BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Permasalahan

Peternakan sapi di Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat, memiliki karakteristik khas sebagai peternakan rakyat yang tersebar di berbagai lokasi. Skala pemeliharaan bervariasi, mulai dari 1–2 ekor hingga lebih dari 20 ekor, bahkan terkadang melebihi 100 ekor sapi. Sebagian besar peternak rakyat menjadikan kegiatan ini sebagai usaha sampingan, sehingga metode pemeliharaan yang digunakan cenderung sederhana akibat keterbatasan sumber daya dan fasilitas. Meskipun demikian, para peternak tetap berupaya semaksimal mungkin merawat ternak mereka dalam kondisi serba terbatas [1].

Sebesar 90% produksi sapi di Indonesia berasal dari sistem peternakan rakyat (*smallholder farming systems*) yang melibatkan sekitar 6,5 juta peternak di pedesaan [2]. Kondisi ini menegaskan bahwa peternakan rakyat memiliki peran sentral dalam pemenuhan kebutuhan protein hewani nasional, meskipun produksi domestik baru mampu memenuhi sekitar 45%–60% kebutuhan daging sapi nasional [2]. Di samping sebagai penyedia daging, peternakan rakyat juga mendukung sektor lain melalui permintaan akan pupuk, obat-obatan, dan pakan tambahan. Namun, sistem pemeliharaan yang masih bersifat tradisional berkontribusi terhadap stagnasi produktivitas ((tidak berkembang usaha atau peternakannya) [2], sehingga potensi besar yang dimiliki belum sepenuhnya diakui sebagai penyokong kebutuhan nasional. Tantangan utama yang dihadapi adalah rendahnya kemampuan peternak dalam mengadopsi metode modern dan efisien, baik dalam hal pemberian pakan yang sesuai dengan kondisi tubuh sapi, pemanfaatan teknologi informasi untuk pencatatan pakan secara kontinu, maupun pemantauan kesehatan dan kesejahteraan sapi secara berkelanjutan [3]. Upaya peningkatan pada aspek-aspek tersebut menjadi kunci agar peternakan rakyat mampu memberikan kontribusi lebih besar terhadap ketahanan pangan nasional.

Kemajuan teknologi informasi telah membawa perubahan besar dalam metode pemeliharaan sapi. Di berbagai negara, penerapan peternakan presisi dan sistem otomatisasi berbasis teknologi informasi mulai diadopsi untuk meningkatkan efisiensi [4], [5], [6], [7]. Hal ini didorong oleh kelemahan metode pemeliharaan tradisional atau konvensional yang umumnya memerlukan biaya tinggi dan tenaga kerja dalam jumlah besar, namun hasilnya kurang optimal [8]. Sebagai contoh, proses pengamatan bobot sapi pada sistem tradisional masih dilakukan dengan cara memindahkan sapi ke tempat penimbangan. Proses ini membutuhkan kendaraan, tenaga manusia, serta waktu yang tidak sedikit. Selain menimbulkan biaya operasional tinggi, aktivitas tersebut juga dapat membuat sapi merasa gelisah, stres, bahkan berisiko mengalami luka [9], [10]. Kendala serupa

