

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN TIM PROMOTOR	iii
HALAMAN PERSETUJUAN TIM PENGUJI.....	iv
PERNYATAAN PROMOVENDUS	v
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xvii
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Keaslian dan Kontribusi Penelitian.....	5
1.4.1 Kajian Penelitian Terdahulu	7
1.4.1.1 Pendekatan Data dan Model Segmentasi	7
1.4.1.2 Evaluasi Kinerja dan Interpretabilitas	7
1.4.1.3 Keterbatasan dan Celah Penelitian	8
1.4.2 Kontribusi Penelitian	8
1.4.2.1 Kontribusi Metodologis	9
1.4.2.2 Kontribusi Praktis	10
1.4.2.3 Signifikansi dan Dampak	10
1.5 Batasan Masalah.....	11
1.6 Manfaat Penelitian	12
1.6.1 Manfaat Teoretis	12
1.6.2 Manfaat Praktis.....	13
1.7 Sistematika Penulisan	13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	15
2.1 Tinjauan Pustaka.....	15
2.1.1 Arsitektur <i>Deep Learning</i> untuk Segmentasi Tumor Otak	15
2.1.2 <i>eXplainable Artificial Intelligence</i> (XAI)	16
2.1.2.1 Konsep <i>Explainability</i> dalam AI.....	17
2.1.2.2 XAI dalam Perawatan Kesehatan Berbasis <i>Deep Learning</i>	18
2.1.2.3 Pemahaman Dasar Analisis Tumor Otak	19
2.1.3 <i>Visual eXplainable Artificial Intelligence</i>	19

2.1.4	Aplikasi Visual XAI dalam Segmentasi Tumor Otak	20
2.1.4.1	Perkembangan Metode Visual XAI	20
2.1.4.2	Tren dan Implikasi Pengembangan.....	23
2.1.4.3	Sintesis dan Arah Pengembangan	24
2.2	Landasan Teori	26
2.2.1	Konsep Dasar Medis	26
2.2.1.1	Klasifikasi dan Karakteristik Patologis Tumor Otak	26
2.2.1.2	Prinsip Pencitraan <i>Magnetic Resonance Imaging</i> (MRI) .	27
2.2.2	Segmentasi Citra Medis	29
2.2.2.1	Pendekatan Segmentasi 2D versus 3D	29
2.2.2.2	Arsitektur U-Net	30
2.2.2.3	Pengembangan Residual U-Net (ResU-Net).....	31
2.2.2.4	Optimasi Model Ringan (<i>Lightweight</i>) untuk Segmen- tasi Citra Medis	34
2.2.3	<i>Explainable AI</i> untuk Pencitraan Medis.....	39
2.2.3.1	Visual XAI 3D	39
2.2.3.2	Adaptasi Metode CAM untuk Data Volumetrik.....	40
2.2.4	Evaluasi Kinerja Sistem	44
2.2.4.1	Metrik Evaluasi Segmentasi	44
2.2.4.2	Evaluasi Interpretabilitas	45
2.2.4.3	Kurva dan Analisis Pareto-Optimal	47
2.2.4.4	Uji Statistik Friedman	48
2.2.4.5	Analisis Korelasi Spearman.....	50
2.2.4.6	Integrasi Fitur <i>Radiomic</i>	50
2.2.5	Validasi Klinis	52
2.3	Pertanyaan Penelitian.....	52
2.4	Ringkasan	53
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN.....	54
3.1	Pendahuluan	54
3.2	Kerangka Penelitian.....	54
3.3	Dataset dan <i>Preprocessing</i>	57
3.3.1	Dataset BraTS 2020 dan 2021	57
3.3.2	<i>Preprocessing</i> Data	59
3.3.2.1	Normalisasi <i>Z-score</i>	59
3.3.2.2	Pembagian Dataset	60
3.3.2.3	Format Data Input Model.....	61
3.4	Pengembangan Arsitektur <i>Lightweight</i> 3D ResU-Net.....	61
3.4.1	Desain Arsitektur	61
3.4.1.1	Lapisan Input	65
3.4.1.2	<i>Encoder Path</i>	66
3.4.1.3	<i>Bottleneck</i>	69
3.4.1.4	<i>Decoder Path</i>	69

3.4.1.5	Lapisan Output	70
3.4.2	Pengukuran Kompleksitas Komputasi	70
3.5	Implementasi Teknik Visual XAI.....	70
3.5.1	Implementasi dan Evaluasi Komparatif Metode CAM untuk Data 3D.....	72
3.5.1.1	3D <i>Class Activation Mapping</i> (CAM).....	72
3.5.1.2	3D <i>Gradient-weighted Class Activation Mapping</i> (Grad-CAM).....	73
3.5.1.3	3D Grad-CAM++.....	75
3.5.1.4	3D Score-CAM	77
3.5.2	Visualisasi Hasil Segmentasi.....	78
3.5.2.1	Visualisasi Irisan Aksial (<i>Axial Slice Visualization</i>)	78
3.5.2.2	3D <i>Volume Rendering</i>	79
3.6	Integrasi Fitur <i>Radiomic</i>	79
3.6.1	Ekstraksi Fitur <i>Radiomic</i>	79
3.6.1.1	Fitur Morfologis	80
3.6.1.2	Fitur Statistik Orde Pertama	80
3.6.1.3	Fitur Tekstural.....	81
3.6.2	Analisis Fitur <i>Radiomic</i>	82
3.6.2.1	Seleksi Fitur.....	82
3.6.2.2	Karakterisasi Tumor	83
3.7	Kerangka Evaluasi Komprehensif.....	83
3.7.1	Evaluasi Kinerja Segmentasi.....	83
3.7.2	Evaluasi Interpretabilitas.....	84
3.7.2.1	Implementasi Metrik Perturbasi.....	84
3.7.2.2	Evaluasi Kualitatif oleh Ahli Radiologi.....	84
3.7.3	Evaluasi Komputasional.....	85
3.7.3.1	Efisiensi Komputasional	85
3.7.3.2	Skalabilitas	85
3.8	Validasi Klinis.....	85
3.8.1	Desain Studi Validasi	85
3.8.2	Aspek Evaluasi	86
3.8.3	Instrumen Evaluasi	86
3.8.4	Metrik Evaluasi Klinis.....	88
3.9	Eksperimen	89
3.9.1	Skenario Eksperimen.....	89
3.9.1.1	Eksperimen 1: Pemilihan Dataset dan Model <i>Baseline</i> ...	91
3.9.1.2	Eksperimen 2: Optimasi Arsitektur <i>Lightweight</i>	91
3.9.1.3	Eksperimen 3: Evaluasi Teknik Visual XAI	92
3.9.1.4	Eksperimen 4: Evaluasi Integrasi Sistem	93
3.9.2	Implementasi Teknis	96
3.9.2.1	Lingkungan Pengembangan.....	96

