

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Peranan sektor peternakan sangat strategis dalam upaya pemantapan ketahanan pangan, pemberdayaan ekonomi masyarakat, dan pengembangan wilayah. Salah satu subsektor yang memiliki peran signifikan adalah sektor peternakan sapi. Hal ini dikarenakan kontribusinya terhadap penyediaan protein hewani yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat [1]. Menurut data Badan Pusat Statistik, hingga tahun 2024, produksi sapi potong nasional masih berada di bawah target kebutuhan daging nasional yang mencapai 759,67 ribu ton dengan produksi domestik hanya mencapai 477,46 ribu ton [2]. Permasalahan ini disebabkan oleh kurang optimalnya manajemen kesehatan dan reproduksi ternak, khususnya pada deteksi estrus sapi yang tepat. Bahkan masalah tersebut dapat menyebabkan kegagalan inseminasi buatan (IB) dan tingkat keberhasilan kebuntingan yang rendah. Akibatnya, produktivitas sapi menjadi menurun.

Selain itu, dalam manajemen produksi, deteksi estrus sapi atau periode birahi, merupakan aspek penting yang secara signifikan menentukan keberhasilan inseminasi buatan. Estrus pada sapi betina adalah fase yang menunjukkan apakah hewan tersebut siap untuk dikawinkan. Selama fase ini, kadar estrogen meningkat, memengaruhi perilaku seperti gelisah, melenguh, dan berdiri diam saat dinaiki oleh sapi lain atau secara aktif menaiki sapi lain. Namun, periode ini berlangsung cukup singkat, rata-rata 12–18 jam. Dalam beberapa kasus, tanda-tandanya samar atau bahkan tidak terlihat (*silent estrus*), sehingga peluang inseminasi sering terlewatkan oleh peternak [3]. Deteksi estrus yang tidak akurat dapat berdampak langsung pada kegagalan inseminasi buatan dan penurunan tingkat keberhasilan kebuntingan. Kondisi ini juga berpotensi meningkatkan biaya operasional peternakan, baik karena inseminasi buatan berulang maupun biaya pakan dan perawatan yang terus-menerus dikeluarkan tanpa diikuti oleh hasil produksi yang optimal. Fenomena ini perlu mendapatkan penanganan karena berdampak negatif pada efisiensi manajemen reproduksi dan produktivitas ternak. Seiring dengan perkembangan teknologi, permasalahan deteksi estrus dapat diatasi melalui penerapan sistem berbasis teknologi yang membantu meningkatkan efektivitas peternak dalam memantau kondisi estrus pada sapi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, peternak sapi menjadi stakeholder utama, dan apabila permasalahan deteksi estrus dapat diatasi, maka akan memberikan dampak positif berupa meningkatnya keberhasilan kebuntingan serta efisiensi manajemen reproduksi ternak.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Sebagai dasar pendukung dan penguat permasalahan, penulis menggunakan data sekunder yang diperoleh dari hasil penelitian terdahulu terkait respons permasalahan kemampuan peternak dalam mendeteksi estrus. Berdasarkan penelitian yang dilakukan di Kampung Mantedi, diketahui tingkat pengetahuan peternak mengenai gejala estrus dapat dikatakan rendah hingga sedang. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sekalipun penyuluhan dapat meningkatkan pengetahuan peternak, keterampilan dalam mendeteksi beberapa tanda estrus masih rendah, dengan nilai rata-rata adalah 39,83 [4].

Selain itu, penelitian di daerah lain menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar peternak telah memahami dasar-dasar inseminasi buatan, mereka belum mampu menentukan waktu pelaksanaan IB secara tepat berdasarkan gejala estrus yang muncul, sehingga menyebabkan rendahnya keberhasilan pembuahan [5].

Selain keterbatasan pengetahuan dan keterampilan, faktor waktu dan tenaga juga mempersulit peternak dalam melakukan pengamatan visual secara intensif. Peternak skala kecil umumnya memiliki aktivitas lain di luar pemeliharaan ternak, sehingga waktu yang dialokasikan untuk mengamati perilaku sapi relatif terbatas. Berdasarkan hasil penelitian, rata-rata waktu yang digunakan peternak untuk melakukan pengamatan hanya sekitar dua hingga tiga jam per hari, sementara deteksi estrus yang akurat membutuhkan observasi intensif setidaknya sebanyak empat kali dalam sehari [3]. Kondisi ini menyebabkan banyak tanda estrus tidak teramati secara optimal.

