

**DETEKSI DAN PELACAKAN WAJAH KUKANG
SUNDA UNTUK KONSERVASI PRIMATA
DILINDUNGI**

Proposal Tugas Akhir

Oleh

**Louis Ferdyo Gunawan
18222022**



**PROGRAM STUDI SISTEM DAN TEKNOLOGI INFORMASI
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
Desember 2025**

LEMBAR PENGESAHAN

DETEKSI DAN PELACAKAN WAJAH KUKANG SUNDA UNTUK KONSERVASI PRIMATA DILINDUNGI

Proposal Tugas Akhir

Oleh

**Louis Ferdyo Gunawan
18222022**

Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung

Proposal Tugas Akhir ini telah disetujui dan disahkan
di Bandung, pada tanggal 5 Desember 2025

Pembimbing

Dr. Fadhil Hidayat, S.Kom., M.T.

NIP. 198609252012121002

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan	3
I.4 Batasan Masalah	4
I.5 Metodologi	5
II STUDI LITERATUR	7
II.1 Kukang Sunda (<i>Nycticebus coucang</i>)	7
II.1.1 Perilaku, Ekologi, dan Pola Aktivitas	8
II.1.2 Status Konservasi dan Ancaman	8
II.2 Ekspresi Wajah pada Primata	9
II.2.1 Sistem Pengkodean Wajah (FACS dan AnimalFACS)	9
II.2.2 Anatomi Wajah dan Potensi Ekspresi pada Kukang	10
II.2.3 Grimace Scale sebagai Indikator Kesejahteraan	11
II.3 Teknologi Computer Vision dalam Pemantauan Satwa Liar	11
II.3.1 Deteksi Objek: Arsitektur YOLO	12
II.3.2 Deep Learning untuk Klasifikasi Ekspresi	12
II.3.3 Pengolahan Citra Nokturnal (<i>Night Vision</i>)	13
II.4 Dataset Satwa	13
II.5 Literatur Terkait	13
II.5.1 Penerapan Pengenalan Wajah pada Primata: Studi Kasus LemurFaceID	13
II.5.2 Era Deep Learning pada Video Satwa Liar: Studi Kasus Simpanse .	15
II.6 <i>Research Gap</i>	16
III ANALISIS MASALAH	18
III.1 Analisis Kondisi Saat Ini	18
III.2 Analisis Kebutuhan	19
III.2.1 Identifikasi Masalah Pengguna	19
III.2.2 Kebutuhan Fungsional	20
III.2.3 Kebutuhan Non-fungsional	22
III.3 Analisis Penentuan Solusi	23

III.3.1	Penentuan Kriteria Evaluasi	23
III.3.2	Penilaian Alternatif Solusi	23
III.3.3	Hasil Analisis	24
III.3.4	Keputusan Solusi yang Dipilih	24
IV	DESAIN KONSEP SOLUSI	26
IV.1	Model Konseptual Sistem	26
IV.1.1	Sistem Saat Ini (<i>Before</i>)	26
IV.2	Arsitektur Sistem Usulan (<i>After</i>)	27
IV.3	Perbandingan Sistem Saat Ini dan Usulan	30
V	RENCANA SELANJUTNYA	31
V.1	Rencana Implementasi	31
V.1.1	Linimasa Kegiatan	31
V.1.2	Lingkungan Pengembangan (<i>Development Environment</i>)	32
V.1.3	Alat dan Bahan (<i>Tools and Materials</i>)	32
V.1.4	Pengisian Surat Kode Etik Penelitian Hewan	33
V.1.5	Tahapan Implementasi	34
V.1.6	Rencana Anggaran Biaya	34
V.2	Rencana Evaluasi	35
V.2.1	Metode Pengujian	35
V.2.2	Kriteria Keberhasilan	36
V.3	Analisis Risiko dan Mitigasi	36

DAFTAR GAMBAR

IV.1 Model Konseptual Sistem Pemantauan Kukang Saat Ini (Observasi Manual)	27
IV.2 Model Konseptual Sistem Pemantauan Kukang Usulan (Otomatis Berbasis Computer Vision)	28

DAFTAR TABEL

III.1	Spesifikasi Kebutuhan Fungsional Sistem	21
III.2	Spesifikasi Kebutuhan Non-Fungsional Sistem	22
III.3	Kriteria Evaluasi dan Pembobotan	23
III.4	Matriks Penilaian Alternatif Solusi	24
IV.1	Perbandingan Sistem Saat Ini dan Sistem Usulan	30
V.1	Jadwal Pelaksanaan Tugas Akhir (Disesuaikan, Selesai Data April 2026)	31
V.2	Rencana Anggaran Biaya Penelitian	35
V.3	Analisis Risiko dan Strategi Mitigasi	37

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Upaya pelestarian keanekaragaman hayati di Indonesia menghadapi kompleksitas tinggi, terutama dalam menjaga populasi primata endemik seperti Kukang Sunda. Spesies ini tercatat dalam daftar merah International Union for Conservation of Nature (IUCN Red List) dengan status Endangered sejak tahun 2015 (International Union for Conservation of Nature 2020). Populasinya dilaporkan menurun drastis disebabkan oleh hilangnya habitat, fragmentasi hutan, serta tekanan dari perdagangan ilegal sebagai hewan peliharaan maupun untuk kebutuhan obat dan tradisi (Direktorat Jenderal Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem (KSDAE) 2023).

Meskipun informasi kuantitatif tentang ukuran populasi absolut sulit diperoleh karena sifat kukang yang nokturnal dan pemalu, penelitian dan laporan konservasi menunjukkan bahwa selama beberapa dekade terakhir terjadi penurunan populasi hingga sekitar 50% dalam rentang waktu tiga generasi akibat deforestasi dan fragmentasi habitat (NePrimate Conservancy 2024).

Selain ancaman dari perdagangan dan hilangnya habitat, Kukang Sunda menghadapi tekanan dari degradasi lingkungan yang menyebabkan fragmentasi hutan. Fragmentasi ini memutus ruang jelajah serta koneksi antar populasi, padahal kukang sangat bergantung pada kanopi pohon untuk berpindah dari satu area ke area lain (Mandai Wildlife Reserve 2023; Plazi TreatmentBank 2024).

Secara ekologis, keberadaan Kukang Sunda memegang peran penting dalam menjaga fungsi hutan tropis. Sebagai primata nokturnal yang memakan buah, nektar, getah pohon, dan serangga, kukang berkontribusi pada penyebaran biji (seed dispersal), penyerbukan (pollination), serta pengendalian populasi serangga (insect control) (NePrimate Conservancy 2024). Kehadirannya membantu regenerasi vegetasi

hutan dan menjaga kestabilan ekosistem, sehingga sangat vital bagi kelangsungan hutan dan keberagaman hayati (Yayasan IAR Indonesia 2024; NePrimate Conservancy 2024).

Hilangnya kukang dari habitat alaminya dapat memicu ketidakseimbangan ekologis. Penurunan penyebaran biji dan penyerbukan tanaman dapat menghambat regenerasi hutan, yang pada gilirannya menurunkan daya dukung lingkungan. Selain itu, hilangnya pengendali alami serangga dapat menyebabkan ledakan populasi hama yang merugikan pertanian dan tanaman lokal, memberikan dampak negatif tidak hanya pada ekosistem, tetapi juga pada manusia. Banyak lembaga konservasi menyatakan bahwa menjaga kukang di alam liar sama artinya dengan menjaga fungsi ekologis hutan, yang pada akhirnya berkontribusi pada kesejahteraan manusia (Yayasan IAR Indonesia 2024; NePrimate Conservancy 2024).

Namun demikian, upaya konservasi dan pemantauan kukang sering mengalami keterbatasan signifikan. Metode saat ini, seperti observasi lapangan maupun pelacakan manual rentan terhadap bias dan sangat bergantung pada ketersediaan sumber daya manusia serta waktu. Selain itu, sifat kukang yang nokturnal, aktif pada malam hari, dan sering bersembunyi di kanopi yang tinggi membuat proses pemantauan dan dokumentasi menjadi semakin sulit.

Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan teknologi informasi, khususnya visi komputer (computer vision) dan kecerdasan buatan (artificial intelligence), menawarkan peluang baru. Metode seperti deep learning, termasuk Convolutional Neural Networks (CNN), telah terbukti mampu mengenali pola visual kompleks seperti mendekripsi wajah dan ekspresi pada manusia maupun hewan (LeCun, Bengio, dan Hinton 2015). Namun, penerapan teknologi tersebut pada primata endemik seperti Kukang Sunda masih sangat minim sehingga potensi teknologi ini dalam konservasi hewan liar belum banyak dimanfaatkan.

Melalui tugas akhir ini, penulis bermaksud mengisi kekosongan tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi serta pengenalan ekspresi wajah pada Kukang Sunda. Dengan pendekatan berbasis deep learning, diharapkan sistem ini dapat menyediakan data objektif dan real-time mengenai kondisi fisiologis dan emosional kukang, sehingga memberi dukungan nyata bagi upaya rehabilitasi, pelepasliaran, dan pemantauan populasi.

Pendekatan ini bukan sekadar bersifat teknis atau akademik: ia juga mencerminkan komitmen terhadap nilai kemanusiaan dan ekologis, yaitu menghargai kehidupan

hewan, menjaga keberlangsungan biodiversitas, dan mewujudkan ekosistem yang sehat sekaligus bermanfaat bagi manusia. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada upaya konservasi yang berkelanjutan dan holistik dengan menghubungkan ilmu teknologi informasi dengan ekologi dan kesejahteraan masyarakat.

I.2 Rumusan Masalah

Upaya konservasi Kukang Sunda masih menghadapi tantangan signifikan, terutama dalam hal pengumpulan dan analisis data perilaku secara objektif. Proses observasi yang masih dilakukan secara manual membuat akurasi pemantauan kondisi kesehatan kukang sangat bergantung pada pengalaman pengamat, sehingga rentan terhadap *human error* dan inkonsistensi. Selain itu, belum tersedianya dataset ekspresi wajah kukang yang terdigitalisasi menghambat penerapan teknologi kecerdasan buatan dalam mendeteksi kondisi stres atau kesehatan secara otomatis. Minimnya sistem pemantauan berbasis Computer Vision yang mampu bekerja stabil pada kondisi lapangan, seperti variasi pencahayaan di habitat atau pusat rehabilitasi juga menjadi kelemahan yang perlu diatasi.

Rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mendigitalisasi dataset ekspresi wajah kukang sunda terkait responnya terhadap kondisi lingkungan?
2. Bagaimana cara merancang dan mengembangkan model Artificial Intelligence berbasis Computer Vision yang mampu mendeteksi dan mengenali ekspresi wajah kukang di berbagai kondisi pencahayaan secara otomatis?

I.3 Tujuan

Tujuan utama dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah merancang, mengembangkan, dan mengimplementasikan sebuah model Artificial Intelligence berbasis Computer Vision yang mampu:

1. Mendigitalisasi dataset ekspresi wajah kukang terkait respon terhadap lingkungan. Dataset ini dapat digunakan untuk penelitian lain yang berkaitan dengan primata.
2. Mendeteksi dan mengenali ekspresi wajah primata untuk memantau kondisi kesehatan dan perilaku mereka.

