

HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR SINGKATAN .....	xiii
INTISARI .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
BAB I Pendahuluan .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
1.6 Sistematika Penulisan .....	5
BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori .....	7
2.1 Tinjauan Pustaka .....	7
2.2 Dasar Teori .....	11
2.2.1 Sistem Limfatik .....	11
2.2.2 Limfedema .....	13
2.2.3 Impedansi .....	15
2.2.4 LCR Meter .....	16
2.2.4.1 Metode Konfigurasi LCR Meter .....	17
2.2.4.2 Metode Pengukuran: <i>Bridge</i> .....	18
2.2.4.3 Metode Pengukuran: <i>Autobalancing Bridge</i> .....	20
2.2.5 Konduktivitas dan Permittivitas .....	20
2.2.6 Bioimpedance Jaringan Tubuh .....	21
2.2.7 <i>Electrical Impedance Tomography</i> .....	22
2.2.8 Aspek Pengukuran Impedansi EIT .....	24
2.2.8.1 Modalitas Pencitraan EIT: <i>Difference EIT</i> .....	24
2.2.8.2 Elektroda: Material dan Jumlah .....	25
2.2.8.3 Metode Pengukuran: <i>Adjacent</i> .....	26
2.2.9 Rekonstruksi Citra EIT .....	28
2.2.9.1 <i>Meshing</i> .....	28

2.2.9.2	<i>Forward Problem</i> .....	33
2.2.9.3	<i>Inverse Problem</i> .....	40
2.2.10	<i>Library pyEIT</i> .....	43
2.2.11	ANSYS Maxwell: <i>Electric Transient</i> .....	44
2.2.12	<i>Clustering</i> .....	45
2.2.13	Sensor ToF: VL503L0X .....	48
2.2.14	Motor Stepper : NEMA17 .....	50
2.2.15	Driver Motor Stepper: A4988 .....	52
<b>BAB III Metode Penelitian</b> .....		55
3.1	Alat dan Bahan Tugas akhir .....	55
3.1.1	Alat Tugas akhir .....	55
3.1.2	Bahan Tugas akhir .....	56
3.2	Metode Penelitian .....	56
3.2.1	Pengembangan Sistem Sensor Batas Tubuh .....	56
3.2.1.1	Rancangan Umum Sistem .....	56
3.2.1.2	Perancangan Elektris Sistem Sensor Batas Tubuh .....	57
3.2.1.3	Struktur Mekanis Sensor Batas Tubuh .....	59
3.2.1.4	Desain Mekanis Sistem Sensor Batas Tubuh .....	60
3.2.1.5	Penentuan Masukan Motor Stepper .....	61
3.2.1.6	Perancangan Perangkat Lunak pada Arduino Uno .....	62
3.2.2	Desain Pengujian Sensor dan Sistem Sensor Batas Tubuh .....	63
3.2.3	Persiapan Model Limfedema .....	64
3.2.4	Pembuatan <i>Phantom Agarose</i> Limfedema .....	65
3.2.5	Desain Simulasi Pengukuran Impedansi EIT .....	67
3.2.6	Desain Eksperimen Pengukuran Impedansi EIT .....	68
3.2.7	Desain Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> Citra EIT .....	69
3.2.8	Metode Evaluasi .....	71
3.3	Tahapan Penelitian .....	73
3.3.1	Studi Literatur .....	73
3.3.2	Persiapan Model Limfedema .....	73
3.3.3	Pengembangan Sistem Sensor Batas Tubuh .....	74
3.3.4	Pengujian Sensor dan Sistem Sensor Batas Tubuh .....	74
3.3.5	Pembuatan Model <i>Phantom Agarose</i> Limfedema .....	74
3.3.6	Simulasi EIT dengan Perangkat Lunak <i>Multiphysic</i> .....	74
3.3.7	Eksperimen EIT dengan Model <i>Phantom Agarose</i> Limfedema ....	74
3.3.8	Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> Citra EIT .....	75
3.3.9	Evaluasi, Analisis, dan Penulisan Dokumen .....	75
<b>BAB IV Hasil dan Pembahasan</b> .....		76
4.1	Hasil Manufaktur .....	76

