

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Serangan hama merupakan salah satu ancaman serius terhadap ketahanan pangan global. Menurut data dari *Food and Agriculture Organization*, serangan hama dapat menurunkan hasil produksi tanaman global hingga 40% setiap tahun [1]. Kondisi ini juga dirasakan di Indonesia, mengingat tingginya ketergantungan nasional terhadap komoditas pangan strategis pada lahan pertanian. Berdasarkan Survei Pertanian yang dirilis oleh Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2024, menunjukkan 55,03% petani di Indonesia melaporkan gangguan hama sebagai kendala utama dalam usaha tani [2]. Dampaknya dapat mempengaruhi stabilitas produksi pangan nasional.

Pada komoditas pangan strategis ancaman hama datang dalam berbagai bentuk dengan karakteristik yang berbeda-beda. ancaman hama dapat berasal dari organisme vertebrata maupun invertebrata dengan skala serangan yang beragam. Burung pemakan bulir seperti burung pipit (*Lonchura spp.*) menyerang padi pada fase pengisian bulir dan dapat menurunkan hasil panen hingga 50% apabila tidak ditangani dengan cepat dan efektif [3]. Disisi lain, Babi hutan (*Sus scrofa*) merupakan hama vertebrata berukuran besar yang banyak menyerang lahan pertanian di wilayah transisi sawah–hutan, menyebabkan kerusakan tanaman dan struktur lahan secara berulang setiap musim tanam [4]. Selain itu,, hama berukuran mikro seperti wereng batang coklat (*Nilaparvata lugens*) pada tanaman padi mampu menyebabkan fenomena *hopperburn* dengan potensi kehilangan hasil panen hingga 70% [5].

Namun demikian, Sistem pengendalian hama pada lahan pertanian masih mengandalkan respon manual dari petani. Metode konvensional seperti orang-orangan sawah, tali plastik atau kaleng, serta patroli rutin di lahan pertanian menuntut kehadiran petani secara fisik untuk turun ke lahan pertanian dan menjaga tanaman secara terus menerus sepanjang hari [6]. Pendekatan ini menjadi kurang efektif karena terdapat keterbatasan metode pengendalian manual petani terhadap

karakteristik hama yang berbeda. Burung pipit menyerang secara bergerombol pada waktu-waktu tertentu seperti sore hari (15.00 - 18.00) [6], sementara babi hutan bersifat nokturnal dengan aktivitas puncak pada malam hari (22.00-03.00), sehingga pengawasan manual sangat beresiko dan menambah beban kerja bagi petani [7] Pengendalian hama serangga seperti wereng batang coklat umumnya menggunakan insektisida kimia sebagai respon reaktif dalam mengusir hama serangga seperti Wereng Batang Coklat juga menimbulkan permasalahan jangka panjang berupa resistensi hama dan fenomena "treadmill pestisida", dimana petani terdorong untuk meningkatkan dosis, frekuensi, atau beralih ke insektisida yang lebih mahal dan lebih toksik [7].

Berdasarkan hal tersebut, pengendalian hama di lahan pertanian bukan semata-mata pada jenis hama, melainkan pada keterbatasan sistem pengendalian yang masih bersifat manual, reaktif, dan sangat bergantung pada kehadiran manusia. Beberapa faktor eksternal, seperti jarak lahan pertanian dari pemukiman serta keterbatasan jumlah tenaga kerja memperburuk kemampuan petani untuk merespons hama dengan cepat sehingga sistem pengendalian menjadi tidak optimal dan melelahkan [8]. Permasalahan ini tidak hanya berdampak pada petani, tetapi terdapat beberapa pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung diantaranya :

1. Petani

Petani menjadi pihak paling terdampak karena keterbatasan respon manual terhadap serangan hama burung membuat pengendalian tidak efektif dan menurunkan hasil panen. Masalah ini juga menambah beban waktu dan tenaga karena petani harus berjaga di sawah secara terus-menerus.

2. Pemerintah

Jika permasalahan ini tidak diatasi, pemerintah akan menghadapi menurunnya ketahanan pangan akibat kerugian produksi nasional dan bertanggung jawab terhadap perumusan kebijakan pertanian.

3. Masyarakat

Masyarakat terdampak secara tidak langsung melalui ketersediaan pangan yang aman, terjangkau, dan bebas dari residu pestisida berbahaya.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

1.1.1.1 Hama Wereng Batang Cokelat

Kesulitan dalam mengendalikan WBC berakar pada karakteristik biologi dan perilakunya yang unik, yang secara efektif memungkinkan wereng untuk menghindari dan bertahan dari metode pengendalian manual.



Gambar 1. 1 Wereng Batang Cokelat (*Nilaparvata lugens*)

Karakteristik

1. Siklus Hidup Cepat dan Fekunditas Tinggi, WBC memiliki siklus hidup yang sangat pendek, berkisar antara 28 hingga 50 hari. Seekor betina mampu meletakkan 100 hingga 600 telur selama hidupnya. Kombinasi ini memungkinkan terjadinya ledakan populasi dalam waktu yang sangat singkat, seringkali sebelum petani menyadari tingkat infestasi awal[11].
2. Peletakan Telur Tersembunyi, Imago betina meletakkan telur secara berkelompok di *dalam* jaringan pelepah daun. Strategi ini tidak hanya membuat telur sepenuhnya tidak terlihat, tetapi juga melindunginya dari predator dan efektivitas insektisida kontak. Hal ini menjadi batasan fundamental bagi metode deteksi atau pengendalian yang berbasis permukaan[12].

3. Potensi Reproduksi Eksplosif, Kapabilitas reproduksi WBC sangat tinggi. Dengan siklus hidup yang singkat, hanya 23 hingga 32 hari, seekor betina mampu menghasilkan antara 270 hingga 902 butir telur[5]. Secara teoritis, dalam kondisi ideal, satu pasang wereng dapat menghasilkan hingga 20.000 keturunan dalam waktu 90 hari[5]. Laju pertumbuhan eksponensial ini berarti penundaan deteksi selama beberapa hari saja dapat mengakibatkan perbedaan antara populasi yang terkendali dan wabah yang tidak dapat diatasi.
4. Polimorfisme Sayap, Spesies ini menunjukkan polimorfisme sayap yang merupakan strategi adaptif yang canggih. Bentuk *makroptera* (bersayap panjang) berfungsi untuk migrasi jarak jauh dan kolonisasi areal sawah baru. Setelah menemukan habitat yang cocok, generasi berikutnya akan didominasi oleh bentuk *brakhiptera* (bersayap pendek) yang tidak bisa terbang namun memiliki fekunditas (kemampuan bertelur) yang jauh lebih tinggi, yang dirancang untuk eksploitasi sumber daya lokal dan ledakan populasi secara cepat[11].
5. Ukuran Mikroskopis pada Fase Awal, Deteksi dini secara visual hampir tidak mungkin dilakukan. Telur WBC diletakkan di dalam jaringan pelepah daun dengan ukuran hanya sekitar 1,3 x 0,33 mm, sementara nimfa pada instar pertama berukuran kurang dari 1 mm[1]. Ukuran ini membuat pemantauan konvensional oleh petani menjadi tidak efektif sehingga populasi mencapai tingkat yang merusak.

Perilaku (Behavior)

1. Habitat dan Pola Serangan, WBC hidup secara berkelompok (gregarious) dan bersembunyi di pangkal batang padi, beberapa sentimeter di atas permukaan air[15]. Lokasi tersembunyi (kriptik) ini melindunginya dari predator dan insektisida semprot. Mereka makan dengan menghisap cairan floem, yang secara kolektif menyebabkan gejala *hopperburn* (tanaman kering seperti terbakar)[12].

