

**ANALISIS SEISMISITAS DAN PEMETAAN ZONA KERENTANAN
GEMPA BUMI MENGGUNAKAN ANALISIS
KERNEL DENSITY ESTIMATION
(Studi Kasus : Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)**

SKRIPSI

Oleh:

**AJENG SEPTY ARINI
NIM. 220604110061**



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**ANALISIS SEISMISITAS DAN PEMETAAN ZONA KERENTANAN
GEMPA BUMI MENGGUNAKAN ANALISIS
KERNEL DENSITY ESTIMATION
(Studi Kasus : Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
AJENG SEPTY ARINI
NIM. 220604110061**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

**ANALISIS SEISMISITAS DAN PEMETAAN ZONA KERENTANAN
GEMPA BUMI MENGGUNAKAN ANALISIS
KERNEL DENSITY ESTIMATION
(Studi Kasus : Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)**

SKRIPSI

Oleh:

AJENG SEPTY ARINI
NIM. 220604110061

Telah diperiksa dan Disetujui untuk dikaji
Pada Tanggal, 25 Juni 2026

Pembimbing I,


Drs. Abdul Basid, M.Si.
NIP. 19650504 199003 1 003

Pembimbing II,


Arista Romadhani, M.Sc
NIP. 19900905 201903 1 018

Mengetahui
Ketua Program Studi



Farid Samsu Mananto, S.Si., M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

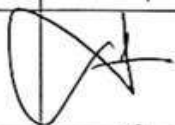
ANALISIS SEISMISITAS DAN PEMETAAN ZONA KERENTANAN GEMPA
BUMI MENGGUNAKAN ANALISIS
KERNEL DENSITY ESTIMATION
(Studi Kasus : Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)

SKRIPSI

Oleh:

AJENG SEPTY ARINI
NIM. 220604110061

Telah Dipertahankan di Depan dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 26 Juni 2026

Penguji Utama	:	<u>Irjan, M.Si</u> NIP.19691231 200604 1 003	
Ketua Penguji	:	<u>Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si</u> NIP.19871502 202321 2 031	
Sekretaris Penguji	:	<u>Drs. H. Abdul Basid, M.Si</u> NIP.19650504 199003 1 003	
Anggota Penguji	:	<u>Arista Romadani, M.Sc</u> NIP. 19900905 201903 1 018	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi



Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ajeng Septy Arini

NIM : 220604110061

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Analisis Seismisitas dan Pemetaan Zona Kerentanan
Gempa Bumi Menggunakan Analisis *Kernel Density Estimation* (Studi Kasus: Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025).

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, Juni 2026
Yang Membuat Pernyataan



Ajeng Septy Arini
NIM. 220604110061

MOTTO

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(QS. Al- Insyirah ayat 5)

“Setiap proses adalah bagian dari perjalanan menuju keberhasilan”

“Selalu ada pelangi pada setiap mendungnya”

~ Raim laode

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta kemudahan yang diberikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Semoga sholawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, para sahabatnya, dan semua orang yang meneladaninya. Dengan segala hormat dan kasih sayang, skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Kepada kedua orang tua yang paling berjasa dalam hidup saya, Ibu Anisa dan Bapak Suatno. Terimakasih atas do'a, dukungan, perhatian, kasih sayang serta semua pengorbanan yang telah dilakukan untuk mewujudkan impian saya. Dengan selesainya skripsi ini menjadi salah satu hadiah untuk setiap pengorbanan, setiap lelah dan setiap do'a yang selalu dipanjatkan. Terimakasih selalu ada Setiap saat dan Terimakasih telah menjadi penyemangat dalam hidup saya.
2. Kepada kakak saya, terima kasih atas dukungan, perhatian, semangat, serta doa yang selalu diberikan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Kehadiran kalian menjadi penyemangat dalam setiap proses yang saya lalui.
3. Kepada Sahabat dan Temen-teman saya , terima kasih telah menjadi tempat berbagi cerita, membantu dalam kesulitan, memberikan semangat, serta menemani perjalanan selama masa perkuliahan. Terima kasih untuk setiap tawa, dukungan, dan kenangan yang tidak akan terlupakan.
4. Kepada Dosen Pembimbing dan Dosen Penguji, terima kasih atas ilmu, bimbingan, arahan, kritik, dan saran yang telah diberikan selama proses

penyusunan skripsi ini sehingga saya dapat menyelesaikannya dengan baik.

5. Kepada Seseorang yang saya sayangi, terima kasih karena selalu hadir memberikan dukungan, perhatian, motivasi, serta menemani saya dalam berbagai keadaan selama proses penyelesaian skripsi ini. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan ini.
6. Diri saya sendiri, terima kasih karena sudah mampu bertahan, berjuang, dan tidak menyerah sampai di titik ini. Terima kasih sudah kuat menghadapi proses panjang, rasa lelah, dan berbagai tantangan selama menyelesaikan skripsi ini.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT berkah Rahmat, Hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul **“Analisis Seismisitas dan Pemetaan Zona Kerentanan Gempa Bumi Menggunakan Analisis *Kernel Density Estimation* (Studi Kasus: Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini terwujud berkat bantuan, arahan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M. Si., CAHRM., CRMP selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, M.Kes selaku Dekan, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Farid Samsu Hananto, M.T Selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Irjan, M.Si dan Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si Selaku dewan penguji skripsi.
5. Drs.H. Abdul Basid, M.Si dan Arista Romadani, M.Sc selaku dosen pembimbing skripsi.
6. Fikriyatul Azizah Su’udi, M.Si selaku dosen wali.
7. Untuk Bapak Suatno dan Ibu Anisah sebagai *support system* utama dalam perjalanan menuju sarjana ini, penulis mengucapkan terimakasih atas segala

usaha dan kontribusi yang diberikan dalam perjalanan ini. Terimakasih atas do'a yang selalu di langitkan dalam siang dan malam, atas kesabaran, pengorbanan, kasih sayang, serta perjuangan yang tidak pernah berhenti untuk mengantarkan anakmu sampai pada titik ini. Terima kasih telah menjadi tempat pulang, sumber kekuatan, dan alasan untuk terus berusaha menyelesaikan setiap proses yang dilalui. Terima kasih atas segala upaya yang telah diusahakan demi keberhasilan anakmu. Segala pencapaian ini tidak terlepas dari doa dan dukungan Bapak dan Ibu. Semoga setiap langkah dan pengorbanan yang telah diberikan menjadi amal kebaikan, serta kelak anakmu dapat terus menjadi kebanggaan dan memberikan kebahagiaan untuk Bapak dan Ibu.

8. Untuk kakak saya Titin Sumariyah dan Ayu Retno Sari yang senantiasa memberi dukungan dan juga do,a dalam setiap perjalanan ini. Terima kasih atas segala dukungan, perhatian, semangat, dan doa yang selalu diberikan selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi tempat berbagi cerita, memberikan motivasi, serta menemani setiap proses yang telah dilalui hingga akhirnya penulis dapat sampai pada tahap ini. Segala bentuk kepedulian dan dukungan yang diberikan menjadi salah satu kekuatan bagi penulis untuk terus berusaha dan menyelesaikan perjalanan ini. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT.
9. Keponakan penulis, Sarah, Lano, Zafran, Zayn, dan Zara terimakasih atas doa dan tawa yang diberikan selama ini. Terimakasih selalu memberi tawa dan kebahagiaan. Semoga kelak kalian berada di posisi ini.

10. Sahabat penulis yang senantiasa memberi semangat dan menemani sampai ditahap ini. Kepada Syafira, Melisa, Maharani, Anisa, Qonita, dan Raisan yang menjadi bagian dalam perjalanan perkuliahan ini. Terimakasih atas bantuan, masukan, dan waktu yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih atas tawa yang selalu ada dan terimakasih atas waktu yang selalu di luangkan dalam proses ini.
11. Seseorang yang penulis sayangi dan cintai, terimakasih atas segala kontribusi, dukungan, upaya, dan tawa sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Terimakasih sudah meluangkan waktu untuk menemani revisi dan menyelesaikan permasalahan dalam penulisan skripsi ini. Hal-hal yang diberikan sangat berarti bagi penulis dan menjadikan perjalanan ini terasa lebih indah dan berarti. Terimakasih untuk cinta dan kasih sayang serta perhatian yang diberikan. Semoga semua yang diberikan mendapat balasan yang setara. Terimakasih Gali.
12. Untuk teman KKN, teman kamar ma'had, teman SMA, dan teman masa kecil penulis yang memberi dukungan dan bantuan dalam perjalanan ini. Terimakasih atas kebersamaannya dalam penyusunan skripsi ini.
13. Untuk Epshilon dan anak *geophysic* terimakasih atas dukungan , kebersamaan, dan segala bantuan yang diberikan. Semoga semua hal yang diberikan mendapatkan balasan dari Allah SWT dan kalian diberi kelancaran dalam proses menuju impian kalian masing- masing.
14. Untuk diriku sendiri, Ajeng Septy Arini terimakasih sudah bertahan sampai akhir. Terimakasih sudah berjuang walaupun penuh dengan keluhan tapi kamu hebat bisa sampai di posisi ini. Terimakasih telah mewujudkan mimpi

itu. Terima kasih sudah berusaha, belajar, dan melewati setiap proses hingga akhirnya dapat menyelesaikan apa yang telah dimulai. Perjalanan ini menjadi bukti bahwa setiap usaha, doa, dan kesabaran memiliki hasilnya masing-masing. Semoga pencapaian ini menjadi pengingat bahwa diri ini mampu melewati berbagai tantangan dan terus berkembang menjadi pribadi yang lebih baik.

Malang, 24 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	iv
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
مستخلص البحث.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan.....	6
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Sumber Gempa di Jawa	8
2.2 Gempa Bumi.....	9
2.2.1 Proses Terbentuknya Gempa Bumi	10
2.2.2 Teori Tektonik Lempeng	10
2.2.3 Klasifikasi Gempa Bumi.....	12
2.2.4 Seismisitas	13
2.2.5 Gelombang Seismik.....	14
2.2.6 Parameter Gempa Bumi.....	16
2.3 Bahaya dan Kerentanan Gempa Bumi	19
2.3.1 Bahaya	20
2.3.2 Kerentanan.....	20
2.3.3 Hubungan Bahaya dan Kerentanan Gempa Bumi	21
2.4 Sistem Informasi Geografis (SIG).....	21
2.5 Kernel Density Estimation (KDE)	22
2.5.1 Konsep Dasar Fungsi Kernel	23
2.5.2 Bandwidth dalam KDE.....	24
2.5.3 Penerapan KDE dalam Pemetaan Bahaya Gempa.....	25
2.6 Penelitian Terdahulu.....	25

BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Lokasi Penelitian	27
3.2 Data Penelitian	28
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.4 Peralatan Penelitian	28
3.5 Prosedur Penelitian.....	29
3.5.1 Pengumpulan Data.....	29
3.5.2 Pengolahan Data	30
3.5.3 Interpretasi Data.....	32
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Analisis Karakteristik Seismisitas Wilayah Malang Raya	34
4.2 Analisis Spasial Sebaran dan Kepadatan Gempa Bumi	36
4.2.1 Peta Sebaran Gempa Bumi Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025	37
4.2.2 Peta Kepadatan Gempa Bumi Metode <i>Kernel Density Estimation</i>	38
4.3 Analisi Faktor Kerentanan Gempa Bumi	40
4.3.1 Peta Kepadatan Penduduk Wilayah Malang Raya	40
4.3.2 Peta Kawasan Permukiman Wilayah Malanag Raya.....	42
4.4 Analisis Zona Kerentanan Gempa Bumi di Wilayah Malang Raya.....	43
4.5 Integrasi Keislaman.....	44
4.5.1 Seismisitas Gempa Bumi dalam Pandangan Islam.....	45
4.5.2 Analisis <i>Kernel Density Estimation</i> dalam Pandangan Islam.....	46
4.5.3 Zona Kerentanna Gempa Bumi dalam Pandangan Islam	48
BAB V PENUTUP.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lempeng Tektonik Indonesia (Amira, 2024).....	8
Gambar 3.1 Peta Daerah Penelitian	27
Gambar 3.2 Parameter <i>Kernel Density Estimation</i>	31
Gambar 3.3 Pembobotan Parameter pada Proses <i>Weighted Overlay</i>	32
Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian.	33
Gambar 4.1 Distribusi Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Malang raya	34
Gambar 4.2 Distribusi Kedadaman Gempa di Wilayah Malang Raya	35
Gambar 4.3 Distribusi Jumlah Kejadian Gempa Bumi per Tahun di Wilayah Malang Raya Tahun 2010-2025	36
Gambar 4.4 Peta Sebaran Gempa Bumi Wilayah Malang Raya.....	37
Gambar 4.5 Peta Kepadatan Gempa Bumi Metode <i>Kernel Density Estimation</i> Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025.	39
Gambar 4.6 Peta Kepadatan Penduduk Wilayah Malang Raya Tahun 2021	41
Gambar 4.7 Peta Kawasan Permukiman Wilayah Malang Raya Tahun 2021.....	42
Gambar 4.8 Peta Kerentanan Gempa Bumi Wilayah Malang Raya	43

ABSTRAK

Arini, Ajeng Septy. 2026. **Analisis Seismisitas dan Pemetaan Zona Kerentanan Gempa Bumi Menggunakan Analisis *Kernel Density Estimation* (Studi Kasus: Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025)**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Drs. H. Abdul Basid, M.Si. (II) Arista Romadani, M.Sc.

Kata Kunci: Gempa Bumi, Kernel Density Estimation, Kernel Quartic, Weighted Overlay, Kerentanan Gempa, Malang Raya

Wilayah Malang Raya merupakan salah satu wilayah di Jawa Timur yang memiliki potensi bahaya gempa bumi akibat aktivitas zona subduksi di selatan Pulau Jawa. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan tingkat kerentanan gempa bumi wilayah Malang Raya dengan mengintegrasikan parameter seismisitas, kepadatan penduduk, dan kawasan permukiman menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Data yang digunakan berupa data kejadian gempa bumi periode 2010-2025 bersumber dari *United States Geological Survey* (USGS), data kepadatan penduduk, serta data kawasan permukiman. Analisis dilakukan berdasarkan parameter magnitudo, kedalaman, dan frekuensi kejadian gempa menggunakan metode *Kernel Density Estimation* (KDE) dengan fungsi *Kernel Quartic* untuk menghasilkan zona kepadatan gempa. Selanjutnya proses *Weighted Overlay* dengan bobot parameter kepadatan gempa 50%, kepadatan penduduk 30%, dan kawasan permukiman 20% untuk menghasilkan peta kerentanan gempa bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas gempa bumi di Wilayah Malang Raya periode 2010-2025 didominasi oleh gempa magnitudo rendah hingga sedang dan wilayah kepadatan gempa tinggi berada di selatan Malang Raya. Hasil *Weighted Overlay* menunjukkan wilayah kerentanan tinggi berada di wilayah selatan Kabupaten Malang dan sebagian Kota Malang yang dipengaruhi oleh aktivitas kegempaan serta faktor sosial dan fisik. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi spasial dalam mendukung mitigasi bencana gempa bumi di wilayah Malang Raya.

ABSTRACT

Arini, Ajeng Septy. 2026. **Analysis of Seismicity and Mapping of Earthquake Vulnerability Zones Using Kernel Density Estimation (Case Study: Greater Malang Area, 2010–2025)**. Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Advisors: (I) Drs. H. Abdul Basid, M.Si. (II) Arista Romadani, M.Sc.Ajeng

Keywords: Earthquake, Kernel Density Estimation, Quartic Kernel, Weighted Overlay, Earthquake Vulnerability, Greater Malang

The Greater Malang region is one of the areas in East Java that is at risk of earthquakes due to subduction zone activity south of Java Island. This study aims to map the level of earthquake vulnerability in the Greater Malang region by integrating seismicity parameters, population density, and residential areas using a Geographic Information System (GIS). The data used consists of earthquake occurrence data for the 2010–2025 period sourced from the United States Geological Survey (USGS), population density data, and residential area data. The analysis was conducted based on the parameters of magnitude, depth, and frequency of earthquake occurrences using the Kernel Density Estimation (KDE) method with a quartic kernel function to generate earthquake density zones. Next, a Weighted Overlay process was performed, with weights of 50% for earthquake density, 30% for population density, and residential areas (20%) to produce an earthquake vulnerability map. The results of the study show that earthquake activity in the Greater Malang region during the 2010–2025 period is dominated by low- to moderate-magnitude earthquakes, and the area with high earthquake density is located in the southern part of Greater Malang. The weighted overlay results indicate that high-vulnerability areas are located in the southern part of Malang Regency and parts of Malang City, which are influenced by seismic activity as well as social and physical factors. The results of this study can be used as spatial information to support earthquake disaster mitigation in the Greater Malang region.

