

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN TIM PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN TIM PENGUJI	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xvi
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Keaslian Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB II Tinjauan Pustaka dan Landasan Teori	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1 Pendekatan Berbasis Sinyal Tunggal.....	8
2.1.2 Pendekatan Multimodal	8
2.1.3 Metode Berbasis <i>Deep Learning</i>	8
2.1.4 Identifikasi Kesenjangan Penelitian	10
2.2 Landasan Teori.....	11
2.2.1 Sistem Kardiorespiratori	11
2.2.2 Gangguan Pernapasan Obstruktif	12
2.2.3 Prinsip Pembacaan Polysomnography untuk Deteksi Gangguan Napas Tidur	14
2.2.3.1 Komponen Sinyal Utama dalam Polysomnography.....	14
2.2.3.2 Kriteria Identifikasi Apnea Berdasarkan AASM.....	16
2.2.3.3 Mekanisme Integratif Pembacaan PSG	16
2.2.4 Perbedaan Pola Sinyal Normal dan Apnea	16
2.2.5 Sinyal Elektrokardiogram (ECG)	18
2.2.6 Sinyal Elektromiogram (EMG).....	19
2.2.6.1 Signifikansi Fisiologis dan Deteksi Obstruksi Jalan Na- pas Berbasis Sinyal EMG	20

2.2.7	Korelasi Fisiologis Sinyal ECG dan EMG pada Kejadian Obstruktive Sleep Apnea	20
2.2.7.1	Mekanisme Respons Kardiovaskular pada Sinyal ECG...	20
2.2.7.2	Mekanisme Respons Neuromuskular pada Sinyal EMG..	21
2.2.7.3	Justifikasi Fisiologis Penggunaan Arsitektur Hybrid CNN-LSTM	21
2.2.8	Pemrosesan Sinyal Time-Series	21
2.2.8.1	High-Pass dan Low-Pass Filter	22
2.2.8.2	Bandpass Filter	22
2.2.8.3	Notch Filter	23
2.2.8.4	Smoothing dan Moving Average.....	24
2.2.8.5	Ringkasan Perbandingan Filter	24
2.2.8.6	Keterkaitan Pemrosesan Sinyal dengan Pemodelan CNN-LSTM	24
2.2.9	Interaksi Antara Sistem Kardiorespiratori dan Gangguan Pernapasan Obstruktif	25
2.2.10	<i>Deep Learning</i>	25
2.2.11	<i>Dataset MESA Sleep</i>	30
2.2.11.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu yang Menggunakan Dataset Publik <i>Sleep Study</i>	33
2.3	Pertanyaan Penelitian	36
2.4	Hipotesis Penelitian	36
2.5	Penutup Bab	37
BAB III	METODE PENELITIAN	38
3.1	Implementasi Teori dan Konsep Dasar	38
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	39
3.2.1	Deskripsi Akuisisi Sinyal ECG dan EMG pada Dataset MESA Sleep	40
3.2.1.1	Perangkat Keras dan Spesifikasi Akuisisi	40
3.2.1.2	Pemasangan Elektroda ECG dan EMG	41
3.2.1.3	Prosedur Perekaman Sinyal dalam Studi Tidur.....	42
3.2.1.4	Kemudahan dan Tantangan Pengumpulan Sinyal.....	42
3.2.1.5	Risiko Teknis dan Artefak yang Umum Muncul.....	42
3.2.1.6	Pertimbangan Penggunaan Dataset Publik dan Perbandingan dengan Perekaman Mandiri	42
3.3	Rancangan dan Alur Penelitian	42
3.3.1	Pengumpulan Data.....	44
3.3.2	Pemrosesan Data	44
3.3.2.1	Filtrasi dan Denoising Sinyal	44
3.3.2.2	Normalisasi Sinyal	45
3.3.2.3	Segmentasi Sinyal dan Pembentukan Epoch 30 Detik	45
3.3.3	Ekstraksi Fitur	47