2. Waktu Kemunculan, Ledakan populasi WBC sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Serangan dominan terjadi pada musim hujan atau kondisi kemarau basah (efek La Nina)[14]. Kondisi ideal untuk perkembangbiakannya adalah pada kelembaban udara tinggi (70-80%) dan suhu siang hari antara 28-30°C[13].
3. Karakteristik Spektral dan Temporal Sinyal WBC, Analisis spektral menunjukkan bahwa komunikasi getaran *N. lugens* berada pada rentang frekuensi rendah hingga menengah, yang secara signifikan berbeda dari suara serangga terbang lainnya atau kebisingan lingkungan frekuensi tinggi.



- 1) Sinyal Perkawinan Betina, Sinyal ini memiliki frekuensi getaran utama (Main Vibration Frequency) MVC rata-rata sekitar 234 Hz, dengan laju pulsa (*pulse rate*) sekitar 23 Hz. Sinyal ini bersifat ritmis dan berfungsi sebagai jawaban atas panggilan jantan[5].
- 2) Sinyal Perkawinan Jantan, Jantan memproduksi sinyal dengan frekuensi sedikit lebih tinggi, dengan rata-rata MVF pada 255 ± 24 Hz. Struktur sinyal jantan lebih kompleks, terdiri dari pulsa tidak teratur awal, diikuti oleh sinyal pulsa berkelanjutan (CPS) yang membawa konten frekuensi utama[5].
- 3) Sinyal Kompetisi Jantan, Dalam situasi di mana terdapat kepadatan populasi tinggi dan persaingan antar jantan terjadi, frekuensi sinyal dapat bergeser naik ke sekitar 281 ± 46 Hz[5].

Atraktor (Penarik) dan Repelen (Penolak):

1. Respon Terhadap Cahaya (Fototaksis), Wereng batang cokelat (WBC) memiliki perilaku fototaksis positif, yaitu kecenderungan untuk bergerak menuju sumber cahaya. Namun, respons fototaksis ini bersifat selektif terhadap panjang gelombang tertentu. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa WBC lebih tertarik pada cahaya biru dan hijau, dengan rentang kepekaan visual puncak berada pada panjang gelombang 450–500 nm[13]. Rentang ini sesuai dengan spektrum lampu LED biru (455–492 nm),

sehingga efektif digunakan sebagai daya tarik visual pada sistem perangkap cahaya. Perangkap yang menggunakan lampu LED biru terbukti memiliki efektivitas tinggi dalam menarik dan menangkap WBC, dengan hasil tangkapan rata-rata mencapai 75,6 ekor per unit, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan perangkap lampu hitam konvensional[16]. Selain itu, beberapa penelitian lain di bidang pertanian juga melaporkan bahwa lampu LED kuning memiliki peran penting dalam menarik atau mengacaukan orientasi terbang WBC. Warna kuning memiliki panjang gelombang sekitar 560–590 nm, yang menyerupai pantulan warna tanaman padi pada siang hari. Dalam kondisi tertentu, lampu kuning mampu menarik wereng dewasa, khususnya betina muda, untuk mendekati sumber cahaya. Namun, pada intensitas dan lingkungan tertentu, cahaya kuning juga dapat berfungsi sebagai repelan visual dengan mengganggu kemampuan orientasi hama terhadap tanaman inangnya[16].

2. Respons terhadap Suara (Fonotaksis), WBC menunjukkan kerentanan terhadap gelombang suara. Beberapa penelitian menunjukkan hasil yang bervariasi, yang justru menjadi justifikasi ilmiah untuk penelitian ini:

- 1) Frekuensi Ultrasonik (30-45 kHz), Rentang ini terbukti memicu perilaku menghindar, meningkatkan mortalitas, dan mengganggu reproduksi, dengan efektivitas puncak pada 40 kHz[13].
- 2) Frekuensi Ultrasonik (≥ 40 kHz), Frekuensi ini menyebabkan wereng menjadi pasif atau pergerakannya melambat, dan paparan dalam durasi lama (180 menit) dapat menyebabkan kematian[9].
- 3) Frekuensi Sonik (1.2-3 kHz), Satu studi justru menemukan rentang ini paling efektif memicu respons menghindar yang aktif (berpindah tempat dan terbang)[10].

3. Respons terhadap Kimia (Kemotaksis), Senyawa volatil dari tanaman seperti serai dapur (*Cymbopogon citratus*) dan kemangi (*Ocimum* sp.) terbukti memiliki sifat repelen (penolak) terhadap WBC[11]. Senyawa spesifik yang

diidentifikasi sebagai penolak antara lain *alfa-pinene* dan berbagai ester asam lemak[11].

1.1.1.2 Solusi Yang Telah Ada

Berdasarkan hal tersebut, Permasalahan hama pada lahan pertanian sebenarnya sudah menjadi masalah yang banyak terjadi, hingga sudah ada beberapa solusi yang dilakukan oleh masyarakat dan bisa dilihat analisis beberapa solusi tersebut di tabel 1.1 berikut :

Tabel 1. 1 Solusi yang Telah Ada

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
1.	Penyemprotan Insektisida	Pengendalian yang mudah di lakukan oleh petani, dengan memberikan zat yang membunuh secara langsung hama wereng batang cokelat	Terjadinya evolusi akibat sistem habituasi pada hama, mengakibatkan tidak efektifnya pengendalian dalam jangka panjang dan ikut membunuh musuh alami dari hama wereng batang cokelat.	[7]
2.	Pengendalian Hayati	Proses pengendalian hama wereng batang cokelat yang mudah dengan memanfaatkan	Ketergantungan akan predator yang tidak bisa dikendalikan mengakibatkan	[17]

		predator alami hama wereng batang cokelat	mudahnya hama wereng batang cokelat berkembang biak secara pesat.	
3.	Varietas Tahan Wereng (VTW)	Mengurangi tanaman padi yang terdampak dengan menggunakan bibit varietas anti hama wereng batang cokelat.	Hama wereng batang cokelat mudah melakukan evolusi terhadap tanaman padi.	[17]

1.1.1.3 Analisis Respon Manual Terhadap Pengendalian Tidak Efektif

Untuk memahami mengapa pengendalian manual sering gagal, perlu diletakkan dasar pemahaman mengenai batasan biologis manusia (*human biological constraints*) ketika berinteraksi dengan variabel lingkungan pertanian yang kompleks.

Kemampuan Pemantauan Hama pada Manusia

Dalam konteks pemantauan hama, efektivitas petani bergantung sepenuhnya pada *input* visual. Mata manusia memiliki keterbatasan resolusi spasial (*spatial resolution*), terutama untuk objek yang bergerak cepat atau berukuran sangat kecil dengan latar belakang yang kompleks (kamufase).

Studi menunjukkan bahwa kemampuan mata manusia untuk mendeteksi objek menurun drastis seiring dengan mengecilnya ukuran objek dan berkurangnya kontras warna. Hama seperti nimfa Wereng Batang Cokelat instar 1 yang berukuran 0,6 mm dan berwarna putih bening[18] berada tepat di ambang batas deteksi visual (*liminal threshold*) manusia, terutama ketika inspeksi dilakukan sambil berdiri atau

berjalan cepat di pematang sawah. Kegagalan deteksi ini bukan akibat kelalaian kognitif, melainkan ketidakmampuan optik mata manusia untuk memisahkan objek hama dari substrat tanaman tanpa alat bantu optik.

Penurunan Kewaspadaan dan Kelelahan

Teori ergonomi menyatakan bahwa kemampuan manusia untuk mempertahankan perhatian (*sustained attention*) pada tugas monitoring yang monoton akan menurun secara signifikan setelah 30 menit. Dalam kasus pengendalian hama burung atau babi hutan yang membutuhkan penjagaan berjam-jam atau bahkan sepanjang malam, petani mengalami *vigilance decrement*.

Kelelahan fisik (*physical fatigue*) juga memainkan peran krusial. Aktivitas pengusiran manual seperti menarik tali, berteriak, atau mengejar hama adalah aktivitas metabolik tinggi. Ketika cadangan energi petani menipis, waktu reaksi (*reaction time*) melambat, dan frekuensi monitoring menurun, menciptakan "jendela kerentanan" (*windows of vulnerability*) yang dimanfaatkan oleh hama untuk menyerang[16][20].