Secara spesifik, tujuan yang ingin dicapai adalah:

1. Menghasilkan *dataset* citra wajah Kukang Sunda dari rekaman *night vision* yang telah dianotasi dan divalidasi label ekspresinya (seperti posisi mata, te-

- linga, dan mulut) berdasarkan validasi perilaku dari mitra konservasi.
2. Membangun model *Computer Vision* yang mampu mendeteksi wajah kukang dan mengklasifikasikan ekspresinya dengan tingkat akurasi yang terukur, dengan fokus pada fitur wajah seperti perubahan bentuk dan gerak mulut, mata, dan telinga.
 3. Melakukan validasi kinerja model menggunakan data uji untuk memastikan sistem dapat berfungsi pada kondisi pencahayaan minim sesuai lingkungan habitat kukang.

Kriteria keberhasilan tugas akhir ini adalah terbentuknya model yang mampu mengenali ekspresi wajah kukang pada data uji dengan metrik evaluasi (seperti akurasi, presisi, dan *recall*) yang memadai untuk kebutuhan pemantauan awal.

I.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penggerjaan, pelaksanaan tugas akhir ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

1. Data masukan yang digunakan berupa rekaman video atau citra digital dari kamera *night vision* (inframerah/minim cahaya) yang diperoleh dari lingkungan konservasi.
2. Pelabelan ekspresi wajah (*ground truth*) didasarkan pada panduan dari ahli primata/dokter hewan dari tim IPB dan UNPAD, tidak mencakup analisis klinis atau hormonal secara langsung oleh penulis.
3. Sistem yang dikembangkan berbasis video, belum mencakup implementasi *real-time* penuh selama tugas akhir ini.
4. Penelitian hanya mencakup pengenalan ekspresi wajah kukang pada rekaman video dengan fokus yang terbatas pada bagian wajah yang terlihat jelas, tidak mencakup analisis saat wajah tidak terlihat karena kondisi gerak kukang yang tidak terprediksi.
5. Penelitian dilakukan pada kondisi lingkungan yang terkontrol dengan parameter pencahayaan dan struktur habitat tertentu, sehingga belum mencakup berbagai variasi kondisi lingkungan antar pusat rehabilitasi yang berbeda.
6. Penggunaan alat perekam terbatas pada spesifikasi tertentu yang ditentukan dalam penelitian ini, tidak mencakup pengujian dengan berbagai tipe atau spesifikasi alat perekam yang berbeda.
7. Penelitian hanya melibatkan individu kukang dengan kriteria kesehatan dan kondisi fisik tertentu sesuai standar etika penelitian, tidak mencakup individu dengan kondisi medis kompleks atau stres berat yang akan mempengaruhi

validitas analisis.

8. Sistem yang dikembangkan hanya digunakan untuk menganalisis dan menyimpan rekaman video yang telah terlebih dahulu direkam, tidak mencakup sistem pemantauan real-time langsung dari kamera yang terintegrasi secara langsung dengan sistem pengambilan keputusan.

I.5 Metodologi

Pelaksanaan tugas akhir ini mengacu pada kerangka kerja *Systems Development Life Cycle* (SDLC) yang mencakup beberapa tahapan utama.

1. *Planning*

Tahap ini dimulai dengan studi literatur mendalam mengenai teknik-teknik terkini dalam deteksi objek dan pengenalan ekspresi wajah pada hewan. Peneliti meninjau berbagai tantangan teknis dalam pemantauan satwa liar, terutama pada hewan nokturnal seperti Kukang Sunda yang memiliki perilaku bergerak tidak terprediksi dan sering berada pada kondisi pencahayaan rendah. Selain itu, dilakukan pula perumusan ruang lingkup penelitian, pembagian fokus antara deteksi dan klasifikasi, serta penyusunan rencana kerja dan penjadwalan kegiatan penelitian.

2. *Requirement Analysis*

Tahap ini mencakup analisis kebutuhan data, di mana peneliti mengidentifikasi sumber data yang relevan berupa video dan citra Kukang Sunda dari pusat rehabilitasi. Data yang dikumpulkan kemudian diseleksi berdasarkan kualitas visual, seperti keterlihatan wajah dan kejernihan citra. Selain itu dilakukan juga studi mengenai kebutuhan sistem dari sisi konservasi dan validasi perilaku/hormonal melalui koordinasi dengan mitra penelitian (IPB dan UNPAD).

3. *System Design*

Pada tahapan ini dilakukan perancangan arsitektur sistem deteksi ekspresi wajah yang mencakup modul pengambilan data video, modul deteksi wajah, modul ekstraksi fitur ekspresi, dan modul klasifikasi ekspresi. Tahap ini juga melibatkan perancangan struktur database untuk menyimpan dataset citra wajah kukang beserta anotasi label ekspresi yang telah divalidasi oleh tim IPB dan UNPAD.

4. *Implementation & Development*

Tahap ini mencakup implementasi model deteksi wajah dan klasifikasi ekspresi berbasis *Deep Learning* dan *Computer Vision*, termasuk pengumpulan data video dari lokasi mitra dan penerapan teknik pra-pemrosesan citra. Dilakukan juga pelatihan model dengan dataset yang telah disiapkan untuk meng-

enali berbagai ekspresi wajah kukang (santai, stres, sakit).

5. *Testing & Validation*

Tahapan ini melibatkan evaluasi kinerja model dengan metrik seperti akurasi, presisi, *recall*, dan F1-score menggunakan data uji. Dilakukan pula validasi sistem di lokasi mitra untuk memastikan sistem dapat bekerja efektif dalam kondisi nyata dan memberikan hasil yang konsisten dengan data validasi hormonal dari UNPAD.

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1 Kukang Sunda (*Nycticebus coucang*)

Kukang Sunda (*Nycticebus coucang*) merupakan salah satu dari sembilan spesies kukang yang termasuk dalam genus *Nycticebus*. Primata ini berada dalam famili Lorisidae dan ordo Primates, dengan ciri khas berupa tubuh kecil, gerakan lambat, mata besar, serta adaptasi kuat terhadap kehidupan nokturnal. Secara taksonomi, spesies ini dikategorikan sebagai bagian dari subordo Strepsirrhini, kelompok primata dengan karakteristik morfologis seperti rhinarium basah dan indra penciuman yang dominan (Nekaris dan Jaffe 2007).

Secara geografis, Kukang Sunda tersebar di kawasan Asia Tenggara, khususnya di Sumatra, Semenanjung Malaysia, Thailand Selatan, dan sebagian kecil wilayah Singapura. Habitat utamanya meliputi hutan hujan tropis, hutan sekunder, serta kawasan terdegradasi yang masih menyediakan tutupan vegetasi yang cukup. Kajian lapangan menunjukkan bahwa Kukang Sunda masih dapat bertahan di wilayah yang mengalami gangguan moderat, meskipun preferensi utamanya adalah hutan dengan struktur kanopi yang rapat untuk mendukung mobilitas arborealnya (NePrimate Conservancy 2024).

Distribusi yang luas ini tidak menjamin kelestarian populasinya karena tekanan antropogenik, terutama deforestasi dan fragmentasi habitat. Studi-studi konservasi menegaskan bahwa populasi Kukang Sunda mengalami penurunan signifikan dalam tiga dekade terakhir, sehingga pemahaman mengenai distribusi aktual dan kondisi habitat menjadi krusial untuk upaya perlindungan yang efektif (NePrimate Conservancy 2024).

II.1.1 Perilaku, Ekologi, dan Pola Aktivitas

Kukang Sunda merupakan primata nokturnal dengan aktivitas utama terjadi setelah matahari terbenam. Perilakunya cenderung soliter, bergerak perlahan, dan menunjukkan pola aktivitas yang sangat bergantung pada ketersediaan sumber pakan. Hasil penelitian lapangan menunjukkan bahwa individu kukang dapat menghabiskan hingga 40% waktunya untuk mencari makan, dengan pola jelajah yang relatif terbatas namun konsisten di wilayah teritorialnya (NePrimate Conservancy 2024).

Secara ekologis, Kukang Sunda memainkan peran penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem hutan tropis. Dietnya yang beragam seperti buah, nektar, getah pohon, dan berbagai jenis serangga menempatkannya sebagai agen penyebar biji (seed disperser), penyebuk (pollinator), sekaligus pengendali populasi serangga di habitat alaminya. Perannya sebagai penyebuk, misalnya, terkait dengan kemampuannya mengakses bunga pada malam hari, memberikan kontribusi signifikan terhadap regenerasi vegetasi dan dinamika struktur hutan (NePrimate Conservancy 2024).

Namun demikian, karakteristik perilaku kukang yang lambat, pemalu, dan aktif di ketinggian kanopi membuat pengamatannya menjadi tantangan besar. Aktivitas nokturnal menyebabkan rendahnya visibilitas, sedangkan posisi tubuh yang sering bersembunyi di balik dedaunan membuat pengenalan visual sangat bergantung pada teknologi dan teknik dokumentasi yang memadai (NePrimate Conservancy 2024).

II.1.2 Status Konservasi dan Ancaman

Berdasarkan daftar merah International Union for Conservation of Nature (IUCN), Kukang Sunda dikategorikan sebagai spesies berstatus Terancam Punah (Endangered) (International Union for Conservation of Nature 2020). Status ini merefleksikan penurunan populasi yang diperkirakan mencapai 30–50% dalam tiga generasi, terutama akibat degradasi habitat, fragmentasi kawasan hutan, serta tekanan antropogenik yang terus meningkat. Penelitian konservasi sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi deforestasi, hilangnya tutupan kanopi, dan semakin sempitnya ruang jelajah telah memberikan dampak signifikan terhadap keberlangsungan populasi kukang di alam liar (NePrimate Conservancy 2024).

Salah satu ancaman paling serius yang dihadapi Kukang Sunda adalah perdagangan ilegal. Laporan konservasi terbaru yang disusun oleh Yayasan IAR Indonesia mengungkapkan bahwa kukang secara rutin ditangkap untuk dijadikan hewan peliharaan atau objek hiburan, terutama karena meningkatnya permintaan pasar dan

penyebaran konten digital yang menampilkan kukang sebagai hewan lucu (Yayasan IAR Indonesia 2017). Banyak individu kukang mengalami perlakuan brutal selama proses penangkapan dan distribusi, termasuk praktik pencabutan gigi yang bertujuan menghilangkan kemampuan menggigitnya, padahal kukang memiliki kelenjar racun. Tindakan tersebut tidak hanya melanggar prinsip kesejahteraan hewan, tetapi juga menyebabkan tingkat mortalitas yang sangat tinggi, baik sebelum maupun sesudah masuk ke rantai perdagangan.

Selain perdagangan ilegal, fragmentasi hutan akibat konversi lahan untuk pertanian, perkebunan, dan pemukiman turut memperburuk kondisi konservasi. Hilangnya struktur kanopi yang kontinu sebagai jalur utama pergerakan kukang membatasi kemampuan mereka berpindah, mencari makan, dan berinteraksi dengan kelompok populasi lain. Isolasi populasi yang terjadi dalam jangka panjang dapat menurunkan keragaman genetik dan meningkatkan kerentanan terhadap ancaman eksternal, menjadikan upaya konservasi semakin mendesak.

