

**IDENTIFIKASI TINGKAT KEPADATAN TULANG
MENGUNAKAN METODE *GAUSSIAN MIXTURE MODELS –
EXPECTATION MAXIMIZATION (GMM-EM)***

TESIS



Oleh
AGUNG EFENDY
NIM. 24.131.003

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PEMINATAN SISTEM KENDALI DAN EMBEDDED

**PROGRAM PASCASARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FEBRUARI
2026**

**IDENTIFIKASI TINGKAT KEPADATAN TULANG
MENGUNAKAN METODE *GAUSSIAN MIXTURE MODELS –
EXPECTATION MAXIMIZATION (GMM-EM)***

TESIS

Diajukan kepada
Institut Teknologi Nasional Malang
untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Menyelesaikan Program Studi Magister Teknik Elektro
Peminatan Sistem Kendali dan Embedded

Oleh
AGUNG EFENDY
NIM. 24.131.003

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PEMINATAN SISTEM KENDALI DAN EMBEDDED

**PROGRAM PASCASARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FEBRUARI
2026**

Tesis oleh **Agung Efendy, S.T. NIM 24.131.003**, ini telah diperiksa dan disetujui dalam ujian.

Malang, Februari 2026

Pembimbing I

Pembimbing II

**Dr. Eng. I Komang Somawirata, S.T., M.T.
NIP.P. 1030100361**

**Dr. Irmalia Suryani Faradisa, S.T., M.T.
NIP.P. 1030000365**

**Mengetahui :
Institut Teknologi Nasional Malang
Program Pascasarjana**

**PPs ITN Malang
Direktur,**

**Magister Teknik Elektro
Ketua Program Studi**

**Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, M.T.
NIP.Y. 1018700153**

**Dr. Ir. F. Yudi Limpraptono, M.T.
NIP.Y. 1039500274**

BERITA ACARA UJIAN TESIS
PROGRAM STUDI : MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

Nama : AGUNG EFENDY
NIM : 24.131.003
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Peminatan : Sistem Kendali dan Embedded
Judul : IDENTIFIKASI TINGKAT KEPADATAN TULANG MENGGUNAKAN
METODE *GAUSSIAN MIXTURE MODELS – EXPECTATION MAXIMIZATION*
(GMM-EM)

Dipertahankan dihadapan Tim Penguji Ujian Tesis Jenjang Program Studi Magister Teknik Elektro Program Pascasarjana ITN Malang

Pada hari : Jum'at
Tanggal : 17 Februari 2026
Dengan Nilai : A

Panitia Ujian Tesis

Ketua

Sekretaris

Prof. Dr. Eng. Aryunto Soetedjo, S.T., M.T.
NIP. Y. 1030800417

Dr. Eng. I Komang Somawirata, S.T., M.T.
NIP.P. 1030100361

Penguji I

Penguji II

Prof. Dr. Eng. Aryunto Soetedjo, S.T., M.T.
NIP. Y. 1030800417

Dr. Michael Ardita, S.T., M.T.
NIP. Y. 1028700171

PERNYATAAN

ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia Tesis ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (Magister Teknik) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, Februari 2026

Agung Efendy, S.T.
NIM. 24.131.003

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Allhamdulillah Kehadirat Allah SWT. yang telah melimpahkan anugerah-Nya, serta Rasul Muhammad SAW. yang telah memberikan kabar gembira serta menyempurnakan akhlak dan memberi syafa'at sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul :

IDENTIFIKASI TINGKAT KEPADATAN TULANG MENGGUNAKAN METODE *GAUSSIAN MIXTURE MODELS – EXPECTATION MAXIMIZATION* (GMM-EM)

Laporan tesis ini selain merupakan salah satu syarat akademis yang harus ditempuh oleh mahasiswa program pasca sarjana, juga untuk menambah ilmu bagi penulis dan pembaca.