Kesenjangan Kognitif dan "Base Rate Neglect"

Selain batasan fisik, terdapat batasan kognitif. Petani sering kali mengalami bias kognitif dalam mengestimasi populasi hama. Tanpa data kuantitatif yang akurat, manusia cenderung meremehkan pertumbuhan populasi yang bersifat eksponensial (seperti pada serangga r-strategist) dan bereaksi secara linear. Hal ini menyebabkan respon pengendalian selalu terlambat (*lagging response*) dibandingkan laju reproduksi hama[19].

Tabel 1. 2 Matriks Perbandingan Kapasitas Deteksi Manusia vs. Karakteristik Hama

Variabel Biologis	Kapasitas Manusia (Petani)	Karakteristik Hama Target	Status Konflik
Resolusi Visual	Efektif pada objek >1-2 mm; buruk pada kontras rendah.	Nimfa WBC: 0,6 mm; Warna: Hyaline/Kriptik.	Gagal Deteksi (Invisible Threat)
Siklus Aktivitas	Diurnal (Siang hari); Istirahat malam hari.	Wereng Batang Cokelat: Nokturnal (Aktif malam).	Mismatch Waktu (Temporal Gap)
Stamina Fisik	Terbatas (Butuh istirahat periodik).	Ledakan populasi wereng yang tidak terduga.	Kelelahan (Endurance Failure)
Kecepatan Respon	Detik hingga Menit (Reaksi motorik).	Terbang/Lari: Milidetik hingga Detik.	Lambat (Reaction Lag)

Sumber, Analisis sintesis berdasarkan data[16][18][16][20]

1.1.2. Analisis Masalah dan *Constraint*

Berikut pembahasan masalah yang diajukan dalam beberapa aspek :

1. Aspek Ekonomi

Keterbatasan respon manual petani terhadap serangan hama membuat pengendalian menjadi tidak optimal, sehingga kerugian hasil panen meningkat dan dapat menimbulkan tekanan finansial bagi petani, terutama yang menggantungkan hidup pada hasil pertanian padi. Permasalahan ekonomi yang dihadapi petani bersifat ganda, yakni kerugian hasil panen yang signifikan akibat serangan hama dan keterbatasan modal untuk investasi teknologi. Hama burung, wereng, dan babi hutan secara langsung memangkas margin keuntungan petani yang sudah rendah. Oleh karena itu, sistem pengendalian hama yang dikembangkan harus memiliki biaya implementasi yang rendah, agar secara ekonomi layak diterapkan dan dapat diadopsi oleh petani tanpa menambah beban finansial.

2. Aspek Waktu & Tenaga Kerja

Metode pengusiran hama manual memerlukan kehadiran petani di lahan pertanian. Aktivitas ini menyita banyak waktu dan tenaga, terutama pada jam-jam serangan hama pertanian, misalnya hama burung, yang terjadi pada pagi dan sore hari, hama babi hutan dan wereng yang bersifat nokturnal (aktif di malam hari) dimana pengawasan secara manual sangat melelahkan dan tidak efektif akibat penurunan kewaspadaan (*vigilance decrement*). Sehingga ketergantungan pada respon manual mengurangi efisiensi kerja dan mengganggu kegiatan pertanian lainnya. Oleh karena itu dibutuhkan pengendalian yang bersifat otonom, tanpa perlu intervensi yang signifikan dari petani.

3. Aspek Lingkungan

Kemunculan hama babi dan burung yang tidak dikendalikan secara optimal dapat merusak lahan pertanian karena aktivitasnya untuk mencari makan serta penggunaan pestisida kimia pada hama wereng berpotensi mencemari tanah, air, dan udara, yang dapat membunuh hewan-hewan lain yang bermanfaat dan merusak kesehatan lingkungan secara keseluruhan. Selain berdampak ekologis, praktik pengendalian yang tidak ramah lingkungan juga berpotensi

melanggar ketentuan keselamatan dan perlindungan lingkungan hidup yang berlaku pada sektor pertanian. Oleh karena itu, diperlukan penerapan konstrain Standar dan Regulasi Lingkungan melalui pendekatan non-invasif yang memastikan alat tidak melukai hewan maupun merusak vegetasi.

4. Aspek Teknis & Fungsional

Sistem dioperasikan pada lahan pertanian terbuka sehingga memerlukan ketahanan terhadap panas matahari dan curah hujan. Oleh karena itu, sistem dirancang dengan material yang kokoh, sehingga memunculkan konstrain Tahan Cuaca pada materialnya. Selain itu, proses pengembangan sistem dibatasi oleh waktu yang relatif singkat, agar solusi dapat segera diterapkan dan diuji di lapangan secara nyata. Batasan waktu yang ditetapkan maksimal enam bulan untuk memastikan seluruh tahapan perancangan, pengujian, dan integrasi dapat diselesaikan secara efektif sehingga menentukan konstrain Batas Waktu Pengembangan maksimal enam bulan untuk seluruh tahapan perancangan hingga integrasi.

5. Aspek Hukum

Penggunaan teknologi dalam kegiatan pertanian, khususnya alat pengendalian hama, tidak terlepas dari ketentuan hukum dan regulasi yang mengatur keselamatan manusia, perlindungan lingkungan hidup, serta kesejahteraan hewan. Pengendalian hama yang dilakukan secara tidak terkendali, misalnya dengan penggunaan bahan kimia berbahaya atau metode yang bersifat destruktif, berpotensi melanggar prinsip perlindungan lingkungan dan keselamatan kerja di sektor pertanian. Selain itu, penerapan sistem elektronik di lahan pertanian terbuka juga harus mempertimbangkan aspek keselamatan pengguna, seperti risiko sengatan listrik, kebisingan berlebih, maupun dampak alat terhadap masyarakat sekitar. Oleh karena itu, sistem pengendalian hama yang dikembangkan tidak hanya dituntut efektif secara teknis, tetapi juga harus aman secara hukum dan etis untuk digunakan dalam jangka panjang. Berdasarkan aspek hukum tersebut, solusi yang dirancang harus memperhatikan kepatuhan terhadap standar teknis dan regulasi yang relevan, baik terkait keselamatan penggunaan alat,

perlindungan lingkungan, maupun penerapan prinsip pengendalian hama yang berkelanjutan. Hal ini menjadi dasar munculnya kebutuhan akan konstrain standar dan regulasi dalam perancangan sistem.

Berdasarkan tinjauan permasalahan dari beberapa aspek yang didefinisikan, Adapun beberapa konstrain yang dapat muncul berdasarkan permasalahan ini, konstrain ini mencakup berbagai tantangan yang bisa mempengaruhi keberhasilan penerapan solusi, baik dari sisi teknologi, biaya, maupun aspek operasional lainnya. Adapun beberapa konstrain yang muncul berdasarkan permasalahan dan kebutuhan sistem yang telah diuraikan sebelumnya. Konstrain ini mencakup berbagai tantangan yang berpotensi mempengaruhi keberhasilan perancangan dan implementasi solusi, diantaranya adalah :

1. *Low Cost*

Sebagai kaitan dari aspek ekonomi, sistem dirancang dengan batasan biaya maksimal Rp. 5.000.000 untuk masing-masing sub-sistem, sehingga tetap terjangkau bagi petani namun tetap memiliki kemampuan deteksi yang handal. Batasan ini membatasi pemilihan komponen perangkat keras pada kategori *Consumer Grade* yang berkinerja tinggi namun ekonomis (seperti Raspberry Pi dan modul kamera standar), serta menuntut efisiensi algoritma agar dapat berjalan pada perangkat keras tersebut tanpa memerlukan server mahal.