مستخلص البحث

أريني، أجينج سييتي. 2026. تحليل الزلازل ورسم خرائط مناطق تعرض الزلازل باستخدام تحليل تقدير كثافة النواة (دراسة حالة: منطقة مالانغ رايا للفترة 2010-2025). بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية في مالانج. المشرف: (الأول) د. هـ. عبد البسيط، الماجستير؛ (الثاني) أريستا روماداني، الماجستير.

الكلمة الرئيسية: الزلازل، تقدير كثافة النواة، نواة ربعية، التراكب المرجح، هشاشة الزلازل، مالانج رايا

تُعد منطقة مالانج الكبرى واحدة من المناطق في جاوة الشرقية التي لديها احتمالية لخطر الزلازل بسبب نشاط منطقة الغمر جنوب جزيرة جاوة. تهدف هذه الدراسة إلى رسم خريطة لمستوى هشاشة الزلازل في منطقة مالانج الكبرى من خلال دمج معايير الزلازل، وكثافة السكان، والمناطق السكنية باستخدام البيانات المستخدمة تشمل بيانات الزلازل خلال فترة 2010- (GIS). نظام المعلومات الجغرافية ، وبيانات كثافة السكان، وبيانات (USGS) 2025 من مصادر هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية المناطق السكنية. تم إجراء التحليل بناءً على معايير الحجم، العمق، وتكرار حدوث الزلازل باستخدام مع دالة النواة الرباعية لتوليد مناطق كثافة الزلازل. بعد ذلك، تم (KDE) طريقة تقدير كثافة النواة مع أوزان المعايير: كثافة الزلازل 50%، (Weighted Overlay) تطبيق عملية طبقات الوزن أظهرت نتائج . كثافة السكان 30%، والمناطق السكنية 20% لإنتاج خريطة هشاشة الزلازل البحث أن نشاط الزلازل في منطقة مالانج الكبرى خلال الفترة 2010-2025 كان يغلب عليه الزلازل ذات الشدة المنخفضة إلى المتوسطة، وكانت مناطق الكثافة الزلزالية العالية تقع في جنوب مالانج الكبرى. وأظهرت نتائج التحليل الطبقي المرجح أن المناطق العالية الخطورة تقع في جنوب مقاطعة مالانج وجزء من مدينة مالانج، ويتأثر ذلك بنشاط الزلازل بالإضافة إلى العوامل الاجتماعية والطبيعية. يمكن استخدام نتائج هذا البحث كمعلومات مكانية لدعم التخفيف من مخاطر الزلازل في منطقة مالانج الكبرى.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang berada pada wilayah Cincin Api Pasifik (Ring of Fire), yang menjadikannya sebagai salah satu daerah paling rawan gempa bumi di dunia. Hal ini disebabkan oleh pertemuan tiga lempeng tektonik utama yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Akibat aktivitas tektonik tersebut, wilayah Indonesia sering mengalami gempa bumi, baik tektonik maupun vulkanik. Ketiga lempeng ini saling bergerak dan berinteraksi secara aktif di wilayah Nusantara, yang menjadikan Indonesia sebagai salah satu wilayah dengan tingkat kegempaan tertinggi di dunia (Irsyam et al., 2020).

Berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Indonesia mengalami antara 5.000 - 10.000 kejadian gempa bumi baik dalam skala kecil maupun besar setiap tahunnya selama periode 2010 - 2025. Hal ini menunjukkan tingginya aktivitas seismik akibat adanya interaksi tiga lempeng tektonik dunia.

Dalam Al Qur'an telah banyak menjelaskan tentang segala sesuatu mengenai kejadian-kejadian alam, salah satunya yaitu Gempa bumi. Firman Allah SWT. Q.S. Al-A'raf: 78 :

فَأَخَذَتْهُمُ الرَّجْفَةُ فَأَصْبَحُوا فِي دَارِهِمْ جُثَمِينَ

"Maka gempa (dahsyat) menimpa mereka sehingga mereka menjadi (mayat-mayat yang) bergelimpangan di dalam (reruntuhan) tempat tinggal mereka," (QS. Al-A'raf:78).

Menurut tafsir Ibnu Katsir, ayat tersebut menjelaskan bahwa kaum Tsamud mendapatkan azab berupa gempa dahsyat sebagai akibat dari kedurhakaan mereka terhadap perintah Allah SWT. Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang terjadi atas kehendak Allah SWT dan menyebabkan kematian. Kejadian gempa juga menunjukkan kekuasaan Allah SWT terhadap bumi dan seluruh proses yang terjadi di dalamnya. Oleh karena itu, manusia dapat mempelajari fenomena gempa bumi melalui kajian ilmiah sebagai bentuk usaha memahami tanda-tanda kebesaran Allah SWT serta sebagai upaya untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan.

Bencana gempa bumi pada kawasan pulau Jawa masih berada di tingkat kerawanan yang tinggi dan tentunya perlu mendapatkan perhatian khusus. Bencana gempa belum bisa diprediksi secara akurat mengenai waktu, kekuatan, dan tempat kejadiannya. Oleh karena itu, mitigasi bencana gempa sangat penting untuk mengurangi bahaya dan kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gempa bumi, terutama di provinsi Jawa timur yang merupakan kawasan rawan bencana (Badan Geologi, 2018).

Penelitian kali ini berfokus pada wilayah Malang Raya karena wilayah ini sering terkena dampak gempa bumi. Kabupaten Malang menduduki peringkat ke-60 merupakan salah satu kabupaten yang diklasifikasikan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mempunyai tingkat bahaya bencana gempa bumi tektonik “tinggi”. Kondisi tersebut terjadi akibat pergerakan Lempeng Indo-Australia ke utara yang mengalami interaksi dengan Lempeng Eurasia sehingga menyebabkan terjadinya aktivitas tektonik yang tinggi di wilayah selatan Malang.

Malang Raya terletak di bagian selatan Provinsi Jawa Timur. Wilayah ini termasuk dalam daerah dengan risiko gempa bumi yang tinggi (Bachri et al., 2021). Hal tersebut disebabkan oleh aktivitas tektonik dari beberapa sesar di sekitarnya, termasuk Sesar Grindulu di Pacitan dan Sesar Klangon di Madiun (Lestari et al., 2019; Yusvinda et al., 2021). Selain itu, Malang juga berdekatan dengan zona subduksi megathrust, yaitu zona yang membentang di sepanjang pulau-pulau bagian selatan Sumatera, Jawa, dan Nusa Tenggara.

Faktor lain yang meningkatkan potensi bahaya gempa di Malang adalah kedekatannya dengan gunung-gunung berapi aktif, seperti Gunung Kelud, Arjuno–Welirang, dan Semeru, yang dapat memicu gempa vulkanik. Kombinasi aktivitas tektonik dan vulkanik (Hariyanto et al., 2021). Kondisi tersebut menjadikan wilayah Malang sebagai wilayah yang perlu mendapat perhatian khusus dalam upaya analisis seismisitas dan pemetaan zona kerentanan gempa bumi. Analisis seismisitas berperan penting untuk memahami pola distribusi spasial dan temporal suatu kejadian gempa berdasarkan data historis. Informasi ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat bahaya relatif antar wilayah.

Perkembangan teknologi pemetaan dan analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) memberikan peluang besar dalam pengkajian bahaya gempa bumi. Dengan memanfaatkan data seismisitas historis, seperti lokasi episenter, magnitudo, dan kedalaman gempa, untuk memahami memahami pola distribusi aktivitas tektonik di suatu wilayah. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam analisis sebaran kejadian gempa adalah metode *Kernel Density Estimation* (KDE). Dalam konteks pemetaan spasial, *Kernel Density Estimation* (KDE) merupakan teknik statistik yang efektif untuk menggambarkan pola

penyebaran gempa bumi dan mengidentifikasi zona dengan tingkat aktivitas seismik tinggi. *Kernel Density Estimation* mengubah titik-titik episenter gempa menjadi peta kepadatan (density map) yang menggambarkan konsentrasi kejadian gempa berdasarkan data historis (Amador Luna et al., 2024).

Menurut Ramanna (2011), metode ini dilakukan dengan menempatkan kurva standar seperti uniform, segitiga, normal, atau kuartik pada setiap titik data, dan menentukan kerapatan sebagai hasil penjumlahan yang dinormalisasi dari masing-masing kernel individual. Sementara itu, penelitian terbaru telah dilakukan oleh Amador Luna et al. (2024) menunjukkan bahwa KDE merupakan alat yang efektif untuk memvisualisasikan persebaran spasial episenter dan mendeteksi area dengan konsentrasi gempa tertinggi menggunakan data gempa berskala besar (*seismic big data*).

Metode *Kernel Density Estimation* (KDE) termasuk ke dalam pendekatan statistik nonparametrik yang tidak memerlukan asumsi terhadap bentuk distribusi data. Setiap titik data (titik episenter gempa) diperlakukan sebagai pusat fungsi kernel. Setiap titik merupakan pusat pusat fungsi kernel yang kemudian dihitung tingkat kepadatannya berdasarkan jarak antar titik. Hasil akhirnya berupa peta yang menunjukkan variasi kerapatan spasial, sehingga area dengan kepadatan episenter tinggi dapat diidentifikasi sebagai zona rawan gempa (Fadli et al., 2025; Silverman, 1986).

Berbagai penelitian mengenai seismisitas dan bahaya gempa di Jawa Timur telah banyak dilakukan sebelumnya, namun sebagian besar masih terbatas pada analisis seismisitas tanpa pemanfaatan sistem informasi geografis. Selain itu, penelitian pemetaan bahaya gempa di Malang lebih banyak dilakukan hanya

berdasarkan parameter geologi. Penelitian terdahulu juga umumnya menggunakan data historis yang terbatas hingga tahun 2020. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mengkombinasikan analisis kepadatan episenter berbasis *Kernel Density Estimation* (KDE) dengan pendekatan kerentanan terkini, khususnya di wilayah Malang Raya dengan data terbaru hingga tahun 2025. Sehingga diperoleh informasi zonasi kerentanan gempa yang lebih akurat dan komprehensif.

Dengan demikian, analisis dan pemetaan zona kerentanan gempa bumi wilayah Malang Raya menggunakan pendekatan *Kernel Density Estimation* (KDE) menjadi penting untuk memberikan informasi spasial yang lebih komprehensif dan mendukung upaya mitigasi bencana gempa di tingkat daerah dan dapat digunakan untuk menilai tingkat kerentanan relatif antar wilayah berdasarkan distribusi spasial data gempa yang telah terjadi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis sebaran aktivitas seismik dan memetakan zona kerentanan gempa bumi di wilayah Malang Raya dengan menggunakan metode *Kernel Density Estimation* (KDE) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Latar belakang yang telah diuraikan, Maka penelitian ini memiliki rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik seismisitas gempa bumi di Malang Raya periode 2010-2025?
2. Bagaimana pola sebaran spasial gempa bumi di Malang Raya berdasarkan analisis *Kernel Density Estimation*?
3. Bagaimana pemetaan zona kerentanan gempa bumi di Malang Raya?

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukan penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis karakteristik seismisitas gempa bumi di Malang Raya periode 2010-2025.
2. Untuk memetakan pola sebaran spasial gempa bumi di Malang Raya menggunakan analisis *Kernel Density Estimation*.
3. Untuk menentukan zona kerentanan gempa bumi di Malang Raya.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan yang ingin dicapai, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada wilayah Malang Raya dengan koordinat $112^{\circ} 17'10,90''$ - $112^{\circ} 57'00''$ BT dan $7^{\circ} 44'55,11''$ - $8^{\circ} 26'35,45''$ LS.
2. Data gempa bumi yang dianalisis diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS) yang memiliki rentang waktu tahun 2010 hingga 2025 dengan rentang magnitudo (M) >3 dengan kedalaman gempa dangkal $h < 60$ Km dan gempa menengah $60 \text{ Km} < h < 300 \text{ km}$.
3. Parameter gempa yang digunakan meliputi lokasi episenter (lintang dan bujur), kedalaman hiposenter, serta magnitudo gempa.
4. Karakteristik seismisitas dalam penelitian ini meliputi magnitudo, kedalaman hiposenter, dan frekuensi kejadian gempa bumi.
5. Penelitian ini menggunakan metode analisis seismisitas dan pemetaan spasial berbasis *Kernel Density Estimation* (KDE) dengan bantuan Sistem Informasi Geografis (SIG).

1.5 Manfaat

Manfaat dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Manfaat Akademis
 - a. Manfaat penelitian ini bagi para akademis adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang geofisika dan kebencanaan, khususnya terkait penerapan metode *Kernel Density Estimation (KDE)* dalam analisis spasial sebaran gempa bumi serta menjadi referensi akademik bagi mahasiswa, dosen, dan peneliti dalam mengembangkan kajian mengenai seismisitas dan pemetaan zona kerentanan gempa bumi.
2. Manfaat Bagi Masyarakat
 - a. Untuk membantu masyarakat setempat dan pemerintah di wilayah Malang Raya dalam upaya mitigasi bencana, sebagai informasi untuk perencanaan bangunan tahan gempa, serta sebagai bahan referensi.

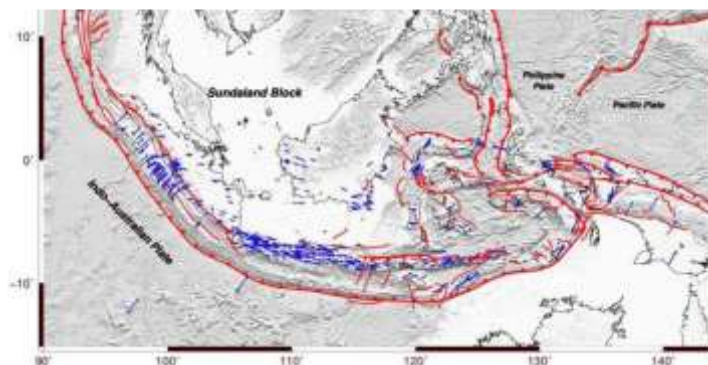
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sumber Gempa di Jawa

Lempeng Indo-Australia bergerak relatif ke utara dan menyusup ke bawah Lempeng Eurasia. Hal ini dikarenakan Lempeng Indo-Australia merupakan lempeng Samudera yang memiliki berat jenis lebih besar dibandingkan lempeng benua sehingga lempeng Samudera akan menunjam di bawahnya. Adanya akumulasi energi hasil desakan akibat pertemuan dua lempeng ini yang kemudian akan melampaui batas elastisitasnya sehingga berakibat munculnya bidang patahan atau sesar.

Tumbukan lempeng tektonik di wilayah Selatan Jawa Timur berdampak pada wilayah Jawa Timur. Zona subduksi dan zona sesar tercipta dari pergerakan lempeng. Jika dibandingkan dengan zona batas lempeng lainnya, zona subduksi memiliki tingkat aktivitas gempa yang lebih tinggi karena adanya titik kontak dua lempeng di kawasan tersebut. Intensitas aktivitas seismik mungkin berbeda dari zona subduksi ke zona subduksi lain. Pengaruh kecepatan pergerakan antar lempeng merupakan salah satu elemen yang paling mungkin bertanggung jawab atas variasi besarnya aktivitas gempa tersebut (Widiyantoro et al., 2020).



Gambar 2. 1 Lempeng Tektonik Indonesia (Amira, 2024).

