



INSTITUT PERTANIAN BOGOR

**MODEL PREDIKSI BODY CONDITION SCORE (BCS)
GAJAH SUMATERA BERDASARKAN CITRA
FOTOGRAMETRI DRON**

TESIS

**CHRISTIAWAN EKO SAPUTRO
M0503241005**

**SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
PROGRAM MAGISTER ILMU KOMPUTER
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS, SUMBER INFORMASI, PENGGUNAAN AI, DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Model Prediksi Body Condition Score (BCS) Gajah Sumatera Berdasarkan Citra Fotogrametri Dron” merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister ilmu komputer. Karya ini adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dalam penyusunan karya ini, saya menggunakan bantuan kecerdasan buatan *claude* untuk membantu penyempurnaan tata bahasa, struktur kalimat, dan kejelasan penulisan naskah yang telah saya susun sebelumnya. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, saya meninjau dan menyunting konten sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas isi karya tugas akhir ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Oktober 2026



Christiawan Eko Saputro
M0503241005

© Hak Cipta milik IPB, 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SOROTAN

CHRISTIAWAN EKO SAPUTRO. Model Prediksi Body Condition Score (BCS) Gajah Sumatera Berdasarkan Citra Fotogrametri Dron. Dibimbing oleh TOTO HARYANTO, MUSHTHOFA, dan DEDE AULIA RAHMAN.

1. Penelitian ini membahas BCS gajah sumatera, dengan tujuan untuk memprediksinya dari citra dron.
2. Penelitian ini menggunakan U-Net dan EfficientNetV2-M untuk menganalisis 32 gajah sumatera.
3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa IoU segmentasi 0,9742, R^2 0,9504, dan MAE 0,1095 pada regresi.
4. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap konservasi, serta menawarkan wawasan baru mengenai BCS.
5. Tesis ini menunjukkan pentingnya memprediksi BCS, dan menyarankan potensi penerapan pada satwa liar.

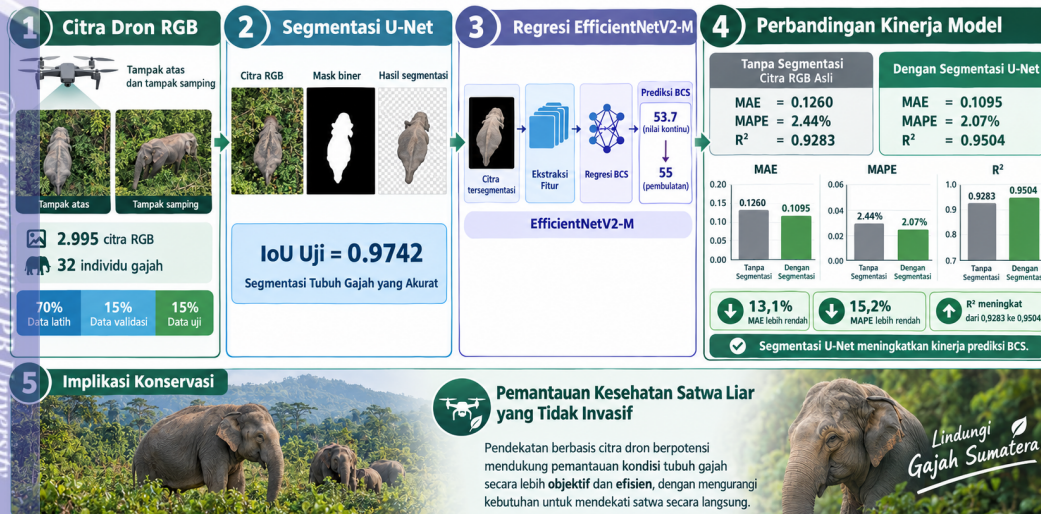
HIGHLIGHTS

CHRISTIAWAN EKO SAPUTRO. *A Model for Predicting the Body Condition Score (BCS) of Sumatran Elephants Based on Drone Photogrammetry Images. Supervised by TOTO HARYANTO, MUSHTHOFA, and DEDE AULIA RAHMAN.*

1. *This study addresses BCS of Sumatran elephants, aiming to predict it from drone imagery.*
2. *The research employs U-Net and EfficientNetV2-M to analyze images of 32 Sumatran elephants.*
3. *Results indicate that segmentation IoU was 0.9742, with regression R^2 0.9504 and MAE 0.1095.*
4. *The findings contribute to wildlife conservation, offering new insights into BCS prediction.*
5. *This thesis demonstrates the importance of BCS prediction, suggesting potential applications in wildlife.*