Dengan besarnya tekanan ekologis dan antropogenik tersebut, pemantauan populasi kukang yang lebih akurat, efisien, dan didukung teknologi menjadi kebutuhan mendesak dalam rangka meningkatkan efektivitas program perlindungan dan rehabilitasi.

II.2 Ekspresi Wajah pada Primata

Ekspresi wajah merupakan salah satu kanal komunikasi sosial terpenting pada primata. Banyak spesies primata menggunakan perubahan otot wajah untuk menyampaikan emosi, intensi perilaku, serta status sosial dalam kelompok. Menurut Burrows (2008), primata umumnya memiliki sistem musculi mimetic (facial musculature) yang lebih kompleks dibanding banyak mamalia lain, yang memungkinkan rentang ekspresi wajah cukup luas tergantung adaptasi ekologis dan kondisi sosial.

II.2.1 Sistem Pengkodean Wajah (FACS dan AnimalFACS)

Untuk menganalisis ekspresi wajah secara objektif dan standarisasi, metode yang paling umum digunakan adalah *Facial Action Coding System* (FACS). Dikembangkan pertama kali oleh Ekman dan Friesen pada tahun 1978 untuk manusia, sistem ini berbasis anatomi yang mengkategorikan gerakan wajah berdasarkan kontraksi otot individu atau kelompok otot yang disebut sebagai *Action Units* (AUs) (Ekman dan Friesen 1978). Keunggulan utama FACS adalah objektivitasnya; sistem ini mendeskripsikan gerakan fisik otot semata tanpa mengasumsikan emosi di balik-

nya, sehingga menghindari bias interpretasi pengamat (Waller, Julle-Daniere, dan Micheletta 2013).

Mengingat kedekatan evolusioner dan kemiripan struktur otot wajah, FACS telah diadaptasi ke berbagai spesies primata non-manusia, yang dikenal sebagai Animal-FACS. Beberapa adaptasi yang telah mapan antara lain:

1. ChimpFACS untuk simpanse (*Pan troglodytes*), yang memetakan gerakan wajah homolog dengan manusia (Vick dkk. 2007).
2. MaqFACS untuk monyet rhesus (*Macaca mulatta*), yang juga mengidentifikasi gerakan unik spesies seperti *Ear Flapping* (EAU1) yang tidak ditemukan pada manusia (Parr dkk. 2010).

Adaptasi ini memungkinkan peneliti untuk membandingkan repertoar ekspresi antar spesies (komparatif) dan menerjemahkan observasi biologis menjadi data komputasional yang terstruktur.

II.2.2 Anatomi Wajah dan Potensi Ekspresi pada Kukang

Penerapan analisis ekspresi wajah pada Kukang Sunda menghadapi tantangan taksonomi, mengingat posisinya sebagai primata *Strepsirrhini* (berhidung basah). Kelompok ini secara tradisional dianggap memiliki mobilitas wajah yang lebih terbatas dibandingkan *Haplorhini* (primata berhidung kering seperti monyet dan kera) karena struktur bibir atas yang menyatu dengan rhinarium (Diogo, Santana, dkk. 2012).

Namun, penelitian anatomi terbaru mengubah paradigma ini. Studi komprehensif yang dilakukan oleh Burrows dkk. (2024) melalui diseksi dan pemindaian 3D pada genus *Nycticebus* berhasil memetakan 19 otot wajah, termasuk otot-otot halus seperti *depressor anguli oris* dan *constrictor nasalis* (Burrows dkk. 2024). Temuan ini mengonfirmasi bahwa kukang memiliki "perangkat keras" anatomis yang memadai untuk menghasilkan ekspresi wajah yang kompleks dan bernuansa.

Selain itu, pola pewarnaan wajah (*facial mask*) pada kukang yang memiliki kontras tinggi—seperti cincin gelap di sekitar mata—diduga berfungsi sebagai sinyal aposematik untuk menarik perhatian pada kemampuan gigitan berbisa mereka (Nekaris dkk. 2019). Fitur kontras tinggi ini secara teknis menguntungkan dalam pengembangan sistem deteksi berbasis *Computer Vision* karena menciptakan gradien piksel yang tajam pada citra digital.

II.2.3 Grimace Scale sebagai Indikator Kesejahteraan

Dalam konteks konservasi dan pemantauan kesejahteraan hewan, analisis ekspresi wajah sering difokuskan pada deteksi nyeri atau stres melalui metode *Grimace Scale*. Berbeda dengan FACS yang memetakan seluruh gerakan, *Grimace Scale* secara spesifik mengidentifikasi perubahan fitur wajah yang berkorelasi dengan ketidaknyamanan fisik (Keating dkk. 2012).

Meskipun skala resmi untuk kukang belum dibakukan, literatur etologi mengidentifikasi beberapa perubahan wajah spesifik yang menjadi indikator stres atau nyeri pada spesies ini:

1. **Orbital Tightening:** Penutupan kelopak mata atau mata yang menyipit (*squinting*) bukan karena kantuk, melainkan respons terhadap nyeri atau cahaya terang (Nekaris dkk. 2022).
2. **Posisi Telinga:** Telinga yang ditarik ke belakang dan mendatar terhadap kepala (*flattened ears*) merupakan indikator universal agresi defensif atau ketidaknyamanan pada banyak mamalia, termasuk kukang (Fuller, Nekaris, dkk. 2015).
3. **Perubahan Mulut:** Menyeringai atau menarik sudut bibir sering kali merupakan tanda ketakutan, sementara menunjukkan gigi (*baring teeth*) adalah sinyal ancaman yang jelas (Nekaris dkk. 2022).

Pemahaman terhadap indikator visual ini menjadi dasar penting dalam pelabelan dataset untuk pelatihan model kecerdasan buatan, memungkinkan sistem untuk membedakan antara kondisi "Netral" dan "Stres/Sakit" secara otomatis.

II.3 Teknologi Computer Vision dalam Pemantauan Satwa Liar

Pemanfaatan teknologi dalam konservasi telah bergeser dari metode manual menuju otomatisasi cerdas. Secara tradisional, pemantauan populasi dan perilaku satwa liar bergantung pada transek garis dan pengamatan langsung yang memiliki keterbatasan signifikan, seperti biaya tinggi, intensitas tenaga kerja yang besar, serta potensi gangguan terhadap perilaku alami hewan (*observer effect*) (Greenberg dkk. 2020).

Revolusi penggunaan kamera trap digital (camera trap) menghasilkan lonjakan data visual yang tidak mungkin lagi dianalisis secara manual. Oleh karena itu, *Computer Vision* (CV)—cabang kecerdasan buatan yang melatih komputer untuk menafsirkan citra—telah menjadi standar baru untuk mengotomatisasi analisis ekologi, mulai dari deteksi spesies, penghitungan individu, hingga pengenalan perilaku (Norouzzadeh dkk. 2018).

II.3.1 Deteksi Objek: Arsitektur YOLO

Langkah fundamental dalam sistem analisis wajah hewan adalah melokalisasi area wajah di dalam *frame* gambar yang luas. Untuk tugas ini, algoritma deteksi objek berbasis *Deep Learning* menjadi pilihan utama. Di antara berbagai arsitektur yang ada, keluarga YOLO (*You Only Look Once*) mendominasi implementasi *real-time* karena efisiensinya.

Berbeda dengan metode dua tahap (*two-stage*) seperti Faster R-CNN yang memisahkan proses proposal wilayah dan klasifikasi, YOLO memprediksi kotak pembatas (*bounding boxes*) dan probabilitas kelas secara simultan dalam satu kali pemrosesan Neural Network (Kholgh dkk. 2020).

- **YOLOv5:** Versi ini sering digunakan dalam studi satwa liar karena keseimbangan optimal antara kecepatan inferensi dan akurasi, serta ukurannya yang ringan untuk perangkat lapangan. Lei dkk. (2022) membuktikan efektivitas YOLOv5 dalam mendekripsi dan mengklasifikasikan perilaku postural Kukang Bengal (*Nycticebus bengalensis*) dengan presisi tinggi pada kondisi malam hari (Lei dkk. 2022).
- **YOLOv8 Attention Mechanisms:** Iterasi terbaru seperti YOLOv8 menawarkan peningkatan pada mekanisme *Feature Pyramid Network* (FPN) untuk mendekripsi objek kecil. Integrasi modul atensi (seperti CBAM) pada arsitektur ini terbukti meningkatkan kemampuan deteksi pada citra termal/infrared dengan menekan *noise* dari latar belakang vegetasi yang kompleks (Wang dkk. 2024).

II.3.2 Deep Learning untuk Klasifikasi Ekspresi

Setelah wajah terdeteksi dan di-*crop*, tahap selanjutnya adalah klasifikasi ekspresi (misalnya: Netral vs. Stres). *Convolutional Neural Networks* (CNN) merupakan arsitektur yang paling efektif untuk tugas ini karena kemampuannya mengekstraksi fitur visual secara hierarkis, mulai dari tepi sederhana hingga tekstur wajah yang kompleks (Revina dan Emmanuel 2023).

Kendala utama dalam penerapan CNN pada satwa liar langka seperti Kukang Sunda adalah kelangkaan data (*data scarcity*). Melatih model dari awal membutuhkan ribuan citra berlabel. Solusi standar untuk masalah ini adalah *Transfer Learning*, yaitu teknik memanfaatkan model yang telah dilatih pada dataset raksasa (seperti ImageNet atau dataset wajah manusia) dan mengadaptasinya untuk tugas baru.

Studi terbaru, seperti inisiatif *PrimateFace*, menunjukkan bahwa model yang telah "belajar" mengenali wajah manusia memiliki performa dasar yang baik pada wajah primata, yang kemudian dapat ditingkatkan secara drastis melalui proses *fine-tuning* spesifik spesies (Parodi dkk. 2025).

II.3.3 Pengolahan Citra Nokturnal (*Night Vision*)

Karena sifat nokturnal Kukang Sunda, sebagian besar data diperoleh menggunakan kamera inframerah (IR). Citra IR memiliki karakteristik unik yang menantang bagi model standar yang dilatih pada citra RGB siang hari:

1. Kontras Rendah: Citra cenderung datar dengan histogram sempit, menyulitkan pembedaan fitur wajah (Sykora dkk. 2024).
2. Distribusi Cahaya Tidak Merata: Objek yang dekat kamera mengalami *overexposure* ("efek senter"), sementara latar belakang menjadi hitam pekat (Greenberg dkk. 2020).

Untuk mengatasi hal ini, teknik pra-pemrosesan citra (*preprocessing*) seperti *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE) sangat krusial. Berbeda dengan ekualisasi histogram biasa yang memperkuat *noise*, CLAHE meningkatkan kontras lokal secara adaptif. Penelitian oleh Tiwari dkk. (2023) menunjukkan bahwa penerapan CLAHE pada citra malam secara signifikan meningkatkan *Mean Average Precision* (mAP) algoritma deteksi karena mampu menonjolkan tepi dan detail tekstur yang sebelumnya tersembunyi dalam kegelapan (Tiwari dkk. 2023).

