

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
INTISARI.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Manfaat Penelitian	6
1.5. Batas Masalah	6
1.6. Metodologi Penelitian	7
1.7. Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
BAB III LANDASAN TEORI.....	26
3.1. Detak Jantung dan Fisiologi Kardiovaskular	26
3.1.1. Variasi Detak Jantung Berdasarkan Aktivitas	27
3.1.2. Heart Rate Variability (HRV) dan Analisis Metrik Time-Domain....	28
3.2. Photoplethysmography (PPG): Prinsip dan Karakteristik.....	29
3.2.1. Fundamental PPG	29
3.2.2. Komponen Sinyal PPG	30
3.2.3. Sumber Noise dalam PPG.....	31
3.3. Embedded Systems Architecture untuk Aplikasi Biomedis.....	32
3.3.1. ESP32-S3 System-on-Chip	32
3.3.2. MAX30102 Optical Sensor System.....	34
3.4. Advanced Signal Processing Pipeline.....	36

3.4.1.	Multi-Stage Filtering Architecture	36
3.4.2.	Wavelet-Based Denoising	37
3.4.3.	Multi-Source Dataset Integration	38
3.4.4.	Data Balancing & Augmentation	40
3.4.5.	Comprehensive Pipeline Architecture	42
3.5.	Embedded Machine Learning Architecture	46
3.5.1.	LSTM Network Design	46
3.5.2.	TensorFlow Lite Micro Optimization	48
3.6.	Hybrid Heart Rate Estimation Algorithm	50
3.6.1.	Multi-Modal Peak Detection	50
3.6.2.	Adaptive Kalman Filter	53
3.6.3.	Sensor Fusion Architecture	55
3.7.	Comprehensive Performance Evaluation Framework	58
3.7.1.	Clinical Accuracy Metrics	58
3.7.2.	Computational Performance Metrics	58
3.7.3.	Activity-Specific Performance	60
3.8.	System Integration and Real-Time Architecture Evaluation Matrix	60
3.8.1.	End-to-End Processing Pipeline	60
3.8.2.	Power Management Strategy	61
BAB IV METODE PENELITIAN		63
4.1.	Alur Kerja Penelitian	63
4.1.1.	Training Pipeline	65
4.1.2.	Deployment Pipeline	67
4.1.3.	Integrasi dan Validasi	68
4.2.	Metode Integrasi Data Multi-Sumber	69
4.2.1.	Prinsip Integrasi Komplementer	69
4.2.2.	Teknik Konsolidasi Data	71
4.2.3.	Quality Control Multi-Sumber	77
4.3.	Strategi Augmentasi Data Berbasis Aktivitas dan HR	79
4.3.1.	Augmentasi HR-Aware dan Activity-Aware	80
4.3.2.	Targeted Augmentation untuk High HR dengan Generative Approach	

