 2 pada aspek ini tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap skor total. Selain itu, Solusi 2 hanya memiliki hubungan lemah (△) pada *User Friendly* dan Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi. Hal ini sejalan dengan kompleksitas mekanik robot, kebutuhan kalibrasi sistem gerak, serta potensi peningkatan biaya dan perawatan, yang kurang sesuai dengan keterbatasan sumber daya petani.

Pada *Notification Capability*, hubungan Solusi 2 berada pada tingkat sedang (○), yang menunjukkan bahwa meskipun sistem mendukung monitoring berbasis IoT, aspek penyampaian informasi kepada pengguna bukan menjadi fokus utama. Kondisi ini menyebabkan Solusi 2 memperoleh skor 3,351, lebih rendah dibandingkan Solusi 1.

Sementara itu, Solusi 3 berupa menunjukkan fokus utama pada aspek visual dan *precision spraying*. Berdasarkan HoQ, Solusi 3 memiliki hubungan kuat (●) pada *Computing Method* dan Deteksi Citra Hama. Hal ini selaras dengan penerapan metode

computer vision, ekstraksi fitur visual, dan pengambilan keputusan penyemprotan berdasarkan luas area tanaman dan hasil segmentasi citra.

Namun, Solusi 3 hanya memiliki hubungan lemah (Δ) pada *Sensing Capability* dan Casing (Ketahanan Sistem). Kondisi ini mencerminkan ketergantungan solusi pada data visual dibandingkan pemantauan parameter tanah secara langsung, serta sensitivitas sistem terhadap kondisi pencahayaan dan lingkungan lapangan. Pada *Actuation Capability* dan *Notification Capability*, hubungan berada pada tingkat sedang ($\circ$), yang menunjukkan bahwa aktuasi dan notifikasi bersifat pendukung dan tidak sepenuhnya adaptif terhadap kondisi tanah.

Karena kebutuhan fungsional dengan bobot tertinggi dalam HoQ adalah *Actuation Capability* dan *Sensing Capability*, keterbatasan Solusi 3 pada dua aspek tersebut menyebabkan kontribusi totalnya menjadi lebih rendah. Meskipun unggul pada precision spraying dan efisiensi pestisida, Solusi 3 memperoleh skor terendah, yaitu 3,035, sehingga kurang sesuai dengan tujuan utama sistem yang berorientasi pada pengelolaan kondisi tanah dan pengendalian penyiraman secara adaptif.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil perhitungan *House of Quality* (HoQ), solusi yang dipilih adalah Solusi 1, yaitu Sistem Monitoring, Penyiraman, dan Penyemprotan Pestisida Berbasis *Internet of Things* (IoT), dengan skor tertinggi sebesar 4,256. Skor ini menunjukkan bahwa Solusi 1 memiliki tingkat kesesuaian paling tinggi terhadap kebutuhan pengguna dibandingkan solusi lainnya. Solusi ini dirancang sebagai satu sistem terintegrasi yang menjalankan tiga fungsi utama, yaitu monitoring kondisi tanah, penyiraman tanaman, dan penyemprotan pestisida, dengan pendekatan pengolahan yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing proses. Monitoring unsur hara tanah dilakukan melalui pengukuran parameter lingkungan seperti NPK, pH tanah, kelembaban tanah, dan suhu, yang berfungsi sebagai informasi pemantauan kondisi lahan secara waktu nyata. Data hasil monitoring ini disajikan kepada pengguna tanpa

pengambilan keputusan langsung, sehingga pengguna dapat memahami kondisi tanah secara menyeluruh sebagai dasar evaluasi.

Proses penyiraman tanaman pada Solusi 1 menggunakan metode logika fuzzy sebagai inti dari pengambilan keputusan. Logika fuzzy memanfaatkan data sensor kelembaban tanah, suhu, dan pH untuk menentukan durasi penyiraman secara adaptif, sehingga penyiraman tidak dilakukan secara tetap, melainkan menyesuaikan dengan kondisi aktual tanah. Sementara itu, proses penyemprotan pestisida tidak menggunakan logika fuzzy, melainkan mengandalkan penjadwalan waktu, data sensor pendukung, serta pengolahan citra. Citra tanaman diambil menggunakan kamera, kemudian diolah menggunakan metode image processing untuk mendeteksi keberadaan hama berdasarkan karakteristik visual tanaman. Hasil deteksi citra ini menjadi dasar keputusan penyemprotan pestisida, sehingga penyemprotan dapat dilakukan secara lebih terarah dan tidak berlebihan.

Seluruh proses sistem dikendalikan oleh mikrokontroler sebagai pusat kendali, dengan satu pompa sebagai aktuator utama yang dioperasikan secara bergantian sesuai kebutuhan penyiraman atau penyemprotan pestisida. Data sensor, hasil pengolahan sistem, serta status aktuator dikirimkan ke aplikasi mobile berbasis IoT yang terhubung dengan basis data. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi lahan, status sistem, serta menerima informasi terkait aktivitas penyiraman dan penyemprotan secara real time. Dengan demikian, Solusi 1 tidak hanya unggul dari sisi teknis, tetapi juga memberikan kemudahan pemantauan dan pengendalian sistem secara menyeluruh.