II.4 Dataset Satwa

Salah satu hambatan terbesar dalam penerapan *Deep Learning* untuk konservasi satwa liar adalah ketersediaan dataset terlabel yang berkualitas. Berbeda dengan pengenalan wajah manusia yang didukung oleh dataset masif (seperti LFW atau CelebA), dataset untuk primata, terlebih lagi untuk spesies nokturnal yang terancam punah, sangat terbatas (*data scarcity*).

II.5 Literatur Terkait

II.5.1 Penerapan Pengenalan Wajah pada Primata: Studi Kasus LemurFaceID

Salah satu penelitian fundamental dalam biometrik primata non-manusia dilakukan oleh Crouse dkk. (2017) yang mengembangkan sistem *LemurFaceID* untuk identifikasi individu Lemur Perut Merah (*Eulemur rubriventer*) di Ranomafana National

Park, Madagaskar. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan metode konvensional seperti penandaan fisik (*tagging/collaring*) yang bersifat invasif, berisiko melukai hewan, dan mahal, serta metode identifikasi manual yang sangat bergantung pada keahlian pengamat dan rentan terhadap bias subjektif.

Dalam pengembangan *LemurFaceID*, Crouse dkk. (2017) menemukan tantangan teknis yang spesifik pada wajah hewan yang tertutup bulu. Eksperimen awal mereka menggunakan fitur *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) yang umum digunakan pada objek kaku dan menghasilkan akurasi yang rendah (Rank-1: 73%). Hal ini disebabkan oleh sifat fitur SIFT yang terlalu sensitif terhadap pola rambut/bulu lokal yang berubah-ubah antar citra akibat faktor lingkungan atau pergerakan.

Sebagai solusi, penelitian ini beralih menggunakan pendekatan berbasis tekstur dengan metode *Patch-wise Multiscale Local Binary Pattern* (MLBP). Alur pemrosesan citra yang diterapkan meliputi:

1. Pra-pemrosesan (*Preprocessing*): Penyelarasan mata (*eye alignment*) secara manual, pemotongan (*cropping*), dan konversi ke *grayscale*.
2. Normalisasi Iluminasi: Mengadaptasi metode Tan dan Triggs untuk mengurangi dampak variasi pencahayaan dan tekstur bulu halus, menggunakan filter *Difference of Gaussians* (DoG).
3. Ekstraksi Fitur: Penggunaan MLBP untuk menangkap pola tekstur wajah lokal.
4. Reduksi Dimensi: Penerapan *Linear Discriminant Analysis* (LDA) untuk memaksimalkan perbedaan antar-kelas (antar individu) dan meminimalkan variasi dalam-kelas (foto berbeda dari individu yang sama).

Evaluasi sistem dilakukan menggunakan dataset berisi 462 citra dari 80 individu. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi, mencapai 98,7% ($\pm 1,81\%$) pada skenario *closed-set* dengan menggunakan fusi dua citra kueri.

Temuan ini sangat relevan bagi pengembangan sistem deteksi pada primata lain yang memiliki variasi pola wajah (masker wajah) yang distingtif, seperti Kukang Sunda. Crouse dkk. (2017) menyimpulkan bahwa teknologi pengenalan wajah mampu menjadi alternatif non-invasif yang valid untuk studi longitudinal jangka panjang, mengatasi kendala logistik dan etika yang melekat pada metode penandaan fisik.

II.5.2 Era Deep Learning pada Video Satwa Liar: Studi Kasus Simpanse

Jika Crouse dkk. (2017) meletakkan dasar pengenalan wajah primata menggunakan fitur tekstur manual, penelitian oleh Schofield dkk. (2019) menandai lompatan teknologi menuju penggunaan *Deep Learning* secara menyeluruh (*end-to-end*). Dalam studi mereka mengenai pengenalan wajah simpanse (*Pan troglodytes*) di alam liar, Schofield et al. mengembangkan sistem yang mampu menangani tantangan visual ekstrem yang sering gagal ditangani oleh metode konvensional, seperti pencahayaan buruk, gerakan cepat (*motion blur*), dan oklusi sebagian

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penerapan arsitektur Artificial Neural Network (ANN) yang kompleks pada data video, bukan hanya citra diam (*still images*). Pipa pemrosesan yang dikembangkan terdiri dari beberapa tahap:

1. Deteksi Wajah (*Single Shot Detector/SSD*): Menggunakan model SSD untuk mendeteksi wajah simpanse dalam setiap *frame* video secara *real-time*.
2. Pelacakan Wajah (*Tracking*): Menerapkan pelacak Kanade-Lucas-Tomasi untuk menghubungkan deteksi wajah antar-*frame* menjadi satu kesatuan lintasan (*tracklet*). Hal ini memungkinkan sistem untuk mengagregasi informasi dari berbagai sudut pandang wajah dalam satu urutan video.
3. Pengenalan Identitas (CNN): Menggunakan arsitektur ResNet-50 (VGG-M) yang telah dilatih ulang (*fine-tuned*) untuk mengklasifikasikan identitas individu berdasarkan fitur wajah yang diekstraksi dari CNN.

Salah satu faktor kunci keberhasilan Schofield dkk. (2019) adalah volume data. Mereka membangun arsip yang berisi lebih dari 10 juta deteksi wajah dari ribuan jam rekaman video yang dikumpulkan selama 14 tahun di Guinea, Afrika Barat. Evaluasi sistem menunjukkan akurasi identifikasi sebesar 92,5%, sebuah pencapaian signifikan mengingat data yang digunakan adalah data mentah "di alam liar" tanpa kontrol pencahayaan atau pose.

Studi ini memberikan implikasi penting bagi penelitian Kukang Sunda, terutama dalam hal penggunaan data video dibandingkan foto statis. Pendekatan Schofield membuktikan bahwa dengan memanfaatkan informasi temporal (urutan frame dalam video), model AI dapat mengenali individu dengan lebih akurat meskipun kualitas per-frame rendah akibat kondisi lingkungan (misalnya, kondisi malam hari pada kukang).

II.6 Research Gap

Berdasarkan tinjauan terhadap literatur terdahulu dan kondisi lapangan, penelitian ini mengidentifikasi beberapa kesenjangan krusial yang menghambat penerapan teknologi *Deep Learning* pada konservasi Kukang Sunda. Kesenjangan ini dikategorikan ke dalam tiga aspek utama:

1. Kelangkaan dan Ketiadaan Standardisasi Dataset (*Data Scarcity*)

Berbeda dengan penelitian pengenalan wajah manusia atau primata diurnal (seperti simpanse dan makaka) yang didukung oleh dataset publik berskala besar (misalnya *PrimateFace* atau *Labeled Faces in the Wild*), penelitian pada primata nokturnal menghadapi kendala *data scarcity* yang ekstrem.

- Belum tersedia dataset publik yang teranotasi secara baku untuk Kukang Sunda, sehingga validasi silang antar-penelitian sulit dilakukan.
- Data yang ada umumnya terbatas pada lingkungan terkontrol (pusat rehabilitasi) dan kurang merepresentasikan variabilitas kondisi alam liar (*unconstrained environments*).
- Keterbatasan jumlah sampel ini meningkatkan risiko *overfitting* pada model *Deep Learning* konvensional jika tidak ditangani dengan strategi augmentasi yang tepat.

2. Degradasi Kualitas Citra pada Domain Nokturnal

Mayoritas model deteksi objek (seperti YOLO) dilatih menggunakan citra RGB dengan pencahayaan optimal. Penerapan langsung model tersebut pada citra kukang menghadapi *domain shift* yang signifikan karena:

- Citra diambil menggunakan kamera *night vision/inframerah* yang bersifat monokromatik dan sering kali memiliki *noise* tinggi (ISO tinggi).
- Efek *motion blur* sering terjadi akibat pergerakan hewan dalam kondisi *low-light* dengan *shutter speed* rendah.
- Tanpa teknik pra-pemrosesan (*preprocessing*) khusus, fitur visual penting sering kali hilang dalam kegelapan atau tertutup *noise*, menurunkan akurasi deteksi secara drastis.

3. Kompleksitas Pengenalan Fitur Ekspresi Halus (*Subtle Features*)

Tantangan biometrik pada kukang jauh lebih tinggi dibandingkan manusia karena variansi morfologi antar-individu yang sangat rendah (sulit dibedakan secara kasat mata). Selain itu, ekspresi wajah kukang sebagai indikator stres atau kesejahteraan tidak menunjukkan perubahan bentuk wajah yang drastis, melainkan melalui sinyal mikro (*micro-signals*) seperti:

- Perubahan intensitas pembukaan mata (*orbital tightening*).

- Perubahan posisi telinga dan postur tubuh yang perlahan.

Model *Facial Expression Recognition* (FER) standar cenderung gagal menangkap nuansa ini tanpa mekanisme atensi visual (*visual attention*) atau resolusi citra yang memadai.

BAB III

ANALISIS MASALAH

III.1 Analisis Kondisi Saat Ini

Berdasarkan pengamatan terhadap proses rehabilitasi Kukang Sunda saat ini, teridentifikasi beberapa permasalahan utama yang mempengaruhi efektivitas pemantauan kesejahteraan satwa:

1. Keterbatasan Metode Observasi Manual

Penilaian kondisi kesehatan dan perilaku kukang sangat bergantung pada keahlian subjektif petugas lapangan. Hal ini menyebabkan inkonsistensi data dan risiko kesalahan diagnosis, serta tidak memungkinkan dilakukan pemantauan 24 jam secara intensif tanpa mengganggu satwa.

2. Kendala Biologis dan Lingkungan

Sifat nokturnal kukang serta ekspresi wajahnya yang tidak mencolok (*subtle*) dan sulit untuk diketahui menyulitkan pengamatan visual langsung oleh manusia, terutama pada malam hari saat satwa berada pada puncak aktivitasnya.

3. Kesenjangan Teknologi

Kamera pengawas yang tersedia di fasilitas rehabilitasi memiliki resolusi rendah dan/atau kualitas citra *low-light* yang buruk. Keterbatasan resolusi ini menyebabkan fitur-fitur wajah kukang yang penting seperti posisi telinga, mata, dan mulut sulit dibedakan dan diekstraksi oleh model komputasi. Selain itu, belum tersedianya dataset referensi wajah kukang yang terstandarisasi untuk kondisi *low-light* menjadi penghalang utama dalam pengembangan sistem deteksi otomatis.

4. Urgensi Peningkatan Efisiensi

Dengan meningkatnya kasus perdagangan ilegal dan keterbatasan sumber daya manusia (SDM), metode tradisional dinilai tidak lagi memadai untuk menangani volume kukang yang membutuhkan perawatan medis intensif. Dibutuhkan inovasi teknologi non-invasif untuk mempercepat deteksi stres dan

tanda-tanda gangguan kesehatan lainnya.