Relokasi gempa bumi yang dicatat oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di Indonesia dan inversi data sistem penentuan posisi global (GPS) mengungkapkan celah seismik yang jelas di Selatan pulau Jawa. Celah ini mungkin terkait dengan sumber potensial gempa bumi megathrust di masa mendatang. Forum Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (MKG) Provinsi Jawa Timur juga mengetahui potensi gempa di Jawa Timur. Gempa di Jawa Timur bisa terjadi akibat sesar aktif maupun adanya zona subduksi dimana tempat bertemunya Lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Adanya Sesar Rembang, Madura, Kangean, dan Sakala aktif di wilayah utara Jawa Timur, sedangkan sesar Kendeng, Pasuruan, dan Probolinggo aktif di wilayah Tengah. Meskipun belum bisa diperkirakan kapan akan terjadi gempa bumi dan seberapa dahsyat gempa yang akan terjadi, namun masih ada peluang terjadinya gempa di Jawa Timur.

2.2 Gempa Bumi

Gempa (*earthquake*) adalah peristiwa goncangnya bumi akibat pergerakan atau pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba. Pergerakan tiba-tiba yang berasal dari lapisan batuan di dalam bumi menghasilkan energi yang dipancarkan berupa gelombang seismik. Kadang-kadang gerakan lempeng ini saling mengunci sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus sampai pada suatu saat tidak mampu menahan *stress* tersebut, akibatnya akan terjadi gempa bumi yang sangat besar. Pergerakan lempeng terjadi karena adanya dinamika pada lapisan mantel bumi, maka lempeng tektonik terus menerima energi dari lapisan tersebut (Shearer, 2019).

Gempa bumi dipicu oleh sumber getaran yang berada di dalam bumi yang menghasilkan getaran dan dirasakan di permukaan bumi. Getaran tersebut dapat diakibatkan oleh tumbukan lempeng, longsor massa batuan, atau letusan gunung

api. Peristiwa penyebab gempa bumi sangat erat kaitannya dengan patahan, periode deformasi batuan, atau aktivitas tektonik (PusGen, 2024).

2.2.1 Proses Terbentuknya Gempa Bumi

Gempa bumi terjadi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba dalam kerak bumi yang menimbulkan gelombang seismik yang merambat ke segala arah. Energi tersebut dihasilkan akibat adanya pergerakan dan interaksi antar lempeng tektonik dibawah permukaan bumi (Shearer, 2019).

Teori Patahan menyatakan bahwa ketika gempa bumi terjadi, maka patahan akan tiba-tiba melepas sejumlah energi dan karena seismograf sehingga dapat mendeteksi gelombang seismik yang dilepaskan. Sehingga dapat dibuktikan bahwa gempa tersebut dihasilkan oleh pelepasan energi dari suatu sumber (Shearer, 2019).

Pergeseran lempeng tektonik menyebabkan terjadinya gempa tektonik. Hal ini Sesuai dengan prinsip lempeng tektonik, dimana kerak bumi dipisahkan menjadi beberapa wilayah yang disebut lempeng. Seperti Lempeng Afrika, Amerika, Pasifik, Eurasia, dan Antartika yang termasuk dalam tujuh lempeng besar (*Mega Plate*) dalam struktur penyusun bumi (BMKG, 2023).

2.2.2 Teori Tektonik Lempeng

Penyebab gempa bumi karena pergeseran lempeng bumi yang menimbulkan pelepasan energi kinetik. Gerakan lempeng akan menciptakan fenomena gempa bumi, letusan gunung api, dan pembentukan gunung serta lembah. Sehingga bumi dapat dianggap sebagai sistem dinamis yang terus mengalami perubahan sepanjang waktu.

Fenomena pergerakan lempeng ini dapat diartikan bahwa bumi terus mengalami perubahan atau bumi selalu bergerak sama halnya yang tertulis dalam Al-Quran QS. An Naml ayat 88 yang berbunyi :

وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسِبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ صُنْعَ اللَّهِ
الَّذِي أَتَقَنَ كُلَّ شَيْءٍ إِنَّهُ خَبِيرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ ﴿٨٨﴾

Artinya: “Dan engkau akan melihat gunung-gunung, yang engkau kira tetap di tempatnya, padahal ia berjalan seperti jalannya awan. Demikianlah ciptaan Allah, yang membuat segala sesuatu dengan kokoh. Sungguh Ia Maha teliti terhadap apa yang kamu kerjakan”. (QS. An Naml : 88).

Mengutip tafsir Kementerian Agama RI Surat An Naml ayat 88 menggambarkan fenomena ilmiah, khususnya pergerakan lempeng horizontal yang mempunyai kemampuan menjauh dan mendekat, bahkan saling bertabrakan yang memicu bencana gempa bumi. Melalui ayat tersebut, Allah mengajak manusia berfikir tentang fenomena yang ada di alam semesta ini. Allah menyatakan bahwa gunung yang terlihat diam ternyata memiliki pergerakan. Gunung-gunung atau lempeng-lempeng tersebut telah bergeser millimeter demi millimeter (Kemenag RI, 2022).

Surah An Naml juga berkaitan dengan teori lempeng tektonik, dimana kerak bumi terbagi menjadi beberapa lempeng besar yang bergerak di atas astenosfer yang sifatnya plastis. Pergerakan lempeng-lempeng tersebut berupa konvergen (saling mendekat), divergen (saling menjauh), dan transform (saling bergeser horizontal). Setiap lempeng memiliki interaksi yang berbeda (BMKG, 2023).

2.2.3 Klasifikasi Gempa Bumi

Mekanisme terjadinya gempa tidak lain akibat dari aktivitas fisik peristiwa geologi. Aktivitas geologi adalah aktivitas di dalam bumi dan juga adanya teori lempeng tektonik. Ilmuwan Bolt mengatakan bahwa ada beberapa gempa bumi yang dikategorikan berdasarkan sebab-sebab kejadiannya sebagai berikut (Shearer, 2019):

1. Gempa bumi tektonik (*Tectonic Earthquake*)

Gempa Tektonik adalah gempa yang umumnya paling besar dari gempa-gempa lainnya. Gempa bumi tektonik disebabkan karena adanya aktivitas lempeng tektonik baik skala global maupun regional. Gerakan lempeng tektonik akan saling menekan, saling menggeser, saling tarik dan dapat juga kombinasi diantaranya. Dua lempeng yang mengalami hal tersebut dapat mengalami tegangan, ketika tegangan tersebut sudah membesar dan tidak dapat ditahan lagi oleh batuan maka kerusakan batuan akan terjadi. Kerusakan ini akan menimbulkan getaran yang disebarkan ke semua arah yang selanjutnya merambat sampai ke permukaan tanah. Getaran tersebut dikenal dengan gempa bumi tektonik.

2. Gempa bumi vulkanik (*Vulcanic Earthquake*)

Gempa vulkanik terjadi karena adanya aktivitas vulkanik yaitu proses keluarnya magma panas ke atas permukaan tanah dalam skala besar. Keluarnya magma ini mengakibatkan ledakan yang sangat besar. Oleh karena itu gempa vulkanik berhubungan dengan aktivitas gunung api. Keluarnya magma panas sejalan dengan terjadinya *driving force* akibat panas yang berada di dalam bumi. Proses keluarnya magma panas ini mengakibatkan getaran

tanah yang menyerupai gempa bumi walaupun intensitasnya lebih kecil dari gempa tektonik.

3. Gempa bumi runtuh (Collapse Earthquake)

Gempa bumi runtuh ini terjadi karena adanya runtuh lapisan tanah baik reruntuhan dalam gua dan tambang (*mine burst*) pada batas tertentu yang dapat mengakibatkan getaran pada tanah. Hal tersebut terjadi karena adanya gaya gravitasi ataupun perubahan tanah dan batuan.

4. Gempa bumi ledakan (Explosion Earthquake)

Gempa ledakan terjadi karena adanya ledakan yang sangat besar di bawah tanah seperti saat terjadi percobaan nuklir di bawah tanah. Ledakan nuklir di bawah tanah dapat menghasilkan panas dan tekanan yang sangat tinggi. Akibatnya, batuan di pusat ledakan dapat menguap karena suhu yang tinggi. Energi panas dan tekanan yang besar dapat kemudian merambat dari pusat ledakan ke segala arah termasuk ke permukaan tanah. Rusaknya masa batuan sampai di permukaan tanah akan dirasakan getarannya seperti gempa bumi.

2.2.4 Seismisitas

Seismisitas merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan tingkat aktivitas kegempaan dalam suatu wilayah baik secara spasial maupun temporal. Secara umum, seismisitas mencakup distribusi episentrum gempa bumi, magnitudo, kedalaman, serta frekuensi kejadian gempa dalam kurun waktu tertentu (Chasanah dan Handono, 2021).

Analisis seismisitas sangat penting karena dapat memberikan informasi mengenai pola kegempaan yang berhubungan dengan kondisi tektonik suatu daerah. Dengan demikian, kajian seismisitas dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan potensi bahaya gempa dan penyusunan peta kerentanan seismik.

Parameter seismisitas meliputi lokasi episentrum, kedalaman hiposentrum, magnitudo, dan frekuensi kejadian gempa yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik aktivitas seismik suatu wilayah. Lokasi episentrum menunjukkan distribusi spasial gempa di permukaan bumi, sedangkan kedalaman hiposentrum membedakan gempa dangkal dan menengah yang berpengaruh terhadap tingkat kerusakan. Magnitudo digunakan untuk mengukur energi yang dilepaskan gempa. Sementara itu, frekuensi kejadian gempa biasanya mengikuti hukum *Gutenberg-Richter*, yang menyatakan bahwa semakin besar magnitudo, maka semakin jarang gempa tersebut terjadi. Analisis keempat parameter ini penting untuk memahami pola kegempaan, memetakan sebaran aktivitas seismik, serta memperkirakan potensi bahaya gempa bumi di masa mendatang.

2.2.5 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang energi yang merambat melalui medium bumi akibat pelepasan energi dari sumber gempa. Perambatan gelombang seismik dipengaruhi oleh sifat elastis material penyusun bumi dan dapat direkam menggunakan seismograf untuk mengetahui karakteristik sumber gempa serta struktur bawah permukaan (Golos et al., 2020).

Gelombang badan dan gelombang permukaan adalah dua kategori utama gelombang seismik:

1. Gelombang badan (*Body Wave*)

Gelombang tubuh merupakan gelombang di bagian dalam bumi. Gelombang ini terdiri dari gelombang primer dan sekunder (Ulfa et al., 2023).

a. Gelombang P (primer)

Gelombang primer merupakan gelombang longitudinal, dimana komponen yang dilaluinya bergerak searah dengan gelombang. Sama seperti gelombang

bunyi. Gelombang ini dapat bergerak melalui benda padat, cair, dan gas dengan kecepatan hingga 14 km/s.

b. Gelombang S (sekunder)

Ketika Gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambat gelombang, maka termasuk gelombang transversal. Gelombang S bergerak dengan kecepatan 3,5 km/s merupakan gelombang geser transversal. Tegangan geser tidak dapat ditopang oleh cairan atau gas, hanya medium padat yang dapat membiarkan gelombang ini melewatinya serta bergerak dengan kecepatan 60% lebih lambat dibandingkan gelombang P.

2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang elastis yang disebut gelombang permukaan merambat sepanjang permukaan bumi. Karena sifatnya yang mengikat dan perlu merambat melewati permukaan atau lapisan dan sering dikenal dengan gelombang pasang (*Tide wave*). Gelombang permukaan terdiri dari (Sulaeman et al., 2021):

a. Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh merambat melintasi permukaan bumi melalui Gerak partikel elips yang bergerak tegak lurus arah rambatnya yaitu pada arah bidang datar. Amplitudo gelombang Rayleigh yang besar berkurang seiring bertambahnya kedalaman (Sulaeman et al., 2021).

b. Gelombang Love

Adanya perpindahan vertikal yang tidak dihasilkan oleh gelombang love, yaitu gelombang geser terpolarisasi horizontal. Bangunan berguncang secara horizontal pada bagian dasarnya akibat gelombang tersebut sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan (Ulfa et al., 2023).

2.2.6 Parameter Gempa Bumi

Parameter gempa bumi meliputi waktu kejadian, lokasi episenter, kedalaman hiposenter, dan magnitudo yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik aktivitas seismik suatu wilayah (Daryono, 2018).

1. Waktu Asal (*Origin Time*)

Origin time gempa bumi terjadi pada kedalaman waktu tertentu. Tegangan tersebut akan hilang selama durasi perambatan gelombang gempa satuan Koordinat Waktu Universal (UTC) dapat digunakan untuk mengkonversi hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik (Supendi et al., 2020).

2. Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat gempa bumi yang menunjukkan lokasi dimana kerak bumi bergerak atau berubah dan menyebabkan terjadinya gempa bumi. Kedalaman sumber gempa dapat diketahui dari permukaan bumi dengan mengumpulkan seismogram dan amplitudo setengah gelombang P tertinggi pada komponen vertikal. Gempa berdasarkan kedalamannya terbagi menjadi tiga (Nugraha, 2021):

- a. Gempa bumi dalam, yaitu gempa bumi yang dapat mencapai permukaan dan memiliki kedalaman hiposenter lebih dari 300 km. Gempa ini memiliki amplitudo yang kecil sehingga tidak menimbulkan bahaya.
- b. Gempa bumi sedang, yaitu gempa yang kedalaman hiposenter berkisar antara 60 hingga 300 km. Gempa menengah tersebar sepanjang Sumatra bagian barat, Jawa sebelah selatan, Nusa Tenggara antara Sumbawa dan Maluku berakhir di Teluk Tomini, laut Maluku ke Filipina dengan fokus kurang dari 150 km.

c. Gempa bumi dangkal, yaitu gempa bumi dengan kedalaman hiposenter kurang dari 60 km. Gempa bumi dangkal berasal dari patahan aktif dan sesar aktif. Gempa ini juga menimbulkan kerusakan yang amat besar karena semakin dangkal tempat terjadinya maka tingkat kerusakan juga akan semakin besar.

3. Episenter

Episenter adalah wilayah permukaan bumi yang paling dekat dengan hiposenter. Getaran gempa biasanya dirasakan paling kuat di daerah episentrum tersebut, yaitu tegak lurus hiposenter. Koordinat geografis digunakan untuk menyatakan lokasi pusat gempa (Supendi et al., 2020).

4. Magnitudo

Konsep “magnitudo gempa bumi” merupakan skala kekuatan relative hasil dari pengukuran fase amplitudo yang dikemukakan pertama oleh wadadi dan C. Richter sekitar tahun 1930. Kekuatan gempa bumi diwujudkan dalam magnitudo dengan skala logaritma basis 10. Suatu magnitudo dihasilkan dari analisis bentuk gelombang seismik tertentu (berupa rekaman getaran tanah) dengan memperhatikan jarak stasiun pencatat ke episenternya (Bormann, 2013).

Magnitudo adalah kadar yang digunakan untuk menunjukkan kapasitas gempa yang didasarkan pada daerah yang terpancar saat gempa bumi terjadi dan diwujudkan dalam skala *Richter*. Terdapat berbagai kategori magnitudo gempa, diantaranya adalah magnitude momen (MW), magnitude permukaan (MS), magnitudo benda (MB), dan magnitudo lokan (ML) (Di Giacomo, 2018).

a. Magnitudo Lokal (ML)

Berdasarkan data seismograf dari California Selatan dan observasi gempa bumi, Richter (1969) pertama kali mengajukan konsep magnitudo lokal.