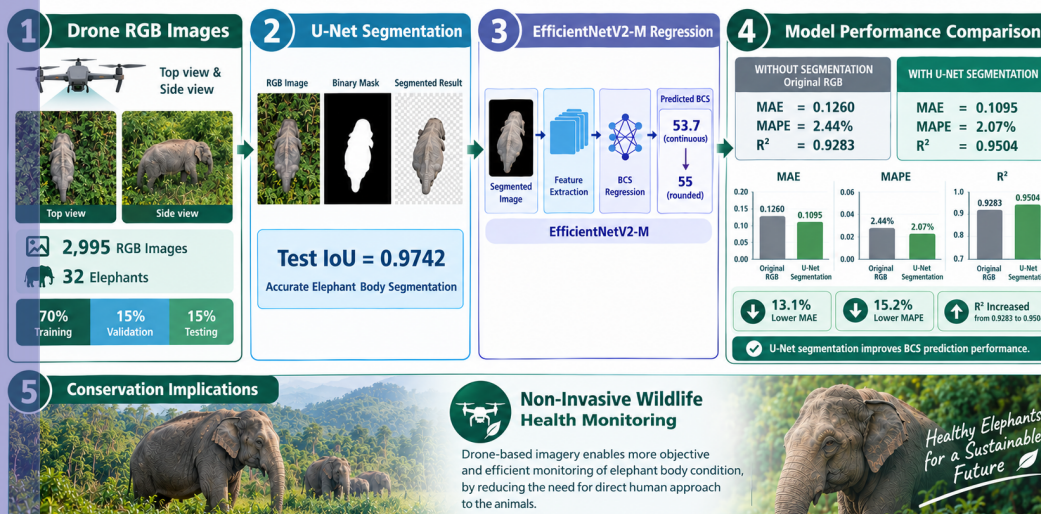


RINGKASAN VISUAL



Prediksi BCS Gajah Sumatera Berdasarkan Citra Dron

GRAPHICAL SUMMARY



Predicting Sumatran Elephant BCS Based on Drone Imagery

RINGKASAN

CHRISTIAWAN EKO SAPUTRO. Model Prediksi Body Condition Score (BCS) Gajah Sumatera Berdasarkan Citra Fotogrametri Dron. Dibimbing oleh TOTO HARYANTO, MUSHTHOFA, dan DEDE AULIA RAHMAN.

Gajah sumatera merupakan salah satu satwa dengan nilai ekologis tinggi yang dikategorikan sebagai spesies payung (*umbrella species*). Populasi gajah sumatera saat ini terus menurun secara signifikan, dari sekitar 2.800 sampai 4.800 ekor pada tahun 1985 menjadi sekitar 1.100 ekor pada tahun 2025, akibat rendahnya keberhasilan reproduksi yang diduga kuat terjadi karena fragmentasi habitat, konflik manusia–gajah, serta gangguan kesehatan dan kesejahteraan individu.

Taman Nasional Way Kambas (TNWK) adalah kawasan konservasi gajah sumatera, berfungsi sebagai pusat perlindungan, rehabilitasi, dan penelitian. Salah satu indikator kesejahteraan gajah adalah *body condition score* (BCS), yang mencerminkan kondisi fisik dan status gizinya.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model *deep learning* yang dapat memprediksi nilai BCS gajah sumatera secara otomatis dari citra fotogrametri dron. Pendekatan yang digunakan menggabungkan dua model, yaitu U-Net untuk segmentasi tubuh gajah dari latar belakang dan EfficientNetV2-M untuk memprediksi nilai BCS dari citra hasil segmentasi tersebut. Citra hasil segmentasi digunakan sebagai masukan pada tahap prediksi agar model lebih terfokus pada fitur tubuh gajah, sehingga nilai prediksi meningkat.