Selain itu, variasi dan ketidakteraturan tanda estrus pada sapi turut memperbesar tingkat kesulitan dalam proses deteksi. Sapi merupakan hewan *poliestrus non-musiman*, sehingga dapat mengalami estrus kapan saja sepanjang tahun dengan durasi dan intensitas yang berbeda-beda pada setiap individu [6].

Seiring dengan upaya meningkatkan keberhasilan deteksi estrus pada sapi, berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mendukung proses tersebut, antara lain:

1. Sistem pendeteksi estrus berdasarkan gerak sapi dengan accelerometer berbasis Arduino

Sistem ini menggunakan sensor akselerometer untuk memantau peningkatan aktivitas fisik sapi. Data dianalisis menggunakan algoritma K-Means untuk klasifikasi perilaku estrus. Kelemahan sistem ini adalah hanya mampu mendeteksi gejala umum dan tidak spesifik pada puncak estrus [4].

2. Deteksi estrus secara real-time pada sapi menggunakan *deep learning pose estimation*

Sistem ini menggunakan kamera untuk memantau pergerakan sapi dan mengklasifikasikannya ke dalam aktivitas berbaring atau berdiri. Jika jumlah kelas berbaring kurang dari 57.600 kelas per jam, sapi dianggap sedang dalam periode estrus. Hasil deteksi ditampilkan melalui layar LCD. Sistem ini menggunakan algoritma YOLOv5 untuk mendeteksi aktivitas sapi. Model ini dilatih menggunakan gambar-gambar sapi yang telah dianotasi dengan kelas-kelas pergerakan seperti berdiri dan berbaring. Adapun kekurangan dari sistem ini, ukuran sampel yang kecil sehingga berpengaruh pada generalisasi hasil pada lingkungan lain, selain itu, komponen seperti kamera RGB yang memiliki keterbatasan dalam kondisi tertentu [7].

3. Upaya deteksi estrus pada sapi melalui pengukuran suhu permukaan pangkal ekor ventral secara kontinu dengan *supervised machine learning*

Alat yang digunakan adalah sensor yang dipasang di ekor untuk mengukur suhu permukaan di pangkal ekor ventral sapi. Sensor ini dirancang untuk menjadi metode yang kurang invasif dan mudah diaplikasikan untuk memantau suhu tubuh sapi. Sensor ini mengukur suhu permukaan di pangkal ekor pada interval 30 detik atau 10 menit dan mengirimkan data secara nirkabel ke komputer. Model ini dikembangkan dengan menggunakan tiga algoritma *machine learning* yaitu *Random Forest (RF)*, *Artificial Neural Network (ANN)*, dan *Support Vector Machine (SVM)*. Alat ini sangat memungkinkan untuk dikembangkan lebih baik lagi. Beberapa kekurangan yang ada antara lain sensitivitas dan presisi yang relatif rendah (berkisar antara 50,0% hingga

58,8% dan 60,6% hingga 73,1%, masing-masing) dan sulitnya memisahkan perubahan suhu permukaan yang terkait dengan estrus dari fluktuasi suhu permukaan yang tidak terkait dengan estrus [8].

1.1.2 Analisis Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, berikut beberapa aspek yang berhubungan dengan permasalahan tersebut:

1.1.2.1 Aspek Ekonomi

Kegagalan dalam mendeteksi estrus secara akurat berdampak langsung terhadap efisiensi reproduksi ternak sapi. Kondisi ini menyebabkan rendahnya tingkat kebuntingan serta memperpanjang *calving interval* (jarak beranak). Akibatnya, produktivitas ternak menurun karena berkurangnya jumlah pedet yang dihasilkan per tahun. Selain itu, peternak harus menanggung biaya tambahan untuk pakan dan pemeliharaan sapi yang berada dalam kondisi tidak produktif. Kegagalan pada satu siklus inseminasi buatan (IB) juga mengharuskan dilakukannya IB ulang, yang pada praktiknya dapat meningkatkan biaya hingga 2-3 kali lipat dari estimasi awal. Dampak ekonomi ini menjadi semakin signifikan bagi peternakan skala kecil yang sangat bergantung pada efisiensi reproduksi sebagai sumber utama pendapatan, sehingga ketidaktepatan deteksi estrus berpotensi memperbesar risiko kerugian usaha peternakan rakyat.

