

DAFTAR ISI

Halaman Persembahan	
<i>ABSTRAK</i>	<i>i</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>ii</i>
<i>KATA PENGANTAR</i>	<i>iii</i>
<i>DAFTAR ISI</i>	<i>v</i>
<i>DAFTAR GAMBAR</i>	<i>ix</i>
<i>DAFTAR TABEL</i>	<i>xi</i>
<i>BAB I PENDAHULUAN</i>	<i>1</i>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Kerangka Pemikiran.....	5
1.7. Sistematika Penulisan	8
<i>BAB II KAJIAN LITERATUR</i>	<i>11</i>
2.1. Tinjauan Pustaka	11
2.2. Dasar Teori	19
2.2.1. Algoritma <i>Convolutional neural network</i> (CNN).....	19
2.2.2. <i>Transfer learning</i> dan <i>Custom classification Head</i>	23
2.2.2.1. <i>Transfer learning</i>	23
2.2.2.2. <i>Custom classification Head</i>	24
2.2.3. MobileNetV2	26
2.2.4. Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC)	26
2.2.5. Log-Mel Spectrogram	29
2.2.6. <i>Data augmentation</i>	29
2.2.6.1. <i>Specaugment</i>	29
2.2.7. Teknik Regularisasi.....	30
2.2.7.1. <i>Dropout</i>	30
2.2.7.2. <i>Batch normalization</i>	31

2.2.7.3.	<i>Label smoothing</i>	32
2.2.7.4.	<i>Early stooping</i>	32
2.2.8.	Huruf Hijaiyah	33
2.2.9.	<i>Confusion matrix</i>	34
2.2.10.	Python	35
2.2.11.	Tensorflow.....	36
2.2.12.	Librosa	37
2.2.13.	FastAPI.....	37
2.2.14.	Flutter	37
2.2.15.	CRISP-DM.....	38
2.2.15.1.	<i>Business Understanding</i>	39
2.2.15.2.	<i>Data understanding</i>	39
2.2.15.3.	<i>Data preparation</i>	39
2.2.15.4.	<i>Modeling</i>	40
2.2.15.5.	<i>Evaluation</i>	40
2.2.15.6.	<i>Deployment</i>	40
BAB III METODOLOGI		41
3.1	<i>Business Understanding</i>	42
3.1.1	Identifikasi Masalah.....	42
3.1.2	Tujuan Penelitian.....	42
3.2	<i>Data understanding</i>	43
3.2.1	Pengumpulan Dataset.....	43
3.2.2	Eksplorasi Dataset.....	44
3.3	<i>Data preparation</i>	44
3.3.1	Pra-pemrosesan Audio	45
3.3.2	Ekstraksi Fitur MFCC (<i>Baseline</i>).....	45
3.3.3	Ekstraksi Log-Mel Spectrogram (Usulan)	46
3.3.4	Augmentasi Data	47
3.3.5	Pembagian Dataset.....	47
3.4.1	Arsitektur Model MobileNetV2	49
3.4.2	Strategi Pelatihan (<i>Transfer learning</i> Dua Fase).....	49
3.5	<i>Evaluation</i>	51
3.6	<i>Deployment</i>	51

3.6.1 Perancangan Arsitektur Sistem	52
3.6.2 Perancangan Alur Interaksi Pengguna	53
3.6.3 Rencana Pengujian Sistem	53
<i>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</i>	54
4.1. Hasil <i>Business Understanding</i>	54
4.1.1 Identifikasi dan Tujuan Penyelesaian Masalah (<i>Business Goals</i>)	54
4.1.2 Penetapan Tujuan Teknis Data (<i>Data Mining Goals</i>)	55
4.1.3 Kriteria Keberhasilan Eksperimen (<i>Successs Criteria</i>)	55
4.2. Hasil <i>Data understanding</i>	55
4.2.1 Pengumpulan Data	56
4.2.2 Eksplorasi Karakteristik Data	56
4.2.3 Visualisasi Data Audio	58
4.2.4 Ringkasan Karakteristik Dataset	61
4.3. Hasil <i>Data preparation</i>	61
4.3.1 Pra-Pemrosesan Audio	62
4.3.2 Ekstraksi Fitur	63
4.3.3 <i>Label encoding</i>	67
4.3.4 Pembagian Dataset (<i>Train/Validation/Test Split</i>)	68
4.3.5 Augmentasi Data <i>SpecAugment</i>	68
4.4. Hasil <i>Modeling</i>	70
4.4.1 Arsitektur Model MobileNetV2 + Custom Head	70
4.4.2 Strategi Pelatihan Dua Fase (<i>Progressive Fine-Tuning</i>)	71
4.4.3 Kurva <i>Training</i>	72
4.4.4 <i>Callbacks</i> dan Mekanisme Pengaturan <i>Training</i>	76
4.5. Hasil <i>Evaluation</i>	77
4.5.1 Evaluasi Eksperimen 1 Split 80:10:10	78
4.5.2 Evaluasi Eksperimen 2 Split 70:15:15	87
4.5.3 Perbandingan Eksperimen 1 dan Eksperimen 2	93
4.5.4 Perbandingan dengan Jurnal Acuan	95
4.5.5 Kesimpulan Tahap <i>Evaluation</i>	96
4.6. Hasil <i>Deployment</i>	97
4.6.1 Implementasi Backend FastAPI	97
4.6.2 Antarmuka Aplikasi <i>Mobile Flutter</i>	97
4.6.3 Pengujian Sistem: Kelas Terbaik alif_kasroh ($F1 = 1,000$)	99
4.6.4 Pengujian Sistem: Kelas Terburuk dad_kasroh ($F1 = 0,500$)	101
4.6.5 Uji Manual	103
4.6.6 Analisis dan Ringkasan <i>Deployment</i>	104
4.7. Pembahasan	105

