

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Pengenalan Masalah

Padi (*Oryza sativa*) merupakan sumber makanan pokok yang memiliki peranan sangat penting dalam kehidupan masyarakat Indonesia. Sekitar 90%–95% penduduk mengandalkan beras sebagai sumber karbohidrat utama, sehingga padi menjadi komoditas strategis dalam menjaga ketahanan pangan nasional, ekonomi dan sosial masyarakat [1].

Menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS), luas panen padi di Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar 10,05 juta hektare dengan produksi padi (gabah kering giling atau GKG) sebanyak 53,14 juta ton GKG. Jumlah ini menurun 838 ribu ton dibanding tahun 2023 akibat faktor iklim dan gangguan hama pemakan bulir padi yang dapat merusak hasil panen [2]. Para petani melakukan berbagai cara untuk melindungi padi dari serangan hama burung dengan menggunakan orang-orangan sawah atau tali plastik, dan kaleng yang digantung mengelilingi area persawahan untuk mengusir hama burung. Namun metode ini menuntut petani secara langsung untuk turun ke sawah dan menjaga tanaman padi secara terus menerus sepanjang hari., terutama pada jam kritis yaitu pukul 07.00–10.00 dan 14.00–17.00 [3].

Hama burung, khususnya burung pipit (*Lonchura spp.*) paling intens terjadi pada fase pengisian bulir padi menjelang panen, ketika karbohidrat pada bulir tinggi dan menarik perhatian kawanan burung. Kondisi ini membuat petani untuk terus berjaga di sawah dalam rentang waktu yang lama [8]. Berdasarkan Data Balai Besar Peramalan Hama dan Penyakit Tanaman (BBPOPT) Kementerian Pertanian pada tahun 2023 menunjukkan bahwa serangan burung pipit dapat menurunkan produksi padi hingga 50% apabila tidak ditangani dengan cepat dan efektif [4]. Namun, beberapa faktor eksternal, seperti jarak sawah dari pemukiman atau keterbatasan jumlah tenaga kerja memperburuk kemampuan petani untuk merespons serangan burung dengan cepat sehingga sistem pengendalian menjadi

tidak optimal dan melelahkan [5]. Permasalahan ini tidak hanya berdampak pada petani, tetapi terdapat beberapa pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung terhadap keberhasilan pengendalian hama burung pada tanaman padi 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 tekanan kebijakan subsidi dan ketahanan pangan akibat kerugian produksi nasional yang menurun. Jika teratasi, produksi beras nasional meningkat, sehingga kebijakan ketahanan pangan lebih stabil dan kebutuhan impor dapat ditekan.

3. Masyarakat

Masyarakat terdampak secara tidak langsung melalui kenaikan harga beras dan menurunnya ketersediaan pangan. Jika pengendalian hama lebih efektif, pasokan beras akan terjaga dan harga menjadi stabil.

### 1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Padi termasuk kedalam genus *Oryza* merupakan komoditas pangan utama yang tumbuh optimal di daerah tropis dan subtropis pada kisaran 45° LU hingga 45° LS dengan siklus hidup padi sekitar 3 - 6 bulan, tergantung varietas dan kondisi lingkungan. Tanaman padi memiliki dua kelompok organ utama, yaitu vegetatif dan generatif. Organ vegetatif mencakup daun dan batang, sementara organ generatif terdiri atas malai, gabah, dan bunga [7].

Kajian terbaru melaporkan bahwa serangan burung pada padi umumnya merupakan burung pemakan biji dari keluarga *Estrildidae*, seperti burung pipit (*Lonchura striata*) dan burung bondol (*Lonchura spp.*) dengan cara bergerombol dan mampu memakan bulir padi sebanyak 10% dari berat tubuhnya per hari,

setara dengan  $\pm 5$  gram per ekor [3]. Di Uganda, burung pemakan padi dilaporkan mampu memangkas hasil panen antara 30% hingga 100% apabila tidak dikendalikan dengan baik [9]. Selain itu, hama burung pada padi biasanya terjadi pada fase generatif padi berumur 70–80 hari, yaitu saat bulir padi mulai matang, terutama pada pagi hari (06.00–10.00) dan sore hari (15.00–18.00) sehingga menuntut kehadiran petani di lapangan [3]. Burung juga menggunakan komunikasi vokal untuk memanggil kawanan lain, sehingga serangan kecil bisa berkembang menjadi serangan besar dalam waktu singkat [9].