Rumus umum besaran lokal pada persamaan berikut:

$$MI = \log a + 3 \log \Delta \quad (2.1)$$

Dimana:

MI = Magnitudo Lokal

a = Amplitudo getaran (μm)

Δ = Jarak episenter dengan stasiun pengamat (km)

b. Magnitudo Tubuh (MB)

Gelombang primer digunakan untuk mengukur suatu benda. Jika gempa terjadi lebih dalam maka digunakan besaran gempa tersebut. Karena amplitudo gelombang primer hampir tidak mempengaruhi kedalaman maka kondisi gelombang permukaan melemah dan kondisi gelombang primer menjadi dominan. Menurut Ibrahim dan subardjo (2004), besarnya adalah:

$$Mb = \log a - \log T + Q(\Delta, h) \quad (2.2)$$

Dimana:

Mb = Magnitudo Body

a = Amplitudo getaran (μm)

T = Periode getaran (s)

$Q(\Delta, h)$ = Jarak stasiun sumber gempa dan kedalaman gempa yang didapatkan (km)

c. Magnitudo Permukaan (MS)

Kramer (1996) menegaskan bahwa pengaruh jenis gelombang yang berbeda tidak dapat dibedakan berdasarkan besaran lokal. Gelombang permukaan mendominasi getaran tanah di lokasi yang jauh dari pusat gempa karena gelombang tubuh menjadi sangat kecil dan lemah di lokasi tersebut. Persamaan perhitungan berikut berlaku untuk magnitudo permukaan (Ibrahim dan Subardjo, 2004):

$$M_s = \log A + \alpha \log \Delta + \beta \quad (2.3)$$

Dimana:

M_s = Magnitudo permukaan

A = Amplitudo getaran (μm)

Δ = Jarak episenter dengan stasiun pengamat (km)

α, β = konstanta

d. Magnitudo Momen (MW)

Nilai momen seismik menentukan besaran momen. Momen seismik di didefinisikan sebagai dimensi perpindahan bidang patahan atau hasil analisis gelombang pada seismograf pita lebar. Jumlah ini yang dinyatakan dalam persamaan (Ibrahim dan Subardjo, 2004):

$$M_w = \left(\log \frac{M_o}{1.5} \right) - 10.73 \quad (2.4)$$

Diman:

M_w = Magnitudo Momen

M_o = Momen seismik (N.m)

2.3 Bahaya dan Kerentanan Gempa Bumi

Bahaya dan kerentanan merupakan komponen penting dalam kajian

kebencanaan, kedua komponen tersebut saling berkaitan dan menentukan tingkat dampak yang dapat ditimbulkan oleh suatu bencana. Oleh karena itu pemahaman mengenai konsep bahaya dan kerentanan diperlukan sebagai dasar dalam analisis zona kerentanan gempa bumi pada penelitian ini .

2.3.1 Bahaya

Bahaya gempa bumi adalah potensi terjadinya guncangan tanah yang disebabkan oleh aktivitas tektonik seperti pergerakan sesar, subduksi, maupun deformasi kerak bumi. Bahaya gempa dibedakan menjadi bahaya utama (*main hazard*) seperti guncangan tanah (*ground shaking*), patahan permukaan (*surface rupture*), likuefaksi, dan pergeseran tanah serta bahaya lanjutan seperti longsor, kebakaran, kerusakan fasilitas, dan gagal struktur (Adiyoso, 2018).

Pada penelitian ini, bahaya gempa bumi direpresentasikan melalui analisis seismitas menggunakan metode *Kernel Density Estimation* (KDE). Metode KDE digunakan untuk menghitung tingkat kepadatan episenter gempa bumi dari data katalog gempa, sehingga dapat menggambarkan distribusi spasial daerah dengan aktivitas gempa yang tinggi. Semakin tinggi nilai kepadatan episenter maka semakin besar potensi bahaya guncangan yang mungkin terjadi di wilayah tersebut.

2.3.2 Kerentanan

Kerentanan gempa bumi adalah kondisi yang menyebabkan suatu wilayah, masyarakat, atau infrastruktur mudah mengalami kerusakan dan gangguan akibat guncangan gempa. Dalam penelitian ini kerentanan ditinjau berdasarkan aspek fisik dan sosial (Aksa, 2021).

1. Kerentanan fisik

Meliputi kualitas bangunan, umur bangunan, standar konstruksi, material dan kawasan permukiman.

2. Kerentanna sosial

Kerentanan sosial dipengaruhi oleh tingkat Pendidikan, pendapatan, kepadatan penduduk, akses informasi, serta kemampuan masyarakat dalam melakukan mitigasi.

Tutupan lahan mencerminkan tingkat pemanfaatan ruang, jenis bangunan, dan kepadatan aktivitas manusia.

2.3.3 Hubungan Bahaya dan Kerentanan Gempa Bumi

Kerentanan hanya menjadi bermakna ketika dikaitkan dengan bahaya gempa. Suatu wilayah dengan bangunan rapuh dan kepadatan penduduk tinggi tidak dianggap rentan apabila tidak berada pada wilayah berbahaya secara seismik. Oleh karena itu, analisis zona kerentanan pada penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan faktor seismisitas sebagai representasi bahaya gempa bumi serta faktor kepadatan penduduk dan kawasan permukiman sebagai indikator kerentanan wilayah.

Dengan demikian pemetaan kerentanan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi area yang paling rentan terhadap guncangan gempa berdasarkan kondisi sosial, fisik, dan lingkungan. Sedangkan KDE digunakan untuk menampilkan intensitas bahaya gempa bumi yang menjadi dasar analisis kerentanan.

2.4 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Sistem Informasi Geografis Adalah suatu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk menyimpan, mengelola, menganalisi, dan memvisualisasikan data spasial. SIG memungkinkan peneliti untuk menggabungkan berbagai informasi (layer) seperti peta gempa, peta kepadatan penduduk, dan peta bangunan untuk

melakukan analisis spasial yang kompleks (Gulo, 2023).

Dalam konteks mitigasi bencana, SIG berperan dalam pemetaan bahaya dan risiko karena memungkinkan visualisasi spasial dari potensi bahaya bencana serta faktor kerentanan masyarakat. Dengan Sistem Informasi Geografis (SIG), peneliti dapat mengidentifikasi zona rawan yang lebih akurat dan membuat skenario mitigasi berbasis spasial (Gulo, 2023).

Salah satu teknik analisis utama dalam SIG adalah *overlay analysis*. *Overlay* memungkinkan penggabungan beberapa layer spasial dengan bobot tertentu untuk menghasilkan peta kerentanan. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian bencana karena fleksibilitas dalam menimbang parameter sosial, fisik, dan lingkungan (Riyadi, 2021).

2.5 Kernel Density Estimation (KDE)

Kernel Density Estimation (KDE) merupakan metode *nonparametric* untuk mengestimasi *probability density function* (PDF) dari suatu himpunan data tanpa harus menentukan bentuk distribusi awal. Metode KDE tidak mengharuskan data mengikuti pola distribusi tertentu sehingga metode ini lebih fleksibel dalam berbagai aplikasi seperti geostatik, seismologi, dan pemrosesan bahan alami (Silverman, 1986).

Konsep KDE menempatkan sebuah fungsi kernel pada setiap data kemudian menjumlahkan seluruh kontribusi kernel tersebut sehingga menghasilkan kurva kepadatan yang halus. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola-pola distribusi, kluster, aktivitas, serta perubahan intensitas fenomena secara spasial maupun temporal (Silverman, 1986).

Persamaan Kernel Density Estimation untuk data spasial dua dimensi (Silverman, 1986):

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K_2 \left\{ \frac{1}{h} (\mathbf{x} - \mathbf{X}_i) \right\} \quad (2.7)$$

Dimana:

$\hat{f}(\mathbf{x})$ = estimasi fungsi kepadatan di titik $\mathbf{x}$

n = jumlah data

h = bandwidth (radius pencarian)

$K(.)$ = *Kernel function*

$\mathbf{X}_i$ = titik data ke- i

$\mathbf{x}$ = lokasi atau titik yang dihitung kepadatannya

d = dimensi ruang (untuk data spasial, $d = 2$)

2.5.1 Konsep Dasar Fungsi Kernel

Fungsi kernel $K(u)$ merupakan jenis kernel dalam KDE yang umumnya digunakan seperti *Gaussian*, *Epanechnikov*, *Quartic (Biweight)*, *Triangular*, dan *Rectangular*. Dalam penelitian ini kernel yang digunakan merupakan jenis *Kernel Quartic*. Hal ini sesuai dengan penjelasan oleh Silverman (1986) yaitu pada setiap sel raster keluaran dihitung dengan menambahkan nilai semua permukaan kernel dimana permukaan tersebut tumpang tindih dengan pusat sel raster. Fungsi kernel *Quartic* untuk data spasial dua dimensi ($d=2$) didasarkan pada persamaan berikut: (Silverman, 1986):

$$K_2(u) = \begin{cases} 3\pi^{-1}(1 - u^T u)^2 & \text{jika } u^T u < 1 \\ 0 & \text{jika } u^T u \geq 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

Nilai $u^T u$ merupakan kuadrat jarak Euclidean ternormalisasi antara titik kejadian gempa dengan lokasi elevasi. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan perbandingan jarak Euclidean (d) terhadap bandwidth (h) sebagai radius pencarian kernel, dengan persamaan berikut:

$$u^T u = \frac{d^2}{h^2} \quad (2.9)$$

Jarak Euclidean (d) dihitung berdasarkan jarak antara lokasi elevasi dengan titik kejadian gempa pada data spasial dua dimensi dengan persamaan:

$$d = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.0)$$

Dimana:

u = nilai jarak ternormalisasi

$u^T u$ = kuadrat jarak *Euclidean* ternormalisasi

h = *bandwidth* (radius pencarian)

π = konstanta pi ($\approx 3,14159$)

d = jarak antara lokasi elevasi dengan titik kejadian gempa

x, y = koordinat lokasi elevasi

x_i, y_i = koordinat episenter gempa

Penggunaan *Kernel Quartic* menghasilkan permukaan yang halus dan kontinu karena bobotnya menurun dari pusat menuju batas radius pencarian. Dalam aplikasi spasial dan pemetaan bahaya gempa bumi, pemilihan kernel mempengaruhi sensitivitas terhadap kluster gempa dan struktur geologi (Fadli dan Priyambodo, 2025).

2.5.2 Bandwidth dalam KDE

Bandwidth (h) adalah parameter yang menentukan tingkat kehalusan dalam KDE. *Bandwidth* kecil akan menghasilkan kurva dengan detail tinggi atau tidak halus. Sedangkan dengan *bandwidth* besar dapat menghasilkan kurva yang halus. Dalam sebuah penelitian di India yang dilakukan oleh Ramanna dan Dodaagoudar pada tahun 2011, menunjukkan bahwa pemilihan *bandwidth* sangat menentukan kualitas peta bahaya, terutama karena fenomena gempa bumi memiliki fenomena

fraktal. Sehingga *bandwidth* dapat ditentukan melalui hubungan magnitudo dan jarak antar episenter. Ini menandakan bahwa parameter *bandwidth* tidak hanya bergantung pada jumlah data, tetapi juga karakteristik fisik fenomena geologi itu sendiri.

2.5.3 Penerapan KDE dalam Pemetaan Bahaya Gempa

Kernel Density Estimation (KDE) banyak digunakan dalam pemetaan bahaya gempa karena mampu mengubah kumpulan titik episenter menjadi permukaan kepadatan yang halus dan kontinu. Metode ini bekerja dengan menempatkan fungsi kernel setiap gempa dan menjumlahkannya sehingga berbentuk pola sebaran seismisitas yang lebih informatif. Hal ini dijelaskan oleh Rmanna dan Dodaoudar (2011) bahwa KDE “menentukan kepadatan sebagai penjumlahan ternormalisasi dari kurva kernel pada setiap titik data”.

Melalui proses *smoothing*, KDE dapat mengatasi fragmentasi data dan memudahkan identifikasi zona berisiko. Huldem (2015) juga menegaskan bahwa KDE berfungsi “meratakan jumlah kejadian pada area yang lebih luas dan mempertahankan ukuran grid kecil”.

Dalam konteks seismik, metode ini membantu memunculkan kluster aktivitas gempa yang penting bagi analisis bahaya. Penelitian pemetaan gempa Indonesia (2025) menjelaskan bahwa variasi *bandwidth* dalam KDE berpengaruh langsung pada klasifikasi tingkat bahaya karena *bandwidth* kecil, sedang, dan besar dapat menghasilkan penyebaran kepadatan yang berbeda (Fadli dan Priyambodo, 2025).

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pemetaan seismisitas dengan metode *Kernel Density Estimation* (KDE) menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam menggambarkan

pola spasial kejadian gempa. Penelitian dahulu oleh Ramanna dan Dodagoudar (2011) membuktikan bahwa *foxed kernel* dan *adaptive* mampu menampilkan kerapatan gempa secara lebih akurat dibandingkan zonasi konvensional, serta menegaskan pentingnya pemilihan bandwidth dalam kualitas pemetaan.

Selain itu, penelitian Fariha (2024) melakukan analisis zona kerentanan gempa di wilayah Malang Raya menggunakan parameter Peak Ground Acceleration (PGA) dari data historis gempa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya variasi tingkat kerentanan gempa pada wilayah Malang Raya berdasarkan karakteristik aktivitas kegempaan. Kedua penelitian tersebut menjadi dasar dalam penelitian ini, yaitu penggunaan metode KDE untuk analisis kepadatan gempa serta pendekatan spasial dalam pemetaan zona kerentanan gempa bumi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Wilayah Malang Raya meliputi Kabupaten Malang, Kota Batu, dan Kota Malang. terletak pada $7^{\circ} 44'55.11''$ - $8^{\circ} 26'35.45''$ LS dan $112^{\circ} 17'10.90''$ - $112^{\circ} 57'00''$ BT. Wilayah Malang memiliki Riwayat gempa bumi besar yang terjadi di wilayah Malang Selatan akibat adanya gempa di Zona subduksi lempeng Indo-Australia yang bergerak jauh ke utara dan bertabrakan dengan lempeng Eurasia. Gempa-gempa tersebut kerap menimbulkan gempa merusak, dan gempa terakhir terjadi pada 10 April 2021. Pusat gempa berkekuatan 6,1 SR yang terjadi 96 kilometer (km) Selatan Kepanjen, Malang, Jawa Timur, terletak di laut.



Gambar 3.1 Peta Daerah Penelitian

3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang terdiri dari data gempa bumi, data kepadatan penduduk, dan data kawasan pemukiman. Data gempa bumi USGS diunduh untuk wilayah Malang Raya periode 2010-2025 dengan magnitudo (M) > 3 SR. Pada magnitudo serta kedalaman tertentu. Selain data magnitudo dan kedalaman gempa bumi, data yang didapatkan memiliki parameter berupa waktu dan lokasi gempa di permukaan (episenter).

Data kepadatan penduduk diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Malang, Kota Malang, dan Kota Batu. Data ini digunakan untuk menggambarkan tingkat kerentanan sosial masyarakat terhadap potensi dampak gempa bumi.

Data kawasan permukiman diperoleh dari Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) Kabupaten Malang, Kota Batu dan Kota Malang. Data ini digunakan sebagai representasi kondisi fisik wilayah yang menggambarkan konsentrasi kawasan terbangun yang berpotensi terdampak bencana gempa bumi.

3.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan di Lab Geofisika UIN Malang. Dimulai pada Tanggal 1 Maret 2025 dan diperkirakan penelitian selesai pada tanggal 20 Juni 2026.

3.4 Peralatan Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini diperlukan peralatan yaitu:

1. Perangkat keras (*hardware*) berupa Laptop.
2. Perangkat lunak (*software*)
 - a. Microsoft Excel 2021 untuk menganalisis data gempa bumi
 - b. Microsoft Word 2021 untuk penyusunan laporan tugas akhir.

- c. Arcgis 10.8 untuk pembuatan peta zona kerentanan gempa bumi daerah penelitian.
3. Data sekunder yang digunakan meliputi:
 - a. gempa bumi wilayah Kabupaten Malang didapatkan dari laman USGS (*United States Geological Survey*) pada laman <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> periode 2010-2025.
 - b. Data kependudukan Kabupaten Malang, Kota Malang, dan Kota Batu yang diperoleh dari laman Badan Pusat Statistik (BPS) [https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah tahun 2021](https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah_tahun2021).
 - c. Data kawasan permukiman yang diperoleh dari laman Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) <https://malangkota.bps.go.id/id> tahun 2022 sebagai representasi kondisi fisik wilayah penelitian.

3.5 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga langkah yaitu pengumpulan data, pengolahan data, dan interpretasi data.

3.5.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang terdiri dari data gempa bumi, data kepadatan penduduk, dan data kawasan permukiman. Data gempa bumi bersumber dari USGS. Data gempa bumi ini diunduh untuk wilayah Malang Raya periode 2010-2025 dengan magnitudo (M) > 3 SR, data tersebut berupa data magnitudo dan kedalaman tertentu yang memiliki parameter berupa waktu dan lokasi gempa di permukaan (episenter).

Data kepadatan penduduk diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) sebagai indikator kerentanan sosial wilayah penelitian, Sedangkan data kawasan

permukiman diperoleh dari Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan digunakan sebagai indikator kondisi fisik wilayah penelitian.