1.1.2.2 Aspek Manajemen dan Operasional

Kegagalan dalam mendeteksi estrus membuat pengelolaan peternakan menjadi kurang optimal. Pekerjaan harian peternak dan staf memerlukan upaya tambahan karena mereka harus menghabiskan lebih banyak waktu untuk mengamati ternak secara langsung. Selain itu, pencatatan data reproduksi sering kali menjadi tidak akurat, sehingga informasi mengenai kondisi ternak kurang akurat. Hal ini menyulitkan peternak dalam mengambil keputusan, seperti mengatur kandang, mengelompokkan ternak, atau menentukan waktu penjualan. Pada peternak skala besar, ketidaktepatan manajemen reproduksi juga dapat menyebabkan jadwal kelahiran yang tidak teratur. Akibatnya, ketersediaan produk peternakan, seperti susu, daging, dan anak ternak, menjadi tidak stabil dan dapat mengganggu distribusi ke pasar.

1.1.2.3 Aspek Sosial

Ditinjau dari aspek sosial, sebagian besar peternak sapi di Indonesia merupakan peternak rakyat dengan latar belakang pendidikan formal yang terbatas. Kondisi ini menyebabkan pemahaman terhadap tanda-tanda estrus, baik secara fisiologis maupun teknis, masih rendah. Selain itu, peternak seringkali tidak memiliki waktu khusus untuk melakukan pengamatan ternak secara intensif dan berkala, serta cenderung mengandalkan pengalaman turun-temurun yang bersifat subjektif. Keterbatasan akses terhadap pelatihan manajemen reproduksi dan informasi teknis yang berkelanjutan semakin memperkuat hambatan dalam mengadopsi metode deteksi estrus yang lebih modern. Akibatnya, kesenjangan pengetahuan dan teknologi antara peternak dan perkembangan inovasi di bidang peternakan masih menjadi tantangan utama dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan reproduksi sapi.

1.1.3 Kebutuhan Yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan hasil analisis masalah, terdapat beberapa kebutuhan yang harus dipenuhi untuk merumuskan solusi dalam mengatasi permasalahan ketidaktepatan deteksi estrus pada sapi. Kebutuhan yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Solusi yang mampu mengidentifikasi estrus pada sapi secara real-time.
2. Solusi yang mampu memberikan informasi atau notifikasi kepada peternak ketika kondisi estrus terdeteksi.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan data pendukung, analisis masalah, dan perumusan kebutuhan yang harus dipenuhi, maka penelitian ini ditujukan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi estrus pada sapi yang mampu mengidentifikasi sapi betina dalam masa birahi secara akurat dan real-time, sehingga mampu meningkatkan keberhasilan proses perkawinan atau inseminasi buatan.

1.2 Solusi

Berdasarkan analisis masalah dan tujuan, dapat dirancang beberapa alternatif solusi yang memenuhi kebutuhan dan diharapkan mampu mengatasi permasalahan. Solusi yang diinginkan adalah sistem yang dapat mengidentifikasi estrus pada sapi dan dapat memberikan notifikasi kepada peternak. Alat ini perlu diletakkan di dalam kandang untuk mengetahui apakah terdapat sapi yang sedang mengalami estrus. Melalui

penerapan sistem ini, diharapkan dapat mendukung peningkatan efisiensi dalam manajemen reproduksi dan produktivitas sapi. Sebelum memutuskan solusi untuk masalah ini, penting untuk mengetahui karakteristik yang diperlukan sebagai berikut:

1.2.1 Karakteristik Produk

Karakteristik sistem yang akan dikembangkan meliputi fitur dasar dan fitur tambahan. Fitur dasar merupakan fitur yang wajib tersedia dalam sistem. Penjabaran mengenai fitur dasar dan fitur tambahan sebagai karakteristik produk disajikan sebagai berikut.

a. Fitur Dasar

1. *Real-time monitoring*

Solusi yang dihadirkan mampu mengidentifikasi estrus pada sapi secara real-time.