3.9.2.2	<i>Prosedur Pelatihan</i>	97
3.9.2.3	Validasi Statistik	98
3.10	Integrasi Hasil	99
3.10.1	Analisis Kerangka Multidimensi	99
3.10.2	Menjawab Pertanyaan Penelitian.....	100
3.10.2.1	Metodologi Validasi Terintegrasi	101
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	102
4.1	Pendahuluan	102
4.2	Hasil <i>Preprocessing</i> Data.....	103
4.3	Hasil Eksperimen 1: Pemilihan Model <i>Baseline</i> dan Dataset	104
4.3.1	Evaluasi Dataset.....	105
4.3.2	Evaluasi Model <i>Baseline</i>	105
4.3.3	Kesimpulan Eksperimen 1	107
4.4	Hasil Eksperimen 2: Optimasi Arsitektur <i>Lightweight</i>	108
4.4.1	Hasil Analisis Kinerja per Komponen (<i>Ablation Study</i>).....	108
4.4.1.1	<i>Baseline</i> 3D ResU-Net	109
4.4.1.2	Integrasi MobileNet.....	110
4.4.1.3	Integrasi GhostNet	112
4.4.1.4	Implementasi <i>Hybrid</i>	113
4.4.2	Evaluasi <i>Trade-off</i> Efisiensi versus Akurasi.....	115
4.4.2.1	Perbandingan Metrik Efisiensi Komputasi	115
4.4.2.2	Perbandingan Metrik Akurasi Segmentasi	116
4.4.2.3	Analisis Kurva Pareto	118
4.4.3	Kesimpulan Eksperimen 2	120
4.5	Hasil Eksperimen 3: Evaluasi Teknik Visual XAI	120
4.5.1	Implementasi dan Adaptasi Teknik Visual XAI	121
4.5.2	Analisis Kuantitatif Interpretabilitas	122
4.5.3	Analisis Lokalisasi.....	126
4.5.3.1	Evaluasi Korespondensi Spasial	126
4.5.3.2	Identifikasi Pola Kesalahan	127
4.5.4	Kesimpulan Eksperimen 3	129
4.6	Hasil Eksperimen 4: Analisis Sistem Terintegrasi.....	129
4.6.1	Validasi Klinis oleh Ahli	130
4.6.1.1	Penilaian Perbandingan Teknik XAI.....	130
4.6.1.2	Penilaian Model Segmentasi.....	131
4.6.1.3	Evaluasi Transparansi dan Kepercayaan Sistem	131
4.6.2	Analisis Karakterisasi Tumor Berbasis <i>Radiomic</i>	132
4.6.3	Evaluasi Kerangka Multidimensi	134
4.6.3.1	Analisis <i>Trade-off</i>	134
4.6.3.2	Analisis Korelasi.....	135
4.6.3.3	Validasi Metodologis	137
4.6.3.4	Integrasi Sistem	139



4.7	Diskusi	141
4.7.1	Efisiensi dan Akurasi Model	141
4.7.2	Transparansi dan Interpretabilitas	143
4.7.3	Kerangka Evaluasi Komprehensif.....	144
4.8	Analisis Kesesuaian dengan Tujuan Penelitian.....	145
4.8.1	Pencapaian Tujuan Penelitian	146
4.8.1.1	Pencapaian Tujuan 1: Pengembangan Model yang Efisien dan Akurat	146
4.8.1.2	Pencapaian Tujuan 2: Peningkatan Transparansi dan Karakterisasi Tumor	146
4.8.1.3	Pencapaian Tujuan 3: Pengembangan Kerangka Evaluasi Komprehensif	147
4.8.1.4	Jawaban atas Pertanyaan Penelitian	147
4.9	Keterbatasan Penelitian	148
4.9.1	Keterbatasan Data dan Generalisasi	148
4.9.2	Keterbatasan Validasi Klinis	149
4.9.3	Keterbatasan Teknis	149
4.9.4	Keterbatasan Metodologis	149
4.10	Ringkasan	150
BAB V	PENUTUP	151
5.1	Kesimpulan	151
5.2	Saran.....	152
DAFTAR PUSTAKA	.....	154
LAMPIRAN	.....	L-1
Lampiran 1: Algoritma .....	.....	L-1
Lampiran 2: Data perbandingan metrik DAUC dan IAUC untuk berbagai teknik XAIL-3 .....	.....	L-3
Lampiran 3: Hasil seleksi fitur <i>radiomic</i> dari PyRadiomic .....	.....	L-4
Lampiran 4: Rubrik Kuesioner .....	.....	L-10