3.5.2 Pengolahan Data

Pada penelitian ini ada beberapa Langkah untuk menentukan zona kerentanan gempa bumi dengan analisis *Kernel Density Estimation* (KDE) yang dilakukan secara otomatis menggunakan perangkat lunak ArcGIS tanpa perhitungan manual dengan tahapan sebagai berikut:

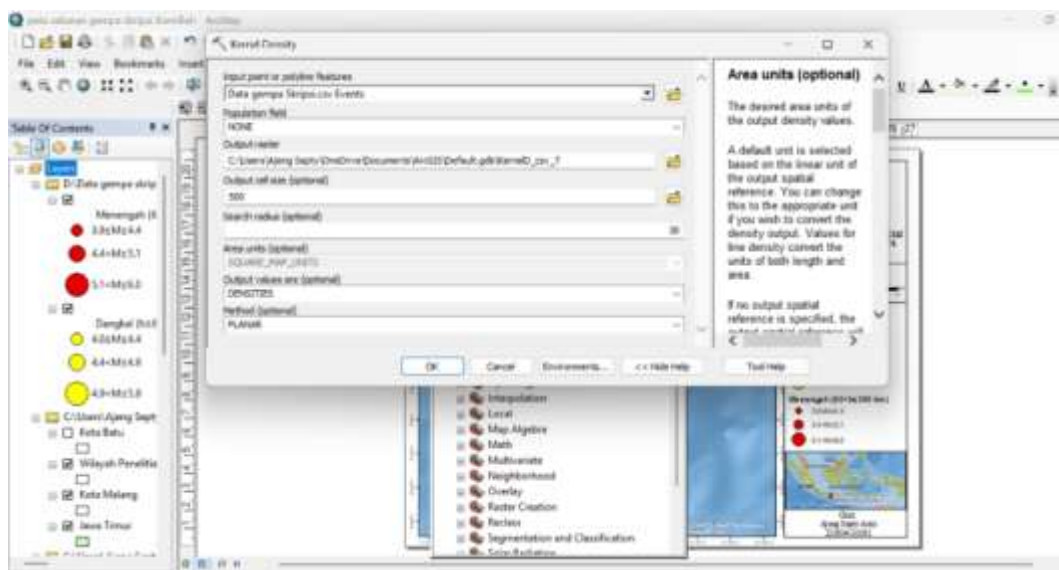
A. Analisis Seismitas

1. Pengolahan awal data gempa menggunakan Microsoft Excel, data gempa disusun sesuai periode 2010-2025 dan diperiksa untuk memastikan data gempa relevan dan sesuai dengan penelitian.
2. Data diklasifikasikan berdasarkan rentang magnitude, kedalaman, dan frekuensi kejadian untuk mengetahui dominasi jenis gempa.
3. Menghasilkan grafik distribusi magnitude, kedalaman, dan frekuensi gempa sesuai periode 2010-2025.

B. Peta Kepadatan Gempa

1. Mengimpor hasil olahan data yang telah disesuaikan berdasarkan magnitude dan kedalaman pada periode 2010–2025 ke dalam ArcGIS menggunakan fitur Add XY Data untuk menampilkan episenter gempa.
2. Menambahkan peta batas administrasi wilayah Malang Raya sebagai peta dasar.
3. Analisis kepadatan kejadian gempa bumi menggunakan metode Kernel Density Estimation (KDE) dengan memanfaatkan tool Kernel Density pada menu *Spatial Analyst Tools* di ArcGIS yang menghasilkan peta kepadatan kejadian gempa bumi. Beberapa parameter yang digunakan:

- a. Input point features : titik episenter gempa bumi
- b. Population field: none (tanpa bobot)
- c. Output cell size: 500 m
- d. Search radius (*bandwidth*): menentukan jangkauan perhitungan kepadatan di sekitar episenter gempa (30 km)
- e. Area unit scale factor: kilometer persegi (km²) . Analisis ini menghasilkan peta kepadatan kejadian gempa bumi.



Gambar 3.2 Parameter *Kernel Density Estimation*.

4. Menghasilkan peta kepadatan gempa yang kemudian diklasifikasikan menjadi tiga tingkat kepadatan, yaitu rendah, sedang, dan tinggi.

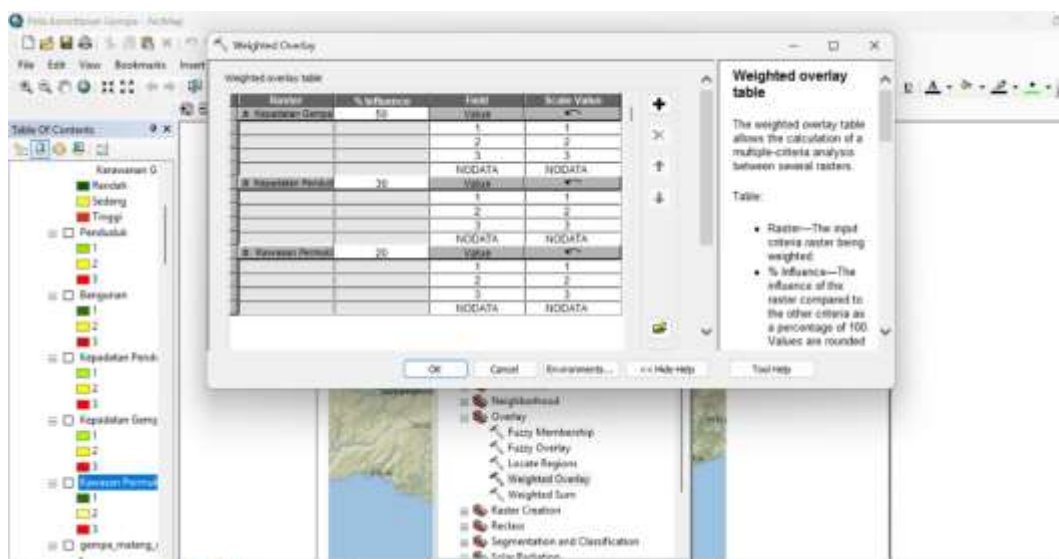
C. Pengolahan Faktor Kerentanan

1. Faktor sosial diklasifikasikan berdasarkan peta kepadatan penduduk menjadi tiga kategori: rendah, sedang, dan tinggi.
2. Faktor fisik diklasifikasikan berdasarkan peta kawasan permukiman menjadi tiga kategori: rendah, sedang, dan tinggi.

D. Overlay peta kepadatan gempa, kepadatan penduduk, dan kawasan permukiman.

1. Menggabungkan layer raster faktor sosial, faktor fisik, dan hasil kepadatan gempa (KDE) menggunakan *Weighted Overlay Analysis* untuk menghasilkan peta zona kerentanan, dengan bobot tiap parameternya:

- Hasil seismitas (KDE) = 50%
- Kepadatan penduduk = 30%
- Kawasan Permukiman = 20%

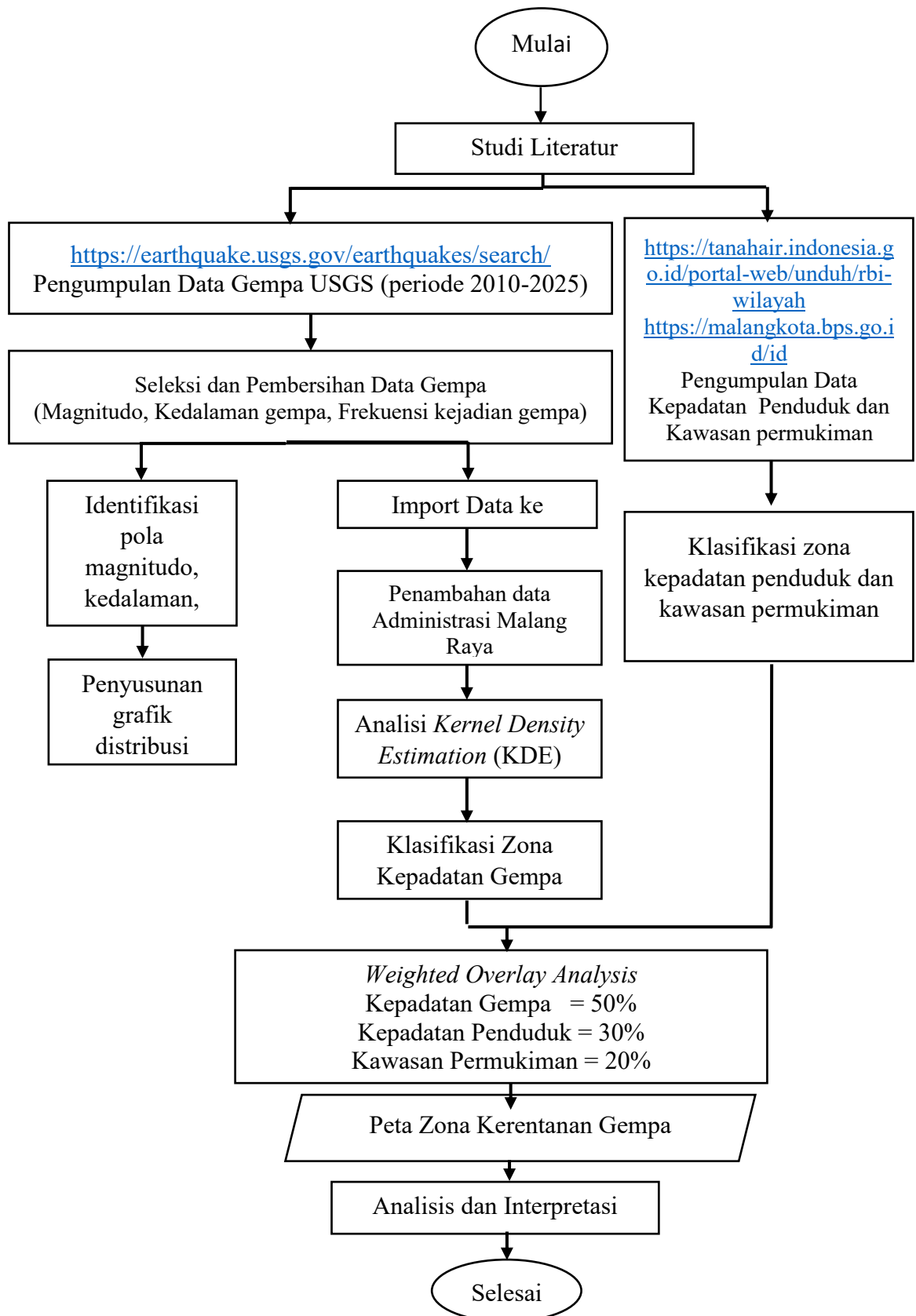


Gambar 3.3 Pembobotan Parameter pada Proses *Weighted Overlay*

3.5.3 Interpretasi Data

Pada tahap interpretasi, dilakukan analisis data pada peta zona kerentanan gempa bumi yang didapatkan. Interpretasi dilakukan untuk daerah dengan zona kerentanan yang terendah hingga yang paling tinggi. Hasil peta dibandingkan dengan data historis kejadian gempa signifikan untuk melihat kesesuaian antara area dengan kepadatan tinggi dan kerentanan tinggi. Tahap ini memastikan bahwa hasil analisis KDE dan overlay berbobot menghasilkan representasi yang akurat terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.

3.6 Diagram Alir Penelitian



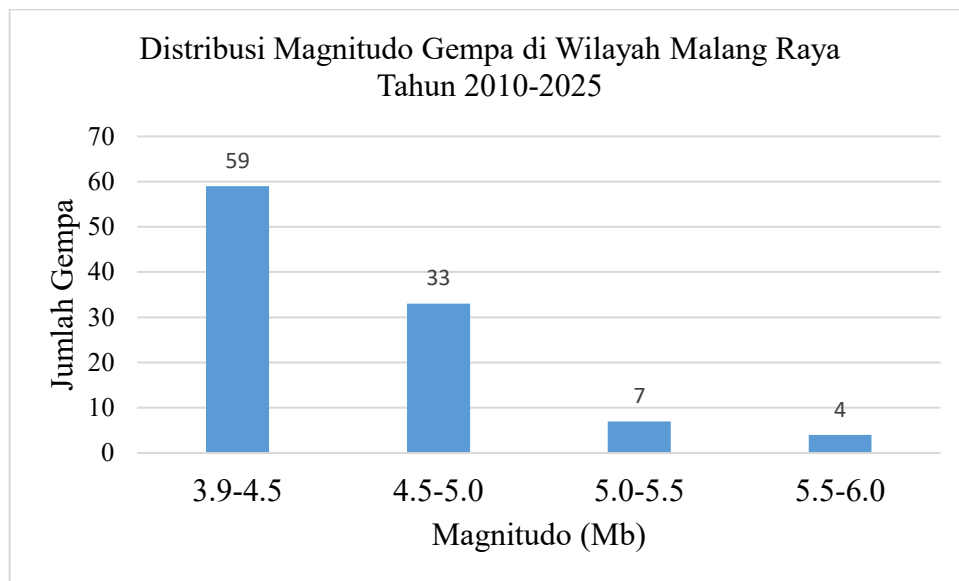
Gambar 3. 4. Diagram Alir Penelitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

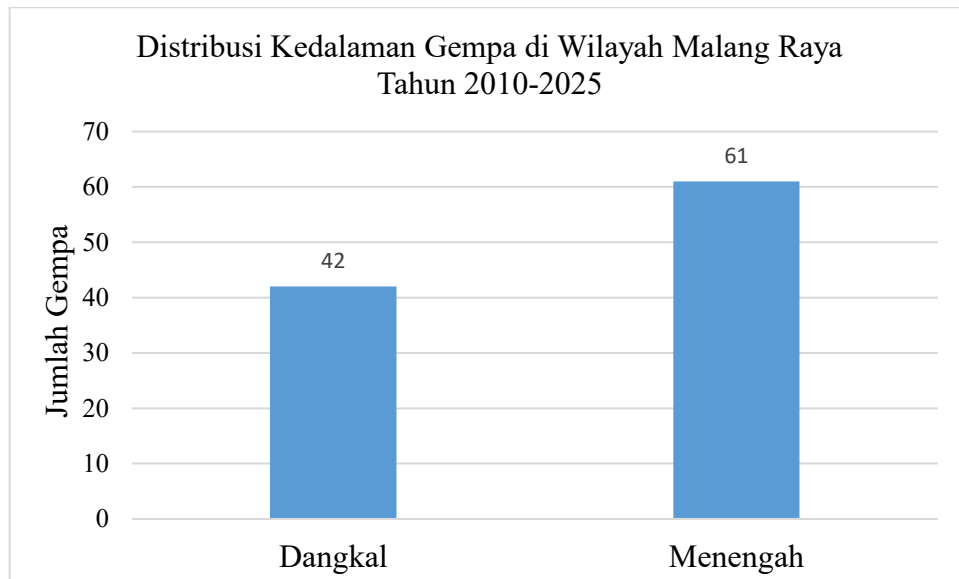
4.1 Analisis Karakteristik Seismisitas Wilayah Malang Raya

Berdasarkan data gempa bumi wilayah Malang Raya pada periode 2010-2025 yang diunduh pada laman *United States Geological* (USGS) memiliki beberapa parameter gempa bumi meliputi *origin time*, *latitude*, *longitude*, kedalaman, magnitudo dan *type* magnitudo. Data gempa bumi tersebut dianalisis untuk mengetahui karakteristik seismisitas melalui distribusi magnitudo, kedalaman, dan frekuensi gempa yang disajikan dalam bentuk grafik sebagai informasi awal mengenai kondisi seismisitas wilayah Malang Raya.