2. *Sensing capability*

Kemampuan sistem membaca data perilaku sapi, seperti suara, pergerakan, atau aktivitas ternak, sebagai dasar identifikasi kondisi estrus.

3. *Real-time notification*

Solusi dapat mengirimkan notifikasi yang dapat diterima oleh peternak.

4. *Processing capability*

Kemampuan sistem dalam mengolah data yang diterima dari sensor melalui mikrokontroler dalam menentukan kondisi sapi, yaitu normal atau estrus.

b. Fitur Tambahan

1. *Power efficiency*

Kemampuan sistem untuk hemat energi saat beroperasi dalam jangka waktu lama.

2. *Low-cost*

Total biaya pembuatan satu unit sistem diperkirakan kurang dari Rp500.000, menjadikannya layak untuk diadopsi oleh peternak skala kecil dan menengah.

3. *Short Time*

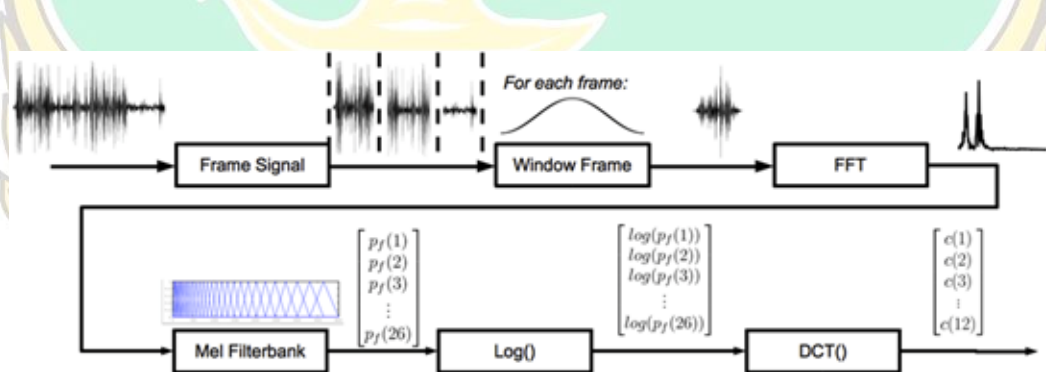
Sistem dirancang agar dapat dibuat dan diuji dalam waktu kurang dari 6 bulan, sehingga cocok untuk proyek tugas akhir mahasiswa dengan tenggat waktu terbatas.

Gambar di atas memperlihatkan proses pembagian citra, prediksi *bounding box*, serta hasil identifikasi objek dalam satu kali proses inferensi. Mekanisme ini memungkinkan sistem melakukan pendeteksian perilaku sapi dengan cepat dan efisien, meskipun memerlukan kemampuan pemrosesan yang tinggi.

Untuk mendukung implementasi sistem ini, dibutuhkan beberapa komponen utama, yaitu kamera sebagai pengambil data visual, *edge device* berupa Raspberry Pi sebagai unit pemrosesan citra menggunakan model YOLO, serta jaringan konektivitas untuk mengirimkan hasil deteksi atau notifikasi kepada peternak.

1.2.2.2 Sistem Deteksi Estrus Berdasarkan Suara dan Gerak Menggunakan Pendekatan Machine Learning

Sapi dilengkapi perangkat pintar berbentuk kalung yang terintegrasi dengan sensor suara dan sensor akselerometer untuk mendeteksi dua indikator biologis estrus, yaitu melenguh berulang dan peningkatan aktivitas fisik. Sensor suara merekam vokalisasi sapi secara kontinu, kemudian data suara diproses menggunakan algoritma ekstraksi fitur MFCC (*Mel Frequency Cepstrum Coefficient*) untuk memperoleh karakteristik unik dari pola suara sapi. Hasil ekstraksi fitur ini selanjutnya diklasifikasikan menggunakan model *machine learning*, seperti BPNN, *Random Forest*, SVM, dan CART, guna menentukan kondisi sapi apakah *non-estrus*, mungkin *estrus*, atau *estrus*.