Dari sisi sensitivitas, Beberapa faktor sensorik menjadi dasar perilaku burung untuk bertahan atau menghindar. Studi di Malaysia melaporkan bahwa burung pipit mulai terganggu pada suara dengan intensitas  $\geq 70$  dB(A). Perangkat air-horn dengan intensitas sekitar 100 dB(A) terbukti mampu menakuti burung hingga radius 40 meter pada siang hari [10]. Selain itu, Burung memiliki sel kerucut mata yang sensitif terhadap warna hijau dan kilatan cahaya. Teknologi laser hijau ( $\approx 532$  nm) dan lampu strobo terbukti mampu menghalau burung di area sawah [11]. Tidak hanya suara dan cahaya, stimulus visual bergerak juga menjadi penghalau efektif. Burung pipit lebih terganggu oleh objek bergerak yang tidak terduga, seperti model predator berbentuk layang-layang elang atau pita reflektif yang berkibar [13]. Penelitian lapangan di Malaysia melaporkan bahwa pemasangan layang-layang elang bergerak mampu menurunkan tingkat kunjungan burung ke area sawah hingga 65% [13].

Sebelumnya, telah terdapat solusi untuk mengurangi serangan hama burung pada lahan pertanian padi diantaranya :

**Tabel 1.1, Solusi yang Telah Ada**

| No | Solusi              | Kelebihan                                        | Kekurangan                                  | Referensi |
|----|---------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------|
| 1. | Metode tradisional: | Biaya rendah, mudah dibuat dan dipasang, efektif | Burung cepat beradaptasi terhadap pola yang | [6]       |

|    |                                                |                                                                                                                                      |                                                                                                             |      |
|----|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|    | Orang-Orangan sawah                            | saat angin bertiup kencang                                                                                                           | statis sehingga efektivitas menurun, tidak bekerja saat angin tidak bertiup kencang.                        |      |
| 2. | Keleng dan Tali dalam pengendalian hama burung | Mudah dibuat dan dipasang, efektif saat angin bertiup kencang                                                                        | Efektivitasnya menurun seiring waktu serta sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan intervensi manual. | [6]  |
| 3. | Kincir angin berbunyi                          | Mudah dibuat dari bahan sederhana dan Menghasilkan bunyi ribut otomatis saat angin bertiup kencang, sehingga efektif menakuti burung | Kinerjanya sangat bergantung pada kondisi angin                                                             | [12] |

### 1.1.2 Analisis Masalah dan *Constraint*

Berikut pembahasan masalah yang diajukan dalam beberapa aspek :

#### 1. Aspek Ekonomi

Keterbatasan respon manual petani terhadap serangan burung 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.

## 2. Aspek Waktu & Tenaga Kerja

Metode penghalauan manual memerlukan kehadiran petani secara terus-menerus di sawah. Aktivitas ini menyita banyak waktu dan tenaga, terutama pada jam-jam serangan burung, sehingga mengurangi efisiensi kerja dan mengganggu kegiatan pertanian lainnya.

## 3. Aspek Lingkungan

Metode penghalauan manual yang sering bersifat reaktif (bahan kimia) tertentu dan kurangnya pengendalian hama dapat mempengaruhi keseimbangan ekosistem, termasuk populasi burung lain dan kondisi lahan pertanian.

## 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. 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 *constrain* 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, 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, 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*.

#### 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 sejumlah kebutuhan yang harus dipenuhi untuk mengatasi permasalahan serangan hama burung pada tanaman padi, antara lain:

1. Alat harus mampu mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan burung pada petak sawah
2. Alat harus dapat memberikan respon pengusiran setelah deteksi
3. Alat harus mampu memberikan informasi kepada petani apabila terdeteksi aktivitas hama burung di area petak sawah

### 1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang harus dipenuhi, maka tujuan yang ingin dicapai adalah membangun sebuah sistem yang mampu mendeteksi keberadaan burung di area persawahan dan memberikan respon pengusiran yang efektif serta dapat memberikan informasi kepada petani terkait aktivitas hama burung. Dengan demikian, sistem diharapkan mampu menanggulangi keterbatasan respon manual petani terhadap kemunculan hama burung terutama dalam hal waktu, tenaga, dan jangkauan sehingga mencegah eskalasi hama burung yang lebih luas sekaligus meminimalkan ketergantungan pada metode pengusiran manual yang melelahkan.