Dataset penelitian terdiri atas 2.995 citra RGB gajah sumatera dari 32 individu di TNWK, yang dibagi secara proporsional menjadi data latih (70%), validasi (15%), dan uji (15%). Model U-Net mencapai performa terbaik pada konfigurasi *learning rate* 0,0001 dan *dropout* 0,3, dengan *Intersection over Union* (IoU) sebesar 0,9742 pada data uji, yang menunjukkan kemampuan model untuk memisahkan area tubuh gajah dari latar belakang secara akurat. Pada tahap prediksi BCS, model EfficientNetV2-M dengan input citra hasil segmentasi U-Net mencapai performa terbaik pada konfigurasi *learning rate* 0,001 dan *dropout* 0,2, dengan *Coefficient of Determination* (R^2) = 0,9504 dan *Mean Absolute Error* (MAE) = 0,1095 pada data uji. Performa ini lebih baik dibandingkan dengan model menggunakan citra asli tanpa segmentasi (R^2 = 0,9283; MAE = 0,1260), dengan penurunan MAE sebesar 13,1%, yang menunjukkan bahwa segmentasi U-Net berkontribusi nyata terhadap peningkatan akurasi prediksi.

Kombinasi U-Net dan EfficientNetV2-M menghasilkan estimasi BCS yang akurat dan konsisten. Pendekatan berbasis citra dron ini mengurangi risiko bagi peneliti, dan meminimalkan gangguan terhadap satwa. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi *deep learning* berbasis citra dron berpotensi menjadi solusi alternatif yang konsisten dan efisien untuk mendukung pemantauan kesehatan dan program konservasi gajah sumatera.

Kata kunci: *body condition score*, *deep learning*, gajah sumatera, pengolahan citra digital, prediksi



SUMMARY

CHRISTIAWAN EKO SAPUTRO. *A Model for Predicting the Body Condition Score (BCS) of Sumatran Elephants Based on Drone Photogrammetry Images. Supervised by TOTO HARYANTO, MUSHTHOFA, and DEDE AULIA RAHMAN.*

The Sumatran elephant is a species of high ecological value, categorized as an umbrella species. Its population has declined significantly, from approximately 2,800–4,800 individuals in 1985 to around 1,100 individuals in 2025, due to low reproductive success that is strongly suspected to result from habitat fragmentation, human–elephant conflict, and impaired individual health and welfare.

Way Kambas National Park (TNWK) is a conservation area for Sumatran elephants, serving as a center for protection, rehabilitation, and research. One indicator of elephant welfare is the body condition score (BCS), which reflects an individual's physical condition and nutritional status.

This study aimed to develop a deep learning model that can automatically predict the BCS of Sumatran elephants from drone photogrammetry imagery. The approach combines two models: U-Net for segmenting the elephant's body from the background, and EfficientNetV2-M for predicting BCS from the segmented images. The segmented images were used as input at the prediction stage so that the model could focus on the elephant's body features, thereby improving prediction performance.

The dataset consisted of 2,995 RGB images of Sumatran elephants from 32 individuals in TNWK, proportionally split into training (70%), validation (15%), and test (15%) sets. The U-Net model performed best with a learning rate of 0.0001 and a dropout of 0.3, achieving an Intersection over Union (IoU) of 0.9742 on the test set, indicating its ability to accurately separate the elephant's body area from the background. At the BCS prediction stage, the EfficientNetV2-M model using U-Net-segmented images as input performed best with a learning rate of 0.001 and a dropout of 0.2, achieving a Coefficient of Determination (R^2) of 0.9504 and a Mean Absolute Error (MAE) of 0.1095 on the test set. This performance was better than that of the model using original, unsegmented images ($R^2 = 0.9283$; MAE = 0.1260), with a 13.1% reduction in MAE, demonstrating that U-Net segmentation contributes substantially to improved prediction accuracy.

The combination of U-Net and EfficientNetV2-M produced accurate and consistent BCS estimates. This drone imagery-based approach reduces risks for researchers and minimizes disturbance to the animals. These findings indicate that deep learning technology based on drone imagery has the potential to serve as an consistent and efficient alternative solution to support health monitoring and conservation programs for Sumatran elephants.

Keywords: *body condition score, deep learning, digital image processing, prediction, Sumatran elephants*



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

- 1 Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom., M.Kom.

Judul Tesis : Model Prediksi Body Condition Score (BCS) Gajah Sumatera
Berdasarkan Citra Fotogrametri Dron
Nama : Christiawan Eko Saputro
NIM : M0503241005

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Mushthofa, S.Kom., M.Sc.

Pembimbing 3:
Dr. Dede Aulia Rahman, S.Hut., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si.
NIP. 198211172014041001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP. 196607021993021001



Tanggal Ujian: 1 Oktober 2026

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PRAKATA

Penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, kasih, dan penyertaan-Nya sehingga penelitian berjudul "Model Prediksi Body Condition Score (BCS) Gajah Sumatera Berdasarkan Citra Fotogrametri Dron" dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini berlangsung dari Oktober 2025 hingga Agustus 2026.