2. Tahan Cuaca

Sebagai jawaban atas tantangan pada aspek teknis, sistem wajib menggunakan material yang memiliki durabilitas tinggi dan desain *enclosure* khusus agar tahan terhadap berbagai kondisi cuaca ekstrem. Hal ini mencakup perlindungan komponen elektronik dari paparan panas matahari yang terik secara terus-menerus serta curah hujan tinggi di lahan pertanian terbuka, guna menjamin keberlangsungan operasional perangkat dalam jangka panjang.

3. *Autonomous Operation*

Untuk mengatasi permasalahan pada aspek waktu dan tenaga kerja, sistem dibatasi oleh kebutuhan untuk mampu melakukan proses pengusiran hama secara otomatis berdasarkan hasil deteksi tanpa memerlukan intervensi manual, sehingga mampu mengatasi masalah keterbatasan tenaga kerja dan ketidakmungkinan pengawasan manual 24 jam.

4. Regulasi Lingkungan

Merujuk pada aspek lingkungan dan aspek hukum, sistem ini dirancang mengikuti regulasi keamanan hayati dan perlindungan alam melalui pendekatan *non-invasif*. Hal ini memastikan bahwa alat tidak melukai hewan, tidak merusak vegetasi, tidak mengganggu aktivitas manusia dan menjamin keselamatan petani dalam monitoring pada lahan pertanian, serta yang terpenting tidak mengganggu keseimbangan ekosistem sehingga tetap legal secara operasional.

5. Batas waktu pengembangan

Sesuai dengan batasan pada aspek fungsional, proses pengembangan alat dijadwalkan selesai dalam waktu 6 bulan, termasuk tahap perancangan, pembuatan, pengujian sistem, dan integrasi seluruh komponen. Waktu tersebut dianggap ideal untuk memastikan sistem bekerja secara stabil dan efektif dalam kondisi lapangan yang sebenarnya, sekaligus memberi ruang untuk penyempurnaan fungsi pendeteksian dan pengusiran dan dapat diterapkan secara langsung.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa kebutuhan yang perlu dipenuhi sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut, antara lain :

1. Sistem mampu mendeteksi dan mengidentifikasi hama burung, hama wereng batang cokelat, dan hama babi hutan pada lahan pertanian.
2. Sistem mampu memberikan respon pengendalian hama burung, hama wereng batang cokelat dan hama babi hutan setelah terdeteksi.

3. Sistem mampu memberikan informasi kepada petani apabila terdeteksi aktivitas hama burung, hama wereng batang cokelat dan hama babi pada lahan pertanian.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang harus dipenuhi, tujuan utama yang ingin dicapai adalah Merancang, membangun dan menguji sebuah sistem yang mampu mendeteksi keberadaan hama di lahan pertanian dan memberikan respon pengendalian setelah hama terdeteksi, serta memberikan informasi kepada petani terkait aktivitas hama pada lahan pertanian. Dengan demikian, sistem diharapkan mampu menanggulangi keterbatasan respon manual dan ketergantungan pada metode pengendalian manual petani terhadap kemunculan hama terutama dalam hal waktu, tenaga, dan jangkauan sehingga mencegah eskalasi hama lebih luas.

1.2 Solusi

Berdasarkan masalah yang telah dibahas sebelumnya, maka dapat diajukan beberapa usulan solusi yang ditawarkan. Solusi yang diharapkan adalah alat mampu mendeteksi keberadaan hama dan memberikan respon pengendalian secara otomatis setelah deteksi valid, sehingga proses pengendalian dapat berlangsung tanpa ketergantungan pada kehadiran petani secara langsung.

1.2.1 Karakteristik Produk

Adapun alat yang akan dibangun dirancang dengan karakteristik tertentu yang mencakup fitur-fitur yang perlu ada sebagai solusi yang diusulkan.

1. Sensing Capability

Sistem memiliki kemampuan sensorik untuk mendeteksi dan mengumpulkan data yang dibutuhkan untuk mendeteksi hama pada lahan pertanian.

2. Computation Method

Sistem mampu mengolah data hasil deteksi menggunakan metode komputasi yang tepat agar sistem dapat dikembangkan secara optimal dan Output yang dihasilkan lebih akurat.

3. *Computing performance*

Sistem memiliki kinerja komputasi yang optimal untuk memproses deteksi dan identifikasi hama secara *real-time*.

4. *Response Capability*

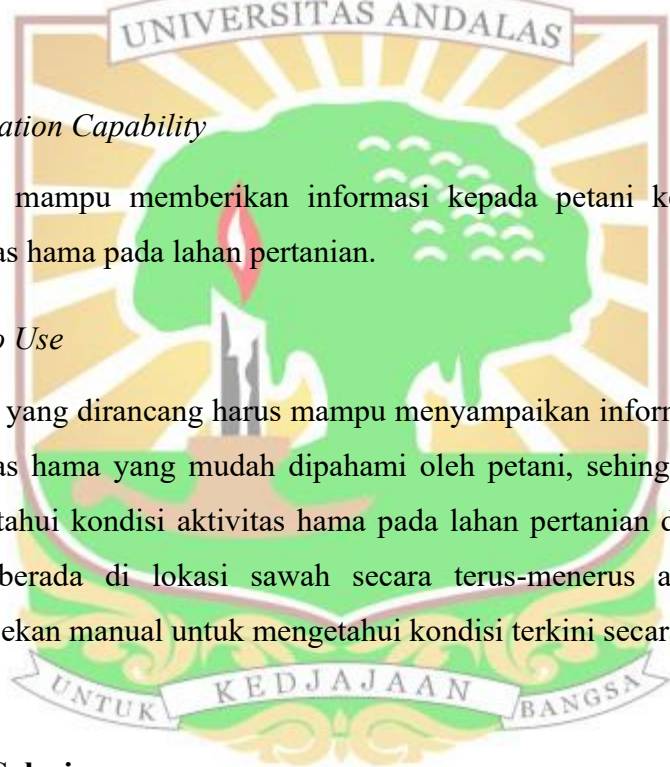
Sistem mampu memberikan respon pengendalian otomatis setelah deteksi terjadi.

5. *Notification Capability*

Sistem mampu memberikan informasi kepada petani ketika terdeteksi aktivitas hama pada lahan pertanian.

6. *Easy to Use*

Sistem yang dirancang harus mampu menyampaikan informasi *monitoring* aktivitas hama yang mudah dipahami oleh petani, sehingga petani dapat mengetahui kondisi aktivitas hama pada lahan pertanian dan petani tidak perlu berada di lokasi sawah secara terus-menerus atau melakukan pengecekan manual untuk mengetahui kondisi terkini secara sederhana dan cepat.



1.2.2 Usulan Solusi

Setelah menguraikan urgensi dan kompleksitas masalah infestasi Wereng Batang Cokelat (WBC) pada Bab 1.1, bagian ini akan memaparkan tiga usulan solusi teknologi yang dirancang secara spesifik untuk menjawab tantangan tersebut. Setiap solusi diformulasikan dengan landasan prinsip-prinsip teknik komputer, mengintegrasikan perangkat keras dan lunak, serta secara langsung ditujukan untuk memenuhi kebutuhan krusial yang telah diidentifikasi, seperti kemampuan dalam mendeteksi hama, melakukan pengendalian dan kemampuan pemantauan waktu nyata (*real-time*). Ketiga solusi ini, yaitu Sistem Deteksi dan Pengusiran WBC

Berbasis Fototaksis dan Fonotaksis, Sistem Penyemprotan Insektisida Nabati Otomatis Berbasis Deteksi Akustik, dan Deteksi WBC Berbasis Bau Senyawa dengan repellent Kandungan Tanaman Serai, disajikan sebagai alternatif yang independen dan setara, masing-masing mengeksplorasi penyelesaian masalah yang berbeda dalam manajemen hama modern.