4.7.1 Integrasi MFCC dan MobileNetV2 untuk Klasifikasi Huruf Hijaiyah	106
4.7.2 Pengaruh Log-Mel Spectrogram sebagai Alternatif MFCC terhadap Performa MobileNetV2.....	107
4.7.3 Performa Model dalam Mengklasifikasikan Huruf Hijaiyah secara Akurat.....	108
4.7.4 Keterbatasan Penelitian.....	109
<i>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</i>	<i>111</i>
5.1. Kesimpulan	111
5.2. Saran.....	112
<i>DAFTAR PUSTAKA</i>	<i>113</i>
<i>LAMPIRAN</i>	<i>120</i>



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka Pemikiran.....	5
Gambar 2.1 Ilustrasi Model CNN [15]	20
Gambar 2.2 Convolutional Layer [16].....	21
Gambar 2.3 Pooling Layer [17]	22
Gambar 2.4 Fully Connected Layer[18]	23
Gambar 2.5 Arsitektur MobileNetV2 [23].	26
Gambar 2.6 Proses Ekstraksi MFCC [24].....	27
Gambar 2.7 <i>Confusion matrix</i> [36]	34
Gambar 2.8 Pemodelan CRISP – DM [46]	39
Gambar 3.1 Alur Penelitian.....	41
Gambar 3.2 Use Case Diagram Aplikasi Klasifikasi Pelafalan Huruf Hijaiyah ...	52
Gambar 3.3 Rancangan Alur Interaksi Pengguna Aplikasi.....	53
Gambar 4.1 Distribusi Sampel per Kelas Huruf Hijaiyah (84 Kelas).....	56
Gambar 4.2 Distribusi Sampel per Harakat	57
Gambar 4.3 Distribusi dan Statistik Durasi Audio (200 sampel acak)	57
Gambar 4.4 Hasil Pemeriksaan Kualitas File Audio.....	58
Gambar 4.5 Contoh Waveform Audio per Kelas Huruf Hijaiyah	59
Gambar 4.6 Contoh Log-Mel Spectrogram per Kelas Huruf Hijaiyah.....	59
Gambar 4.7 Perbandingan Waveform dan Log-Mel Spectrogram.....	60
Gambar 4.8 Struktur Dataset dan Alur Persiapan Data.....	62
Gambar 4.9 Tahapan Pra-Pemrosesan Audio: (a) Audio Asli, (b) Setelah <i>Noise reduction</i> + Trim Silence, (c) Setelah Pad/Crop ke 2,0 Detik.....	63
Gambar 4.10 Representasi Tiga Channel MFCC: (a) MFCC Statis, (b) Delta MFCC, (c) Delta-Delta MFCC	64
Gambar 4.11 Representasi Log-Mel Spectrogram: (kiri) visualisasi dengan sumbu frekuensi mel, (kanan) representasi matriks 2D sebelum resize	65
Gambar 4.12 Perbandingan Format Input CNN: MFCC (3 channel berbeda) dan Log-Mel Spectrogram (pseudo-RGB).....	66
Gambar 4.13 Perbandingan Representasi MFCC (baris atas) dan Log-Mel Spectrogram (baris bawah) pada 4 Kelas.....	66
Gambar 4.14 Visualisasi Pembagian Dataset: Proporsi dan Jumlah Sampel per Subset	68
Gambar 4.15 Efek <i>SpecAugment</i> : Original dan Tiga Variasi Augmentasi (<i>Time Masking</i> + <i>Frequency Masking</i>).....	69
Gambar 4.16 Diagram Arsitektur Model MobileNetV2 + <i>Custom classification Head</i>	70
Gambar 4.17 Distribusi Parameter Trainable dan Frozen pada Dua Fase <i>Training</i>	71
Gambar 4.18 Kurva Akurasi dan Loss <i>Training</i> Model MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram	73