4.1.1	Hasil Manufaktur Sistem Sensor Batas Tubuh .....	76
4.1.2	Hasil Manufaktur <i>Chamber Phantom</i> dan Cetakan Organ .....	77
4.2	Pengujian Sensor ToF VL53L0X .....	78
4.2.1	Pengujian Sensor ToF VL53L0X Terhadap Variasi Jarak.....	78
4.2.2	Pengujian Sensor ToF VL53L0X terhadap Variasi Sudut.....	79
4.3	Pengujian Sistem Sensor Batas Tubuh .....	81
4.3.1	Pengujian Sudut Rotasi <i>Base</i> .....	81
4.3.2	Pengujian Estimasi Bentuk Batas Tubuh pada Objek <i>Chamber Phantom</i> EIT .....	83
4.4	Perbandingan Sinyal Impedansi Model EIT pada Simulasi dan Eksperimen	85
4.5	Pengujian Performa Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> Citra EIT .....	87
4.5.1	Pengujian Performa Rekonstruksi Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> Citra EIT pada Data Simulasi .....	87
4.5.2	Pengujian Performa Rekonstruksi Citra EIT Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> pada Data Eksperimen.....	91
4.5.3	Perbandingan Hasil Rekonstruksi Rekonstruksi dan <i>Clustering</i> ....	95
4.5.4	Penentuan Nilai <i>hyperparameter</i> regularisasi <i>pVal</i> Terbaik.....	95
BAB V	Kesimpulan dan Saran.....	96
5.1	Kesimpulan.....	96
5.2	Saran.....	96
	DAFTAR PUSTAKA.....	98
	LAMPIRAN .....	L-1
L.1	Data Batas Objek .....	L-1
L.2	<i>Code</i> Akuisisi Data Jarak pada Sistem Sensor Batas Tubuh.....	L-5
L.3	<i>Code</i> Rekonstruksi Bentuk Batas Tubuh.....	L-6
L.4	<i>Code</i> Rekonstruksi Citra EIT.....	L-7

Tabel 2.1	Penelitian Terkait Limfedema dan Edema .....	7
Tabel 2.2	Penelitian Terkait Deteksi Bentuk Batas Tubuh pada Limfedema .....	9
Tabel 2.3	Fungsi Pin pada Driver Motor Stepper A4988 .....	53
Tabel 2.4	Konfigurasi <i>Microstepping</i> . .....	54
Tabel 3.1	Konfigurasi PIN.....	58
Tabel 3.2	Model Limfedema. ....	65
Tabel 3.3	Properti Elektris Jaringan pada Model Organ. ....	65
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Sensor ToF VL53L0X Terhadap Variasi Jarak.....	79
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Sensor ToF VL53L0X Terhadap Variasi Sudut. ....	81
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Sudut Rotasi Base terhadap Sudut Seharusnya. ...	82
Tabel 4.4	Perbandingan dengan penelitian terdahulu. ....	84
Tabel 4.5	Nilai Rerata Error Absolut Sinyal Impedansi Simulasi dan Ekspe- rimen. ....	86
Tabel 4.6	Hyperparameter pVal yang Memberikan Akurasi Citra <i>Clustering</i> Terbaik pada Data Simulasi. ....	89
Tabel 4.7	Hyperparameter pVal yang Memberikan Akurasi Citra <i>Clustering</i> Terbaik pada Data Eksperimen.....	93
Tabel 4.8	Perbandingan Akurasi Hasil Rekonstruksi. ....	95
Tabel 1	Data Batas Objek 1 .....	L-1
Tabel 2	Data Batas Objek 2 .....	L-2
Tabel 3	Data Batas Objek 3 .....	L-3

Gambar 2.1	Sistem Limfatik a) Kapiler Limfatik b) Hubungan Kapiler Limfatik dengan Kapiler Darah [1]. . . . .	11
Gambar 2.2	Sistem Limfatik a) Pertukaran Cairan Antara Sistem Peredaran Darah dan Limfatik b) Organ Limfatik [1]. . . . .	12
Gambar 2.3	Limfedema pada Kaki dan Tangan [4]. . . . .	14
Gambar 2.4	Empat Derajat Keparahan Limfedema [27]. . . . .	14
Gambar 2.5	a) Metode Dua Terminal b) Model Metode Dua Terminal. . . . .	17
Gambar 2.6	Metode Empat Terminal. . . . .	18
Gambar 2.7	Rangkaian <i>Wheatstone Bridge</i> . . . . .	19
Gambar 2.8	Rangkaian <i>Autobalancing Bridge</i> . . . . .	20
Gambar 2.9	Model Fricke-Morse. . . . .	22
Gambar 2.10	Modalitas <i>Difference Electrical Impedance Tomography</i> [40]. . . . .	24
Gambar 2.11	Material Elektroda: a) Ag/AgCl [41], b) <i>Stainless Steel</i> [42]. . . . .	25
Gambar 2.12	Jumlah Elektroda EIT. . . . .	26
Gambar 2.13	Metode Pengukuran <i>Adjacent</i> . . . . .	27
Gambar 2.14	Komponen Mesh [46]. . . . .	28
Gambar 2.15	<i>Structured Meshes</i> dan <i>Unstructured Meshes</i> [48]. . . . .	29
Gambar 2.16	Triangulas: a) Buruk ( <i>skinny triangle</i> ) b) Baik [49]. . . . .	29
Gambar 2.17	Jumlah <i>edge</i> dan <i>triangle</i> pada triangulasi [50]. . . . .	30
Gambar 2.18	Triangulasi dan Triangulasi Delaunay [47]. . . . .	31
Gambar 2.19	Langkah Triangulasi menggunakan <i>Triangle</i> [52]. . . . .	32
Gambar 2.20	Aturan Penghalusan Ukuran <i>Mesh</i> [52]. . . . .	33
Gambar 2.21	Penyelesaian Analitik Forward Problem. . . . .	35
Gambar 2.22	Perhitungan Matriks <i>Jacobian</i> [14]. . . . .	36
Gambar 2.23	Elemen Tunggal dan Rangkaian Ekuivalennya. Diadopsi berdasarkan [56]. . . . .	36
Gambar 2.24	Penggabungan Dua Elemen. . . . .	38
Gambar 2.25	<i>Complete electrode model</i> : a) Elemen pada elektroda b) Representasi rangkaian admitansi c) Penggabungan Elemen [56]. . . . .	40
Gambar 2.26	Diagram Alir Rekonstruksi Citra EIT. . . . .	41
Gambar 2.27	Arsitektur <i>Library</i> <code>pyEIT</code> [57]. . . . .	43
Gambar 2.28	Tampilan Halaman pada ANSYS Maxwell [59]. . . . .	45
Gambar 2.29	Penerapan <i>K-Means Clustering</i> pada citra EIT [23]. . . . .	48
Gambar 2.30	Prinsip <i>Time-of-Flight</i> . . . . .	49
Gambar 2.31	Sensor ToF VL53L0X a) Modul b) Field of View [64]. . . . .	49
Gambar 2.32	Protokol Komunikasi <i>Inter-Integrated Circuit</i> (I2C) []. . . . .	50
Gambar 2.33	Konfigurasi Motor Stepper Bipolar a) Lilitan b) Stator terhadap Rotor [69]. . . . .	51
Gambar 2.34	Arus dialirkan ke a) Koil Pertama b) Koil Kedua c) Koil Pertama Polaritas Berlawanan d) Koil Kedua Polaritas Berlawanan [69]. . . . .	52
Gambar 2.35	Konfigurasi Pin Driver Motor Stepper A4988 [70]. . . . .	53
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem Sensor Batas Tubuh. . . . .	57
Gambar 3.2	Rangkaian Sistem Sensor Batas Tubuh. . . . .	58
Gambar 3.3	Struktur Mekanis Sensor Batas Tubuh. . . . .	59