1.2.2.1 Solusi 1 Pendeteksi dan Pengendali Berbasis Kamera Memanfaatkan Sifat Fototaksis dan Fonotaksis Hama Wereng

Solusi ini mengusulkan pengembangan perangkat cerdas yang mengintegrasikan metode deteksi visual dan mekanisme pengusiran berbasis gelombang suara untuk pengendalian hama Wereng Batang Cokelat (WBC). Sistem ini dirancang untuk memanipulasi perilaku fototaksis (reaksi terhadap cahaya) dan fonotaksis negatif (reaksi menjauh terhadap suara) dari hama sasaran, sebuah pendekatan ekologi kimiawi yang terbukti efektif dalam memengaruhi orientasi serangga tanpa kontak fisik langsung[13]. Perangkat beroperasi secara otonom dengan menyinergikan sumber cahaya spektrum spesifik, sensor citra digital, dan modul emisi gelombang ultrasonik, sehingga mampu melakukan siklus pemantauan, identifikasi, dan mitigasi hama secara *real-time* tanpa memerlukan intervensi manual di lapangan.

Secara prinsip kerja, alat ini mengeksploitasi perilaku fototaksis positif WBC, yaitu kecenderungan serangga untuk mendekati sumber cahaya dengan panjang gelombang tertentu, khususnya pada rentang spektrum biru hingga kuning (450–600 nm) yang diketahui memiliki daya tarik visual tertinggi bagi hama nokturnal[15]. Unit penerangan ini dipasang pada ketinggian strategis di area persawahan dan diatur untuk aktif pada periode intensitas cahaya lingkungan rendah. Ketika hama tertarik mendekati zona perangkat cahaya, sensor kamera resolusi tinggi yang terintegrasi akan memindai area tersebut secara kontinu. Citra yang tertangkap kemudian diproses oleh unit komputasi tertanam (*embedded system*) menggunakan algoritma visi komputer berbasis pembelajaran mendalam (*deep learning*). Model ini telah dilatih untuk melakukan segmentasi dan klasifikasi objek guna mengidentifikasi morfologi wereng berdasarkan parameter bentuk, dimensi, dan warna tubuh dengan tingkat presisi tinggi, memisahkannya dari serangga non-target[14].

Apabila sistem mengonfirmasi keberadaan koloni WBC dengan tingkat akurasi yang memadai, unit kendali akan secara otomatis memicu modul repelensi akustik. Modul ini memancarkan gelombang ultrasonik pada frekuensi tinggi (di atas 20 kHz) yang dirancang untuk menciptakan gangguan fisiologis atau stres pada hama (*acoustic stress*)[16]. Mekanisme ini memanfaatkan sensitivitas sistem syaraf serangga terhadap frekuensi tertentu, yang bertujuan memicu respon fonotaksis negatif atau disorientasi navigasi, sehingga mendorong hama untuk menjauh dari area tanaman yang dilindungi. Dengan demikian, alat ini bertindak sebagai pengendali fisik aktif yang bebas dari residu kimia berbahaya.

Keseluruhan arsitektur sistem dikendalikan oleh unit mikrokontroler berdaya rendah yang berfungsi sebagai otak pemrosesan pusat. Unit ini mengatur manajemen daya, siklus tugas (*duty cycle*) penerangan, akuisisi data visual, serta durasi dan interval emisi gelombang ultrasonik. Data hasil deteksi, yang mencakup penghitungan populasi dan waktu aktivitas hama, ditransmisikan melalui modul komunikasi nirkabel jarak jauh ke server basis data terpusat. Informasi ini disajikan melalui antarmuka dasbor pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT), memungkinkan petani dan peneliti untuk memantau dinamika populasi hama secara aktual[21]. Guna menjamin kemandirian operasional (*autonomous operation*), perangkat dilengkapi dengan sistem manajemen daya mandiri yang bersumber dari panel surya dan penyimpan daya baterai, memastikan efisiensi energi yang optimal di lahan pertanian.

Dari perspektif ekologi, pendekatan ini mendukung prinsip Pertanian Berkelanjutan (*Sustainable Agriculture*) karena meminimalkan penggunaan pestisida sintetis, menjaga keseimbangan musuh alami, dan tidak mencemari lingkungan tanah maupun air. Selain fungsi pengendalian, integrasi pencatatan data digital menjadikan alat ini berfungsi sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*) yang efektif. Data tren populasi yang dihasilkan dapat menjadi landasan bagi pengambilan keputusan agronomis yang lebih presisi, mewujudkan konsep pertanian cerdas (*smart farming*) yang efisien dan ramah lingkungan[21].

Secara keseluruhan, solusi ini mengintegrasikan tiga aspek utama pengendalian hama modern, yaitu deteksi cerdas (*smart detection*), pengendalian non-kimia (*eco-*

friendly control), dan pemantauan berbasis data (IoT monitoring). Pendekatan ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem pertanian presisi yang efektif dalam menekan kerusakan akibat serangan WBC, sekaligus mendukung pertanian berkelanjutan di era digital.

1.2.2.2. Solusi 2 Pendeteksi Hama Wereng Berbasis Sensor Audio dengan Penyemprotan Insektisida Nabati Otomatis

Solusi kedua yang diusulkan adalah pengembangan sistem deteksi dini migrasi Wereng Batang Cokelat (WBC) berbasis analisis suara lingkungan (*audio sensing*) yang terintegrasi dengan mekanisme penyemprotan insektisida nabati otomatis di udara (*aerial misting*). Sistem ini memanfaatkan prinsip bioakustik bahwa setiap serangga, termasuk WBC, menghasilkan pola suara khas dari getaran sayap maupun sinyal komunikasi substrat yang dapat dibedakan dari suara serangga lain atau kebisingan alam sekitar[13]. Dengan menggunakan teknologi sensor audio berpresisi tinggi dan algoritma analisis sinyal digital, sistem ini dirancang untuk mendeteksi peningkatan aktivitas akustik wereng secara *real-time* sebagai indikasi awal dari pergerakan atau migrasi populasi hama sebelum terjadi kolonisasi pada tanaman padi.

Secara teknis, sistem terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu mikrofon terarah (*directional microphone*) yang sensitif terhadap frekuensi rendah hingga menengah, unit pemroses sinyal digital (*Digital Signal Processing*), serta modul aktuator penyemprot otomatis yang berisi larutan insektisida nabati. Sensor audio akan bekerja secara kontinu memantau lingkungan sawah dan merekam suara dalam rentang frekuensi spesifik yang telah ditentukan berdasarkan penelitian karakteristik fonik wereng, yang umumnya berada pada spektrum frekuensi rendah (di bawah 5 kHz) untuk sinyal getaran tubuh[22]. Data suara mentah yang diterima akan diolah melalui proses penyaringan (*filtering*), transformasi domain waktu ke frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), dan pengenalan pola (*pattern recognition*). Ekstraksi fitur suara, seperti *Mel Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), dipadukan dengan model pembelajaran mesin ringan (*lightweight machine learning*) untuk mengklasifikasikan pola getaran khas WBC dengan akurasi tinggi dan memisahkannya dari gangguan suara latar[21].

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{i2\pi kn/N}$$

Rumus 1. 1 Fast Fourier Transform (FFT) [21]

Ketika sistem mendeteksi adanya peningkatan intensitas sinyal suara yang menyerupai aktivitas migrasi WBC dalam jumlah signifikan, unit pengendali akan segera mengaktifkan modul penyemprot otomatis. Penyemprotan dilakukan menggunakan formula insektisida nabati, seperti ekstrak daun mimba (*Azadirachta indica*), serai wangi, atau bawang putih. Bahan-bahan ini dipilih karena sifatnya yang *biodegradable*, aman bagi lingkungan, tidak mencemari ekosistem perairan sawah, dan memiliki toksisitas rendah terhadap musuh alami wereng[23]. Mekanisme penyemprotan diarahkan ke udara sekitar area deteksi untuk membentuk lapisan aroma repelen atau penghalang alami (*olfactory barrier*). Hal ini bertujuan mengganggu orientasi navigasi dan aktivitas terbang WBC, sekaligus menurunkan potensi hama untuk hinggap dan menetap di area pertanian tersebut.