terjadi pada pemantauan perilaku reproduksi sapi, khususnya dalam mendeteksi masa estrus (berahi). Masa estrus pada sapi betina hanya berlangsung sekitar 12–18 jam, dengan rata-rata siklus berulang setiap 18–24 hari. Dalam praktik tradisional, pemantauan masa kawin masih mengandalkan tenaga ahli yang harus mengidentifikasi tanda-tanda visual perilaku estrus. Namun, tenaga manusia tidak mungkin melakukan observasi terus-menerus selama 24 jam, sehingga sering kali masa estrus terlewat. Akibatnya, peluang reproduksi sapi baik secara alami maupun melalui inseminasi buatan dapat tertunda hingga siklus berikutnya, yang tentu berdampak pada efisiensi produksi [11][12]. Selain itu, perubahan perilaku sapi yang tidak normal, misalnya penurunan aktivitas, stres akibat gangguan lingkungan, atau tanda-tanda awal penyakit, juga sulit dideteksi secara manual karena keterbatasan pengawasan manusia. Padahal, kondisi tersebut merupakan indikator penting dari kesejahteraan dan kesehatan sapi yang berhubungan langsung dengan pertumbuhan, produktivitas, dan kualitas hasil ternak [13], [14]. Oleh karena itu, peran teknologi informasi menjadi sangat penting dalam peternakan sapi modern. Melalui pemanfaatan sensor, kamera, serta sistem analitik berbasis kecerdasan buatan, berbagai parameter penting mulai dari pertumbuhan bobot, perilaku makan, kondisi kesehatan, hingga deteksi estrus dapat diamati, dideteksi, dan dianalisis secara otomatis dan real-time. Hal ini tidak hanya mengurangi biaya dan kebutuhan tenaga kerja, tetapi juga meningkatkan akurasi deteksi, mencegah keterlambatan reproduksi, serta mendukung kesejahteraan sapi secara menyeluruh [7], [15], [16].

Beberapa penelitian mengenai tumbuh kembang sapi, khususnya terkait *Body Condition Score* (BCS), bobot, dan perilaku, telah banyak memanfaatkan kemajuan teknologi informasi. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah Internet of Things (IoT) dengan pemasangan sensor untuk menangkap data fisik maupun perilaku sapi. Data yang diperoleh kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk menghasilkan keluaran berupa skor BCS, estimasi bobot, maupun identifikasi perilaku [12], [13], [17], [18]. Selain itu, teknologi pengolahan citra digital juga telah dimanfaatkan dengan memanfaatkan kamera untuk merekam gambar sapi. Citra yang diperoleh selanjutnya diproses menggunakan berbagai metode pengolahan citra guna mengekstraksi parameter-parameter penting, seperti kondisi tubuh, ukuran, atau pola perilaku [6], [19]. Hasil data baik dari sensor maupun citra kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan sistem cerdas berbasis kecerdasan buatan, seperti artificial intelligence, machine learning, atau deep learning. Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan deteksi dan klasifikasi secara otomatis terhadap BCS, bobot, maupun perilaku sapi dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode manual [9], [12], [20], [21], [22].

Penggunaan teknologi pengolahan citra dan IoT telah banyak diterapkan di bidang peternakan [15], [17], [23], [24], karena mampu menggantikan peran manusia, yaitu dapat bekerja secara terus-menerus selama 24 jam, sesuatu yang mustahil dilakukan oleh manusia [25]. Dari beberapa tindakan pengamatan seperti

pengamatan *Body Condition Score* (BCS), bobot dan perilaku maka pengamatan yang dianggap paling urgen adalah pengamatan perilaku [26] karena perubahan perilaku tidak dapat diprediksi dan perilaku sapi berkorelasi dengan kesehatan atau kesejahteraan sapi tetapi perubahan perilaku tidak dapat diprediksi, sedangkan pada pengamatan bobot maupun BCS dapat dilakukan dalam rentang mingguan, bulanan bahkan 3 bulanan [27].

Penelitian tentang tumbuh kembang sapi dengan menggunakan teknologi pengolahan citra umumnya memerlukan perangkat yang memiliki spesifikasi tinggi, seperti kamera dengan resolusi tinggi dan perangkat komputer dengan prosesor dan memori yang besar dikarenakan data yang akan diolah berupa data gambar atau video. Penelitian dititikberatkan pada tingkat akurasi deteksi atau prediksi yang tinggi seperti kemampuan memprediksi skor BCS, berat sapi atau mendeteksi perilaku [28]. Sedangkan untuk penggunaan teknologi *Internet of Things* (IoT) cenderung menggunakan perangkat dengan spesifikasi alat yang lebih rendah karena penggunaan sensor menghasilkan data yang lebih kecil [29].