Gambar 1.2 Blok Diagram Algoritma Ekstraksi Fitur MFCC [11]

Gambar 1.2 menunjukkan alur kerja algoritma ekstraksi fitur MFCC yang digunakan untuk merepresentasikan karakteristik suara sapi secara numerik. Proses ini diawali dengan tahap *pre-emphasis* yang bertujuan untuk memperkuat komponen frekuensi tinggi pada sinyal suara serta mengurangi pengaruh *noise* lingkungan. Selanjutnya,

sinyal suara dibagi ke dalam beberapa *frame signal* agar perubahan karakteristik suara dapat dianalisis dalam interval waktu tertentu.

Setiap *frame* kemudian diproses melalui tahap *windowing* menggunakan fungsi *hamming window* untuk meminimalkan efek diskontinuitas pada batas *frame* akibat pemotongan sinyal. Hasil *windowing* selanjutnya ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) sehingga diperoleh spektrum frekuensi yang menggambarkan distribusi energi suara pada setiap frekuensi.

Spektrum frekuensi tersebut kemudian dipetakan ke dalam skala Mel melalui *Mel Filter Bank* yang dirancang untuk meniru cara sistem pendengaran manusia dalam merespons frekuensi suara. Energi pada setiap band frekuensi dihitung dalam bentuk logaritmik, sehingga pola energi suara sapi dapat direpresentasikan secara lebih stabil. Tahap akhir dari proses MFCC dilakukan menggunakan *Discrete Cosine Transform* (DCT) untuk mengubah representasi energi tersebut ke dalam domain *cepstral* dan menghasilkan koefisien MFCC. Koefisien inilah yang digunakan sebagai vektor fitur utama dalam proses klasifikasi suara sapi. Setelah vektor fitur MFCC diperoleh, data tersebut digunakan sebagai masukan bagi model *machine learning* untuk melakukan klasifikasi kondisi estrus. Untuk meningkatkan keandalan hasil deteksi, sistem tidak hanya mempertimbangkan satu potongan suara, tetapi mengevaluasi pola vokalisasi sapi dalam rentang waktu tertentu. Dengan pendekatan ini, sistem mampu membedakan kondisi sapi secara lebih akurat antara *non-estrus*, kemungkinan *estrus*, dan *estrus*.

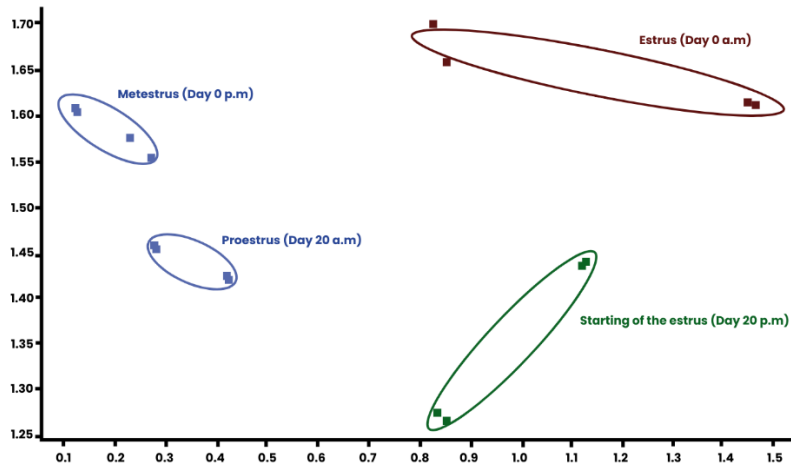
Dalam implementasinya, solusi ini menggunakan beberapa komponen utama, yaitu sensor suara sebagai perangkat untuk merekam vokalisasi sapi yang merepresentasikan perubahan perilaku selama fase estrus, sensor akselerometer untuk memantau peningkatan aktivitas fisik berdasarkan pergerakan dan intensitas gerak ternak, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data dan pengambilan keputusan, baterai Li-Ion 5V sebagai sumber daya sistem, serta Telegram API sebagai media pengiriman notifikasi kepada peternak.

1.2.2.3 Sistem Deteksi Estrus Otomatis dengan Electronic Nose (E-Nose)

Pada solusi ketiga, deteksi estrus (masa birahi) pada sapi betina dilakukan menggunakan perangkat *Electronic Nose (E-Nose)* yang dipasang pada pangkal ekor sapi. Perangkat ini bekerja dengan mendeteksi perubahan profil senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compounds/VOCs*) seperti asam asetat, keton, dan amonia yang meningkat ketika sapi memasuki fase estrus. Untuk menangkap perubahan tersebut, E-Nose dilengkapi dengan array sensor gas berbasis *Metal Oxide Semiconductor (MOS)* atau polimer konduktif, di mana setiap sensor memiliki sensitivitas berbeda terhadap jenis VOC tertentu sehingga membentuk pola aroma khas [12].