## 1.2 Solusi

Dari permasalahan yang telah dibahas sebelumnya, maka dapat diajukan beberapa usulan solusi yang ditawarkan. Solusi yang diharapkan adalah alat mampu mendeteksi keberadaan burung dan memberikan respon pengusiran yang efektif pada jam rawan serangan hama burung pada padi sehingga alat dapat bekerja tanpa ketergantungan pada kehadiran petani.

### 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.

a. *Sensing Capability*

Sistem mampu mendeteksi keberadaan hama burung melalui tanda-tanda fisik kehadiran atau aktivitas burung di lahan padi.

b. *Computing performance*

Sistem mampu memproses data secara *real-time* selama periode kritis untuk memantau dan mendeteksi hama burung

c. *Response Capability*

Sistem mampu memberikan respon pengusiran otomatis setelah deteksi terjadi

d. *Computation Method*

Sistem didukung oleh metode komputasi dan algoritma yang sesuai dengan pola keberadaan hama burung pada lahan padi

e. *Notification Capability*

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

f. *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

### 1.2.2.1 Solusi 1 (Deteksi Hama Burung Berbasis Pengolahan Citra Visual)

Sistem dirancang untuk mendeteksi dan mengendalikan serangan hama burung pada petak sawah saat padi masuk ke fase generatif. Sistem bekerja dengan menangkap citra visual secara *real-time* selama jam rawan serangan hama burung, seperti pagi dan sore hari, melalui kamera yang ditempatkan pada sudut petak sawah. Citra yang diperoleh kemudian diproses oleh unit pemrosesan pusat terhubung dengan kamera untuk menjalankan algoritma *deep learning*, yang mendeteksi dan mengidentifikasi burung hama secara otomatis berdasarkan pola visual khas seperti bentuk, ukuran, gerakan berkelompok dan warna coklat-keabu-abuan yang kontras dengan latar belakang hijau sawah atau permukaan air sawah.

Dalam proses komputasi, citra digital yang diterima kamera diubah menjadi representasi numerik berupa matriks piksel dengan nilai intensitas tertentu. Dalam tahap analisis citra, Bidang pengamatan dibagi ke dalam beberapa region kecil atau *grid* berukuran  $s \times s$ . Setiap *grid* bertugas untuk memprediksi apakah terdapat objek (hama burung) di dalamnya. Jika ada, maka *grid* tersebut menghasilkan kotak pembatas atau *bounding box* yang berisi informasi posisi dan ukuran objek. Secara matematis, tiap bounding box direpresentasikan oleh lima nilai utama: koordinat pusat ( $x, y$ ), ukuran lebar dan tinggi relatif terhadap grid ( $w, h$ ), serta nilai keyakinan atau *confidence score*  $c$  yang menunjukkan tingkat kepastian bahwa kotak tersebut benar-benar berisi objek [13].

Dalam tahap analisis citra, selain menghasilkan *bounding box*, setiap *grid* juga menghitung probabilitas kelas objek yang diprediksi. Nilai probabilitas menunjukkan apakah objek tersebut adalah hama burung pipit atau objek tidak relevan seperti daun padi bergoyang akibat angin atau burung non-hama seperti walet. Proses ini menegaskan bahwa kepastian suatu objek bukan hanya ditentukan oleh keberadaannya, tetapi juga oleh seberapa sesuai objek tersebut dengan ciri khas burung hama yang sudah dikenali sebelumnya.

Setelah objek dikenali, Sistem menghitung jumlah burung yang terdeteksi dan membandingkannya dengan ambang batas yang telah ditentukan. Saat jumlah burung terdeteksi melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sistem akan segera mengaktifkan perangkat pengusir hama burung secara otomatis. Mekanisme pengusiran dilakukan melalui stimulus gerakan mekanik berupa gantungan benda yang bergoyang untuk menciptakan efek fisik yang mengganggu aktivitas makan di batang padi. Stimulus ini dibatasi agar aman bagi lingkungan, dengan durasi 10-15 detik per aktivasi.

Pada tahap deteksi sering kali muncul lebih dari satu *bounding box* yang saling tumpang tindih pada satu objek. Untuk menghindari duplikasi deteksi, digunakan prinsip penyaringan berbasis nilai keyakinan tertinggi. Konsep ini memastikan bahwa dari sekian banyak prediksi, hanya kotak dengan nilai *confidence* terbesar yang dipertahankan, sedangkan kotak lainnya dihapus. Dengan demikian, sistem lebih efisien dan hasil deteksi lebih akurat [13].