III.2 Analisis Kebutuhan

Berdasarkan kondisi saat ini dan permasalahan yang teridentifikasi, perlu dilakukan analisis kebutuhan yang mencakup identifikasi masalah pengguna, kebutuhan fungsional, serta kebutuhan non-fungsional dari sistem yang akan dikembangkan. Analisis ini dilakukan secara kolaboratif antara tim ITB (teknologi), IPB (perilaku dan ground truth), dan UNPAD (hormonal dan fisiologis).

III.2.1 Identifikasi Masalah Pengguna

Permasalahan dalam pemantauan Kukang Sunda tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berdampak langsung pada pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses rehabilitasi dan konservasi. Identifikasi masalah spesifik berdasarkan peran pengguna adalah sebagai berikut:

1. Petugas Konservasi (*Conservation Officers*)

Petugas lapangan bertanggung jawab atas pemantauan harian, pemberian pakan, dan pembersihan kandang. Masalah utama yang dihadapi meliputi:

- **Beban Operasional Tinggi:** Peningkatan jumlah kukang sitaan tidak sebanding dengan jumlah petugas, sehingga pemantauan intensif pada setiap individu menjadi sulit dilakukan. Metode manual yang ada saat ini sangat memakan waktu (*time-consuming*) dan tidak praktis untuk skala populasi yang besar.
- **Subjektivitas Pengamatan:** Penilaian perilaku (seperti tingkat aktivitas atau nafsu makan) rentan terhadap bias antar-pengamat (*inter-observer error*), di mana penilaian satu petugas bisa berbeda dengan petugas lainnya.
- **Keterbatasan Pengawasan Malam Hari:** Sifat nokturnal kukang mengharuskan pengawasan dilakukan pada malam hari. Keterbatasan visibilitas dan kelelahan manusia menurunkan kewaspadaan petugas terhadap tanda-tanda anomali perilaku.

2. Dokter Hewan (*Veterinarians*)

Tim medis berfokus pada kesehatan fisik, fisiologis, dan kesiapan rilis satwa. Kendala spesifik yang dihadapi adalah:

- **Keterbatasan Diagnosa Jarak Jauh:** Kamera CCTV yang ada saat ini umumnya memiliki resolusi rendah dan kualitas *night vision* yang buruk. Akibatnya, fitur-fitur wajah penting untuk diagnosa klinis—seperti *or-*

bital tightening (penyipitan mata), posisi telinga, atau kondisi mulut—menjadi kabur dan tidak dapat dianalisis dari rekaman video.

- **Dilema Metode Invasif:** Pemeriksaan fisik secara langsung (*handling*) sering kali memicu respons stres fisiologis akut hingga risiko cedera pada hewan. Dokter hewan membutuhkan metode pemantauan non-invasif yang mampu memberikan data objektif mengenai tingkat stres tanpa perlu menangkap hewan tersebut.
- **Deteksi Dini yang Terhambat:** Tanda-tanda klinis pada kukang sering kali bersifat subtil. Tanpa bantuan teknologi yang mampu mendeteksi perubahan mikro pada wajah atau postur, intervensi medis sering kali terlambat dilakukan.

3. Peneliti Primata (*Primate Researchers*)

Peneliti membutuhkan data yang akurat dan terstandarisasi untuk studi perilaku dan konservasi jangka panjang. Masalah yang dihadapi meliputi:

- **Observer Effect:** Kehadiran peneliti manusia secara fisik di lokasi observasi dapat mengubah perilaku alami hewan yang sedang diamati.
- **Kelangkaan Data Terstandarisasi (Data Scarcity):** Belum adanya dataset publik untuk ekspresi wajah primata nokturnal menghambat pengembangan studi komparatif. Sebagian besar data jangka panjang sulit diintegrasikan karena perbedaan metode identifikasi manual yang digunakan antar-penelitian.
- **Inefisiensi Pengumpulan Data:** Pengumpulan data etogram secara manual sangat lambat dan rentan kesalahan, membatasi volume data yang dapat dianalisis untuk memahami pola perilaku spesies secara komprehensif.

III.2.2 Kebutuhan Fungsional

Sistem yang akan dikembangkan harus memiliki fungsionalitas sebagai berikut:

Tabel III.1 Spesifikasi Kebutuhan Fungsional Sistem

Kode	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi Kebutuhan
F01	Deteksi Wajah Kukang	Sistem mampu melokalisasi area wajah Kukang Sunda (<i>Nycticebus coucang</i>) secara akurat dalam berbagai variasi intensitas cahaya, termasuk pada kondisi minim cahaya (<i>low-light</i>) menggunakan citra inframerah.
F02	Klasifikasi Ekspresi Wajah	Sistem dapat mengklasifikasikan status ekspresi wajah ke dalam kategori indikator kesejahteraan yang telah ditentukan, meliputi: santai (netral), stres, takut, agresif, dan tidak responsif.
F03	Ekstraksi Fitur Wajah	Sistem mampu melakukan pelacakan (<i>tracking</i>) otomatis pada fitur wajah kunci (seperti mata, telinga, dan mulut) untuk menganalisis perubahan morfologis yang berkaitan dengan ekspresi.
F04	Pemantauan Berkelanjutan	Sistem menyediakan kapabilitas pemantauan ekspresi secara kontinu (24/7) untuk mendukung observasi kondisi satwa secara <i>real-time</i> maupun terjadwal.
F05	Manajemen Arsip Data	Sistem secara otomatis menyimpan log hasil deteksi, rekaman video, penanda waktu (<i>timestamp</i>), dan metadata terkait ke dalam basis data untuk keperluan audit dan evaluasi lanjutan.
F06	Visualisasi Dasbor	Sistem memvisualisasikan hasil analisis data melalui antarmuka dasbor yang informatif, mencakup grafik tren perilaku, status terkini, dan representasi visual hasil deteksi ekspresi.
F07	Manajemen Input/Output	Sistem mendukung fungsionalitas impor data video eksternal untuk analisis <i>batch</i> serta ekspor hasil laporan analisis statistik dalam format standar yang dapat diunduh.
F08	Kontrol Akses Pengguna	Sistem menerapkan mekanisme manajemen hak akses berbasis peran (<i>Role-Based Access Control</i>) untuk membedakan otoritas antara petugas lapangan, administrator, dan peneliti.

III.2.3 Kebutuhan Non-fungsional

Selain kebutuhan fungsional, sistem juga harus memenuhi beberapa kebutuhan non-fungsional:

Tabel III.2 Spesifikasi Kebutuhan Non-Fungsional Sistem

Kode	Kebutuhan Non-Fungsional	Deskripsi Kebutuhan
NF01	Kinerja (<i>Performance</i>)	Sistem harus mampu memproses aliran data video dengan laju 15–30 <i>frames per second</i> (FPS) dan menyelesaikan deteksi ekspresi dalam waktu kurang dari 1 detik per <i>frame</i> .
NF02	Keandalan (<i>Reliability</i>)	Sistem harus mampu beroperasi secara stabil 24/7 dengan tingkat akurasi deteksi dan klasifikasi ekspresi minimal antara 85% hingga 90%.
NF03	Skalabilitas (<i>Scalability</i>)	Sistem harus dirancang untuk mengakomodasi penambahan jumlah <i>feed</i> kamera dan ekspansi ukuran dataset pelatihan tanpa mengalami penurunan kinerja pemrosesan yang signifikan.
NF04	Keamanan (<i>Security</i>)	Sistem wajib menerapkan mekanisme keamanan data yang kuat, mencakup enkripsi penyimpanan data, otentikasi pengguna, dan proteksi terhadap akses yang tidak sah.
NF05	Kemudahan Penggunaan (<i>Usability</i>)	Antarmuka pengguna harus dirancang secara sederhana dan intuitif sehingga mudah dioperasikan oleh petugas konservasi yang tidak memiliki latar belakang teknis yang mendalam.
NF06	Kompatibilitas (<i>Compatibility</i>)	Sistem harus kompatibel dengan berbagai jenis kamera inframerah (<i>IR/night vision</i>) yang tersedia dan fleksibel untuk diterapkan baik pada lingkungan <i>server</i> lokal maupun komputasi awan (<i>cloud</i>).
NF07	Keterawatan (<i>Maintainability</i>)	Sistem harus dibangun secara modular untuk mempermudah pemeliharaan, memungkinkan pembaruan model <i>Artificial Intelligence</i> (AI) secara independen, dan memfasilitasi pelatihan ulang (<i>retraining</i>) model.
NF08	Portabilitas (<i>Portability</i>)	Sistem harus dapat dijalankan pada lingkungan perangkat keras yang beragam, seperti komputer <i>desktop</i> , unit <i>server</i> , atau perangkat untuk pemantauan <i>mobile</i> .

III.3 Analisis Penentuan Solusi

Analisis penentuan solusi dilakukan untuk memilih pendekatan terbaik dalam meningkatkan efektivitas pemantauan kondisi Kukang Sunda, terutama dalam mendeteksi ekspresi wajah secara otomatis dan non-invasif. Proses pemilihan dilakukan dengan membandingkan empat alternatif solusi menggunakan metode pembobotan berdasarkan kriteria evaluasi yang relevan dengan kebutuhan lapangan.

III.3.1 Penentuan Kriteria Evaluasi

Kriteria yang digunakan untuk menilai setiap alternatif solusi dijabarkan pada Tabel III.3 berikut:

Tabel III.3 Kriteria Evaluasi dan Pembobotan

Kriteria	Bobot	Penjelasan
Akurasi & Objektivitas	0.30	Kemampuan sistem mengurangi subjektivitas dan menghasilkan analisis ekspresi yang konsisten dan akurat.
Efisiensi Waktu	0.20	Kecepatan solusi dalam menghasilkan informasi dan mendukung pemantauan <i>real-time</i> .
Keamanan Satwa (Non-Invasif)	0.20	Tingkat keamanan dan kenyamanan kukang, menghindari stres tambahan akibat interaksi fisik.
Biaya Implementasi	0.15	Tingkat biaya awal dan biaya pemeliharaan jangka panjang.
Kesesuaian dengan Kondisi Lapangan	0.15	Kesesuaian solusi dengan perilaku nokturnal kukang dan kondisi infrastruktur pusat rehabilitasi.

III.3.2 Penilaian Alternatif Solusi

Berdasarkan kriteria di atas, dilakukan penilaian terhadap empat alternatif solusi (AS). Hasil pembobotan disajikan dalam Tabel dibawah.

Tabel III.4 Matriks Penilaian Alternatif Solusi

Alternatif Solusi	Akurasi (0.30)	Efisiensi (0.20)	Keamanan (0.20)	Biaya (0.15)	Kesesuaian (0.15)	Skor Total
AS01 – Observasi Manual	2	2	4	4	2	2.55
AS02 – Sensor Fisiologis (<i>Wearable</i>)	4	3	2	2	2	2.65
AS03 – Pemantauan Video Tanpa AI	3	3	5	4	3	3.55
AS04 – Sistem Deteksi Ekspresi Wajah Berbasis AI	5	5	5	3	5	4.70

Contoh Perhitungan untuk AS04:

III.3.3 Hasil Analisis

Berdasarkan hasil pembobotan pada matriks keputusan di atas, diperoleh analisis sebagai berikut:

1. **AS04 (Sistem Deteksi Ekspresi Wajah Berbasis AI & Computer Vision)** memperoleh skor tertinggi dengan total **4.70**, mengungguli alternatif solusi lainnya secara signifikan.
2. Solusi ini tidak hanya memenuhi kebutuhan prioritas utama (akurasi dan objektivitas), tetapi juga menjamin keamanan satwa (non-invasif) serta mampu bekerja secara *real-time* pada lingkungan rendah cahaya (*low-light*).