Sistem ini bekerja secara otomatis dan adaptif, di mana modul pengendali akan menyesuaikan frekuensi dan durasi penyemprotan berdasarkan tingkat intensitas aktivitas akustik yang terdeteksi. Data hasil deteksi dan log aktivitas penyemprotan dikirimkan secara nirkabel ke server pusat atau dasbor pemantauan berbasis web, sehingga petani dapat memantau dinamika populasi WBC dari waktu ke waktu serta mengatur ambang batas sensitivitas sistem sesuai kebutuhan. Dalam implementasinya di lapangan, sistem ini didukung oleh catu daya mandiri yang terdiri dari panel surya dan baterai penyimpan energi, memungkinkannya beroperasi secara otonom dan hemat energi tanpa ketergantungan pada jaringan listrik eksternal[23].

Kelebihan utama dari solusi ini terletak pada kemampuan deteksi dini berbasis suara yang mampu mengenali potensi serangan presimptomatik, yaitu sebelum populasi WBC terlihat secara visual atau menyebabkan kerusakan fisik (*hopperburn*). Pendekatan berbasis audio ini sangat efektif untuk pemantauan wilayah luas dengan jarak pandang terbatas, serta memungkinkan pengendalian

dilakukan secara preventif, bukan reaktif. Selain itu, penggunaan insektisida nabati otomatis menjadikan sistem ini ramah lingkungan, sejalan dengan prinsip Pengendalian Hama Terpadu (PHT), sekaligus efisien dari segi biaya operasional dan keamanan ekosistem jangka panjang [23]. Secara keseluruhan, solusi ini menghadirkan integrasi antara analisis sinyal digital, kecerdasan buatan, dan otomasi pertanian yang memberikan pendekatan inovatif dalam mitigasi dini hama WBC.

Secara keseluruhan, solusi ini menghadirkan integrasi antara analisis sinyal digital, kecerdasan buatan, dan otomasi pertanian, yang memberikan pendekatan inovatif dalam mitigasi dini hama WBC. Dengan sistem ini, petani dapat memperoleh alat bantu berbasis teknologi yang mampu memberikan peringatan dan respons otomatis, menjaga produktivitas pertanian tetap stabil, serta mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia yang berlebihan.

1.2.2.3 Solusi 3 Pendeteksi Wereng Batang Cokelat Berbasis Senyawa Bau (VOC) Tanaman dengan Repellent Senyawa Serai dan Kemangi

Solusi ketiga yang diusulkan adalah pengembangan sistem deteksi dini keberadaan wereng batang coklat (WBC) berbasis analisis gas atau senyawa volatil (*Volatile Organic Compounds/VOC*) yang dilepaskan oleh tanaman padi sebagai respons terhadap aktivitas tusukan dan penghisapan cairan sel oleh hama. Secara fisiologis, tanaman padi yang mengalami serangan WBC akan memicu respons stres biotik dengan menghasilkan senyawa kimia volatil tertentu sebagai bentuk mekanisme pertahanan alami tanaman[24]. Senyawa-senyawa ini dapat dimanfaatkan sebagai indikator biologis awal untuk mendeteksi keberadaan WBC bahkan sebelum gejala visual seperti daun menguning atau mengering muncul di lapangan[25].

Secara teknis, sistem ini terdiri dari sensor gas sensitif senyawa organik volatil, modul pemroses berbasis mikrokontroler, serta modul komunikasi nirkabel untuk pengiriman data secara real-time. Sensor gas ditempatkan di sekitar kanopi tanaman padi untuk memantau perubahan komposisi udara akibat emisi senyawa stres tanaman. Data dari sensor diolah melalui proses kalibrasi, penyaringan sinyal (*filtering*), normalisasi, dan ekstraksi fitur untuk membedakan VOC akibat

serangan WBC dengan VOC akibat faktor lingkungan lain seperti suhu, kelembaban, dan pemupukan[26]. Selanjutnya, algoritma klasifikasi berbasis *machine learning* ringan digunakan untuk mengidentifikasi pola khas serangan WBC secara otomatis.

Ketika sistem mendeteksi pola bau yang mengindikasikan keberadaan WBC, modul pengendali akan mengaktifkan mekanisme pengendalian preventif berupa pelepasan senyawa penolak alami berbasis aroma nabati. Pengendalian ini bertujuan untuk mengganggu orientasi kimia WBC serta mengalihkan pergerakan hama menjauh dari tanaman utama tanpa membunuh organisme non-target[27]. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian hama dilakukan secara selektif, ramah lingkungan, dan sejalan dengan prinsip Pengendalian Hama Terpadu (PHT).

Output utama dari sistem ini adalah aktivasi modul pelepasan aroma repellent berbasis ekstrak serai dapur (*Cymbopogon citratus*) dan kemangi (*Ocimum* sp.) ketika pola VOC akibat serangan WBC terdeteksi. Serai dapur dan kemangi diketahui mengandung senyawa atsiri seperti sitronelal, sitronelol, eugenol, dan linalool yang bersifat penolak bagi berbagai jenis serangga, termasuk wereng[27]. Modul aktuator akan menyemprotkan larutan repellent tersebut dalam bentuk kabut halus ke udara di sekitar area terdeteksi, bukan langsung ke jaringan tanaman, sehingga terbentuk penghalang aroma alami yang mengganggu sistem penciuman, orientasi terbang, dan aktivitas makan WBC. Dengan terganggunya navigasi dan perilaku biologis WBC, potensi wereng untuk menetap, berkembang biak, serta menyebar di area persawahan dapat ditekan secara signifikan.

Sistem bekerja secara otomatis dan adaptif, di mana intensitas pelepasan repellent akan disesuaikan berdasarkan konsentrasi VOC yang terdeteksi. Seluruh data hasil pemantauan dikirimkan ke sistem monitoring berbasis web atau aplikasi bergerak sehingga petani dapat memantau tingkat serangan WBC secara spasial dan temporal sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian lanjutan[28].

Keunggulan solusi ini terletak pada kemampuannya dalam mendeteksi serangan WBC secara sangat dini melalui respons fisiologis tanaman padi, bukan hanya melalui pengamatan visual terhadap hama. Pendekatan berbasis VOC

memungkinkan pengendalian dilakukan sebelum populasi WBC berkembang secara masif dan sebelum kerusakan berat pada tanaman terjadi. Dengan demikian, solusi ini berpotensi menurunkan intensitas serangan, mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia, dan menjaga keseimbangan ekosistem sawah secara berkelanjutan[29].

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Dalam proses analisis usulan solusi, metode *House of Quality* (HoQ) digunakan untuk memastikan kesesuaian antara rancangan solusi dan kebutuhan pengguna. Berdasarkan analisis tersebut, dilakukan penilaian terhadap sembilan usulan solusi yang dikelompokkan menurut jenis hama sasaran. Setiap sub-sistem terdiri dari tiga alternatif solusi yang dievaluasi berdasarkan kebutuhan pengguna.