Selain mendeteksi dan mengusir hama, petani dapat menerima data level aktivitas burung, misalnya “Serangan tinggi: 8 burung terdeteksi” ke perangkat petani melalui pesan teks sederhana demi mengatasi tantangan akses lahan padi yang jauh dari pemukiman. Kehadiran informasi ini membuat petani tidak lagi bergantung pada metode manual berupa patroli harian yang melelahkan, karena pengusiran hama burung dapat dilakukan secara otomatis setelah hama burung terdeteksi pada padi dan kondisi lahan dapat diketahui secara langsung tanpa harus hadir di lokasi. Dengan cara ini, perjalanan berulang yang biasanya membuang waktu dan tenaga dapat diminimalisir, sementara risiko serangan tetap terkendali. Selain itu, sistem ini dapat mencegah eskalasi serangan kecil menjadi besar melalui komunikasi vokal burung yang dapat menarik kawanan tambahan dalam 1 hingga 2 menit.

#### 1.2.2.2 Solusi 2 (Sistem Deteksi Hama Burung Berbasis Gerak dan Suara Objek)

Sistem ini menggunakan sensor gerak dan sensor suara yang akan mendeteksi aktivitas hama burung, terutama pada fase generatif yang rentan mengalami kerusakan pada padi. Sistem bekerja dengan menangkap perubahan fisik berupa aktivitas gerak burung dan pola vokal khas burung hama secara *real-time*. Sensor gerak mendeteksi perubahan fisik di sekitar tanaman sebagai indikasi kehadiran burung, sementara sensor suara menangkap gelombang akustik khas dengan rentang frekuensi suara vokal utama 2 kHz sampai 4 kHz yang berulang (*repetitive short calls*). Rentang frekuensi tersebut yang terdapat pola vokal hama burung padi terjadi berulang yang berbeda secara signifikan dari kebisingan latar seperti hembusan angin, gemericik air, atau suara binatang lain yang tidak merusak padi.

Sebelum dilakukan pengolahan data, masing masing *input* data pada sensor gerak dan sensor suara melakukan proses pra-pemrosesan untuk memastikan data yang diolah valid dan bebas dari gangguan noise. Pertama, sinyal analog mentah yang diterima dari sensor gerak diubah menjadi sinyal digital melalui konverter analog-ke-digital, sehingga dapat diolah oleh sistem komputer. Data digital ini kemudian dilakukan proses normalisasi, yang bertujuan menstandarisasi rentang nilai sinyal agar konsisten dan mudah dibandingkan. Normalisasi sangat penting untuk menghilangkan ketidaksesuaian nilai yang mungkin terjadi akibat perbedaan sensitivitas sensor atau kondisi lingkungan yang bervariasi di area sawah.

Selanjutnya, dilakukan *filtering* sinyal, khususnya untuk sensor gerak, dengan menggunakan *filter low-pass* yang mampu menghilangkan frekuensi tinggi yang biasanya merupakan noise seperti getaran angin, dedaunan bergoyang, atau getaran tanah. *Filtering* ini menjaga agar hanya sinyal relevan yang berkaitan dengan aktivitas fisik burung yang akan dipertahankan untuk diproses lebih lanjut. Proses *filtering* ini dapat mencakup implementasi filter digital yang mampu mengoreksi dan memprediksi sinyal secara optimal. Data suara mentah yang

dihasilkan dikonversi menjadi data digital. Setelah itu, untuk mengidentifikasi pola vokal burung hama, data suara diubah dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma *Short-Time Fourier Transform* (STFT). STFT memungkinkan pemrosesan sinyal secara temporal dalam *frame-frame* kecil, sehingga terjadi proses isolasi frekuensi spesifik seperti 2 hingga 4 kHz, yang merupakan ciri khas vokal burung hama dan membuang noise frekuensi rendah dan tinggi yang tidak relevan dari lingkungan seperti angin, air, atau hewan lain yang bernada berbeda [14]. Pada proses ini juga dilakukan ekstraksi fitur suara, seperti frekuensi puncak, energi spektral, dan pola berulang yang dikenal sebagai ciri vokal burung hama. Setelah hasil pra-pemrosesan pada kedua sensor didapat dalam bentuk fitur sinyal yang bersih, data ini kemudian dimasukkan ke unit pemrosesan utama untuk melakukan penggabungan data. Metode penggabungan menggunakan model probabilistik yang memperhitungkan nilai probabilitas masing-masing sensor, di mana probabilitas deteksi suara dan probabilitas deteksi gerak digabungkan menggunakan Persamaan berikut ini :

Persamaan 1.1 Probabilitas Gabungan [15]

$$C = 1 - (1 - Ps) \times (1 - Pm) \dots \dots \dots (1.1)$$

dimana  $Ps$  adalah probabilitas keberadaan burung hama berdasarkan analisis suara,  $Pm$  adalah probabilitas berdasarkan deteksi gerak, dan  $C$  merupakan probabilitas gabungan terhadap kepercayaan total sistem berdasarkan keberadaan hama pada petak sawah. Nilai  $C$  ini kemudian dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan, jika probabilitas gabungan keberadaan hama burung melebihi ambang batas maka sistem secara otomatis mengaktifkan pengusiran otomatis [15].