Ketika sapi mengeluarkan VOCs, sensor gas akan mengalami perubahan konduktivitas listrik yang menghasilkan sinyal analog. Sinyal ini kemudian dikonversi menjadi data digital oleh mikrokontroler yang terintegrasi di dalam perangkat. Setiap kombinasi respons sensor membentuk sidik jari aroma yang merepresentasikan kondisi fisiologis sapi pada saat itu. Data dari seluruh sensor dikumpulkan secara berkala dan dianalisis menggunakan algoritma *Principal Component Analysis (PCA)* untuk mereduksi dimensi data dan mengekstraksi pola utama yang paling signifikan.

Melalui proses PCA, data aroma yang kompleks dapat divisualisasikan dan dikelompokkan sehingga sistem mampu membedakan kondisi estrus dan non-estrus secara otomatis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.3 [13]. Apabila pola aroma terklasifikasi sebagai estrus, sistem akan mengirimkan notifikasi nirkabel kepada peternak sebagai informasi pendukung pengambilan keputusan manajemen reproduksi, seperti pelaksanaan inseminasi buatan pada waktu yang optimal. Solusi ini didukung oleh komponen utama berupa array sensor gas, mikrokontroler sebagai unit pemrosesan dan komunikasi, baterai sebagai sumber daya, serta casing pelindung untuk menjaga perangkat dari pengaruh lingkungan eksternal.



Gambar 1.3 Visualisasi Hasil Klasifikasi Menggunakan Algoritma PCA [13]

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Untuk menentukan solusi terbaik, diperlukan analisis terhadap berbagai alternatif solusi yang telah diajukan. Metode analisis yang akan digunakan adalah metode *House of Quality* (HoQ) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1

Tabel 1. 1 House of Quality

<i>House Of Quality</i>			↑	↑	↑	↑	
⊙ = <i>Strong</i> (5) ○ = <i>Medium</i> (3) △ = <i>Weak</i> (1) = <i>No relation</i> (0)	<i>Importance a rating</i>	<i>Percent of</i>	<i>Real-Time monitoring</i>	<i>Sensing capability</i>	<i>Real-time notification</i>	<i>Processing capability</i>	
	<i>Power efficiency</i>	3	36,4%	△	△		△
	<i>Low-cost</i>	3	27,2%	△	△	⊙	○
	<i>Short time</i>	4	36,4%	○	○	⊙	△
<i>Importance rating</i>			18	18	35	16	87
<i>Percent of importance</i>			20,69%	20,69%	40,22%	18,40%	100%

Sistem Deteksi Perilaku Sapi Menggunakan Kamera dan Computer Vision					4,59
Sistem Deteksi Estrus Berdasarkan Suara dan Gerak Menggunakan Pendekatan <i>Machine Learning</i>					3,80
Sistem Deteksi Estrus Otomatis dengan Electronic Nose (E-Nose)					3,44

Analisis bobot tiap solusi:

a. Solusi 1:

$$(5 \times 20,69) + (3 \times 20,69) + (5 \times 40,22) + (5 \times 18,40) = 103,45 + 62,07 + 201,10 + 92,00 = 458,62$$

b. Solusi 2:

$$(3 \times 20,69) + (3 \times 20,69) + (5 \times 40,22) + (3 \times 18,40) = 62,07 + 62,07 + 201,10 + 55,20 = 380,44$$

c. Solusi 3:

$$(3 \times 20,69) + (3 \times 20,69) + (5 \times 40,22) + (1 \times 18,40) = 62,07 + 62,07 + 201,10 + 18,40 = 343,64$$

Rincian hasil HoQ yang diperoleh:

1. *Real-time monitoring*

a. *Power efficiency (Weak)*

Real-time monitoring membutuhkan pengambilan data secara terus-menerus untuk memantau kondisi sapi. Aktivitas ini menyebabkan konsumsi daya yang lebih tinggi dibandingkan sistem yang berjalan saat ada peristiwa tertentu. Dengan demikian, hubungan keduanya bersifat berlawanan, meskipun hal ini masih dapat dioptimalkan melalui pengaturan interval pengambilan data.