III.3.4 Keputusan Solusi yang Dipilih

Berdasarkan analisis pembobotan yang telah dilakukan, solusi yang dipilih untuk dikembangkan dalam penelitian ini adalah **AS04**, yaitu:

Sistem Deteksi dan Pengenalan Ekspresi Wajah Kukang Berbasis AI & Computer Vision

Solusi ini dipilih karena alasan-alasan berikut:

1. **Non-invasif:** Tidak menyebabkan stres pada satwa karena tidak memerlukan kontak fisik, sangat sesuai dengan karakter kukang yang sensitif.
2. **Otomatisasi 24/7:** Dapat berjalan secara kontinu mengatasi keterbatasan jumlah SDM petugas di lapangan.
3. **Akurasi Tinggi:** Memanfaatkan model *Deep Learning* modern untuk minimalkan subjektivitas penilaian manusia.
4. **Efisiensi Biaya Jangka Panjang:** Meskipun investasi awal lebih tinggi dibanding observasi manual, solusi ini lebih hemat biaya operasional jangka panjang.

5. **Dukungan Lingkungan Nokturnal:** Terintegrasi dengan kamera inframerah (*Night Vision*) yang sesuai dengan habitat alami kukang.
6. **Kualitas Data:** Menghasilkan data yang objektif, terstandardisasi, dan dapat didokumentasikan untuk keperluan penelitian lanjutan.

Dengan demikian, AS04 ditetapkan sebagai pilihan terbaik untuk meningkatkan efektivitas konservasi dan pemantauan Kukang Sunda secara berkelanjutan.

BAB IV

DESAIN KONSEP SOLUSI

Bab ini menyajikan rancangan sistem dan arsitektur teknis yang diusulkan untuk menjawab kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi, khususnya terkait masalah data scarcity dan kualitas citra nokturnal. Desain solusi ini berfokus pada pembangunan sistem pemantauan kesejahteraan kukang yang bersifat otomatis, objektif, dan non-invasif.

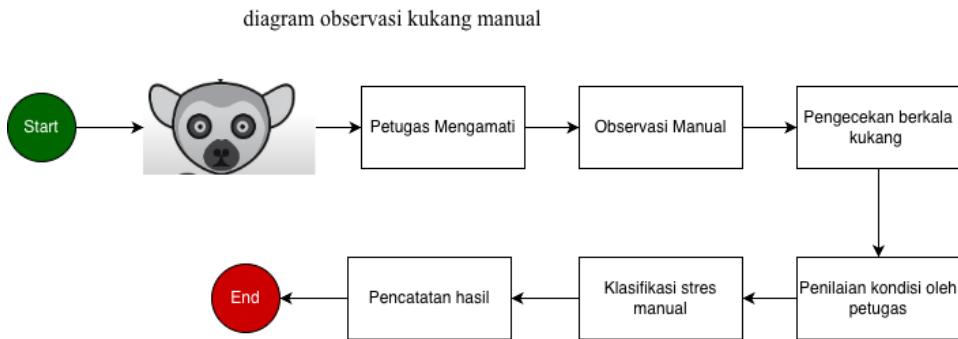
IV.1 Model Konseptual Sistem

Model konseptual sistem ini mengubah alur dari yang awalnya pengamatan dan pencatatan data dilakukan dengan serba manual oleh petugas menjadi sistem yang terotomatisasi berbasis Computer Vision dengan kemampuan klasifikasi ekspresi dan tingkat stres.

Pendekatan yang diusulkan memanfaatkan teknologi Computer Vision dan Kecerdasan Buatan (AI) sebagai inti dari proses identifikasi ekspresi wajah kukang, dengan fokus pada fitur morfologi seperti telinga, mulut, dan mata. Metode ini dipilih karena sesuai dengan karakteristik kukang yang merupakan hewan nokturnal sehingga pengambilan data hanya dapat dilakukan saat kondisi gelap dan juga ekspresi wajahnya yang bersifat subtle.

IV.1.1 Sistem Saat Ini (*Before*)

Model konseptual sistem saat ini digambarkan oleh Gambar ??, di mana proses observasi dan penilaian kondisi satwa sepenuhnya dilakukan secara manual oleh petugas konservasi.



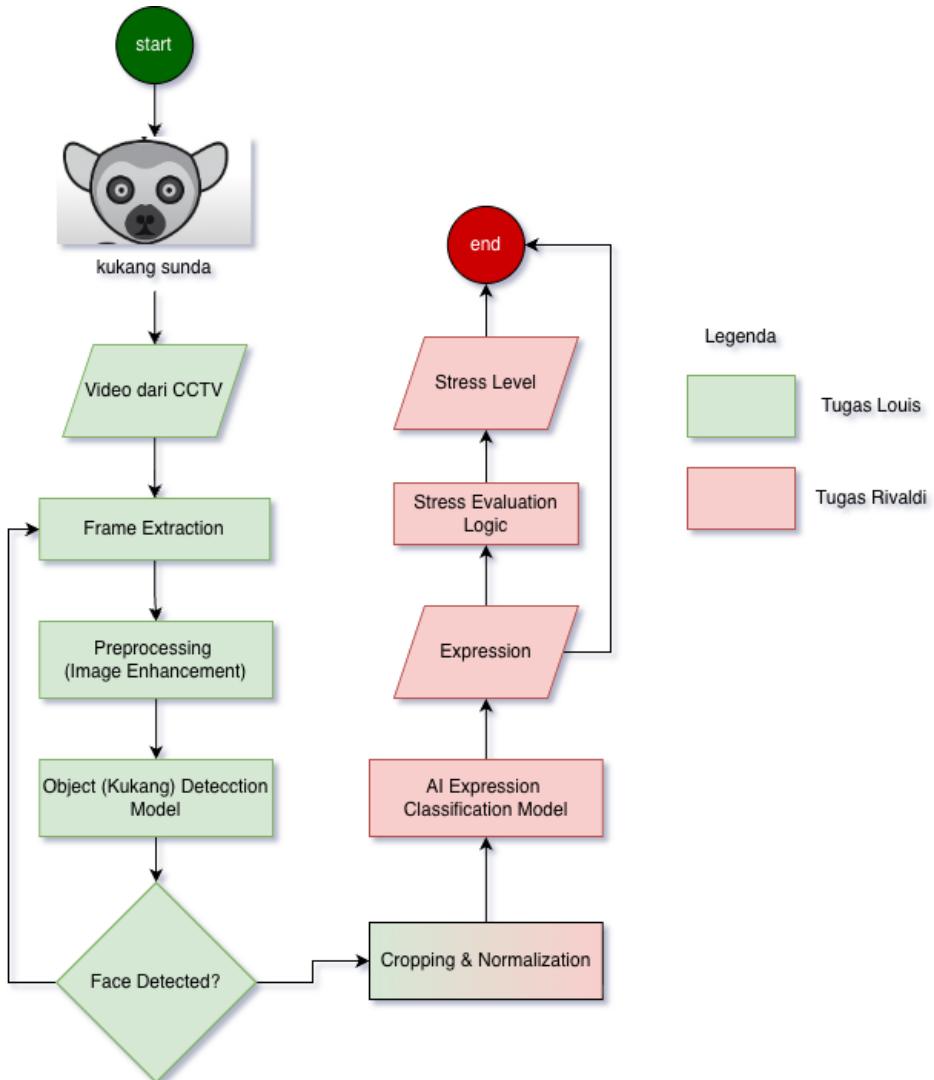
Gambar IV.1 Model Konseptual Sistem Pemantauan Kukang Saat Ini (Observasi Manual)

Seperti penjelasan singkat diatas sistem pemantauan kondisi Kukang Sunda saat ini (*As-Is*) masih alur kerja manual dan diskontinu yang diawali dengan pengamatan visual berkala oleh petugas konservasi. Proses ini melibatkan observasi perilaku satwa secara langsung, yang kemudian dilanjutkan dengan penilaian kondisi dan klasifikasi tingkat stres secara subjektif berdasarkan pengalaman petugas. Seluruh hasil observasi, penilaian, dan klasifikasi kondisi tersebut lantas dicatat secara manual ke dalam buku log atau formulir fisik sebagai tahap akhir dari sesi pemantauan yang dilakukan oleh petugas.

Kelebihan utama dari metode observasi manual ini terletak pada biaya implementasi awal yang rendah serta kemampuan intuisi manusia untuk menangkap konteks situasional yang kompleks. Metode ini juga dapat mendeteksi penyakit, luka, dan kondisi-kondisi fisik lainnya yang berada diluar jangkauan sistem usulan. Namun, kelemahan sistem ini jauh lebih krusial: proses penilaian sangat rentan terhadap subjektivitas dan bias antar pengamat, sistem tidak dapat berjalan secara kontinu (24/7), dan rentan terhadap kesalahan akibat kelelahan manusia. Kekurangan-kekurangan ini, ditambah dengan inefisiensi pencatatan data fisik, secara kolektif meningkatkan risiko latensi deteksi terhadap tanda-tanda awal stres atau gangguan kesehatan pada kukang.

IV.2 Arsitektur Sistem Usulan (*After*)

Berdasarkan analisis kelemahan pada sistem observasi manual dan identifikasi kesenjangan teknis, sistem usulan ini dapat bekerja secara otomatis dalam pemantauan kesejahteraan Kukang Sunda yang otomatis, objektif, dan non-invasif.



Gambar IV.2 Model Konseptual Sistem Pemantauan Kukang Usulan (Otomatis Berbasis Computer Vision)

Sistem usulan ini dirancang sebagai solusi otomatisasi *end-to-end* yang dikembangkan secara kolaboratif dengan pembagian fokus teknis yang terstruktur. Alur pemrosesan data dimulai dengan akuisisi video dari kamera pada kandang Kukang Sunda, diikuti oleh ekstraksi *frame* dan pra-pemrosesan citra (*image enhancement*) untuk meningkatkan kualitas visual pada kondisi pencahayaan rendah. Tahapan awal ini, termasuk pengembangan model deteksi objek untuk melokalisasi keberadaan wajah kukang secara spesifik, merupakan lingkup pengerjaan penulis.

Apabila wajah berhasil dideteksi, sistem melanjutkan ke proses *cropping* dan normalisasi citra area wajah. Tahap ini dikerjakan secara bersama-sama (kolaboratif) untuk memastikan kesesuaian input data antar-modul. Citra wajah yang telah dinor-

malisasi kemudian diteruskan ke model klasifikasi ekspresi dan logika evaluasi stres (*Stress Evaluation Logic*), yang merupakan tanggung jawab rekan peneliti. Sinergi dari kedua bagian ini menghasilkan keluaran berupa indikator tingkat stres dan jenis ekspresi, memungkinkan pemantauan kesehatan mental satwa secara digital dan terstruktur.