Di samping fungsi pengusiran otomatis, sistem juga memberikan notifikasi kepada petani berupa level atau status aktivitas hama burung sehingga membantu petani dalam mengawasi lahan tanpa harus secara rutin melakukan patroli fisik yang melelahkan dan memakan waktu, khususnya ketika lahan sawah berada jauh dari rumah petani. Penyampaian informasi yang cepat ini dapat meningkatkan efektivitas pengendalian hama burung dengan memungkinkan intervensi lebih

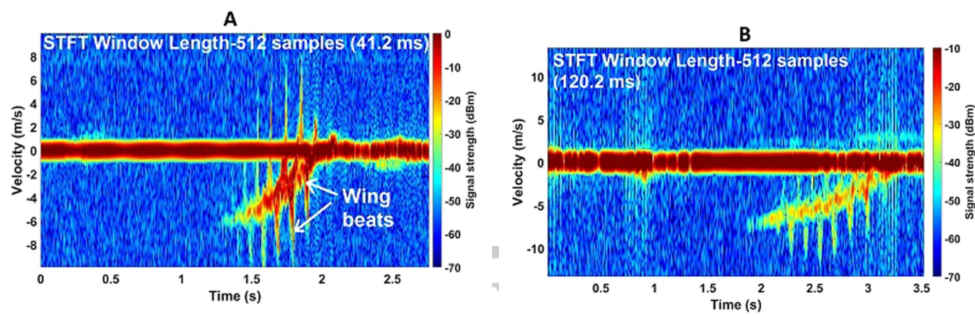
awal saat aktivitas burung meningkat dan mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja keluarga petani atau buruh musiman

### **1.2.2.3 Solusi 3 : (Deteksi Hama Burung Berbasis Radar Gelombang Mikro)**

Solusi dirancang dengan pendekatan berbasis radar gelombang mikro untuk mendeteksi kehadiran hama burung pada petak sawah secara otomatis dan memberikan respons pengusiran terarah. Unit radar diposisikan pada beberapa titik strategis di sekitar petak sawah. Dimana Setiap unit mencakup satu radar gelombang mikro, unit pemrosesan, dan unit pengusir terintegrasi. Sensor radar dalam setiap unit terus memindai area sawah di sekitarnya. Jika burung pipit terdeteksi hinggap di sawah, sistem segera mengenali kehadirannya dan mengaktifkan mekanisme pengusiran untuk mengusir burung tersebut.

Radar bekerja secara berkala memancarkan pulsa gelombang elektromagnetik dan ketika gelombang tersebut mengenai suatu objek seperti burung, sebagian energinya akan dipantulkan kembali ke antena penerima [39]. Pantulan inilah yang menjadi sumber data utama untuk dianalisis oleh sistem. Data sinyal pantulan dikirim melalui koneksi nirkabel ke unit pemrosesan pusat yang bertugas menganalisis pola sinyal dan mengenali karakteristik pergerakan yang khas pada burung.

Sistem radar mikro-gelombang bekerja dengan prinsip *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) untuk mendeteksi pergerakan dinamis di area pengamatan. Gelombang elektromagnetik dipancarkan dan pantulannya dianalisis menggunakan algoritma *Short-Time Fourier Transform* (STFT) guna memperoleh spektrum waktu-frekuensi. Dari hasil spektrum tersebut, sistem mengekstraksi pola *micro-Doppler* yang menandakan kapan sayap burung [16]. Jika pola sesuai dengan karakteristik gerakan burung (frekuensi 4–20 Hz dan kecepatan radial 3–15 m/s), sistem secara otomatis memicu aktuator bunyi ultrasonik sebagai pengusir di titik deteksi.