Penulis secara khusus menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si., Bapak Dr. Mushthofa, S.Kom., M.Sc., dan Bapak Dr. Dede Aulia Rahman, S.Hut., M.Si. yang telah membimbing dan banyak memberi saran dan nasehat selama proses penelitian hingga penulisan tesis ini selesai. Terima kasih khusus kepada Bapak Dr. Dede Aulia Rahman yang juga telah menyediakan data citra dron dan data morfometrik gajah yang digunakan dalam penelitian ini.
2. Bapak Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom., M.Kom. selaku dosen penguji luar komisi pembimbing, atas saran dan masukan yang berharga bagi penyempurnaan tesis ini.
3. Ibu Dr. Shelve Nidya Neyman, S.Kom., M.Si. selaku moderator pada ujian tesis, atas kelancaran dan bimbingan jalannya sidang.
4. Balai Taman Nasional Way Kambas yang telah memberikan izin penelitian dan izin penggunaan data (SIMAKSI No. S1.903/T.11/TU/HMS/07/2025), serta seluruh pengelola dan staf PLG TNWK yang telah memfasilitasi pengambilan data di lapang.
5. Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemdiktisaintek) yang telah memberikan izin tugas belajar, serta Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah (Kemendikdasmen) melalui Program Beasiswa Unggulan (BU) yang telah memberikan pembiayaan pendidikan sehingga penulis dapat melanjutkan studi dengan lancar.
6. Kepada kedua orang tua penulis, Ayah Sutadi dan Ibunda Nunuk Nuryanti, yang telah lebih dahulu berpulang, serta Ibu mertua Linda Dewi, atas doa dan kasih sayang yang selalu menyertai penulis.
7. Kepada istri tercinta Ruth Meliani dan ananda Prisha Elliana Saputri, atas kesabaran, dukungan, dan kasih sayang yang luar biasa selama penulis menjalani studi ini.
8. Kepada adik-adik Fransisca Amelia Pradita Sari, Bernadetta Amanda Margaretta, dan Yosep Fridolin, yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan kepada penulis selama menjalani studi ini.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Oktober 2026



Christiawan Eko Saputro



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Gajah Sumatera dan Body Condition Score	5
2.2 Fotogrametri	6
2.3 Kecerdasan Buatan dalam Konservasi Satwa Liar	6
2.4 Segmentasi dan U-Net	7
2.5 EfficientNet	9
2.6 Dampak Penerapan AI dalam Konservasi Satwa Liar	10
III METODE	11
3.1 Lokasi Penelitian	11
3.2 Tahapan Penelitian	11
3.3 Pengumpulan Data	12
3.4 Pembuatan Masking dan Pelabelan Data	13
3.5 Penyiapan Data untuk Pemodelan	14
3.6 Pembuatan dan Evaluasi Model U-Net	15
3.7 Pembuatan dan Evaluasi Model EfficientNetV2-M	18
3.8 Lingkungan Pengembangan	21
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Pengumpulan Data	22
4.2 Penyiapan Data untuk Pemodelan	23
4.3 Model Segmentasi Menggunakan Arsitektur U-Net	25
4.4 Model Prediksi Menggunakan Arsitektur EfficientNetV2-M	27
4.5 Kesesuaian Prediksi Model dengan Penilaian Konvensional	32
4.6 Inferensi Model Prediksi BCS	32
4.7 Penerapan Model dalam Konservasi Gajah Sumatera	35
4.8 Keterbatasan Penelitian	35
V SIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Simpulan	36
5.2 Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	42
RIWAYAT HIDUP	45

DAFTAR TABEL

1	Ciri diagnostik BCS gajah asia pada skor ganjil	6
2	Perbandingan performa model varian EfficientNet dan EfficientNetV2 pada ImageNet	18
3	Distribusi citra pada data latih, validasi, dan uji untuk setiap nilai BCS	24
4	Hasil <i>hyperparameter tuning</i> untuk U-Net	25
5	Hasil <i>hyperparameter tuning</i> untuk EfficientNetV2-M tanpa proses segmentasi	28
6	Hasil <i>hyperparameter tuning</i> untuk EfficientNetV2-M dengan proses segmentasi	29
7	Galat prediksi BCS berdasarkan sudut pandang citra	34