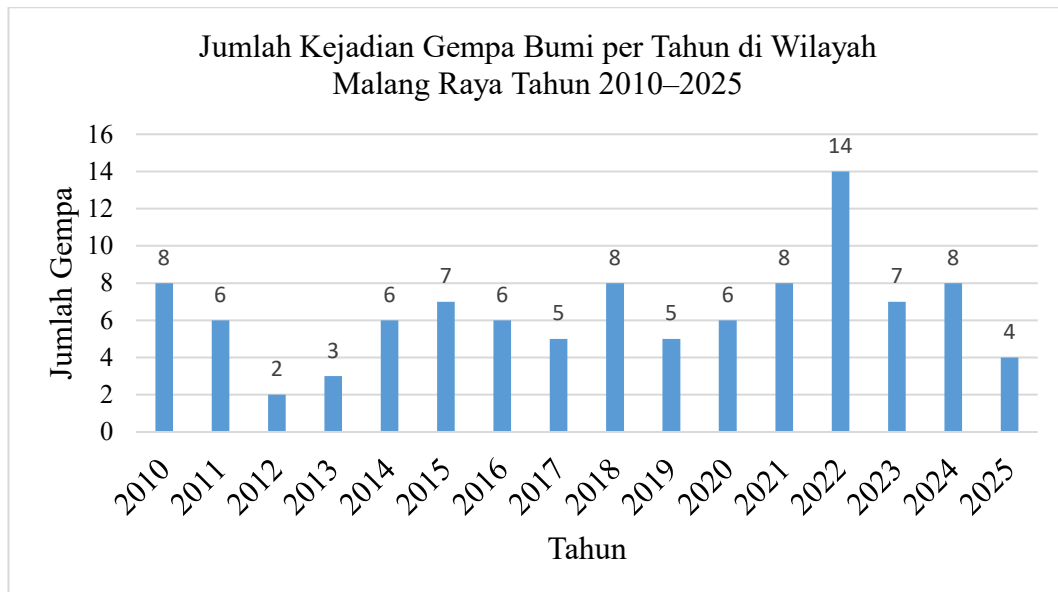
Gambar 4.1 Distribusi Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Malang Raya

Gambar 4.1 menunjukkan distribusi magnitudo gempa di wilayah Malang Raya selama tahun 2010-2025. Gempa tersebut didominasi oleh gempa dengan magnitudo 3,9-4,5 dengan jumlah 59 kejadian, diikuti oleh magnitudo 4,5-5,0 sebanyak 33 kejadian, sementara itu gempa dengan magnitudo lebih besar yaitu 5,0-6,0 relatif jarang terjadi. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivitas seismik di wilayah tersebut didominasi oleh gempa berkekuatan rendah hingga sedang.



Gambar 4.2 Distribusi Kedalaman Gempa di Wilayah Malang Raya

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa distribusi kedalaman gempa di wilayah Malang Raya tahun 2010-2025 didominasi oleh gempa berkedalaman menengah dengan jumlah 61 kejadian, sedangkan gempa dangkal sebanyak 42 kejadian. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivitas seismik di wilayah tersebut lebih sering terjadi gempa pada kedalaman menengah, yang umumnya berkaitan dengan proses tektonik di bawah permukaan bumi.



Gambar 4.3 Distribusi Jumlah Kejadian Gempa Bumi per Tahun di Wilayah Malang Raya Tahun 2010-2025

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa jumlah kejadian gempa bumi di wilayah Malang Raya tahun 2010-2025 mengalami fluktuasi setiap tahunnya. Jumlah kejadian gempa tertinggi terjadi pada tahun 2022 sebanyak 14 kejadian, sedangkan yang terendah terjadi pada tahun 2012 sebanyak 2 kejadian. Pola fluktuatif ini mengindikasikan bahwa aktivitas seismik wilayah Malang Raya bersifat dinamis dan tidak terlihat tren peningkatan atau penurunan jangka panjang yang konsisten.

Berdasarkan hasil analisis ketiga grafik tersebut menunjukkan bahwa wilayah Malang Raya memiliki aktivitas gempa relative aktif namun belum menunjukkan kejadian gempa berkekuatan tinggi. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut secara spasial untuk mengidentifikasi pola sebaran dan konsentrasi kejadian gempa di wilayah Malang Raya.

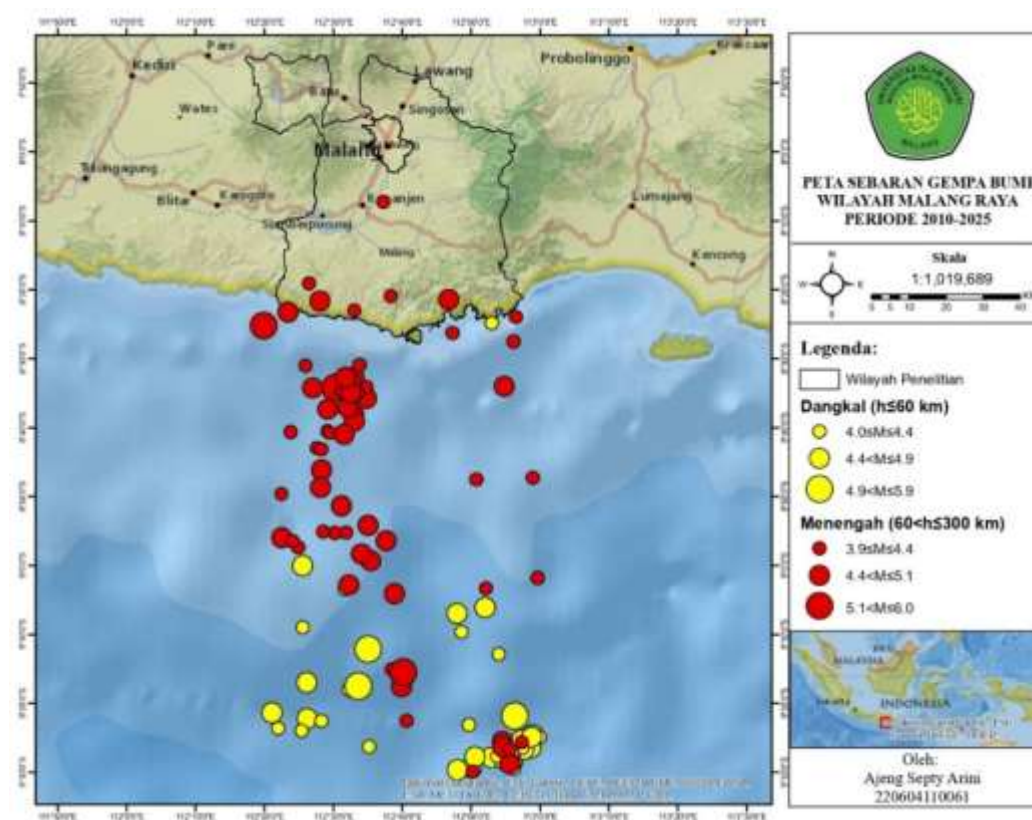
4.2 Analisis Spasial Sebaran dan Kepadatan Gempa Bumi

Berdasarkan hasil analisis statistik, diperlukan analisis spasial untuk mengkaji pola distribusi kejadian gempa bumi di wilayah Malang Raya. Pendekatan ini dilakukan melalui pengamapan Lokasi kejadian gempa untuk memberikan

gambaran sebaran secara keruangan. Peta sebaran gempa bumi berikut menunjukkan distribusi titik kejadian gempa selama periode 2010-2025 di wilayah Malang Raya.

4.2.1 Peta Sebaran Gempa Bumi Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025

Peta magnitude dan kedalaman gempa bumi digunakan untuk menunjukkan karakteristik kejadian gempa bumi wilayah Malang Raya periode 2010-2025. Magnitudo menggambarkan besar energi yang dilepaskan saat terjadi gempa bumi, sedangkan kedalaman gempa menunjukkan lokasi pusat gempa di bawah permukaan bumi. Analisa kedua parameter dilakukan untuk mengetahui pola sebaran dan karakteristik aktivitas seismik di Wilayah Malang Raya.



Gambar 4.4 Peta Sebaran Gempa Bumi Wilayah Malang Raya

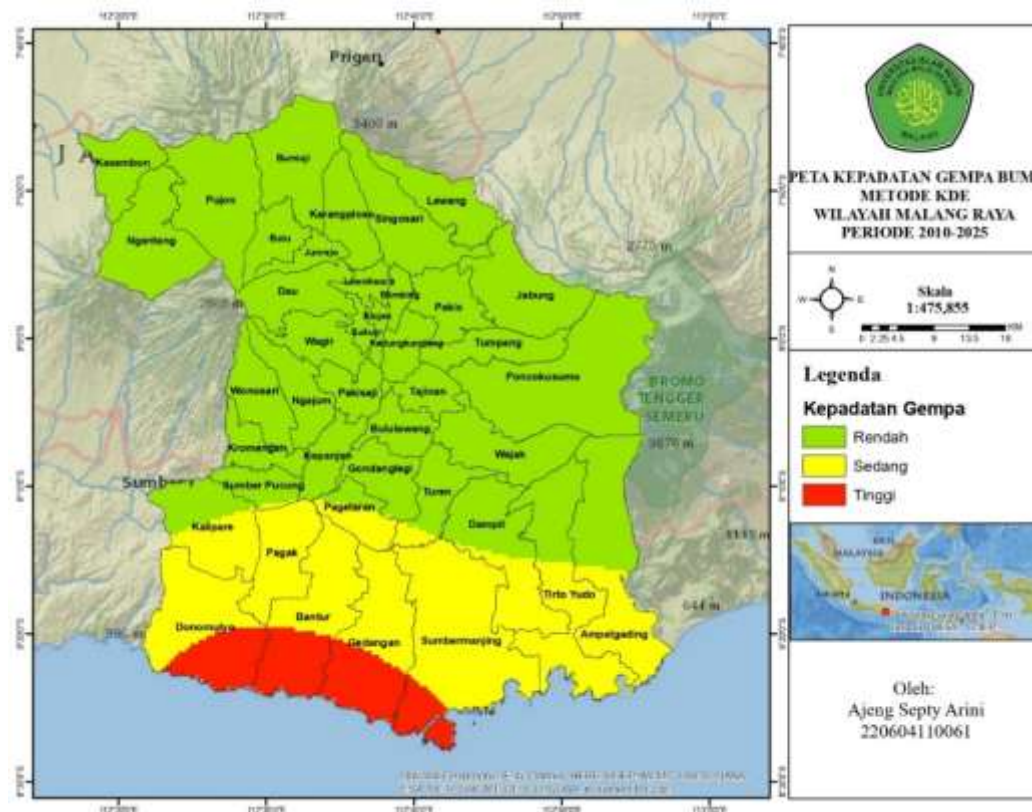
Gambar 4.4 menunjukkan peta sebaran episenter gempa bumi yang dipilih berdasarkan magnitudo dan kedalaman gempa bumi. Magnitudo yang digunakan merupakan magnitudo >3 , sedangkan kedalaman yang digunakan berkisar antara 0-

300 km yang merupakan gempa bumi dangkal dan menengah. Dimana kedalaman 0-600 km merupakan gempa bumi dnagkal dan kedalaman 60-300 km merupakan gempa bumi kedalaman menengah (Sanjaya,2008).

Berdasarkan peta sebaran gempa bumi pada gambar 4.4 mendeskripsikan jumlah gempa bumi di wilayah malang raya periode 2010-2025 terdapat sebanyak 103 kejadian yang didominasi oleh gempa bumi kedalaman dangkal sebanyak 42 kejadian dan gempa bumi kedalaman menengah sebanyak 61 kejadian. Kemudian wilayah malang raya juga didominasi oleh gempa bumi dengan magnitudo dari $3.9 < M \leq 5.0$ sebanyak 87 kejadian dan gempa dengan magnitudo $5.0 < M \leq 6.0$ sebanyak 16 kejadian. Gempa di wilayah Malang Raya didominasi pada wilayah selatan kabupaten Malang.

4.2.2 Peta Kepadatan Gempa Bumi Metode *Kernel Density Estimation*

Peta kepadatan gempa bumi metode *Kernel Density Estimation* digunakan untuk menunjukkan tingkat kosentrasi kejadian gempa di Wilayah Malang Raya berdasarkan persebaran titik gempa periode 2010-2025. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi wilayah dengan kepadatan kejadian gempa yang tinggi sehingga dapat memberikan gambaran spasial mengenai zona yang lebih sering mengalami aktivitas gempa bumi.



Gambar 4. 5 Peta Kepadatan Gempa Bumi Metode *Kernel Density Estimation* Wilayah Malang Raya Periode 2010-2025.

Gambar 4.5 menunjukkan kepadatan gempa bumi metode *Kernel Density Estimation* (KDE) di wilayah Malang Raya periode 2010-2025 berdasarkan 103 kejadian gempa bumi. Analisis *Kernel Density Estimation* dilakukan dengan parameter bandwidth 30 km, ukuran sel raster (*cell size*) 500 m, serta area perhitungan dalam satuan km^2 . Sehingga setiap titik gempa memiliki pengaruh terhadap area dalam radius tersebut.

Hasil analisis menunjukkan tingkat kepadatan gempa dibagi menjadi 3 kelas yaitu rendah dengan nilai, sedang, dan tinggi. Wilayah kepadatan tinggi dengan nilai 0-0,00193 kejadian/ km^2 ditunjukkan warna merah yang dominan berada di wilayah selatan Malang Raya, sedangkan kepadatan rendah dengan nilai 0,194 – 0,0052 kejadian/ km^2 ditunjukkan warna kuning yang tersebar pada bagian tengah wilayah penelitian. Kemudian wilayah kepadatan rendah dengan nilai 0,0054 –

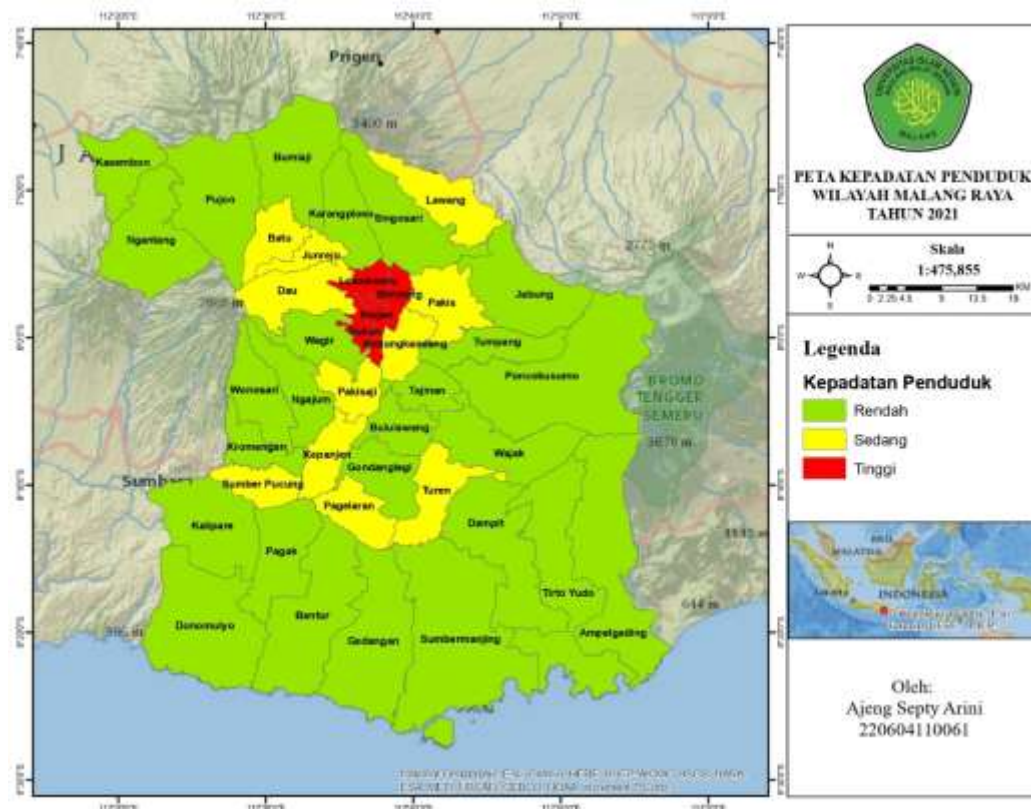
0,010 kejadian/km² ditunjukkan warna hijau yang berada di bagian utara wilayah penelitian. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas gempa lebih terkonsentrasi di wilayah selatan Malang Raya, daerah ini dipengaruhi oleh zona subduksi di selatan Pulau Jawa.

4.3 Analisa Faktor Kerentanan Gempa Bumi

Analisis Faktor kerentanan gempa bumi dilakukan untuk mengidentifikasi wilayah yang memiliki tingkat kerentanan terhadap dampak gempa bumi di Wilayah Malang Raya. Faktor kerentanan dalam penelitian ini terdiri atas kepadatan penduduk dan kawasan permukiman yang dianalisis secara spasial.