**Gambar 1.1 : Spectrogram *micro-Doppler* burung**

Pola kepakan sayap periodik (wingbeat) dengan frekuensi sekitar 4–6 Hz. Pola berulang ini menjadi dasar fitur untuk mengenali pergerakan burung dari sinyal radar, membedakannya dari objek non-hidup seperti daun atau angin.

Sebagaimana ditunjukkan pada penelitian oleh Kim et al. (Nature, 2020), setiap spesies burung menghasilkan pola *micro-Doppler* unik yang muncul sebagai pita-pita osilasi periodik pada domain waktu-frekuensi. Karakteristik ini dapat digunakan sebagai *signature pattern* untuk mendeteksi aktivitas burung di area pertanian. Hasil tersebut juga diperkuat oleh penelitian Narayanan et al. yang menunjukkan tingkat akurasi klasifikasi hingga 96% dalam membedakan burung dari *drone* menggunakan citra spectrogram radar [16].

Tahapan pemrosesan sinyal diawali dengan melakukan proses penyaringan sinyal mentah untuk menghilangkan gangguan statis seperti pantulan dari tanah atau batang padi. Penyaringan ini dilakukan menggunakan filter digital yang dirancang untuk mempertahankan hanya komponen dinamis pada sinyal, yaitu bagian yang menunjukkan perubahan jarak atau kecepatan relatif terhadap radar. Dengan demikian, sinyal yang tersisa merupakan representasi dari objek yang benar-benar bergerak di area pengamatan.

Setelah melalui tahap penyaringan, sistem melanjutkan ke tahap analisis sinyal dan ekstraksi ciri. Pada tahap ini, radar memanfaatkan perbedaan frekuensi antara sinyal yang dipancarkan dan yang dipantulkan untuk mengidentifikasi adanya gerakan. Prinsip dasar yang digunakan adalah efek Doppler, di mana pergeseran kecil pada frekuensi pantulan menunjukkan bahwa objek bergerak relatif terhadap

radar. Namun, sistem tidak hanya mengandalkan efek Doppler umum yang menunjukkan kecepatan rata-rata objek tetapi juga menerapkan konsep *micro-Doppler*, yaitu variasi frekuensi kecil yang disebabkan oleh gerakan bagian tubuh objek, seperti kepakan sayap, gerakan ekor, atau perubahan posisi tubuh burung ketika terbang.

Dalam ranah teori gelombang, *micro-Doppler* muncul karena setiap bagian tubuh yang bergerak menghasilkan perubahan kecepatan radial yang menyebabkan modulasi kecil pada frekuensi pantul. Sistem kemudian menganalisis pola ritmis perubahan tersebut dengan metode transformasi waktu-frekuensi atau penguraian sinyal menjadi komponen frekuensi terhadap waktu. Hasilnya berupa representasi dinamis yang menampilkan pola berulang khas makhluk hidup, yang berbeda secara jelas dari gerakan mekanis benda mati.

Langkah selanjutnya adalah analisis inferensi dan klasifikasi sinyal, di mana sistem memutuskan apakah pola yang terdeteksi benar menunjukkan aktivitas burung. Sistem menentukan tingkat keyakinan berdasarkan kesesuaian ciri-ciri yang terdeteksi dengan rentang karakteristik gerak burung yang telah ditetapkan. Misalnya, jika frekuensi Doppler menunjukkan kecepatan antara 3–15 m/s dan terdapat osilasi mikro dengan frekuensi kepakan sekitar 5–20 Hz, maka sistem akan mengidentifikasinya sebagai aktivitas burung. Sistem akan mengaktifkan mekanisme pengusiran secara otomatis yang beroperasi hanya pada area tempat radar mendeteksi aktivitas burung.

Selain memberikan reaksi otomatis, sistem juga memiliki kemampuan pencatatan dan pemberitahuan kepada petani. Setiap kali terjadi aktivitas deteksi dan pengusiran, data diteruskan ke petani dalam bentuk notifikasi sederhana. Dengan demikian, petani dapat mengetahui tingkat aktivitas hama burung di lahan mereka tanpa harus berada di lokasi setiap waktu.