		Rating (1 = low, 5 = high)	Percent of costumer importance rating	Functional Requirement						
				▲	▲	▲	▲	▲	▲	
				Sensing Capability	Computation Method	Computing performance	Response Capability	Notification Capability	Easy to Use	
Constraint	Low Cost	3	14%	▲	■	▲	○	■	●	
	Tahan Cuaca	5	24%	●	■	○	■	■	■	
	Autonomous Operation	5	24%	■	●	○	●	○	●	
	Standar dan Regulasi	3	14%	■	○	■	○	■	■	
	Development Timeline	5	24%	○	●	○	○	▲	■	
Importance Rating				43	59	48	58	20	40	
Percent of Importance				16,04%	22,01%	17,91%	21,64%	7,46%	17,78%	
Solusi	Solusi 1			●	○	●	●	●	○	4.346
	Solusi 2			○	○	●	○	●	○	3.592
	Solusi 3			○	○	●	▲	●	○	3.159

Gambar 1. 2 Tabel House of Quality

Keterangan

:

Relationship :	
	Strong = 5
	Fair = 3
	Weak = 1

Berikut adalah perhitungan perbandingan solusi dengan fitur atau fungsi utama yang dimiliki sistem agar dapat bekerja sesuai dengan tujuan perancangannya :

Solusi 1

$$(5 \times 0,1604 + (3 \times 0,2201) + (5 \times 0,1791) + (5 \times 0,2164) + (5 \times 0,0746) + (3 \times 0,1778) = 4.346$$

Solusi 2

$$(5 \times 0,1604 + (3 \times 0,2201) + (5 \times 0,1791) + (5 \times 0,2164) + (5 \times 0,0746) + (3 \times 0,1778) = 3.592$$

Solusi 3

$$(5 \times 0,1604 + (3 \times 0,2201) + (5 \times 0,1791) + (5 \times 0,2164) + (5 \times 0,0746) + (3 \times 0,1778) = 3.159$$

Berikut adalah penjelasan mengenai HOQ (*House Of Quality*) untuk permasalahan ini:

Fitur *Low Cost* (Biaya Rendah) memiliki hubungan yang sangat rendah dengan *Sensing capability* dengan nilai 1 karena semakin tinggi kualitas dari sensor dan bagaimana *sensing capability* bekerja, akan semakin tinggi pula biaya yang dibutuhkan. Hal tersebut juga sama dengan *computing performance* yang memiliki nilai hubungan rendah bernilai 1 karena Peningkatan performa komputasi umumnya memerlukan penggunaan prosesor atau perangkat keras dengan spesifikasi tinggi, yang secara langsung meningkatkan biaya pengadaan sistem.

Berbeda dengan hubungan *response capability* yang memiliki nilai sedang yaitu 3 karena respon atau aktuator yang digunakan oleh sistem tidak mengalami terlalu jauh perbedaan harga dari komponen yang dipakai. Hubungan ini menunjukkan kalau harga dari sistem akan sangat menentukan dari segi *sensing capability* dan *computing performance*, namun untuk *respon capability* tidak mengalami terlalu jauh perbedaan signifikan dari segi harga untuk aktuatornya. *Easy to Use* memiliki hubungan yang kuat yakni bernilai 5, dikarenakan kemudahan penggunaan sangat berkaitan dengan biaya rendah karena antarmuka yang sederhana akan mengurangi biaya pengembangan, integrasi, serta pelatihan pengguna.

Fitur Tahan cuaca diberi nilai 5 atau memiliki hubungan yang sangat kuat dengan *sensing capability* karena semakin tahan sensor terhadap hujan, panas, dan debu maka semakin baik kualitas input yang dihasilkan sehingga proses deteksi dapat berjalan secara optimal meskipun perangkat dioperasikan pada kondisi lingkungan yang kurang ideal. *Computing performance* menunjukkan hubungan sedang, karena komponen *hardware* yang kokoh akan menjaga stabilitas operasional sistem.

Fitur *Autonomous Operation* memiliki diberi nilai 5 atau memiliki hubungan yang sangat kuat dengan *computation method* dan *response capability* karena tingkat otomatisasi pengusiran hama pada lahan pertanian setelah deteksi valid sangat ditentukan oleh metode komputasi atau algoritma yang digunakan dalam pengambilan keputusan. Selain itu, *Response Capability* juga memiliki hubungan sangat kuat dengan *autonomous operation*, karena sistem harus merespons kondisi lingkungan secara otomatis dan tepat waktu. Sedangkan pada *Computing Performance*, dan *Notification Capability* memiliki hubungan sedang, karena ketiganya berperan sebagai pendukung agar sistem otonom dapat berjalan secara efektif, meskipun bukan faktor penentu utama. *Easy to Use* memiliki hubungan kuat yakni 5 dengan *Autonomous Operation*, karena pada sistem yang berjalan secara otomatis, maka akan semakin mudah untuk digunakan bagi pengguna atau petani.

Fitur standar keamanan memiliki hubungan sedang dengan *response capability*, karena respon pengusiran yang terlalu kuat atau intens berpotensi menimbulkan gangguan terhadap manusia, satwa non-target, maupun lingkungan sekitar lahan pertanian. Oleh karena itu, respon sistem perlu dikendalikan agar tetap berada

dalam batas aman. Selain itu, *Computation method* juga memiliki hubungan sedang dengan standar keamanan, karena pemilihan metode komputasi yang tepat berperan dalam mengatur tingkat respon pengusiran sehingga tetap efektif namun tidak berlebihan dan tidak menimbulkan dampak negatif.

Selanjutnya, Alat dapat diselesaikan dalam waktu 6 bulan memiliki hubungan yang sangat kuat dengan *Computation method* dengan nilai 5 karena tingkat kompleksitas metode komputasi sangat mempengaruhi durasi pengembangan, pelatihan, dan pengujian sistem. Selain itu, fitur ini memiliki hubungan sedang dengan *sensing capability*, *computing performance*, dan *response capability* karena kemudahan implementasi serta ketersediaan komponen di pasaran dapat mempercepat proses pengembangan sedangkan *Notification Capability* memiliki hubungan yang lemah, karena sistem notifikasi tidak berpengaruh besar terhadap waktu pengembangan karena bukan bagian utama dari proses deteksi. Sistem tetap dapat berjalan tanpa notifikasi dan dapat diimplementasikan pada tahap akhir pengembangan tanpa mempengaruhi durasi pengembangan inti sistem.

Selanjutnya dilakukan analisis perbandingan setiap solusi dengan fitur atau fungsi utama yang dimiliki sistem agar dapat bekerja sesuai dengan tujuan perancangannya

Solusi 1 : Pendeteksi dan Pengendali Berbasis Kamera Memanfaatkan Sifat Fototaksis dan Fonotaksis Hama Wereng

Solusi pertama menunjukkan keterkaitan yang sangat kuat (nilai 5) pada *sensing capability*, karena sistem ini mengandalkan sensor kamera resolusi tinggi dan algoritma visi komputer berbasis *deep learning* untuk mendeteksi morfologi Wereng Batang Cokelat secara presisi. Pendekatan visual memungkinkan identifikasi hama secara spesifik berdasarkan bentuk, warna, dan ukuran tubuh, sehingga kualitas input data menjadi sangat tinggi. Pada *computation method*, solusi ini memiliki hubungan sedang (nilai 3) karena penggunaan model pembelajaran mendalam membutuhkan proses komputasi yang relatif kompleks, namun masih dapat dioptimalkan pada sistem tertanam berdaya rendah. Dari sisi *computing performance*, hubungan yang diberikan adalah kuat (nilai 5), sebab

pemrosesan citra dan inferensi model membutuhkan kinerja komputasi yang stabil agar sistem mampu bekerja secara *real-time*.

Selanjutnya, *response capability* juga memiliki hubungan kuat (nilai 5) karena sistem secara otomatis mengaktifkan modul ultrasonik sebagai respon langsung setelah deteksi hama terkonfirmasi, tanpa intervensi manusia. *Notification capability* pada solusi ini bernilai kuat (nilai 5) karena data deteksi dikirimkan ke dasbor IoT sehingga petani dapat memantau kondisi lapangan secara aktual. Namun, pada *easy to use* hubungan dinilai sedang (nilai 3) karena penggunaan sistem berbasis kamera dan dasbor digital memerlukan tingkat pemahaman teknologi tertentu dari pengguna. Kombinasi nilai ini menghasilkan skor akhir 4,346, yang menunjukkan bahwa Solusi 1 unggul dari sisi akurasi deteksi, respon otomatis, dan kapabilitas monitoring.