Penggunaan kedua teknologi tersebut umumnya terpisah, dan hanya terfokus kepada pendeteksian atau estimasi saja seperti estimasi *body condition score*, estimasi bobot sapi dan pendeteksian perilaku sapi yang umumnya menggunakan teknologi pengolahan citra yang digunakan untuk mendapatkan data spasial seperti panjang badan, lingkaran dada, posisi badan dan lain-lain yang dipadukan dengan *deep learning* untuk menganalisa masukan data tersebut untuk menghasilkan luaran berupa nilai bcs, bobot sapi atau jenis perilaku sapi [30], [31]. Selain informasi spasial penggunaan teknologi pengolahan citra dapat menangkap informasi temporal dengan membandingkan informasi pada frame gambar sebelum dengan frame gambar sesudah untuk dapat memastikan perubahan yang terjadi sehingga akan menguatkan suatu analisa [32].

Penggunaan teknologi IoT umumnya lebih kompleks karena melibatkan masukan sensor yang beragam, seperti menggabungkan sensor akselerometer dengan sensor suhu dan sensor kelembapan, sehingga dapat mengaitkan perilaku hewan dengan kondisi lingkungannya [33], [34]. Namun, hal tersebut juga berpotensi menghasilkan informasi yang keliru. Misalnya, nilai akselerometer menunjukkan perubahan yang tidak wajar, sementara sensor suhu mendeteksi kondisi panas terik dengan kelembapan rendah. Dalam kondisi tersebut, sistem dapat menyimpulkan bahwa sapi sedang gelisah akibat cuaca panas, padahal kegelisahan tersebut bisa saja disebabkan oleh faktor lain, seperti gangguan dari pencuri atau hewan pengganggu (misalnya ular) [35], [36].

Pemantauan perilaku makan sapi merupakan aspek penting dalam peternakan modern karena dapat menjadi indikator kesehatan ternak sekaligus mencerminkan kualitas pakan yang diberikan [37], [38]. Perubahan pada perilaku makan, misalnya penurunan jumlah pakan yang dikonsumsi, sering kali menandakan adanya gangguan kesehatan, salah satunya adalah **mastitis**[39], yaitu peradangan pada ambing (kelenjar susu) sapi yang umumnya disebabkan oleh

infeksi bakteri. Selain itu, variasi gerakan kepala sapi saat makan juga dapat memberikan gambaran mengenai mutu pakan yang diterima [38], [40]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penyakit pada sapi, seperti mastitis atau gangguan pada kaki, dapat memengaruhi pola makan ternak. Dengan memahami perilaku makan sapi, peternak dapat melakukan tindakan yang tepat untuk meningkatkan kesejahteraan hewan sekaligus menjaga produktivitasnya [41]. Oleh karena itu, pemantauan perilaku makan sapi sangat diperlukan dalam praktik peternakan modern untuk mengoptimalkan manajemen pemeliharaan dan kesejahteraan hewan [5], [42].

Sejumlah penelitian telah dilakukan terkait deteksi perilaku sapi menggunakan akselerometer berbasis kalung leher. Salah satu studi memanfaatkan sensor akselerometer tiga sumbu dengan ground truth dari halter tekanan (RumiWatch). Data mentah akselerometer kemudian dianalisis menggunakan metode Convolutional Neural Network (CNN) untuk mengklasifikasikan tiga perilaku utama, yaitu makan, memamah biak, dan aktivitas lainnya. Hasil pengujian menunjukkan nilai F1-score sebesar 0,82, dan metode ini dapat dijalankan pada perangkat mikrokontroler STM32L476RG [43]. Studi lain menggunakan kombinasi sensor akselerometer dan geomagnetik (MMA8451Q dan HMC5883L), serta metode K-Nearest Neighbor – Random Forest Fusion Model (KNN-RF Fusion Model). Sistem ini mampu mendeteksi tujuh jenis perilaku, termasuk makan, memamah biak, menggelengkan kepala (head-shaking), dan lainnya secara real-time. Akurasi yang dicapai sangat bervariasi, dengan nilai tertinggi 99,34% dan nilai terendah 89,11% untuk perilaku head-shaking [44]. Namun, kedua penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan. Tantangan utama terletak pada kesulitan membedakan perilaku dengan pola data yang mirip, seperti antara head-shaking dan memamah biak. Selain itu, pada pendekatan berbasis CNN, waktu deteksi masih berada pada skala puluhan detik, sehingga belum sepenuhnya sesuai untuk kebutuhan pemantauan perilaku kompleks secara real-time. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun metode pembelajaran mesin dengan sensor berdaya rendah dapat diterapkan pada perangkat tertanam (embedded device), diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi dan mempercepat deteksi perilaku sapi di lapangan.