3.3.4	Pengembangan dan Pengujian Semua Model	47
3.3.5	Pemilihan Model Terbaik	47
3.3.6	Analisis Lanjutan Model Terbaik	47
3.3.7	Uji Statistik Antar Model	48
3.4	Alur Pengolahan Data dan Pembentukan Model	48
3.5	Teknis Desain Sistem dan Pemilihan Metode	51
3.5.1	Pemilihan Teknik Pra-pemrosesan Sinyal.....	51
3.5.2	Rasionalisasi Teknik Segmentasi Data.....	52
3.5.3	Pertimbangan Metode Non-Deep Learning dalam Deteksi Sleep Apnea	52
3.5.4	Pemilihan Arsitektur Hibrida CNN-LSTM.....	53
3.6	Pra-pemrosesan Sinyal	54
3.6.1	Pra-pemrosesan Sinyal ECG	54
3.6.2	Pra-pemrosesan Sinyal EMG	55
3.6.3	Sinkronisasi dan Standarisasi Sinyal	56
3.7	Ekstraksi dan Representasi Fitur.....	56
3.7.1	Ekstraksi Fitur dari Sinyal ECG.....	56
3.7.2	Ekstraksi Fitur dari Sinyal EMG	56
3.7.3	Integrasi Fitur Multimodal.....	57
3.8	Perancangan Arsitektur CNN-LSTM	57
3.8.1	Keterkaitan Alur Pemrosesan Data dengan Perancangan Model CNN-LSTM	58
3.8.2	Tahap Input	59
3.8.3	Tahap Proses	59
3.8.4	Tahap Output.....	61
3.8.5	Arsitektur CNN-LSTM Multimodal	61
3.8.5.1	Prinsip Dasar Perancangan Arsitektur CNN-LSTM Multimodal.....	62
3.8.5.2	Jalur Pemrosesan Sinyal ECG Berbasis CNN	64
3.8.5.3	Jalur Pemrosesan Sinyal EMG Berbasis RMS dan CNN .	67
3.8.5.4	Fusi Fitur Multimodal (Mid-Level Fusion)	68
3.8.5.5	Pemodelan Temporal Menggunakan LSTM Bertingkat...	69
3.8.5.6	Lapisan Klasifikasi Akhir.....	71
3.8.5.7	Penentuan Hyperparameter dan Strategi Pelatihan Model	72
3.8.5.8	Keunggulan Arsitektur Multimodal Dibandingkan Arsitektur Unimodal	74
3.8.5.9	Analisis Kompleksitas Parameter	76
3.8.5.10	Justifikasi Pemilihan Kernel, <i>Stride</i> , dan <i>Padding</i>	77
3.8.5.11	Kesimpulan Arsitektur CNN-LSTM Multimodal	78
3.9	Strategi Pelatihan, Validasi, dan Evaluasi Performansi Model	79
3.9.1	Fungsi Kehilangan dan Pembobotan Kelas	79
3.9.2	Strategi Validasi Model.....	80