4.3.1 Peta Kepadatan Penduduk Wilayah Malang Raya

Peta kepadatan penduduk digunakan untuk menunjukkan tingkat persebaran penduduk di Wilayah Malang Raya. Parameter ini digunakan sebagai salah satu faktor kerentanan wilayah karena wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi memiliki potensi Risiko lebih besar terhadap dampak gempa bumi.

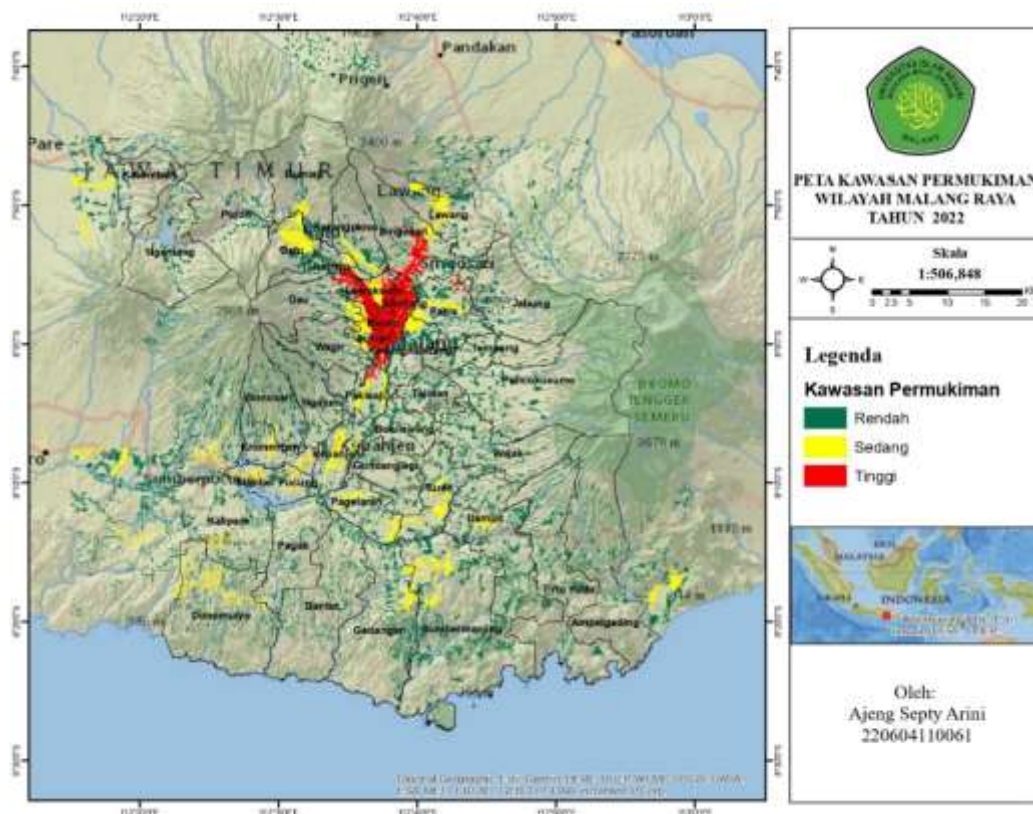


Gambar 4.6 Peta Kepadatan Penduduk Wilayah Malang Raya Tahun 2021

Gambar 4.6 menunjukkan kepadatan penduduk wilayah Malang Raya tahun 2021. Tingkat kepadatan penduduk dibagi menjadi tiga kelas, yaitu kepadatan rendah ($366\text{--}1566$ jiwa/ km^2), kepadatan sedang ($1567\text{--}5216$ jiwa/ km^2), dan kepadatan tinggi ($5217\text{--}10654$ jiwa/ km^2). Wilayah dengan kepadatan penduduk ditunjukkan oleh warna merah yang terpusat di Kota Malang seperti Kecamatan Lowokwaru, Blimbing, Klojen, Sukun, dan Kedungkandang. Sementara itu, wilayah dengan kepadatan sedang tersebar di beberapa kecamatan penyangga, sedangkan wilayah dengan kepadatan rendah mendominasi sebagian besar daerah Kabupaten Malang bagian utara, timur, dan selatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas penduduk lebih terkonsentrasi di pusat perkotaan yaitu di Kota Malang. Data kepadatan penduduk diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Malang, Kota Batu, dan Kabupaten Malang Tahun 2021.

4.3.2 Peta Kawasan Permukiman Wilayah Malang Raya

Peta kawasan permukiman digunakan untuk menggambarkan persebaran bangunan di Wilayah Malang Raya. Kawasan permukiman digunakan sebagai faktor kerentanan karena wilayah dengan konsentrasi permukiman yang tinggi berpotensi mengalami dampak kerusakan yang lebih besar akibat gempa bumi.



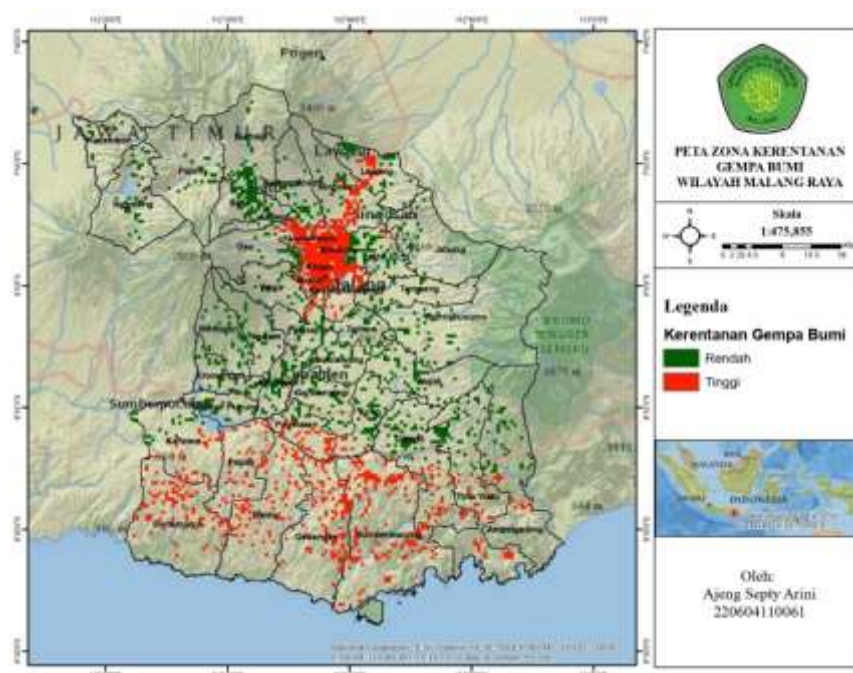
Gambar 4.7 Peta Kawasan Permukiman Wilayah Malang Raya Tahun 2021.

Gambar 4.7 menunjukkan peta kawasan permukiman Wilayah Malang Raya Tahun 2021. Persebaran kawasan permukiman diklasifikasikan menjadi 3 kategori berdasarkan luas area. Kategori rendah memiliki rentan luas 0,0003 – 1,71 km², kategori sedang memiliki rentan luas 1,72 – 8,33 km², dan kategori tinggi memiliki rentan luas 8,34 – 35,80 km². Kawasan tinggi terkonsentrasi pada wilayah perkotaan. Kondisi ini dipengaruhi oleh tingginya aktivitas penduduk serta perkembangan kawasan perkotaan. Kawasan permukiman sedang tersebar pada wilayah peyangga perkotaan seperti kecamatan Singosari, Lawang, Pakis, dan

Kepanjen. Sementara itu, kawasan permukiman rendah tersebar pada wilayah pedesaan dan daerah topografi berbukit hingga pegunungan yang berada wilayah Kabupaten Malang dan Kota Batu. Pola sebaran kawasan permukiman menunjukkan bahwa perkembangan wilayah cenderung terpusat di perkotaan. Data Kawasan pemukiman diperoleh dari layer permukiman Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) yang diunduh melalui Ina-Geoportal BIG dan digunakan untuk menggambarkan kondisi fisik wilayah penelitian.

4.4 Analisis Zona Kerentanan Gempa Bumi di Wilayah Malang Raya

Analisis Zona kerentanan gempa bumi dilakukan menggunakan metode *weighted overlay* dengan menggabungkan parameter kepadatan gempa bumi, kepadatan penduduk, dan kawasan permukiman. Metode ini diunakan untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter terhadap tingkat kerentanan gempa bumi di wilayah Malang Raya. Hasil *overlay* kemudian diklasifikasikan untuk mengetahui wilayah yang memiliki potensi kerentanan rendah hingga tinggi terhadap dampak gempa bumi.



Gambar 4.8 Peta Kerentanan Gempa Bumi Wilayah Malang Raya

Gambar 4.8 menunjukkan peta kerentanan gempa bumi wilayah Malang Raya berdasarkan hasil *weighted overlay* yang terbagi menjadi dua kelas yaitu rendah dan tinggi. Proses *weighted overlay* terdiri atas tiga parameter yaitu, kepadatan gempa hasil *Kernel Density Estimation* dengan bobot 50%, kepadatan penduduk dengan bobot 30%, dan kawasan permukiman dengan bobot 20%.

Zona kerentanan rendah ditunjukkan oleh warna hijau dengan nilai 1 yang berada di wilayah Kota Batu dan sebagian di wilayah Kabupaten Malang. Sedangkan zona kerentanan tinggi ditunjukkan oleh warna merah dengan nilai 1,1 – 2 yang dominan berada di wilayah selatan Kabupaten Malang dan wilayah Kota Malang. Tingginya kerentanan di Kota Malang dipengaruhi oleh kepadatan penduduk dan kawasan permukiman yang tinggi sehingga meningkatkan potensi risiko terhadap gempa bumi. Sementara itu, wilayah berwarna hijau menunjukkan daerah dengan tingkat kepadatan gempa, kepadatan penduduk, dan kawasan permukiman yang relatif lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa wilayah selatan Malang Raya memiliki tingkat kerentanan gempa yang lebih tinggi karena dipengaruhi oleh tingginya kejadian gempa berdasarkan data tahun 2010-2025 yang berkaitan dengan aktivitas subduksi di selatan Pulau Jawa, serta didukung oleh faktor sosial dan fisik.

4.5 Integrasi Keislaman

Integrasi keislaman dalam penelitian ini dilakukan dengan menghubungkan hasil analisis ilmiah mengenai karakteristik seismisitas, pola sebaran gempa bumi, dan pemetaan zona kerentanan gempa bumi dengan nilai-nilai yang terkandung dalam Al-Qur'an. Fenomena gempa bumi merupakan salah satu kejadian alam yang menunjukkan kebesaran Allah SWT. Kejadian bencana tidak dapat diprediksi secara pasti. Namun perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dapat

dimanfaatkan sebagai bentuk ikhtiar dalam memahami fenomena alam dan mengurangi dampak yang ditimbulkan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan informasi mengenai kondisi seismisitas dan kerentanan saja, tetapi juga menjadi salah satu upaya manusia dalam meningkatkan kesiapsiagaan serta mitigasi bencana sesuai dengan nilai-nilai Islam.

4.5.1 Seismisitas Gempa Bumi dalam Pandangan Islam

Seismisitas merupakan gambaran aktivitas kegempaan pada suatu wilayah yang meliputi karakteristik kejadian gempa bumi seperti jumlah kejadian, magnitudo, dan kedalaman gempa. Analisis seismisitas dilakukan untuk mengetahui kondisi aktivitas gempa bumi suatu wilayah sehingga dapat menjadi sumber informasi mengenai potensi aktivitas kegempaan yang terjadi.

Berdasarkan hasil penelitian karakteristik seismisitas wilayah Malang Raya periode 2010-2025 menunjukkan adanya aktivitas gempa bumi dengan variasi magnitudo dan kedalaman yang berbeda. Fenomena gempa bumi dan segala proses yang terjadi di dalamnya merupakan salah satu tanda kebesaran Allah SWT. Sebagaimana dijelaskan dalam Surah Al-Anbiya ayat 31 yang menjelaskan bahwa Allah SWT telah menciptakan bumi dengan sistem keseimbangan tertentu yang bunyinya sebagai berikut:

﴿جَعَلْنَا فِي الْأَرْضِ رَوَاسِيَ أَنْ تَمِيدَ بِهِمْ وَجَعَلْنَا فِيهَا فِجَاجًا سُبُلًا لَّعَلَّهُمْ يَهْتَدُونَ﴾

Artinya: “Dan Kami telah menjadikan di bumi gunung-gunung yang kokoh agar ia (tidak) goncang bersama mereka, dan Kami jadikan (pula) di sana jalan-jalan yang luas agar mereka mendapat petunjuk” (Q.S Al-Anbiya:31).

Menurut tafsir Kemenag RI Surah Al-Anbiya ayat 31 menjelaskan bahwa Allah SWT menciptakan gunung-gunung yang kokoh sebagai penyeimbang bumi serta menjadikan jalan-jalan yang luas supaya manusia dapat menjalani kehidupan

dengan tenang dan memperoleh petunjuk-Nya. Fenomena alam tersebut menunjukkan kebesaran Allah SWT sekaligus menjadi sarana bagi manusia untuk memahami tanda-tanda kekuasaan Allah SWT (Kementerian Agama, 2019).

Berdasarkan penjelasan tersebut, gunung-gunung yang diciptakan Allah SWT merupakan bagian dari sistem bumi yang berkaitan dengan proses geologi yang terjadi di dalamnya. Proses geologi tersebut dapat menghasilkan berbagai fenomena alam, salah satunya aktivitas kegempaan yang memiliki karakteristik tertentu. Dalam penelitian ini, karakteristik seismisitas dianalisis berdasarkan jumlah kejadian gempa, magnitudo, dan kedalaman untuk memahami variasi aktivitas kegempaan di wilayah Malang Raya. Melalui kajian ilmiah tersebut, manusia dapat mempelajari fenomena alam sebagai bentuk usaha memahami tanda-tanda kebesaran Allah SWT.

4.5.2 Analisis *Kernel Density Estimation* dalam Pandangan Islam

Kernel Density Estimation (KDE) merupakan salah satu metode analisis spasial yang digunakan untuk mengidentifikasi pola sebaran dan tingkat kerapatan kejadian gempa bumi pada suatu wilayah. Metode ini menghasilkan peta kerapatan yang menunjukkan area dengan konsentrasi kejadian gempa bumi. Berdasarkan hasil analisis *Kernel Density Estimation* (KDE) diperoleh gambaran pola sebaran dengan tingkat kerapatan yang bervariasi pada setiap wilayah. Pola tersebut menunjukkan adanya area-area tertentu yang memiliki konsentrasi kejadian gempa bumi lebih tinggi. Fenomena alam yang terjadi di bumi merupakan salah satu tanda kebesaran Allah SWT yang dapat diamati dan dipelajari oleh manusia. Sebagaimana dijelaskan dalam firman Allah SWT pada Surah Yunus ayat 101 sebagai berikut:

قُلْ اَنْظُرُوا مَاذَا فِي السَّمٰوٰتِ وَالْاَرْضِ وَمَا تُغْنِي الْاٰيٰتُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا

يُؤْمِنُوْنَ ﴿١٠١﴾

Artinya: “Katakanlah (Nabi Muhammad), “Perhatikanlah apa saja yang ada di langit dan di bumi!” Tidaklah berguna tanda-tanda (kebesaran Allah) dan peringatan-peringatan itu (untuk menghindarkan azab Allah) dari kaum yang tidak beriman” (Q.S Yunus:101).

Menurut tafsir Kemenag RI ayat ini menjelaskan bahwa manusia diperintahkan untuk memperhatikan dan mengkaji berbagai fenomena alam yang ada di langit maupun di bumi sebagai tanda kebesaran dan kekuasaan Allah SWT. Hal ini berkaitan dengan penggunaan metode *Kernel Density Estimation* (KDE) dalam penelitian ini, dimana analisis dilakukan melalui pengamatan terhadap pola sebaran episenter dan tingkat kepadatan kejadian gempa bumi berdasarkan lokasi episenter. Melalui pengamatan tersebut, manusia diharapkan dapat memahami dan mengambil hikmah dari ciptaan Allah SWT. Sehingga dapat meningkatkan keimanan dan pengetahuan terhadap fenomena alam yang terjadi (Kementerian Agama, 2019).