Penelitian sebelumnya dalam deteksi perilaku sapi telah memanfaatkan teknologi kamera dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan kesejahteraan hewan serta memberikan sistem peringatan dini. Dua pendekatan utama terlihat dari studi yang menggunakan kamera CCTV (Hikvision HD) dan kamera ZED2 (StereoLabs). Penelitian pertama menggunakan jaringan CNN berbasis *Non-local Network* dan ResNet-50 *pretrained* pada *dataset Kinetics*, dengan input video klip 3–10 detik, untuk mengidentifikasi tujuh jenis perilaku termasuk makan, minum, berbaring, dan kontraksi kelahiran, dengan akurasi tertinggi mencapai 95% dan deteksi kontraksi sebesar 83% [45]. Sementara itu, penelitian kedua menggunakan model DRN-YOLO (DenseResNet + YOLOv4) pada sistem *edge* NVIDIA Jetson

TX2, yang memungkinkan inferensi real-time (~ 30 fps) dan mendeteksi perilaku makan seperti *feeding*, *chewing*, dan *pushing* dengan F1-score tinggi sebesar 96.83% [5]. Meskipun pendekatan ini menunjukkan akurasi tinggi dan kemampuan deteksi *real-time*, keterbatasannya terletak pada kebutuhan perangkat keras yang canggih dan proses pelabelan data yang masih dilakukan secara manual, yang dapat menjadi tantangan untuk implementasi skala besar di peternakan tradisional.

Penelitian-penelitian sebelumnya dalam deteksi perilaku sapi umumnya hanya memanfaatkan satu jenis sensor secara terpisah, misalnya sensor akselerometer yang merekam data percepatan pada sumbu X, Y, dan Z [43], [46], [47], atau kamera yang menghasilkan data berupa gambar maupun video [45], [48], [49]. Meskipun pendekatan ini mampu memberikan informasi dasar mengenai gerakan atau postur sapi, penggunaan sensor tunggal memiliki beberapa keterbatasan. Pada akselerometer, data yang diperoleh sering kali sulit dibedakan ketika pola gerakan antarperilaku sangat mirip, misalnya antara menggelengkan kepala (*head-shaking*) dan memamah biak. Hal ini menyebabkan terjadinya tumpang tindih data (*overlap*) yang menurunkan akurasi klasifikasi [50]. Di sisi lain, penggunaan kamera juga tidak lepas dari kelemahan, karena kualitas citra sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti pencahayaan, sudut pengambilan gambar, atau adanya objek penghalang [51]. Dalam situasi lapangan, faktor-faktor ini sering kali sulit dikendalikan, sehingga berdampak pada penurunan reliabilitas deteksi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pendekatan sensor tunggal kurang mampu menangkap kompleksitas perilaku sapi secara konsisten. Keterbatasan ini menegaskan perlunya integrasi data dari beberapa sensor, agar diperoleh informasi yang lebih komprehensif, akurat, dan robust terhadap gangguan lingkungan.