4.3.3.	Smart Data Balancing dengan Stratified Sampling.....	88
4.4.	Arsitektur Hybrid Heart Rate Estimation.....	96
4.4.1.	Confidence-Based Fusion Algorithm dengan Pembobotan Dinamis	97
4.4.2.	Multi-Modal Peak Detection dengan Velocity Plethymogram (VPG)	100
4.4.3.	Adaptive Smoothing dengan Hierarchical Kalman Filter (HKF) ...	102
4.5.	Optimasi Komputasi untuk Embedded Deployment.....	104
4.5.1.	Model Quantization, Pruning, dan Compression	105
4.5.2.	Manajemen Memori dan PSRAM pada ESP32-S3.....	106
4.5.3.	Real-Time Scheduling dengan Five-State Main Loop.....	108
4.6.	Strategi Penanganan Motion Artifact Berbasis Aktivitas.....	111
4.6.1.	Adaptive Motion Detection dengan Hybrid Approach	112
4.6.2.	Multi-Phase Suppression Pipeline dengan Activity-Aware Filtering	114
4.7.	Perancangan Sistem Embedded Berbasis ESP32-S3	117
4.7.1.	Spesifikasi Perangkat Keras dan Integrasi Sensor	118
4.7.2.	Diagram Sistem dan Arsitektur Perangkat Lunak.....	120
4.7.3.	Diagram Sistem dan Arsitektur Perangkat Keras.....	122
4.8.	Framework Evaluasi Performa Sistem yang Komprehensif.....	125
4.8.1.	Clinical Accuracy Metrics berdasarkan Standar AAMI/ISO	126
4.8.2.	Computational Performance Metrics untuk Embedded System	128
4.8.3.	Comparative Validation Protocol dengan Perangkat Komersial	131
4.9.	Prosedur Kalibrasi dan Validasi yang Ketat.....	132
4.9.1.	Kalibrasi Bertingkat untuk Sensor dan Algoritma	132
4.9.2.	Uncertainty Analysis untuk Laporan Hasil yang Transparan.....	134
BAB V IMPLEMENTASI		136
5.1.	Arsitektur sistem	136
5.1.1.	Dual Pipeline Architecture	136
5.2.	Implementasi Training Pipeline	137
5.2.1.	Multi-Source Data Integration	137
5.2.2.	Advanced Preprocessing Techniques	141
5.2.3.	Activity-Adaptive Peak Detection	146
5.2.4.	Optimasi Distribusi Data untuk Model LSTM	151

5.3.	Model Architecture.....	153
5.3.1.	LSTM dengan Layer Normalization.....	153
5.3.2.	Comprehensive Callback Training Strategy.....	156
5.3.3.	Advanced Data Processing Pipeline	159
5.4.	Deployment Architecture	164
5.4.1.	Five-State Main Loop Architecture.....	164
5.4.2.	Multi-rate Signal Processing.....	167
5.4.3.	PSRAM Memory Management.....	169
5.5.	Motion Artifact Handling.....	173
5.5.1.	Adaptive Motion Detection.....	173
5.6.	Hybrid HR Estimation Algorithm	175
5.6.1.	Confidence-based Fusion Algorithm.....	175
5.6.2.	Adaptive Smoothing Pipeline	177
5.6.3.	Real-time Optimization and Validation.....	180
5.6.4.	Analisis Efektivitas LSTM dalam Menangani Motion Artifact	186
BAB VI HASIL DAN PEMBAHASAN.....		188
6.1.	Metodologi Evaluasi Sistem	188
6.1.1.	Protokol Pengujian Komprehensif.....	188
6.1.2.	Parameter Evaluasi.....	192
6.1.3.	Prosedur Training dan Validasi Model.....	194
6.2.	Hasil Pengujian dan Analisis Performa.....	195
6.2.1.	Analisis Fase Inisiasi Sistem.....	195
6.2.2.	Performa dalam Kondisi	196
6.2.3.	Respons Terhadap Aktivitas Jalan Kaki	197
6.2.4.	Performa Selama Aktivitas Lari Intensif.....	199
6.3.	Analisis Komparatif dan Validasi Model	200
6.3.1.	Performance Quantitative Analysis.....	200
6.3.2.	Training Dynamics dan Convergence Analysis	201
6.3.3.	Embedded Deployment Validation	203
6.4.	Pembahasan Hasil Pengujian	205
6.4.1.	Analisis Diskrepansi Antara Training dan Real-world Performance	205

6.4.2. Evaluasi Technical Implementation dan Deployment.....	206
6.4.3. Clinical dan Practical Applicability Assesment	207
6.4.4. Analisis Kuantitatif Efektivitas LSTM dalam Menyaring Motion Artifact209	
6.5. Identifikasi Kekurangan dan Masalah.....	210
6.5.1. Limitation dalam Extreme Conditions	210
6.5.2. Technical Constrains dan Challenges.....	211
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN	213
7.1. Kesimpulan	213
7.2. Saran.....	214
DAFTAR PUSTAKA	216
LAMPIRAN.....	220