Melalui kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Bapak Awan Uji Krismanto, S.T., M.T., Ph.D, Selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Prof. Dr. Ir Lalu Mulyadi, M.T.,_Selaku Direktur Program_Pasca Sarjana, Institut Teknologi Nasional Malang.
3. Bapak Dr. Ir. F. Yudi Limpraptono, M.T.,_Selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Bapak Dr. Eng. I Komang Somawirata, S.T., M.T., Selaku Dosen Pembimbing I.
5. Ibu Dr. Irmalia Suryani Faradisa, S.T., M.T., Selaku Dosen Pembimbing II.
6. Bapak dan Ibu Dosen Program Pascaarjana, Program Studi MagisterTeknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang.
7. Bapak dan Ibu bagian administrasi Program Pascasarjana, Institut Teknologi Nasional Malang.
8. Almarhum Dra. Siti Zubaidah, telah menjadi Ibu terbaik sesemesta.
9. Almarhum Miherman, S.E., terimakasih atas pelajarannya dalam menjalani hidup Pak.

10. Rima Ngindia, S.T., telah menemani dalam banyak petualangan dan mari kita terus bertualang sampai saatnya nanti kembali ke titik balik.
11. Alkindi Keaton Rakai Imba, ayo kita bertualang Nak.
12. Markus P Sihombing
13. Seluruh bagian semesta yang telah menemani petualangan sampai saat ini walaupun tanpa disebut satu persatu.

Penulis merasa bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna oleh karena itu saran dan kritik yang sifatnya membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan, guna kesempurnaan Tesis ini, dan dapat berguna bagi penelitian – penelitian selanjutnya.

Malang, Februari 2026

Penulis

ABSTRAK

Agung Efendy, S.T. Program Studi Magister Teknik Elektro, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Nasional Malang, Februari 2026, *Identifikasi Tingkat Kepadatan Tulang Menggunakan Metode Gaussian Mixture Models – Expectation Maximization (GMM-EM)*, Tesis, Pembimbing: Pembimbing I: Dr. Eng. I Komang Somawirata, S.T., M.T., Pembimbing II: Dr. Irmalia Suryani Faradisa, S.T., M.T.

Dalam tubuh manusia terdapat tulang yang menyangga tubuh. Tulang tersebut mempunyai tingkat kepadatan tertentu. Dan tingkat kepadatan tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk usia, jenis kelamin dan gaya hidup. Tingkat kepadatan tulang (*Bone Mineral Density - BMD*) tersebut terbagi menjadi 3 bagian yaitu tulang normal, osteopenia dan osteoporosis. Dengan memanfaatkan citra *X-ray* pada tulang penulis berupaya mendesain dan membuat suatu piranti lunak yang dapat mendeteksi tingkat kepadatan tulang, sehingga dapat dimanfaatkan pada bidang medis.

Maka dari itu penulis bermaksud mengembangkan penelitian ini dengan penerapan metode *Gaussian Mixture Models* (GMM). Metode algoritma GMM yang digunakan pada penelitian ini merupakan metode untuk memperoleh pendugaan yang memberikan hasil yang baik dengan memaksimalkan fungsi kemungkinan. *Expectation Maximization* (EM) termasuk algoritma *clustering* yang berbasiskan model menggunakan perhitungan probabilitas.

Setelah dilakukan segmentasi untuk mendiagnosa maka diperlukan klasifikasi, yang dimana penulis melakukan klasifikasi menjadi 3 jenis yaitu Tulang Normal, Osteopenia dan Osteoporosis. Klasifikasi menggunakan metode *Random Forest* menghasilkan nilai keyakinan yang cukup tinggi. Dalam pengujian sistem pada klasifikasi diperoleh *Sensitivity* 64%, *Specificity* 86.76%, *F1-Score* 73.66% dan *Accuracy* 75%. Dengan hasil ini dapat dinyatakan penelitian ini berjalan sukses

Kata Kunci: Tulang, BMD, *X-ray*, GMM, EM

ABSTRACT

Agung Efendy, S.T. Master of Electrical Engineering Study Program, Postgraduate Program, Institut Teknologi Nasional Malang, February 2026, *Identification Of Bone Density Level Using The Gaussian Mixture Models – Expectation Maximization (GMM-EM) Method*, Tesis, Supervisor: Supervisor I: Dr. Eng. I Komang Somawirata, S.T., M.T., Supervisor II: Dr. Irmalia Suryani Faradisa, S.T., M.T.

The human body contains bones that support the body. These bones have a specific density level. This density is influenced by various factors, including age, gender, and lifestyle. Bone mineral density (BMD) is divided into three categories: normal bone, osteopenia, and osteoporosis. By utilizing X-ray images of bones, the authors attempted to design and create software that can detect bone density levels for use in the medical field.