Perkembangan teknologi sensor dan *computer vision* telah membuka paradigma baru dalam *precision livestock farming*, khususnya dalam pemantauan perilaku hewan ternak. Studi terbaru menunjukkan bahwa integrasi multimodal sensor dapat meningkatkan akurasi deteksi perilaku hingga 15-20% dibandingkan pendekatan unimodal [52], [53], [54]. Namun, mayoritas penelitian masih bergantung pada metode komputasi intensif seperti *deep learning* [55], [56], [57], [58] yang tidak *feasible* untuk implementasi *edge computing* di peternakan dengan sumber daya terbatas [25], [59].

Meskipun teknologi IoT berbasis sensor akselerometer maupun pengolahan citra berbasis kamera telah banyak digunakan dalam deteksi perilaku sapi, mayoritas penelitian sebelumnya masih memanfaatkan satu jenis sensor secara terpisah (unimodal), baik akselerometer [43], [46], [47] maupun kamera [45], [48], [49]. Pendekatan tunggal ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain rentan terhadap gangguan lingkungan, di mana akselerometer dapat menghasilkan data yang keliru akibat gerakan nonperilaku makan, seperti sapi gelisah karena gangguan manusia atau binatang [35], [36], sementara kamera dapat terganggu oleh pencahayaan, posisi pemasangan, atau kondisi cuaca. Selain itu, akurasi untuk

mendeteksi perilaku kompleks juga terbatas, misalnya sulitnya membedakan perilaku dengan pola mirip seperti rumination dan headshaking jika hanya menggunakan akselerometer [43] [44], atau keterbatasan kamera dalam mendeteksi jika objek terhalang atau posisi kepala tidak terlihat jelas. Tantangan lain terletak pada kebutuhan komputasi tinggi dari metode *deep learning* untuk integrasi multimodal, yang tidak sesuai dengan kemampuan *edge computing* di peternakan tradisional yang memiliki sumber daya terbatas [25], [59]. Walaupun beberapa penelitian multimodal menunjukkan peningkatan akurasi sebesar 15–20% [52], [53], [54], umumnya pendekatan tersebut membutuhkan GPU dan perangkat keras mahal sehingga kurang layak untuk diterapkan pada skala peternakan rakyat. Hingga saat ini, meskipun deteksi perilaku makan berbasis akselerometer telah menunjukkan performa baik dengan teknik ringan seperti segmentasi berjendela dan penetapan ambang secara *real-time*, pendekatan tersebut umumnya unimodal dan tidak memanfaatkan informasi spasial dari kamera. Di sisi lain, metode kamera terkini untuk deteksi *feeding/head-pose* didominasi model *deep learning* yang relatif berat komputasinya. Hingga kini belum ditemukan *framework* ringan yang mengintegrasikan data temporal dari akselerometer (pola gerakan kepala) dan data spasial dari kamera (pose/orientasi kepala) secara *real-time* untuk validasi silang hasil deteksi *feeding* pada sapi. Literatur multimodal yang ada lebih banyak menggabungkan akselerometer dengan sensor lokasi (GNSS/UWB) atau menggunakan visi saja, sedangkan kombinasi IMU+kamera dengan teknik statistik klasik (*windowing/thresholding*) belum dilaporkan.

Selain itu, perilaku makan merupakan indikator penting yang memiliki keterkaitan erat dengan kesehatan, produktivitas, dan kesejahteraan sapi. Perubahan pada durasi maupun frekuensi makan sering kali menjadi tanda awal adanya gangguan kesehatan, seperti penyakit metabolik, stres, atau penurunan kondisi fisiologis, bahkan sebelum gejala klinis terlihat [60], [61]. Oleh karena itu, pemantauan perilaku makan tidak hanya relevan untuk meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga berfungsi sebagai sistem deteksi dini yang sangat penting dalam manajemen kesehatan sapi.