3.9.3	Metrik Evaluasi Performansi	80
3.9.4	Implementasi dan Pengujian Akhir	81
3.10	Penjaminan Kualitas Data dan Strategi Pemecahan Masalah	81
3.10.1	Ketidakseimbangan Kelas Apnea dan Non-Apnea	82
3.10.2	Gangguan Noise dan Artefak Sinyal	82
3.10.3	Keterbatasan Sumber Daya Komputasi	82
3.10.4	Konsistensi dan Validasi Model	82
3.11	Penutup Bab	83
BAB IV	Hasil Penelitian dan Pembahasan	84
4.1	Evaluasi Performansi Model Utama	84
4.1.1	Pengaruh <i>Random Seed</i> , Reprodusibilitas, dan Jumlah Pengulangan Eksperimen	85
4.2	Evaluasi Performansi Metode yang Diuji	86
4.2.1	Analisis Performansi Setiap Metode	87
4.2.2	Analisis Komparatif dengan Penelitian Terdahulu pada Dataset MESA Sleep	88
4.3	Analisis Robustness Model	89
4.4	Analisis Per Kelas	90
4.5	Analisis Confusion Matrix	91
4.5.1	Perhitungan Presisi (<i>Precision</i>)	92
4.5.2	Perhitungan Recall (<i>Sensitivity</i>)	92
4.5.3	Perhitungan F1-Score	92
4.5.4	Perhitungan Akurasi	93
4.5.5	Analisis Hasil Confusion Matrix	93
4.6	Analisis Kurva ROC-AUC	93
4.7	Visualisasi Training dan Validation Accuracy/Loss	95
4.7.1	Analisis Kurva Akurasi (Gambar 4.3a)	95
4.7.2	Analisis Kurva Loss (Gambar 4.3b)	96
4.8	Overlay Prediksi vs Ground Truth	96
4.9	Analisis Kesalahan (<i>Error Analysis</i>)	97
4.9.1	Kasus False Positive (FP)	98
4.9.2	Kasus False Negative (FN)	98
4.9.3	Analisis Fisiologis dan Teknis Kesalahan	99
4.9.4	Implikasi Klinis dan Pengembangan Lanjutan	99
4.10	Analisis Uji Statistik Model	99
4.10.1	Metodologi Uji Friedman-Nemenyi	100
4.10.2	Hasil Uji Friedman	100
4.10.3	Hasil Uji Nemenyi dan Visualisasi CD Diagram	101
4.10.4	Analisis Boxplot F1-Score Antar-Model	101
4.10.5	Interpretasi Fisiologis dan Teknis	101
4.11	Analisis Kompleksitas Model	102
4.11.1	Analisis dan Pembahasan	115



4.12	Analisis Mendalam Penggunaan Sinyal ECG dan EMG serta Arsitektur CNN–LSTM.....	116
4.12.1	Landasan Fisiologis Penggunaan Sinyal ECG dan EMG	117
4.12.2	Konsekuensi Jika Tidak Menggunakan Sinyal Multimodal	117
4.12.3	Konsekuensi Jika Tidak Menggunakan CNN–LSTM.....	117
4.12.4	Keunggulan Arsitektur CNN–LSTM Multimodal Berdasarkan Hasil Komputasi.....	118
4.12.5	Keunggulan Kombinasi ECG dan EMG Berdasarkan Hasil Empiris	118
4.12.6	Integrasi Hasil dan Dampak terhadap Penelitian	119
4.12.7	Kesimpulan Analisis Komprehensif.....	120
4.13	Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu	121
4.13.1	Perbandingan Kuantitatif Performansi dengan Penelitian Terdahulu	121
4.13.2	Analisis Komparatif Berbasis ECG, EMG, dan EEG	122
4.14	Pembahasan dan Implikasi Penelitian	124
4.14.1	Makna Fisiologis dari Integrasi Sinyal ECG–EMG	124
4.14.2	Analisis Arsitektur CNN–LSTM Multimodal	124
4.14.3	Implikasi terhadap Sistem Pemantauan Tidur Otomatis.....	124
4.14.4	Relevansi Akademik dan Kontribusi Ilmiah	125
4.14.5	Keterbatasan dan Arah Penelitian Selanjutnya.....	125
4.14.6	Kesimpulan Pembahasan.....	125
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	127
5.1	Kesimpulan	127
5.2	Saran dan Rencana Pengembangan	127
	DAFTAR PUSTAKA	129
	LAMPIRAN	L-1
	Lampiran 1: Algoritma Pelatihan Model CNN–LSTM Multimodal	L-1
	Lampiran 2: Matriks dan Kode Program Matriks	L-2
	Lampiran 3: Persamaan dan Kode Program Penelitian ECG + EMG.....	L-6
	Lampiran 4: Perhitungan dan Analisis Performa Model	L-10