DAFTAR GAMBAR

1	Foto skala BCS (Fernando <i>et al.</i> 2009)	5
2	Contoh segmentasi semantik (Liu <i>et al.</i> 2019)	7
3	Arsitektur U-Net (Ronneberger <i>et al.</i> 2015)	8
4	Peta lokasi penelitian di Taman Nasional Way Kambas	11
5	Tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian	12
6	Ilustrasi pengambilan citra gajah	13
7	Tahapan pembuatan mask citra	13
8	Ilustrasi arsitektur U-Net	17
9	Ilustrasi arsitektur model EfficientNetV2-M untuk prediksi BCS	20
10	Distribusi jumlah individu gajah pada setiap nilai BCS	22
11	Distribusi jumlah citra pada setiap nilai BCS	23
12	Contoh hasil praproses data; (a) citra asli, (b) citra yang sudah di- <i>crop</i> dan <i>resize</i>	24
13	Kurva IoU pelatihan U-Net keenam skenario <i>hyperparameter</i>	26
14	Contoh hasil segmentasi pada citra uji: (a) citra asli dan ground truth, (b) hasil segmentasi RGB dan mask prediksi dari U-Net	27
15	Kurva MAE, MAPE, dan R^2 pada skenario terbaik	30
16	Hasil prediksi model pada data uji dengan scatter plot; (a) BCS aktual dan prediksi, (b) residual terhadap BCS aktual	31
17	Contoh hasil prediksi BCS pada citra uji; nilai aktual, prediksi mentah, dan nilai BCS hasil pembulatan ditampilkan pada judul setiap citra	32
18	Hasil inferensi model prediksi BCS pada prototipe web; (a) nilai BCS 3,0; (b) nilai BCS 5,0; (c) nilai BCS 6,0; (d) nilai BCS 7,0	33

DAFTAR LAMPIRAN

1	Data Gajah Sumatera	43
2	Hasil prediksi BCS setiap citra pada analisis galat berdasarkan sudut pandang	44



DAFTAR ISTILAH

Istilah	Definisi
Augmentasi Data	Teknik memperbanyak variasi data latih, seperti flip horizontal dan rotasi, untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model tanpa perlu menambah data baru.
Backbone	Bagian utama arsitektur jaringan yang mengekstraksi fitur dari citra input menjadi dasar bagi lapisan-lapisan selanjutnya.
Batch	Sekumpulan sampel data yang diproses bersama dalam satu iterasi pelatihan.
BCS (Body Condition Score)	Skor penilaian kondisi tubuh satwa berdasarkan pengamatan visual yang digunakan sebagai indikator status kesehatan dan gizi individu.
Bounding Box	Kotak pembatas berbentuk persegi yang menandai lokasi objek pada citra hasil deteksi.
Computer Vision	Bidang kecerdasan buatan yang memungkinkan komputer menginterpretasikan dan memahami informasi visual dari citra atau video.
Deep Learning	Cabang machine learning yang menggunakan jaringan saraf berlapis-lapis untuk belajar representasi data secara otomatis.
Dron	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (UAV) yang dapat dikendalikan dari jarak jauh.
Dropout	Teknik regularisasi yang menonaktifkan sebagian neuron secara acak saat pelatihan.
EfficientNetV2	Arsitektur CNN yang dioptimalkan untuk efisiensi dan akurasi
Epoch	Satu putaran penuh proses pelatihan melibatkan seluruh data latih.
Fine-tuning	Proses penyesuaian lanjutan bobot model yang sudah dilatih sebelumnya dikenal sebagai transfer learning, agar sesuai dengan tugas atau data baru.
Fotogrametri	Teknik pengukuran dan interpretasi objek dari citra.
Ground Truth	Data acuan atau kebenaran, yang digunakan sebagai pembandingan untuk evaluasi model yang digunakan.
Normalisasi	Proses normalisasi skala data, seperti nilai piksel citra, agar sesuai dengan rentang yang diharapkan model biasanya 0 hingga 1.
Segmentasi Semantik	Proses mengklasifikasikan setiap piksel dalam citra ke dalam kategori tertentu.
Transfer Learning	Pemanfaatan bobot model yang sudah dilatih sebelumnya dari data lain.
U-Net	Arsitektur CNN berbentuk huruf U untuk tugas segmentasi citra.