Penggunaan perangkat dengan daya komputasi rendah, seperti **Raspberry Pi, ESP32, kamera IP, dan sensor GY-521**, memberikan keuntungan signifikan terutama dari aspek biaya. Harga perangkat tersebut relatif lebih terjangkau dibandingkan dengan perangkat berdaya komputasi tinggi. Sebagai contoh, Raspberry Pi 5 memiliki kisaran harga sekitar Rp 1.200.000–Rp 1.500.000 per unit [62], ESP32 sekitar Rp 70.000–Rp 120.000 per unit [63], kamera IP sekitar Rp 250.000–Rp 400.000 per unit [64], serta sensor GY-521 (MPU6050) sekitar Rp 25.000–Rp 50.000 per unit [65]. Secara keseluruhan, investasi awal untuk satu rangkaian perangkat yang digunakan dalam eksperimen dan analisis perilaku sapi hanya berkisar Rp 1.500.000–Rp 2.500.000.

Sebagai perbandingan, perangkat komersial industri dengan fungsi sejenis dapat mencapai harga Rp 15.000.000–Rp 30.000.000 per unit. Dengan demikian,

penggunaan perangkat berbiaya rendah ini mampu menekan kebutuhan anggaran riset lebih dari 80%. Selain biaya investasi awal yang rendah, kebutuhan operasionalnya juga relatif hemat. Konsumsi daya rata-rata perangkat hanya sekitar 10–15 watt, sehingga menambah biaya listrik sekitar Rp 15.000–Rp 25.000 per bulan. Ditambah dengan kebutuhan koneksi internet sekitar Rp 100.000–Rp 150.000 per bulan, maka total biaya operasional hanya berkisar Rp 120.000–Rp 175.000 per bulan. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan biaya pemeliharaan perangkat industri komersial. Efisiensi tersebut membuka peluang penerapan **otomasi pengelolaan peternakan berbasis pengolahan sinyal dan teknologi Internet of Things**, tanpa mengurangi fungsionalitas dasar dalam akuisisi data akselerometer, visual, maupun kondisi lingkungan [66].

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena cakupan uji coba hanya sebatas tahap eksperimen. Hasil yang diperoleh belum dapat digeneralisasi sepenuhnya untuk seluruh kondisi peternakan. Eksperimen dilakukan pada ruang lingkup terbatas, baik dari sisi jumlah sampel hewan, durasi pengamatan, maupun variasi kondisi lingkungan kandang. Oleh karena itu, meskipun hasil uji coba menunjukkan kinerja yang menjanjikan, diperlukan penelitian lanjutan dengan jumlah data yang lebih besar, kondisi lingkungan yang lebih beragam, serta pengujian lintas lokasi. Hal ini penting agar temuan penelitian memiliki validitas eksternal yang lebih kuat dan dapat diterapkan secara lebih universal.

Berdasarkan uraian di atas, **gap penelitian** yang menjadi dasar kajian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. **Dominasi metode tradisional**

Proses pemeliharaan sapi pada peternakan rakyat masih didominasi oleh metode tradisional, sehingga pemantauan perilaku ternak belum dilakukan secara otomatis dan objektif.

2. **Keterbatasan akurasi sensor tunggal**

Sistem deteksi perilaku yang hanya mengandalkan satu jenis sensor, baik akselerometer maupun kamera, masih memiliki keterbatasan dalam mencapai tingkat akurasi yang optimal.

3. **Keterbatasan sumber daya pada penggunaan kamera**

Pemanfaatan kamera untuk proses pemantauan di peternakan menghadapi kendala terkait ketersediaan sumber daya, seperti daya listrik, kapasitas komputasi, dan penyimpanan data.

4. **Belum adanya integrasi sensor akselerometer dan kamera**

Hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang mengintegrasikan sensor akselerometer dengan kamera dalam deteksi perilaku makan sapi, khususnya pada kondisi peternakan dengan sumber daya terbatas

Berdasarkan penjelasan di atas, maka dipilih judul "Eksperimen dan Analisis Perilaku Sapi Berbasis Pengolahan Sinyal dan Teknologi *Internet of Things* untuk Otomasi Pengelolaan Peternakan".