Gambar 3.4	Desain 3D Sistem Sensor Batas Tubuh. ....	60
Gambar 3.5	Konfigurasi <i>Gear</i> . ....	61
Gambar 3.6	Diagram Alir Perancangan Perangkat Lunak. ....	63
Gambar 3.7	Desain Pengujian Sistem Sensor Batas Tubuh. ....	64
Gambar 3.8	Prosedur Pembuatan Model <i>Phantom Agarose</i> Limfedema. ....	67
Gambar 3.9	Desain Simulasi Pengukuran Impedansi EIT menggunakan perangkat lunak <i>multiphysic</i> . ....	68
Gambar 3.10	Desain Eksperimen Pengukuran Impedansi EIT. ....	68
Gambar 3.11	Diagram Alir Rekonstruksi dan Clustering Citra EIT. ....	70
Gambar 3.12	Tahapan Penelitian. ....	73
Gambar 4.1	Hasil Manufaktur Sistem Sensor Batas Tubuh. ....	76
Gambar 4.2	Hasil Manufaktur <i>Chamber Phantom</i> . ....	77
Gambar 4.3	Hasil Manufaktur Cetakan Organ Daging. ....	77
Gambar 4.4	Pengujian Sensor Terhadap Variasi Jarak. ....	78
Gambar 4.5	Grafik Jarak Terukur terhadap Jarak Sebenarnya. ....	79
Gambar 4.6	Pengujian Sensor Terhadap Variasi Sudut. ....	80
Gambar 4.7	Grafik Jarak Terukur terhadap Variasi Sudut. ....	81
Gambar 4.8	Pengujian Sudut Rotasi Platform <i>Base</i> . ....	82
Gambar 4.9	Pengujian Sistem Sensor Batas Tubuh pada <i>Chamber Phantom</i> EIT. ....	83
Gambar 4.10	Hasil Estimasi Bentuk Batas Objek. ....	84
Gambar 4.11	Perbandingan Sinyal Impedansi Normalisasi antara Simulasi dan Eksperimen. ....	85
Gambar 4.12	Simulasi EIT Menggunakan Perangkat Lunak <i>Multiphysic</i> . ....	87
Gambar 4.13	Evaluasi Akurasi Citra <i>Clustering</i> untuk Menentukan <i>Hyperparameter</i> pVal Terbaik pada Data Impedansi Simulasi. ....	88
Gambar 4.14	Citra Rekonstruksi EIT Simulasi pada pVal Terbaik. ....	90
Gambar 4.15	Citra Hasil Clustering EIT Simulasi pada pVal Terbaik. ....	90
Gambar 4.16	Hasil Manufaktur Phantom Limfedema. ....	91
Gambar 4.17	Evaluasi Akurasi Citra <i>Clustering</i> untuk Menentukan <i>Hyperparameter</i> pVal Terbaik pada Data Impedansi Eksperimen. ....	92
Gambar 4.18	Citra Rekonstruksi EIT Eksperimen pada pVal Terbaik. ....	94
Gambar 4.19	Citra Hasil Eksperimen EIT Simulasi pada pVal Terbaik. ....	94