Kelebihan utama dari arsitektur sistem ini adalah kemampuannya untuk melakukan pemantauan secara kontinu (24/7) dan non-invasif, serta memberikan penilaian yang objektif dan terstandarisasi. Hal ini mengeliminasi bias subjektivitas pengamat dan mengatasi keterbatasan fisik petugas (seperti kelelahan). Selain itu, pendekatan modular yang memisahkan tanggung jawab pengembangan model deteksi dan klasifikasi memungkinkan optimalisasi yang lebih mendalam pada setiap tahapannya. Namun, tantangan utama sistem ini terletak pada ketergantungan tinggi terhadap kualitas citra input (terutama mode *night vision*); resolusi rendah atau *noise* tinggi berpotensi menyebabkan kegagalan pada tahap deteksi wajah yang menjadi pintu gerbang proses selanjutnya. Sistem ini juga menuntut sumber daya komputasi yang lebih besar dibandingkan metode manual, serta akurasi akhir yang sangat bergantung pada performa kedua model yang saling terintegrasi.

IV.3 Perbandingan Sistem Saat Ini dan Usulan

Tabel IV.1 Perbandingan Sistem Saat Ini dan Sistem Usulan

Parameter	Sistem Saat Ini (<i>As-Is</i>)	Sistem Usulan (<i>To-Be</i>)
Metode Observasi	Dilakukan secara manual melalui pengamatan visual langsung atau pemantauan monitor CCTV konvensional oleh petugas.	Dilakukan secara otomatis menggunakan algoritma <i>Computer Vision</i> dan <i>Deep Learning</i> untuk mendeteksi wajah dan ekspresi.
Ketersediaan Waktu	Bersifat diskontinu (berkala) mengikuti jadwal ronda atau jam kerja petugas, sehingga terdapat jeda waktu tanpa pengawasan.	Bersifat kontinu (24/7), sistem mampu memproses aliran data video tanpa henti baik siang maupun malam hari.
Objektivitas Penilaian	Subjektif, sangat bergantung pada pengalaman, tingkat kelelahan, dan interpretasi personal petugas lapangan.	Objektif dan terstandarisasi, penilaian didasarkan pada model klasifikasi yang konsisten terhadap setiap data input.
Pencatatan Data	Manual menggunakan buku log fisik atau formulir kertas, rentan hilang dan sulit untuk dianalisis tren jangka panjangnya.	Otomatis tersimpan ke dalam basis data digital (<i>database</i>), mencakup log waktu, jenis ekspresi, dan rekaman video.
Dampak pada Satwa	Berisiko menimbulkan <i>observer effect</i> (stres akibat kehadiran manusia) jika dilakukan observasi langsung di kandang.	Non-invasif, pemantauan dilakukan sepenuhnya dari jarak jauh tanpa interaksi fisik atau gangguan visual bagi satwa.
Kecepatan Deteksi	Memiliki latensi tinggi, gejala stres mungkin baru terdeteksi saat kondisi sudah memburuk atau saat jadwal pengecekan berikutnya.	Deteksi dini lebih cepat, sistem dapat mengidentifikasi perubahan ekspresi abnormal segera setelah video diproses.

BAB V

RENCANA SELANJUTNYA

Bab ini menjelaskan langkah-langkah rencana selanjutnya yang akan dilakukan dalam pelaksanaan tugas akhir, termasuk peralatan yang dibutuhkan, desain pengujian, serta analisis risiko dan mitigasinya.

V.1 Rencana Implementasi

V.1.1 Linimasa Kegiatan

Tabel V.1 Jadwal Pelaksanaan Tugas Akhir (Disesuaikan, Selesai Data April 2026)

Aktivitas (Oktober 2025 – September 2026)	Bulan & Tahun										
	Okt '25	Nov '25	Des '25	Jan '26	Feb '26	Mar '26	Apr '26	Mei '26	Jun '26	Jul '26	Agu '26
Studi Literatur & Analisis Kebutuhan											
Perencanaan Pengambilan Data											
Pengambilan Data											
Ekstraksi Data											
Anotasi Data											
Pembentukan Dataset											
Perancangan Arsitektur & Alternatif Solusi											
Implementasi Model AI & Integrasi Sistem											
Pengujian, Simulasi, & Validasi Expert											
Penyusunan Laporan Akhir											

V.1.2 Lingkungan Pengembangan (*Development Environment*)

Untuk mendukung proses pelatihan model *Deep Learning* dan pemrosesan citra, spesifikasi lingkungan komputasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Perangkat Keras Komputasi (*Computational Hardware*):

- *Processing Unit*: Workstation dengan GPU NVIDIA (minimal VRAM 8GB) atau penggunaan layanan *cloud computing* (seperti Google Colab Pro/RunPod) untuk akselerasi pelatihan model YOLO dan CNN.
- *Storage*: Penyimpanan SSD minimal 512GB untuk manajemen dataset video *high-resolution*.
- *Memory*: RAM minimal 16GB untuk kelancaran proses pra-pemrosesan data (*preprocessing*).

2. Perangkat Lunak (*Software*):

- **Sistem Operasi**: Windows 10/11 atau Linux (Ubuntu 20.04).
- **Bahasa Pemrograman**: Python 3.9+ sebagai bahasa utama.
- **Framework**: PyTorch atau TensorFlow untuk pengembangan model AI.
- **Library Utama**: OpenCV (pengolahan citra/CLAHE), Ultralytics (YOLO), Pandas/NumPy (analisis data).
- **Tools Anotasi**: LabelImg atau Roboflow untuk pelabelan *bounding box* dan kelas ekspresi.

V.1.3 Alat dan Bahan (*Tools and Materials*)

Selain lingkungan komputasi, penelitian ini memerlukan perangkat keras khusus untuk akuisisi data di lapangan (kandang observasi) guna menjamin kualitas data pada kondisi nokturnal.

1. Perangkat Keras Pengambilan Data:

- **Camera Trap Bushnell Core DS-4K (Dual Sensor) No Glow 32MP**: Digunakan sebagai alat perekam utama. Fitur *No Glow* sangat krusial agar cahaya kamera tidak mengganggu atau memicu stres pada kukang yang sensitif cahaya. Resolusi 4K diperlukan untuk menangkap detail fitur wajah halus.
- **Senter Infrared 940nm 10w IR**: Sumber pencahayaan tambahan tak kasat mata (spektrum 940nm tidak terlihat mata telanjang) untuk membantu kamera menangkap citra yang jelas tanpa mengubah perilaku alami satwa nokturnal.
- **Fotometer Digital (Luxmeter Digital Light Meter Lux FC)**: Digu-

nakan untuk mengukur intensitas cahaya ambien di sekitar kandang, memastikan data diambil pada kondisi *low-light* yang terukur dan konsisten.

- **SNDWAY Digital Sound Level Meter:** Digunakan untuk memantau tingkat kebisingan lingkungan sekitar kandang, guna memastikan variabel stres pada kukang tidak disebabkan oleh polusi suara eksternal selama pengambilan data.

2. Bahan Data (*Data Materials*):

- Dataset Video CCTV (Data Sekunder) dari mitra konservasi.
- Dataset Video Observasi Langsung (Data Primer) menggunakan Camera Trap.

V.1.4 Pengisian Surat Kode Etik Penelitian Hewan

Tahap pengisian surat kode etik penelitian hewan merupakan langkah penting sebelum proses pengumpulan data dan implementasi sistem dilakukan. Karena kukang (*Nycticebus* sp.) termasuk satwa dilindungi dan tergolong hewan nokturnal dengan sensitivitas tinggi terhadap cahaya dan stres, penelitian ini wajib mengikuti prosedur etika penelitian hewan sesuai regulasi lembaga dan peraturan pemerintah terkait kesejahteraan satwa (*animal welfare*).

Pada tahap ini, peneliti menyiapkan dokumen administratif yang diperlukan untuk mendapatkan izin pelaksanaan penelitian dari Komisi Etik Penelitian Hewan atau lembaga setara. Pengisian surat kode etik mencakup beberapa informasi utama, seperti tujuan penelitian, metode pengambilan data, durasi penelitian, lokasi observasi, serta deskripsi lengkap mengenai perlakuan yang diberikan kepada hewan. Peneliti juga harus menjelaskan bahwa penelitian tidak melibatkan kontak fisik, tidak memberikan perlakuan invasif, dan tidak menyebabkan gangguan fisiologis maupun psikologis pada satwa.

Selain itu, formulir kode etik juga harus memuat penilaian risiko terhadap hewan serta langkah mitigasi untuk menjamin kesejahteraan satwa selama proses penelitian. Hal ini meliputi pengaturan intensitas cahaya IR agar tidak mengganggu ritme biologis kukang, pengaturan jarak aman saat pengambilan gambar, serta memastikan proses observasi tidak mengubah pola perilaku alami.

Setelah dokumen diisi lengkap, peneliti menyerahkan formulir tersebut kepada unit komite etik untuk dievaluasi. Penelitian hanya dapat dimulai setelah persetujuan etis diperoleh secara resmi. Tahap ini memastikan bahwa seluruh proses penelitian ber-

langsung sesuai standar etika, tidak menimbulkan efek negatif terhadap satwa, dan sejalan dengan prinsip 3R (*Replacement, Reduction, Refinement*) dalam penelitian hewan.

V.1.5 Tahapan Implementasi

Proses implementasi akan dieksekusi melalui empat fase sekuensial:

1. **Persiapan dan Akuisisi Data:** Instalasi Camera Trap dan sensor lingkungan di lokasi observasi, diikuti pengambilan data video. Data kemudian divalidasi kualitasnya menggunakan parameter dari Luxmeter.
2. **Pra-pemrosesan Data:** Pembersihan data, ekstraksi *frame*, dan penerapan algoritma CLAHE untuk perbaikan kontras citra malam hari.
3. **Pengembangan dan Pelatihan Model:** Pelabelan data (*annotation*), pelatihan model deteksi wajah (YOLO), dan pelatihan model klasifikasi ekspresi dengan strategi *Transfer Learning*.
4. **Integrasi dan Pengujian:** Penyatuan modul deteksi dan klasifikasi, serta pengujian performa sistem terhadap data validasi.

V.1.6 Rencana Anggaran Biaya

Estimasi biaya yang diperlukan untuk pengadaan alat dan operasional penelitian disajikan pada Tabel dibawah.

Tabel V.2 Rencana Anggaran Biaya Penelitian

No	Item Kebutuhan	Estimasi Biaya (Rp)
A. Perangkat Keras Pengambilan Data		
1	Camera Trap Bushnell Core DS-4K (Dual Sensor) No Glow 32MP	8.000.000
2	Senter Infrared 940nm 10w IR	385.000
3	Fotometer Digital (Luxmeter Digital Light Meter Lux FC)	391.000
4	SNDWAY Digital Sound Level Meter	490.000
B. Operasional dan Komputasi		
5	Layanan Cloud Computing (GPU Rental/Colab Pro)	1.500.000
6	Media Penyimpanan Eksternal (SD Card High Speed & SSD)	1.000.000
7	Biaya Tak Terduga (10% dari total)	1.176.600
Total Estimasi Anggaran		12.942.600

V.2 Rencana Evaluasi

Evaluasi dilakukan untuk mengukur sejauh mana sistem memenuhi tujuan penelitian, baik dari sisi performa teknis maupun kegunaan praktis.