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana memanfaatkan teknologi IoT berbasis sensor akselerometer untuk merekam pola gerakan kepala sapi dalam mendeteksi perilaku makan secara *real-time* dengan metode komputasi ringan (misalnya *windowing* dan *thresholding*)?
2. Bagaimana memanfaatkan teknologi pengolahan citra berbasis kamera untuk menangkap informasi spasial berupa *pose* dan orientasi kepala sapi dalam mendeteksi perilaku makan?
3. Bagaimana mengintegrasikan data temporal dari akselerometer dan data spasial dari kamera dalam sebuah *framework* ringan sehingga dapat melakukan validasi silang untuk meningkatkan akurasi deteksi perilaku makan sapi?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem berbasis IoT dengan sensor akselerometer untuk merekam pola gerakan kepala sapi, kemudian menganalisisnya menggunakan metode komputasi ringan seperti *windowing* dan *thresholding* agar dapat mendeteksi perilaku makan sapi secara *real-time* dan efisien.
2. Mengembangkan metode pengolahan citra berbasis kamera untuk menangkap informasi spasial berupa pose dan orientasi kepala sapi, sehingga dapat digunakan sebagai indikator pendukung dalam proses deteksi perilaku makan.
3. Mengintegrasikan data temporal dari akselerometer dengan data spasial dari kamera dalam suatu *framework* ringan yang mampu melakukan validasi silang, guna meningkatkan akurasi dan ketahanan sistem deteksi perilaku makan sapi terhadap gangguan lingkungan maupun keterbatasan masing-masing sensor.

1.4 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat dari penelitian Eksperimen dan Analisis Perilaku Sapi Berbasis Pengolahan Sinyal dan Teknologi *Internet of Things* untuk Otomasi Pengelolaan Peternakan antara lain:

1. Penelitian ini memperkaya literatur dalam bidang pemantauan perilaku hewan ternak berbasis teknologi, khususnya melalui pendekatan integrasi atau fusi data multi-sensor (sinyal dan citra) dengan metode klasifikasi ringan yang dapat dijalankan pada perangkat *edge*.
2. Sistem yang dikembangkan merupakan rancangan arsitektur IoT untuk lingkungan peternakan dengan keterbatasan daya dan komputasi. Dengan memanfaatkan ESP8266, Raspberry Pi, dan algoritma sederhana.
3. Sistem ini memungkinkan deteksi dini perubahan perilaku makan sapi secara otomatis dan *real-time*, yang sangat penting sebagai indikator awal gangguan kesehatan, stres, atau penyakit.

4. Dengan meningkatkan efisiensi pengawasan dan kesehatan ternak, sistem ini berpotensi mendukung produktivitas peternak skala kecil hingga menengah. Penggunaan perangkat berbiaya rendah dan konsumsi daya yang rendah memungkinkan teknologi ini diterapkan secara luas, termasuk di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah dirumuskan, maka batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada deteksi perilaku makan sapi sebagai indikator utama kondisi kesehatan dan kesejahteraan sapi, tanpa membahas secara mendalam aspek perilaku lain (misalnya berbaring, minum, atau kawin).
2. Sistem yang dibangun hanya memanfaatkan dua jenis sumber data, yaitu:
 - a. Sensor akselerometer untuk menangkap data temporal berupa pola gerakan kepala sapi.
 - b. Kamera untuk menangkap data spasial berupa pose dan orientasi kepala sapi.
3. Metode pengolahan data dibatasi pada teknik komputasi ringan (*windowing*, *thresholding*, dan analisis statistik sederhana) yang dapat dijalankan pada perangkat *edge*.
4. Integrasi data (fusi sensor) dibatasi pada validasi silang antara sinyal akselerometer dan citra kamera untuk meningkatkan akurasi deteksi perilaku makan.
5. Ruang lingkup penelitian mencakup eksperimen skala kecil hingga menengah pada lingkungan peternakan rakyat dengan keterbatasan infrastruktur, sehingga hasil penelitian lebih relevan untuk konteks peternakan tradisional di Sumatera Barat.
6. Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi, sosial, atau kebijakan peternakan secara mendalam, tetapi hanya menitikberatkan pada perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem teknis untuk deteksi perilaku makan sapi.