### 1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Salah satu pendekatan yang bisa diterapkan guna memastikan bahwa rancangan solusi sesuai dengan kebutuhan pengguna adalah melalui penerapan metode *House of Quality* (HoQ). Di bawah ini disajikan evaluasi terhadap usulan solusi menggunakan kerangka *House of Quality* (HoQ):

|                       |                      | Rating ( 1 = low, 5 = high) | Percent of customer 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 1             |                             |                                       | ●                      | ●                  | ●                     | ○                   | ●                       | ○           | 4.503 |
|                       | Solusi 2             |                             |                                       | ○                      | ○                  | ○                     | ○                   | ○                       | ○           | 3.184 |
|                       | Solusi 3             |                             |                                       | ○                      | ●                  | ○                     | ○                   | ○                       | ○           | 3.642 |

Gambar 1.2 : Tabel *House of Quality*

Keterangan :

| Relationship Matrix |             |   |
|---------------------|-------------|---|
| ●                   | Strong      | 5 |
| ○                   | Medium      | 3 |
| ▲                   | Weak        | 1 |
|                     | No Relation | 0 |

Berikut adalah perhitungan perbandingan solusi dengan fitur-fitur dasar :

**Solusi 1**

$$(5 \times 0,1667) + (5 \times 0,2287) + (5 \times 0,1860) + (3 \times 0,2248) + (5 \times 0,0775) + (3 \times 0,1778) = \mathbf{4,503}$$

**Solusi 2**

$$(3 \times 0,1667) + (3 \times 0,2287) + (3 \times 0,1860) + (3 \times 0,2248) + (3 \times 0,0775) + (3 \times 0,1778) = \mathbf{3,184}$$

**Solusi 3**

$$(3 \times 0,1667) + (5 \times 0,2287) + (3 \times 0,1860) + (3 \times 0,2248) + (3 \times 0,0775) + (3 \times 0,1778) = \mathbf{3,642}$$

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 mampu 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 pada setiap subsistem dengan fitur atau fungsi utama yang dimiliki sistem agar dapat bekerja sesuai dengan tujuan perancangannya

#### **1. Solusi 1 : Deteksi Hama Burung Berbasis Pengolahan Citra Visual**

Solusi pertama dengan fitur dasar *sensing capability* memiliki hubungan yang kuat karena kamera dapat menangkap informasi visual (bentuk, warna dan ukuran dari objek) dan jumlah objek secara jelas sehingga tingkat akurasi deteksi jauh lebih tinggi. Pada fitur *Computation method* mendapatkan nilai 5 karena menggunakan *object detection* berbasis *deep learning* yang mampu mengidentifikasi hama burung melalui analisis fitur citra, sehingga sistem bekerja akurat dan responsif terhadap kondisi di lapangan. Pada *Computing Performance* mendapat nilai 5 karena untuk menjalankan algoritma *deep learning* secara *real-time*, sistem membutuhkan perangkat keras dengan spesifikasi tinggi, yang secara langsung mempengaruhi kecepatan dan akurasi deteksi. *Response capability* memiliki hubungan sedang karena meskipun sistem dapat langsung memicu aktuator pengusir setelah deteksi valid, terdapat *delay* dari waktu pemrosesan gambar dari *deep learning*. *Notification capability* memiliki hubungan yang erat karena hasil deteksi dapat diberikan secara informatif kepada petani, mencakup gambar, jumlah atau level aktivitas hama burung sehingga pengawasan dapat dilakukan dari jarak jauh secara efektif. *Easy to use* memiliki hubungan yang sedang memiliki hubungan sedang dengan solusi pertama karena meskipun sistem hanya dipasang pada satu titik dengan kamera yang mencakup area luas

dan notifikasi melalui Telegram yang mudah digunakan, namun petani masih perlu melakukan konfigurasi awal untuk menempatkan perangkat pengusir mekanik pada beberapa titik strategis di area sawah agar pengusiran efektif di seluruh petak.

## 2. Solusi 2 : Sistem Deteksi Hama Burung Berbasis Gerak dan Suara

Pada *sensing capability* memiliki hubungan sedang karena sistem mengkombinasikan sensor gerak dan suara untuk mendeteksi keberadaan burung. Kombinasi dua sensor ini meningkatkan keandalan sistem melalui redundansi deteksi dan ketika salah satu sensor gagal mendeteksi sensor lainnya tetap bisa mengenali aktivitas burung melalui pola suara khas. Namun, akurasi lebih rendah dibanding kamera karena suara lingkungan lain berpotensi menimbulkan *noise*. Pada *computation method* bernilai sedang karena metode algoritma pemrosesan sinyal dan penggabungan data sensor dengan tingkat kompleksitas menengah. Pada *computing performance* memiliki hubungan yang sedang, karena memiliki beban komputasi relatif ringan, cepat dan dapat dijalankan secara *real-time* pada mikrokontroler kelas menengah. Pada aspek *response capability* memiliki hubungan sedang karena sistem dapat memberikan respon pengusiran secara otomatis ketika hasil penggabungan data sensor menunjukkan aktivitas burung terdeteksi. Namun, adanya potensi kesalahan deteksi menyebabkan respon perlu dikendalikan agar tidak terlalu sering aktif akibat *noise* lingkungan. Pada fitur *Notification capability* mendapat nilai 3 karena sistem hanya memberikan notifikasi sederhana dalam bentuk level aktivitas hama burung atau notifikasi *alert* saat aktivitas tinggi. Fitur *Easy to Use* memiliki hubungan sedang dengan solusi kedua karena sistem menggunakan sensor gerak dan suara yang perlu dipasang pada beberapa titik strategis di area sawah untuk mencakup seluruh petak secara efektif. Meskipun notifikasi melalui Telegram mudah diakses dan dipahami.