V.2.1 Metode Pengujian

Pengujian akan dilakukan menggunakan tiga pendekatan:

1. **Pengujian Kinerja Model (*Model Performance Testing*):** Menggunakan dataset uji (*test set*) yang tidak pernah dilihat model selama pelatihan. Metrik yang diukur meliputi:
 - *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score* untuk mengukur ketepatan klasifikasi ekspresi.
 - *Mean Average Precision* (mAP@0.5) untuk mengukur akurasi lokalisasi wajah oleh YOLO.
 - *Confusion Matrix* untuk menganalisis kesalahan prediksi antar kelas (misal: ekspresi 'Sakit' terdeteksi sebagai 'Netral').

2. **Validasi Ahli (*Expert Validation*):** Membandingkan hasil prediksi sistem dengan anotasi manual (*ground truth*) yang dilakukan oleh pakar perilaku hewan atau dokter hewan. Tingkat kesepakatan akan diukur untuk memvalidasi objektivitas sistem.
3. **Pengujian Kotak Hitam (*Black Box Testing*):** Menguji fungsionalitas sistem secara keseluruhan (input-output) untuk memastikan fitur seperti unggah video, pemrosesan, dan penyimpanan hasil berjalan sesuai spesifikasi tanpa melihat kode internal.

V.2.2 Kriteria Keberhasilan

Penelitian ini dianggap berhasil apabila memenuhi indikator berikut:

- Model deteksi wajah mampu mencapai $mAP \geq 85\%$ pada kondisi pencahayaan rendah (setelah CLAHE).
- Model klasifikasi ekspresi mencapai akurasi keseluruhan $\geq 80\%$ pada data uji.
- Sistem mampu memproses video dengan latensi yang dapat diterima (misal: < 1 detik per *frame* pada GPU standar), memungkinkan analisis yang efisien.

V.3 Analisis Risiko dan Mitigasi

Dalam pengembangan sistem ini, teridentifikasi sejumlah risiko potensial yang dapat menghambat keberhasilan proyek. Strategi mitigasi disusun untuk meminimalkan dampak risiko tersebut.

Tabel V.3 Analisis Risiko dan Strategi Mitigasi

Kategori Risiko	Identifikasi Masalah	Strategi Mitigasi
Data	Kelangkaan Data (Data Scarcity): Jumlah sampel video kukang yang berkualitas mungkin sangat terbatas.	Menerapkan teknik augmentasi data sintetik (rotasi, <i>mixup</i> , <i>mosaic</i>) dan menggunakan <i>Transfer Learning</i> dari model yang dilatih pada dataset wajah hewan lain.
Kualitas Citra	Fitur Wajah Tidak Terlihat: Pada kondisi <i>night vision</i> ekstrem, fitur mata/mulut mungkin tertutup bayangan atau <i>noise</i> .	Penerapan algoritma CLAHE (<i>Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization</i>) atau sejenisnya secara wajib pada tahap <i>preprocessing</i> untuk menonjolkan detail lokal.
Subjektivitas	Ambiguitas Label: Pakar mungkin memiliki perbedaan pendapat dalam melabeli ekspresi "stres" vs "normal".	Melakukan validasi silang antar pakar (minimal 3 pakar) dan menggunakan sistem <i>voting</i> mayoritas untuk menentukan label <i>ground truth</i> yang valid.
Teknis	Beban Komputasi Tinggi: Model terlalu berat untuk dijalankan pada perangkat laptop standar petugas.	Menggunakan arsitektur model yang ringan (<i>lightweight</i>) seperti YOLOv8-Nano atau MobileNet, serta menyediakan opsi pemrosesan berbasis <i>cloud</i> .

DAFTAR PUSTAKA

- Burrows, Anne M. 2008. “The facial expression musculature in primates and its evolutionary significance”. *BioEssays* 30 (3): 212–225. <https://doi.org/10.1002/bies.20719>.
- Burrows, Anne M., dkk. 2024. “From masks to muscles: Mapping facial structure of Nycticebus”. *The Anatomical Record*, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38872582/>.
- Crouse, David, Rachel L. Jacobs, Zach Richardson, Scott Klum, Anil Jain, Andrea L. Baden, dan Stacey R. Tecot. 2017. “LemurFaceID: a face recognition system to facilitate individual identification of lemurs”. *BMC Zoology* 2 (2). <https://doi.org/10.1186/s40850-016-0011-9>. <https://doi.org/10.1186/s40850-016-0011-9>.
- Diogo, Rui, Sharlene E. Santana, dkk. 2012. “Evolution of Facial Musculature”. *Annual Review of Anthropology*, <https://faculty.washington.edu/ssantana/worpress/wp-content/uploads/2013/02/Diogo-Santana%202017%20Chapter%208%20Evolution-of-facial-musculature.pdf>.
- Direktorat Jenderal Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem (KSDAE). 2023. “Informasi Konservasi Satwa Liar: Kukang Sunda”. Accessed 2025-10-22. <https://ksdae.menlhk.go.id/>.
- Ekman, Paul, dan Wallace V. Friesen. 1978. *Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Fuller, G., K. A. I. Nekaris, dkk. 2015. “Trialling exudate-based enrichment efforts to improve the welfare of rescued slow lorises Nycticebus spp.” *Endangered Species Research* 27:21–29. <https://www.int-res.com/articles/esr2015/27/n027p021.pdf>.

- Greenberg, S., dkk. 2020. “Automated Image Recognition for Wildlife Camera Traps: Making it Work for You”. *WildCAM*, https://wildcams.ca/site/assets/files/1389/2020-08-greenberg-imagerecognitioncameratraps_updated.pdf.
- International Union for Conservation of Nature. 2020. “Nycticebus coucang — The IUCN Red List of Threatened Species”. Accessed 2025-10-22. <https://www.iucnredlist.org/species/163017685/17970966>.
- Keating, S. C. J., A. A. Thomas, P. A. Flecknell, dan M. C. Leach. 2012. “The Utility of Grimace Scales for Practical Pain Assessment in Laboratory Animals”. (URL merujuk pada artikel terkait Grimace Scales di source 44), *Applied Sciences* 2:1838. <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/10/1838>.
- Kholgh, A., dkk. 2020. “Deep Learning for Wildlife Monitoring: Near-Infrared Bat Detection Using YOLO Frameworks”. *MDPI*, <https://www.mdpi.com/2624-6120/6/3/46>.
- LeCun, Yann, Yoshua Bengio, dan Geoffrey Hinton. 2015. “Deep Learning”. *Nature* 521 (7553): 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- Lei, T., dkk. 2022. “Postural behavior recognition of captive nocturnal animals based on deep learning: a case study of Bengal slow loris”. *Animals*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9095646/>.
- Mandai Wildlife Reserve. 2023. “Slow Loris Conservation Overview”. Accessed 2025-10-22. <https://www.mandai.com/>.
- Nekaris, K. A. I., dkk. 2019. “Venom in Furs: Facial Masks as Aposematic Signals in a Venomous Mammal”. *Toxins* 11 (2): 93. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6409604/>.
- . 2022. *EAZA Best Practice Guidelines for Nycticebus species*. European Association of Zoos and Aquaria (EAZA). https://strapi.eaza.net/uploads/EAZA_BPG_for_Nycticebus_species_2022_final_doi_82f4cc8101.pdf.
- Nekaris, K. A. I., dan S. Jaffe. 2007. “Unexpected diversity of slow lorises (Nycticebus spp.) within the Javan pet trade: Implications for slow loris taxonomy”. *Naturalis Institutional Repository*, <https://repository.naturalis.nl/document/54530>.
- NePrimate Conservancy. 2024. “Sunda Slow Loris (Nycticebus coucang) Profile”. Accessed 2025-10-22. <https://neprimateconservancy.org/>.

- Norouzzadeh, Mohammad Sadegh, dkk. 2018. “Automatically identifying, counting, and describing wild animals in camera-trap images with deep learning”. *PNAS*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6016780/>.
- Parodi, F., dkk. 2025. “PrimateFace: A Machine Learning Resource for Automated Face Analysis in Human and Non-human Primates”. *bioRxiv*, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.08.12.669927v1>.
- Parr, Lisa A., Bridget M. Waller, Anne M. Burrows, Katalin M. Gothard, dan Sarah-Jane Vick. 2010. “MaqFACS: A Muscle-Based Facial Movement Coding System for the Rhesus Macaque”. *PLoS ONE* 5 (10): e13524. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2988871/>.
- Plazi TreatmentBank. 2024. “Nycticebus coucang Species Information”. Accessed 2025-10-22. <https://treatment.plazi.org/>.
- Revina, I., dan W. S. Emmanuel. 2023. “Facial Emotion Detection Using Deep Learning: A Survey”. *IEEE Access*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10262904/>.
- Schofield, Daniel, Arsha Nagrani, Andrew Zisserman, Misato Hayashi, Tetsuro Matsumura, Dora Biro, dan Susana Carvalho. 2019. “Chimpanzee face recognition from videos in the wild using deep learning”. *Science Advances* 5 (9): eaaw0736. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0736>. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw0736>.
- Sykora, P., dkk. 2024. “Overview and Comparison of Deep Neural Networks for Wildlife Recognition Using Infrared Images”. *MDPI*, <https://www.mdpi.com/2673-2688/5/4/135>.
- Tiwari, A., dkk. 2023. “Enhancing Road Safety: Detection of Animals on Highways During Night”. *IEEE Xplore*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10902391/>.
- Vick, Sarah-Jane, Bridget M. Waller, Lisa A. Parr, Marisa C. Smith Pasqualini, dan Kim A. Bard. 2007. “Classifying Chimpanzee Facial Expressions Using Muscle Action”. *PLoS ONE* 2 (8): e743. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2826116/>.
- Waller, Bridget M., E. Julle-Daniere, dan J. Micheletta. 2013. “Rethinking primate facial expression: A predictive framework”. *Phil. Trans. R. Soc. B*, https://www.researchgate.net/publication/308125593_Rethinking_primate_facial_expression_A_predictive_framework.

- Wang, T., dkk. 2024. "Nighttime wildlife object detection based on YOLOv8-night". *ResearchGate*, https://www.researchgate.net/publication/383001184_Nighttime_wildlife_object_detection_based_on_YOLOv8-night.
- Yayasan IAR Indonesia. 2017. "Kukang dan Tantangan Konservasinya". Accessed 2025-10-22. <https://yiari.or.id/kukang-dan-tantangan-konservasinya/>.
- _____. 2024. "Konservasi Kukang dan Rehabilitasi Satwa". Accessed 2025-10-22. <https://www.internationalanimalrescue.org/indonesia>.