1.6 Keterbaruan (*Novelty*)

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam eksperimen dan analisis perilaku sapi berbasis pengolahan sinyal dan teknologi *Internet of Things* (IoT), dengan penekanan pada efisiensi komputasi serta keterterapan di lingkungan peternakan dengan sumber daya terbatas. Adapun kontribusi utama dan unsur kebaruan penelitian ini dapat dirinci sebagai berikut:

1. Integrasi Sensor Akselerometer dan Kamera pada Perangkat Komputasi Rendah

Penelitian ini mengintegrasikan sensor akselerometer dan kamera pada perangkat komputasi rendah untuk mendeteksi perilaku makan sapi. Integrasi ini memungkinkan pengamatan perilaku secara **real-time** dengan konsumsi daya

dan kebutuhan komputasi yang rendah, sehingga sesuai untuk diterapkan pada peternakan skala kecil dan menengah.

2. **Pemanfaatan Fitur Statistik Sederhana untuk Klasifikasi Perilaku**
Sistem yang dikembangkan menggunakan fitur statistik sederhana, seperti *pitch*, *roll*, dan variabilitas, sebagai dasar klasifikasi perilaku. Algoritma *decision tree* diterapkan untuk menghasilkan aturan logika yang eksplisit dan mudah dipahami.
3. **Analisis Citra Diam dan Video untuk Deteksi Aktivitas.**
Sistem memanfaatkan analisis citra diam (menggunakan metode *grayscale* dan ruang warna Lab) serta video (menggunakan *Haar Cascade* dan *Optical Flow*) guna mendeteksi posisi kepala dan aktivitas mengunyah sapi secara lebih akurat.
4. **Integrasi Multisensor untuk Peningkatan Akurasi.**
Dengan menggabungkan data dari sensor akselerometer dan kamera, sistem mampu meningkatkan akurasi dalam mendeteksi perilaku makan sapi. Pendekatan integrasi multisensor ini menjadi salah satu kontribusi penting dalam pengembangan sistem monitoring ternak yang adaptif dan andal.
5. **Validasi Eksperimental dan Uji Lapangan dengan Data Nyata.**
Penelitian ini divalidasi melalui eksperimen dan uji lapangan menggunakan data nyata. Rangkaian proses yang dikembangkan dikonversi menjadi sistem aturan logika yang siap diimplementasikan secara langsung di lapangan, sehingga memperkuat kontribusi praktis terhadap otomasi pengelolaan peternakan.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari judul penelitian "Eksperimen dan Analisis Perilaku Sapi Berbasis Pengolahan Sinyal dan Teknologi *Internet of Things* untuk Otomasi Pengelolaan Peternakan" dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Bab 1. Pendahuluan: Bab pendahuluan pada disertasi ini berisikan antara lain latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat dan sistematika penulisan, keterbaruan atau kontribusi.
2. Bab II. Tinjauan Pustaka: Bab Tinjauan Pustaka berisi tinjauan teori untuk menyelesaikan permasalahan dan tinjauan penelitian untuk mengetahui *state of the art* dari penelitian.
3. Bab III. Eksperimen dan Analisis Perilaku Sapi
4. Bab IV. Eksperimen dan Analisis Pergerakan Sapi dengan Parameter X, Y, Z
5. Bab V. Eksperimen dan Analisis Pergerakan Sapi dengan Parameter *Pitch*, *Yaw*, *Roll*
6. Bab VI. Eksperimen dan Analisis Perilaku Sapi Berbasis Citra dan Video
7. Bab VII. Simpulan dan Saran
8. Daftar Pustaka: Pada bagian ini berisi pustaka-pustaka yang dijadikan rujukan selama mengerjakan Disertasi.
9. Lampiran