b. *Low-cost (Weak)*

Sistem berbasis real-time memerlukan perangkat komputasi yang mampu berjalan secara terus-menerus. Semakin bagus perangkat komputasi yang digunakan untuk menjalankan program, semakin tinggi juga biaya yang dibutuhkan.

c. *Short time (Medium)*

Implementasi *real-time monitoring* membutuhkan perancangan sistem yang stabil dan pengujian berulang agar sistem mampu berjalan optimal dan mengirimkan notifikasi ke peternak ketika ada indikasi sapi estrus. Lama keseluruhan pengerjaan sistem, yang mencakup evaluasi dan pengujian, adalah sekitar 5 bulan. Durasi ini masih dianggap wajar, sehingga keterkaitan antara kompleksitas tugas dan waktu pengembangan dapat diklasifikasikan sebagai sedang

2. *Sensing capability*

a. *Power efficiency (Weak)*

Hubungan antara kemampuan *sensing* dan efisiensi daya dipengaruhi oleh jumlah serta jenis sensor yang digunakan. Semakin banyak sensor yang aktif atau semakin kompleks fungsinya, semakin tinggi pula konsumsi daya yang diperlukan oleh sistem. Dengan demikian, peningkatan kemampuan sensing biasanya berbanding lurus dengan meningkatnya penggunaan daya. Berdasarkan pengaruh ini, hubungan antara *sensing capability* dan *power efficiency* dapat dikategorikan lemah.

b. *Low-cost (Weak)*

Dalam deteksi estrus pada sapi, dibutuhkan kemampuan sensor yang tinggi agar hasilnya akurat. Semakin banyak dan semakin canggih sensor yang digunakan, semakin besar pula biaya yang diperlukan, sehingga hubungan antara kemampuan sensor dan biaya bersifat berlawanan.

c. *Short time (Medium)*

Penggunaan beberapa jenis sensor memerlukan proses integrasi dan kalibrasi agar data yang dihasilkan konsisten. Proses ini dapat menambah waktu pengembangan, namun masih memungkinkan untuk diselesaikan dalam waktu 6 bulan.

3. *Real-time notification*

a. *Power efficiency (No Relation)*

Notifikasi *real-time* memungkinkan peternak menerima informasi secara langsung ketika sapi memasuki fase estrus, tanpa perlu memantau sistem secara terus-menerus. Notifikasi hanya dikirim saat terjadi kondisi tertentu, misalnya sapi melakukan mounting sebagai indikasi estrus. Karena pengiriman notifikasi hanya

pada kondisi tertentu, dan tidak rutin. Hal ini tidak terlalu memengaruhi efisiensi daya, sehingga dapat disimpulkan bahwa notifikasi real-time tidak memiliki hubungan signifikan dengan efisiensi daya.

b. *Low-cost (Strong)*

Real-time notification bersifat *event-based* dan hanya mengirimkan data dalam jumlah kecil, seperti pesan teks atau sinyal status. Hal ini memungkinkan implementasi menggunakan mikrokontroler dan platform komunikasi berbiaya rendah, sehingga *real-time notification* mempunyai hubungan yang sangat erat dengan *low-cost*.

c. *Short time (Strong)*

Implementasi fitur *real-time notification* relatif sederhana karena memanfaatkan layanan komunikasi yang telah tersedia, yaitu Telegram. Dengan demikian, fitur ini dapat dikembangkan dan diintegrasikan ke dalam sistem dalam waktu yang singkat tanpa proses konfigurasi yang rumit.