Therefore, the author intends to develop this research by applying the Gaussian Mixture Model (GMM) method. The GMM algorithm used in this study is a method for obtaining estimates that provide good results by maximizing the likelihood function. Expectation Maximization (EM) is a model-based clustering algorithm that uses probability calculations.

After segmentation for diagnosis, classification is required, which the author classified into three types: Normal Bone, Osteopenia, and Osteoporosis. Classification using the Random Forest method produced a fairly high confidence value. In system testing, the classification system achieved a sensitivity of 64%, a specificity of 86.76%, an F1-score of 73.66%, and an accuracy of 75%. These results indicate that this research was successful.

Keywords: Bones, BMD, *X-ray*, GMM, EM

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL DEPAN	
HALAMAN JUDUL	
HALAMAN LEMBAR PENGESAHAN	
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	3
1.3 Rumusan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Pembatasan Masalah	4
1.6 Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Tulang	6
2.3 <i>Bone Mineral Density</i>	7
2.4 Citra	8
2.5 Citra X-ray	8
2.6 Pengolahan Citra Digital	9
2.7 Segmentasi Citra	10
2.8 <i>Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)</i> . ..	11
2.9 <i>Gaussian Mixture Models – Expectation Maximization</i>	12
2.10 Ekstraksi Fitur	15
2.11 <i>Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)</i>	15
2.12 Klasifikasi	16
2.13 <i>Random Forest (RF)</i>	17
2.14 Hipotesis	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Pengumpulan Data.....	19
3.2 Instrumen Penelitian	20
3.2.1 Persiapan <i>Hardware</i>	20

3.2.2 Instalasi dan Konfigurasi <i>Software</i>	20
3.3 Rancangan Penelitian	21
3.4 Kerangka Konsep Penelitian	24
3.4.1 Konsep Masalah	24
3.4.2 Konsep Solusi.....	25
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Tampilan Antarmuka	27
4.2 Analisa <i>Pre-Processing</i>	29
4.2.1 Tahap <i>Pre-Processing</i> (Peningkatan Kontras).....	30
4.2.2 Perhitungan Histogram & Probabilitas (PDF).....	31
4.2.3 Cumulative Distribution Function (CDF)	31
4.2.4 Pemetaan Nilai Baru (Transformasi).....	31
4.2.5 Noise Reduction Analisa Kuantitatif MSE dan PSNR.....	32
4.3 Analisa Segmentasi	34
4.4 Sampling Hasil Pengujian Data Latih.....	36
4.5 Sampling Hasil Pengujian Data Uji.....	38
4.4 Pengujian Sistem	41
4.4.1 Hasil Pengujian Sistem <i>Confusion Matrix Multi Class</i>	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	49

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perhitungan Histogram dan PDF	31
Tabel 4.2	Sampling Hasil Pengujian Data Latih	36
Tabel 4.3	Sampling Hasil Pengujian Data Uji	38
Tabel 4.4	<i>Confusion Matrix Multi Class</i>	41
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Dalam <i>Confusion Matrix Multi Class</i>	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Tulang	7
Gambar 2.2 Tulang Normal, Osteopenia dan Osteoporosis.....	8
Gambar 2.3 Citra <i>X-ray</i>	9
Gambar 2.4 <i>Random Forest</i>	17
Gambar 3.1 Proses Instrumentasi Sistem Pada <i>Raspberry Pi</i>	20
Gambar 3.2 Perancangan Penelitian Identifikasi BMD	22
Gambar 3.3 Proses Segmentasi	23
Gambar 3.4 Bagan Integrasi PCD Dalam Identifikasi BMD	25
Gambar 4.1 Tampilan Awal Antarmuka.....	27
Gambar 4.2 Tampilan Menu Training Data.....	28
Gambar 4.3 Tampilan Diagnosis Citra.....	28
Gambar 4.4 Tampilan Hasil Diagnosis	29
Gambar 4.5 Histogram Citra Inputan.....	30
Gambar 4.6 Histogram Citra CLAHE.....	30
Gambar 4.7 <i>Noise Map</i> Menggunakan MSE dan PSNR.....	32
Gambar 4.8 Hasil Citra Tersegmentasi	34
Gambar 4.9 Grafik Distribusi Piksel GMM.....	35

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Kode Sumber <i>Launcher</i>	49
Lampiran 1.2 Kode Sumber <i>Training</i>	52
Lampiran 1.3 Kode Sumber <i>Diagnose</i>	57