### 3. Solusi 3 : Deteksi Hama Burung Berbasis Radar Gelombang Mikro

Pada fitur *sensing capability* memiliki hubungan yang sedang terhadap solusi ini karena deteksi hanya didasarkan pada pergerakan *micro-doppler* objek tanpa informasi visual seperti bentuk, warna, dan ukuran. Pada fitur *computation method* diberikan hubungan yang kuat karena sistem ini berbasis analisis *micro-doppler* dan *tinyML* untuk mengklasifikasikan hama burung secara efektif sehingga sistem mampu mengenali pola pergerakan burung dengan akurasi yang baik tanpa perlu memerlukan perangkat keras yang kuat. Oleh karena itu pada fitur *Computing Performance* diberikan fitur sedang karena sistem ini membutuhkan perangkat pemrosesan sedang atau spesifikasi tinggi untuk mengolah sinyal radar dan identifikasi hama burung. Pada fitur *response capability* diberikan hubungan sedang karena meskipun sistem sangat efektif dalam memberikan respons cepat, sedikit delay dari pemrosesan sinyal radar dan algoritma bisa mempengaruhi kecepatan respon pada waktu tertentu. Pada fitur *notification capability* sistem dapat mengirimkan notifikasi berbasis status ada atau tidaknya aktivitas hama. Namun, tidak menyediakan bukti visual atau data rinci sehingga fungsinya bersifat informatif dasar. Fitur *Easy to Use* memiliki hubungan sedang dengan solusi ketiga karena sistem radar gelombang mikro memerlukan instalasi unit radar pada beberapa titik strategis di sekitar petak sawah agar dapat mencakup seluruh area secara efektif. Petani perlu memahami prinsip dasar penempatan radar untuk memaksimalkan jangkauan deteksi dan meminimalkan *blind spots*. Meskipun sistem bekerja otomatis setelah dikonfigurasi dan notifikasi diterima dengan mudah dan dipahami.

#### 1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *House of Quality* (HoQ), solusi pertama merupakan alternatif terbaik dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan usulan solusi lainnya. Melalui sistem berbasis pengolahan citra visual yang diproses menggunakan algoritma *object detection* untuk mengenali keberadaan hama burung dapat dilakukan secara otomatis tanpa ketergantungan pada

pengawasan manual petani. Sistem menganalisis setiap *frame* gambar dengan membagi area pengamatan menjadi sejumlah sel kecil (*grid*), kemudian setiap sel memprediksi kemungkinan adanya objek melalui pembentukan *bounding box* yang menunjukkan posisi dan ukuran burung. Selanjutnya, sistem mengklasifikasikan objek berdasarkan ciri visual khas burung hama dan pola gerakan terbang atau bergerombol di atas tanaman padi. Jika objek yang terdeteksi sesuai dengan pola visual tersebut, maka sistem mengidentifikasinya sebagai hama burung dan secara otomatis mengaktifkan mekanisme pengusiran. Solusi ini juga memenuhi kebutuhan sistem dalam hal *real-time response* dan dapat memberikan hasil deteksi dengan cepat dan efisien. Dengan demikian, perintah pengusiran dapat dilakukan segera setelah deteksi terjadi. Solusi ini dapat menyajikan hasil deteksi secara informatif dimana sistem tidak hanya memberikan notifikasi berupa peringatan aktivitas hama, tetapi juga menampilkan visualisasi hasil deteksi dalam bentuk citra. Informasi ini dapat diteruskan secara otomatis ke perangkat petani. Dengan fitur ini, sistem tidak hanya menggantikan respon manual, tetapi juga meningkatkan kecepatan dan kualitas pengambilan keputusan petani di lahan sawah.