4. *Processing capability*

a. *Power efficiency (Weak)*

Processing capability merupakan kemampuan sistem dalam melakukan pemrosesan saat menjalankan program. Kemampuan ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi daya; semakin tinggi beban pemrosesan, semakin besar konsumsi daya yang dibutuhkan oleh sistem. Oleh karena itu, pengaruh kualitas proses terhadap efisiensi daya tergolong lemah, sehingga hubungan antara keduanya dikategorikan sebagai weak.

b. *Low-cost (Medium)*

Processing capability tidak secara langsung mempengaruhi biaya pemeliharaan perangkat keras, namun metode komputasi yang kompleks dapat membutuhkan perangkat dengan spesifikasi lebih tinggi. Oleh karena itu, hubungannya dengan aspek *low-cost* dikategorikan sedang.

c. *Short time (Weak)*

Semakin tinggi tingkat *processing capability*, sistem biasanya dijalankan dengan

algoritma yang lebih kompleks. Kompleksitas algoritma ini dapat memperpanjang waktu pengembangan dan pengujian sistem. Oleh karena itu, pengaruh *processing capability* terhadap aspek waktu pengerjaan tergolong lemah, karena yang memengaruhi secara langsung adalah kompleksitas algoritma yang digunakan.

Rincian perbandingan solusi dengan fitur dasar:

1. *Real-time monitoring*

Pada solusi 1 diberikan nilai 5 untuk *real-time monitoring* dikarenakan solusi ini menggunakan perangkat komputasi yaitu Raspberry Pi yang sangat mumpuni untuk mendukung sistem agar dapat berjalan terus-menerus. Sementara itu, Solusi 2 dan 3 diberikan nilai 3 karena menggunakan modul ESP, yang memiliki kapasitas komputasi lebih terbatas dibanding Raspberry Pi. Hal ini membuat kemampuan sistem dalam melakukan *real-time monitoring* tidak seoptimal Solusi 1.

2. *Sensing capability*

Semua solusi diberi nilai 3 untuk *sensing capability* karena jenis sensor yang berbeda tetap memiliki kapasitas yang memadai untuk memenuhi kebutuhan dasar sistem. Nilai ini menunjukkan bahwa setiap solusi cukup untuk mendukung sistem berfungsi, meskipun sensor yang digunakan berbeda dan memiliki karakteristik yang berbeda.

3. *Real-time notification*

Untuk fitur *real-time notification*, semua solusi diberikan nilai 5 karena masing-masing mampu memberikan notifikasi secara real-time secara optimal, sesuai dengan kebutuhan dasar sistem.

4. *Processing capability*

Solusi 1 diberikan nilai 5 untuk *processing capability* karena menggunakan Raspberry Pi yang memiliki kapasitas komputasi tinggi, dan hanya membutuhkan satu jenis sensor, yaitu kamera. Hal ini membuat sistem mampu menjalankan proses dengan lancar dan efisien. Berbeda dengan Solusi 2, yang diberikan nilai 3 karena menggunakan ESP32 sebagai perangkat komputasi dan harus menangani dua sensor sekaligus, yaitu sensor gerak dan suara, sehingga beban pemrosesan lebih

besar. Sedangkan Solusi 3 diberi nilai lebih rendah dibanding Solusi 1 dan 2 karena meskipun menggunakan ESP32, sistem harus mengelola lebih dari dua sensor gas untuk mendeteksi berbagai zat saat estrus, sehingga meningkatkan kompleksitas pemrosesan dan membatasi kemampuan sistem untuk bekerja seefisien Solusi 1.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Dari hasil analisis *House of Quality* (HoQ), diperoleh bahwa Solusi 1, yaitu “Sistem Deteksi Perilaku Sapi Menggunakan Kamera dan Computer Vision”, merupakan solusi dengan nilai total tertinggi dibandingkan alternatif lainnya. Solusi ini dipilih karena mampu menyediakan pemantauan perilaku sapi secara real-time, khususnya dalam mengidentifikasi perilaku menaiki atau dinaiki yang menjadi indikator utama estrus pada sapi betina. Sistem ini mampu memberikan notifikasi secara real time kepada peternak ketika perilaku estrus terdeteksi, sehingga membantu proses pemantauan kondisi reproduksi sapi secara lebih efektif.

Dengan terpenuhinya keempat fitur dasar sistem, Solusi 1 mampu memenuhi kebutuhan utama secara optimal. Meskipun memerlukan kemampuan pemrosesan tinggi, optimasi model dan pemilihan arsitektur yang tepat memungkinkan sistem beroperasi secara efisien, menjaga performa deteksi tetap akurat. Dengan kombinasi fitur-fitur ini, Solusi 1 tidak hanya unggul dalam nilai HoQ, tetapi juga menawarkan solusi yang praktis dan efektif untuk pemantauan estrus pada sapi betina.