Gambar 4.19 Kurva Akurasi dan Loss <i>Training</i> Model MobileNetV2 + MFCC (<i>Baseline</i>)	73
Gambar 4.20 Perbandingan Kurva Val <i>Accuracy</i> dan Val Loss: MFCC (<i>Baseline</i>) dan Log-Mel Spectrogram (Usulan)	74
Gambar 4.21 Kurva Akurasi dan Loss <i>Training</i> MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram (Split 70:15:15).....	75
Gambar 4.22 Kurva Akurasi dan Loss <i>Training</i> MobileNetV2 + MFCC (Split 70:15:15)	75
Gambar 4.23 Perbandingan Kurva Val <i>Accuracy</i> dan Val Loss: Log-Mel Spectrogram dan MFCC (Split 70:15:15)	76
Gambar 4.24 Perbandingan Metrik Evaluasi: MFCC (<i>Baseline</i>) dan Log-Mel Spectrogram (Usulan)	79
Gambar 4.25 <i>Confusion matrix</i> 28×28 Tingkat Huruf MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram (86,42%)	80
Gambar 4.26 <i>Confusion matrix</i> 28×28 Tingkat Huruf MobileNetV2 + MFCC <i>Baseline</i> (76,32%)	81
Gambar 4.27 <i>Confusion matrix</i> Tingkat Harakat MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram (99,55%)	82
Gambar 4.28 <i>Confusion matrix</i> Tingkat Harakat MobileNetV2 + MFCC <i>Baseline</i> (99,10%).....	82
Gambar 4.27 Perbandingan <i>F1-score</i> per Kelas: MFCC (kiri) dan Log-Mel Spectrogram (kanan)	84
Gambar 4.28 Kelas dengan <i>F1-score</i> Tertinggi dan Terendah: MFCC dan Log-Mel Spectrogram	85
Gambar 4.29 <i>Confusion matrix</i> MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram (Split 70:15:15)	88
Gambar 4.30 <i>Confusion matrix</i> MobileNetV2 + MFCC (Split 70:15:15)	89
Gambar 4.31 <i>Confusion matrix</i> Tingkat Harakat MobileNetV2 + MFCC (Split 70:15:15) (99,63%)	90
Gambar 4.31 Akurasi per Kelas MobileNetV2 + Log-Mel Spectrogram (Split 70:15:15)	91
Gambar 4.32 Akurasi per Kelas MobileNetV2 + MFCC (Split 70:15:15)	91
Gambar 4.33 Contoh Inferensi: Prediksi Audio Huruf Hijaiyah dengan Kepercayaan 95,97%	93
Gambar 4.34 Alur Utama Aplikasi: (a) Home Screen, (b) Pilih Harakat, (c) Input Suara.....	98
Gambar 4.35 Pengujian Kelas Terbaik alif_kasroh: (a) Skenario Tepat (98,15%), (b) Skenario Kurang Tepat	100
Gambar 4.36 Pengujian Kelas Terburuk dad_kasroh: (a) Skenario Tepat (93,14%), (b) Skenario Kurang Tepat	102

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Karakteristik Dataset.....	43
Tabel 3.2 Parameter Ekstraksi MFCC.....	45
Tabel 3.3 Parameter Ekstraksi Log-Mel Spectrogram	46
Tabel 3.4 Pembagian Dataset	48
Tabel 3.5 Arsitektur Model MobileNetV2 + Custom <i>Head</i>	49
Tabel 3.6 Hyperparameter Pelatihan	50
Tabel 4.1 Ringkasan Karakteristik Dataset Huruf Hijaiyah.....	61
Tabel 4.2 Parameter Ekstraksi MFCC.....	64
Tabel 4.3 Parameter Ekstraksi Log-Mel Spectrogram	65
Tabel 4.4 Hasil <i>Label encoding</i>	67
Tabel 4.5 Parameter <i>SpecAugment</i>	69
Tabel 4.6 Hyperparameter Pelatihan Dua Fase	72
Tabel 4.7 Ringkasan Callback Pelatihan.....	77
Tabel 4.8 Perbandingan Metrik Evaluasi: MFCC (<i>Baseline</i>) dan Log-Mel Spectrogram (Usulan)	78
Tabel 4.9 Tingkatan Analisis <i>Confusion matrix</i>	79
Tabel 4.10 Kelas dengan <i>F1-score</i> Tertinggi dan Terendah (Log-Mel Spectrogram)	85
Tabel 4.11 Hasil Evaluasi Test Set Eksperimen 2 (Split 70:15:15).....	87
Tabel 4.12 Kelas Terbaik dan Terburuk pada Eksperimen 2 (Split 70:15:15)	92
Tabel 4.13 Perbandingan Metrik Evaluasi: Split 80:10:10 dan Split 70:15:15.....	93
Tabel 4.14 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya.....	95
Tabel 4.15 Spesifikasi Backend FastAPI	97
Tabel 4.16 Fitur Utama Aplikasi <i>Mobile Flutter</i>	99
Tabel 4.17 Detail Hasil Pengujian Kelas alif_kasroh.....	101
Tabel 4.18 Detail Hasil Pengujian Kelas dad_kasroh	103
Tabel 4.19 Ringkasan Pengujian Sistem <i>Deployment</i>	105