Solusi 2 : Pendeteksi Hama Wereng Berbasis Sensor Audio dengan Penyemprotan Insektisida Nabati Otomatis

Solusi kedua memiliki hubungan sedang (nilai 3) pada *sensing capability*, karena deteksi berbasis suara lingkungan mampu mengenali aktivitas wereng secara dini, namun akurasinya masih dipengaruhi oleh gangguan suara latar di area persawahan. Pada *computation method*, hubungan dinilai sedang (nilai 3) karena sistem menggunakan analisis sinyal digital seperti FFT dan ekstraksi fitur MFCC yang relatif lebih ringan dibanding visi komputer, sehingga kompleksitas komputasinya berada pada tingkat menengah. *Computing performance* memperoleh hubungan kuat (nilai 5) karena pemrosesan sinyal audio dan klasifikasi pola harus dilakukan secara kontinu agar sistem dapat mendeteksi migrasi WBC tepat waktu.

Dari sisi *response capability*, solusi ini menunjukkan hubungan sedang (nilai 3) karena respon berupa penyemprotan insektisida nabati dilakukan secara otomatis namun tetap dibatasi oleh pengaturan durasi dan intensitas semprot. *Notification capability* juga bernilai kuat (nilai 5) karena sistem menyediakan data log deteksi dan aktivitas penyemprotan yang dapat diakses melalui dasbor pemantauan. Sementara itu, *easy to use* memiliki hubungan sedang (nilai 3) karena meskipun sistem bekerja otomatis, pengaturan ambang batas sensitivitas tetap memerlukan

keterlibatan pengguna. Berdasarkan kombinasi nilai tersebut, Solusi 2 memperoleh skor 3,592, menunjukkan solusi yang seimbang antara kemampuan deteksi dini, efisiensi komputasi, dan kemudahan implementasi lapangan.

Solusi 3 : Pendeteksi Wereng Batang Cokelat Berbasis Senyawa Bau (VOC) Tanaman dengan Repellent Senyawa Serai dan Kemangi

Solusi ketiga memiliki hubungan sedang (nilai 3) pada *sensing capability*, karena sensor gas VOC mampu mendeteksi respons fisiologis tanaman secara dini, namun masih memerlukan proses kalibrasi untuk membedakan emisi akibat serangan hama dan faktor lingkungan lain. Pada *computation method*, hubungan dinilai sedang (nilai 3) karena sistem menggunakan algoritma klasifikasi ringan untuk mengenali pola VOC, sehingga kompleksitas komputasinya relatif moderat. *Computing performance* memperoleh hubungan kuat (nilai 5) karena sistem harus memproses data sensor secara kontinu untuk memastikan deteksi dini berjalan optimal.

Untuk *response capability*, solusi ini menunjukkan hubungan lemah (nilai 1) karena respon yang diberikan berupa pelepasan aroma repellent bersifat preventif dan tidak menghasilkan efek pengusiran secepat metode fisik atau akustik. *Notification capability* memiliki hubungan kuat (nilai 5) karena hasil deteksi dan tingkat serangan dikirimkan ke sistem monitoring berbasis web sebagai dasar pengambilan keputusan. Adapun *easy to use* dinilai sedang (nilai 3) karena sistem bekerja otomatis, namun masih memerlukan pemahaman dasar terkait interpretasi data VOC. Dengan kombinasi tersebut, Solusi 3 memperoleh skor 3,159, yang mencerminkan keunggulan pada deteksi sangat dini dan keberlanjutan lingkungan, namun dengan respon yang relatif lebih lambat dibanding solusi lainnya.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *House of Quality* (HoQ) dengan mempertimbangkan fitur dasar dan konstrain, hasil analisis menunjukan bahwa sistem pengendalian hama otomatis pada lahan pertanian berbasis deteksi dan respon *real-time* merupakan solusi utama dalam memenuhi kebutuhan sistem.

Solusi satu, yaitu Pendeteksi dan Pengendali Hama Wereng Berbasis Fototaksis dan Fonotaksis, dipilih sebagai solusi utama untuk mengatasi serangan hama Wereng Batang Cokelat (WBC) karena menawarkan pendekatan pengendalian yang paling presisi dan berkelanjutan secara ekologis. Dalam solusi ini, sistem mengintegrasikan mekanisme ganda yang memanipulasi perilaku alamiah serangga, yaitu fototaksis positif untuk menarik hama menggunakan spektrum cahaya spesifik dan fonotaksis negatif untuk mengusir hama menggunakan gelombang ultrasonik. Pendekatan ini dinilai unggul karena mampu melakukan siklus pemantauan, identifikasi, dan mitigasi hama secara otonom tanpa kontak fisik langsung, menjadikannya metode yang efektif dalam memutus siklus hidup hama di area pertanian tanpa merusak tanaman padi secara fisik.

Keunggulan teknis utama dari solusi ini terletak pada kemampuan *Sensing Capability* yang sangat tinggi melalui penerapan algoritma visi komputer berbasis *Deep Learning*. Berbeda dengan metode deteksi suara atau gas yang rentan terhadap gangguan lingkungan, penggunaan kamera resolusi tinggi memungkinkan sistem untuk memverifikasi morfologi wereng secara visual dengan presisi mutlak, membedakannya dari serangga non-target. Ketika sistem mengonfirmasi keberadaan koloni WBC, unit kendali memberikan respons seketika (*Response Capability*) dengan memicu modul repelensi akustik. Hal ini memastikan bahwa tindakan pengendalian hanya dilakukan saat benar-benar diperlukan, menjaga efisiensi energi sekaligus memberikan perlindungan aktif yang tepat sasaran.

Sistem ini juga memiliki keunggulan kompetitif yang signifikan dalam aspek Habituation Resistance (Ketahanan Terhadap Habituasi). Pengendalian hama berbasis kimia atau aroma sering kali gagal dalam jangka panjang karena hama menjadi kebal atau terbiasa (desensitisasi). Sebaliknya, solusi ini memancarkan gelombang ultrasonik di atas 20 kHz yang dirancang untuk menciptakan stres fisiologis (*acoustic stress*) pada sistem saraf serangga. Pola durasi dan interval emisi gelombang ini diatur secara dinamis oleh mikrokontroler, sehingga mencegah hama untuk beradaptasi atau menoleransi gangguan tersebut. Mekanisme dinamis ini menjamin efektivitas pengusiran yang konsisten sepanjang musim tanam,

sebuah fitur yang tidak dimiliki oleh solusi berbasis insektisida ataupun *repellent* statis.

Selain itu, solusi ini menawarkan kelebihan operasional berupa Zero Consumables (Tanpa Bahan Habis Pakai), yang mendukung prinsip pertanian berkelanjutan. Perangkat beroperasi secara mandiri menggunakan daya dari panel surya dan baterai, tanpa memerlukan pengisian ulang cairan pestisida atau bahan kimia lainnya secara berkala. Hal ini tidak hanya meniadakan residu kimia berbahaya di lahan pertanian, tetapi juga secara drastis mengurangi beban perawatan (*maintenance*) bagi petani karena tidak ada risiko kegagalan sistem akibat kehabisan bahan operasional. Data hasil pemantauan kemudian ditransmisikan ke dasbor IoT, memungkinkan petani memantau tren populasi secara transparan dan mengambil keputusan agronomis berbasis data.

Secara keseluruhan, solusi ini dipilih karena kemampuannya menyeimbangkan kecanggihan teknologi deteksi visual dengan metode pengendalian fisik yang ramah lingkungan. Integrasi antara kecerdasan buatan untuk identifikasi yang akurat, gelombang ultrasonik dinamis untuk mencegah resistensi hama, serta kemandirian energi tanpa ketergantungan pada bahan kimia, menjadikannya pilihan terbaik untuk mewujudkan sistem pertanian cerdas (*Smart Farming*) yang efektif menekan populasi WBC sekaligus menjaga kelestarian ekosistem sawah jangka panjang.