Berdasarkan penjelasan tersebut, manusia diperintahkan untuk memperhatikan dan mempelajari berbagai fenomena yang terjadi di bumi sebagai bentuk pengamatan terhadap tanda-tanda kebesaran Allah SWT. Dalam pengamatan terhadap fenomena gempa bumi dapat dilakukan melalui pendekatan ilmiah menggunakan metode *Kernel Density Estimation* (KDE). Metode KDE menjadi salah satu bentuk ikhtiar manusia untuk memahami pola persebaran dan tingkat kepadatan kejadian gempa bumi berdasarkan lokasi episenter. Melalui hasil analisis tersebut, manusia dapat memperoleh informasi mengenai pola aktivitas kegempaan sebagai upaya memahami fenomena alam ciptaan Allah SWT.

Hasil analisis tersebut memberikan informasi mengenai wilayah yang memiliki konsentrasi kejadian gempa tinggi. Informasi tersebut menunjukkan bahwa fenomena kegempaan yang terjadi di bumi memiliki pola tertentu yang dapat diamati dan dipelajari oleh manusia. Hal ini sesuai dengan kandungan Surah Yunus ayat 101 yang memerintahkan manusia untuk memperhatikan berbagai fenomena yang ada di langit dan bumi sebagai tanda kebesaran Allah SWT.

4.5.3 Zona Kerentanna Gempa Bumi dalam Pandangan Islam

Zona kerentanan gempa bumi merupakan wilayah yang memiliki tingkat potensi terdampak gempa bumi berdasarkan karakteristik geologi, aktivitas kegempaan, dan kondisi lingkungan. Informasi mengenai zona kerentanan gempa bumi sangat penting untuk mendukung upaya mitigasi bencana dan mengurangi risiko kerugian yang ditimbulkan akibat gempa bumi.

Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan ilmu At-Tasyir yaitu ilmu yang mempelajari pendugaan berdasarkan fenomena alam dengan tujuan memberikan manfaat bagi kehidupan manusia. Namun manusia tidak dapat mengetahui maupun memprediksi secara pasti kapan terjadinya bencana alam, karena segala ketentuan yang ada di bumi ini telah ditetapkan oleh Allah SWT dan hanya Allah SWT yang mengetahui. Hal tersebut telah dijelaskan dalam Al-Qur'an surah Al-A'raf ayat 78 yang bunyinya sebagai berikut:

فَأَخَذَتْهُمُ الرَّجْفَةُ فَأَصْبَحُوا فِي دَارِهِمْ جَائِمِينَ ﴿٧٨﴾

Artinya "*Maka gempa (dahsyat) menimpa mereka sehingga mereka menjadi (mayat-mayat yang) bergelimpangan di dalam (reruntuhan) tempat tinggal mereka,*" (QS. Al-A'raf:78).

Menurut tafsir Ibnu Katsir, ayat tersebut menjelaskan bahwa kaum Tsamud mendapatkan azab berupa gempa dahsyat sebagai akibat dari kedurhakaan mereka

terhadap perintah Allah SWT. Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang terjadi atas kehendak Allah SWT. Kejadian gempa juga menunjukkan kekuasaan Allah SWT terhadap bumi dan seluruh proses yang terjadi di dalamnya. Oleh karena itu, manusia dapat mempelajari fenomena gempa bumi melalui kajian ilmiah sebagai bentuk usaha memahami tanda-tanda kebesaran Allah SWT serta sebagai upaya untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan.

Ayat tersebut menjelaskan bahwa gempa bumi dapat menimbulkan kerusakan dan menyebabkan kematian, sebagaimana yang terjadi pada kaum Tsamud. Meskipun waktu terjadinya gempa merupakan ketetapan Allah SWT yang tidak dapat diketahui secara pasti oleh manusia, manusia tetap memiliki kewajiban untuk berikhtiar melalui kajian ilmiah. Dalam penelitian ini, ikhtiar tersebut dilakukan dengan memetakan zona kerentanan gempa bumi sebagai upaya mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak sehingga dapat mendukung mitigasi dan mengurangi risiko bencana di masa mendatang.

Penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa bencana gempa bumi merupakan bencana yang merusak dan menyebabkan korban jiwa serta merupakan bencana yang tidak dapat diprediksi secara pasti oleh manusia. Sehingga dengan adanya penelitian ini dapat dipergunakan untuk informasi mengenai mitigasi bencana serta sebagai sikap kesiapsiagaan jika terjadi bencana gempa bumi.

Dengan demikian, terdapat hikmah yang dapat diambil dari peristiwa gempa bumi. Terlihat jelas bahwa peristiwa gempa bumi telah memberikan pelajaran berharga bagi umat manusia dan lingkungan sekitar. Beberapa pelajaran yang bisa dipetik dari peristiwa gempa bumi tercantum di bawah ini:

1. Gempa bumi dan bencana alam lainnya tidak terjadi secara kebetulan melainkan merupakan bagian dari ketetapan Allah SWT. Peristiwa tersebut dapat menjadi pengingat bagi manusia agar senantiasa mendekatkan diri kepada Allah SWT serta meningkatkan kesadaran dalam menghadapi berbagai kemungkinan bencana yang dapat terjadi di kehidupan manusia.
2. Bencana gempa bumi menunjukkan bahwa manusia memiliki keterbatasan sedangkan kekuasaan yang mutlak hanyalah milik Allah SWT. Oleh karena itu, manusia hanya dapat berlindung dan memohon pertolongan kepada Allah SWT.
3. Ketaatan dan keimanan kepada Allah SWT serta Rasul-Nya yang akan membawa keberkahan dan keselamatan bagi kehidupan manusia, baik didunia maupun di akhirat. Sebaliknya, berbagai bentuk pelanggaran terhadap ketentuan Allah SWT dapat menimbulkan berbagai musibah bagi kehidupan manusia. Hal ini termasuk terjadinya bencana alam seperti gempa bumi.
4. Bencana gempa bumi maupun musibah yang lain dapat dijadikan sebagai pembelajaran bagi manusia untuk meningkatkan pengetahuan dan pemahaman terkait kebencanaan. Terjadinya bencana juga mendorong perkembangan teknologi dan inovasi dalam upaya mitigasi bencana, seperti penanggulangan bencana, sistem peringatan dini, dan proses pemulihan pascabencana.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Wilayah Malang Raya selama periode 2010-2025 mengalami 103 kejadian gempa bumi yang didominasi oleh gempa magnitudo 3,9 – 4,5 dan gempa kedalaman menengah (60 – 300 km). Jumlah kejadian gempa bervariasi setiap tahunnya. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah Malang Raya memiliki aktivitas seismik yang aktif.
2. Hasil analisis Metode *Kernel Density Estimation* menunjukkan bahwa kepadatan kejadian gempa bumi terkonsentrasi di bagian selatan wilayah Malang Raya, sedangkan bagian utara memiliki tingkat kepadatan yang lebih rendah. Pola tersebut mengindikasikan bahwa aktivitas gempa di pengaruhi oleh keberadaan zona subduksi di selatan Pulau Jawa.
3. Kota Malang dan wilayah selatan Kabupaten Malang memiliki tingkat kerentanan gempa bumi yang lebih tinggi karena wilayah tersebut memiliki kepadatan kejadian gempa bumi, kepadatan penduduk, dan kawasan permukiman yang tinggi berdasarkan hasil analisis *weighted overlay*.

5.2 Saran

Beberapa rekomendasi yang diperoleh dari penelitian ini bagi penelitian selanjutnya adalah agar mengambil data gempa bumi dengan jumlah yang lebih banyak dan periode yang lebih terbaru sehingga dapat memberikan gambaran aktivitas seismik yang lebih terkini. Selain itu, penambahan parameter yang

mempengaruhi kerentanan gempa bumi untuk menghasilkan pemetaan kerentanan yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiyoso, W. (2018). *Manajemen Bencana*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Al-Qur'an. 2019. *Al-Qur'an Mushaf Per kata Tajwid*. Bandung : Penerbit Jabal.
- Amador Luna, D., Alonso-Chaves, F. M., & Fernández, C. (2024). *Kernel Density Estimation for the Interpretation of Seismic Big Data in Tectonics Using QGIS: The Türkiye–Syria Earthquakes (2023)*. *Remote Sensing*, 16(20), 3849. <https://doi.org/10.3390/rs16203849>
- Bachri, S., Shrestha, R. P., Yulianto, F., Sumarmi, S., Utomo, K. S. B., & Aldianto, Y. E. (2021). Mapping landform and landslide susceptibility using remote sensing, gis and field observation in the southern cross road, Malang regency, East Java, Indonesia. *Geosciences (Switzerland)*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010004>
- Badan Geologi. (2018). *Badan Geologi sudah memetakan seluruh wilayah rawan gempa di Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. <https://www.esdm.go.id>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2023). *Informasi Seismologi dan Tektonik Indonesia*. Jakarta: BMKG.
- Bormann, P. (2013). *History, Aim and Scope of the 1st and 2nd Edition of the IASPEI*. New Manual of Seismologic Observatory Practice, GFZ.
- Chasanah, U., & Handoyo, E. (2021). Analisis tingkat kegempaan wilayah Jawa Timur berbasis distribusi spasial dan temporal magnitude of completeness (Mc), A-value dan B-value. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 11(2).
- Daryono, M. R., Natawidjaja, D. H., & Sapiie, B. (2018). *Earthquake activity and seismic hazard in Indonesia*. *Geoscience Letters*, 5, 1–14.
- Fadli, A., Priyambodo, T.K., Putra, A.E., & Suryanto, W. (2025). *Kernel Density Estimation for Seismic Hazard Mapping in Indonesia*. *Trends in Sciences*.
- Golos, E. M., Fang, H., & van der Hilst, R. D. (2020). Variations in seismic wave speed and VP/VS ratio in the North American lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB020574.
- Gulo, F. W. R. (2023). Peran Sistem Informasi Geografis untuk Pemetaan Bencana. *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 4(5), 41–51.
- Hariyanto, T., Bioresita, F., Pribadi, C. B., & Safitri, C. N. (2021). Determination Of Earthquake Intensity Based On PGA (Peak Ground Acceleration) Using Multi-Event Earthquake Data Determination Of Earthquake Intensity Based On PGA (Peak Ground Acceleration) Using Multi-Event Earthquake Data. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 731(012027). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/731/1/012027>
- Hulden, M., Silfverberg, M., & Francom, J. (2015). Kernel Density Estimation for

- Text-Based Geolocation. *AAAI Conference Paper*.
- Ibnu Katsir. 2004. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 8*. Bogor: Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Irsyam, M., et al. (2020). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional – Kementerian PUPR.
- Kementerian Agama. (2019). *Al-Qur'an dan Terjemahannya Edisi Penyempurnaan*. Jakarta: Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an Badan Litbang dan Diklat Kementerian Agama RI
- Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an dan Lembaga Ilmu Pengetahuan.(2010). *Tafsir Ilmi: Tumbuhan Bumi Dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sains*. Jakarta: Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an)
- Lestari, W., Widodo, A., Warnana, D. D., & Syaifuddin, F. (2019). Earthquake Risk Reduction Study with Mapping an Active Fault at the Southern of East Java. *Journal of Physics: Conference Series*, 1373(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012031>
- Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., & Widiyantoro, S. (2021). *Earthquake source parameters and seismicity analysis in Indonesia*. *Journal of Seismology*, 25, 1–15.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Puspito, N. T., & Widiyantoro, S. (2020). *Identification of seismicity characteristics and earthquake source parameters in Indonesia*. *Geoscience Letters*, 7, 1–12.
- Pusat Studi Gempa Nasional (PusGen). (2024). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2024*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Ramanna, C. K., & Dodagoudar, G. R. (2011). *Kernel density estimation techniques for seismic hazard analysis of South India*. In *Proceedings of the III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2011)*, Corfu, Greece, 25–28 May 2011.
- Riyadi, M. W., & Sudaryanto, F. X. (2021). Overlay dalam Sistem Informasi Geografis untuk Analisis Spasial. *Jurnal Konstruksi*, 13(1), 12–20.
- Setyawan, A., Widiyantoro, S., & Nugraha, A. D. (2021). Active fault mapping and seismicity in East Java. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 33(1), 45–60.
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to Seismology* (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. London: Chapman and Hall.
- Sulaeman, C., Daryono, & Rohadi, S. (2021). Analisis karakteristik gelombang seismik untuk kajian struktur bawah permukaan. *Jurnal Geofisika*, 19(2), 75–84.

Ulfa, U., Fitrianingtyas, R., Maharani, Y. N., & Wibowo, A. (2023). Identifikasi Struktur Kerak Di Bawah Permukaan Jawa Timur Berdasarkan Hasil Tomografi Seismik Menggunakan Model Kecepatan Gelombang P Dan Gelombang S. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 11(2). <https://doi.org/10.23960/jtaf.v11i2.320>

UNDRR (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*.

Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., & Wang, X. (2020). *Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismicity and fault structure in Indonesia*. *Nature Communications*, 11, 3720.

Yusvinda, M. N., Puspitasari, S. W., Wafi, N. M. P., Aziz, K. N., Darmawan, D., Katriani, L., Handayani, N. T., & Wibowo, N. B. (2021). Structure Interpretation Using Gravity Spectral Analysis and Derivative Method in Grindulu Fault, Pacitan, East Java. *Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences ICRIEMS 2020*, 528, 415–420. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210305.060>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Gempa Bumi Periode 2010-2025

No.	Time	Latitude	Longitude	Depth (km)	Magnitudo	MagType
1	2025-12-26T14:19:38.675Z	-8.568	112.9143	136.963	4.5	mb
2	2025-11-30T07:25:46.494Z	-8.4001	112.9424	140.342	4.3	mb
3	2025-07-30T05:59:21.240Z	-9.2516	112.6426	66.245	4	mb
4	2025-03-16T01:15:07.296Z	-8.6337	112.5577	83.815	4.4	mb
5	2024-12-13T17:39:26.685Z	-9.3859	112.8291	55.91	4.4	mb
6	2024-08-31T12:25:01.290Z	-8.3845	112.5515	130.381	4.1	mb
7	2024-08-13T03:03:50.683Z	-8.9043	112.5855	59.667	4.6	mb
8	2024-07-06T13:26:47.455Z	-8.5466	112.5408	87.813	4.2	mb
9	2024-06-16T13:09:16.636Z	-9.4645	112.8829	59.234	4.8	mb
10	2024-06-05T16:40:42.213Z	-8.922	112.5042	63.931	4.2	mb
11	2024-05-20T19:42:15.945Z	-8.9412	112.6283	88.44	5	mb
12	2024-01-22T08:19:58.122Z	-8.3882	112.3912	148.994	4.6	mb
13	2023-11-27T08:19:01.594Z	-8.4591	112.937	142.016	4.4	mb
14	2023-10-10T16:42:28.551Z	-8.5457	112.5505	85.237	4.7	mb
15	2023-06-26T01:16:15.305Z	-8.6755	112.4862	89.45	4.2	mb
16	2023-06-23T11:30:55.228Z	-9.0684	112.6486	120.514	4.6	mb
17	2023-03-06T01:50:08.773Z	-9.3706	112.4379	45.416	4.8	mb
18	2023-01-17T04:36:12.829Z	-9.0476	112.5383	66.345	5	mb
19	2023-01-02T16:49:49.976Z	-8.3498	112.6405	127.241	4.2	mb
20	2022-12-20T18:05:47.741Z	-8.5587	112.5433	84.758	4.5	mb
21	2022-10-31T15:15:54.957Z	-8.68	112.4916	127.513	4.1	mb
22	2022-07-11T04:43:32.333Z	-9.4413	112.978	56.13	4.6	mb
23	2022-07-11T03:46:19.515Z	-9.41	112.9832	58.95	4.6	mb
24	2022-07-09T20:40:16.336Z	-9.4791	112.9275	60.075	4.5	mb
25	2022-07-09T18:10:16.136Z	-9.4155	113	58.284	4.2	mb
26	2022-07-09T14:07:07.679Z	-9.49	112.8346	47.788	4.7	mb
27	2022-07-09T02:53:46.615Z	-9.3644	112.9398	56.35	5.1	mb
28	2022-07-08T22:50:17.678Z	-9.4455	112.9616	51.27	4.9	mb
29	2022-07-08T20:27:08.850Z	-9.4648	112.9197	41.048	5.2	mb
30	2022-07-08T19:28:04.004Z	-9.4225	112.9567	56.626	4.8	mb
31	2022-06-07T14:46:01.875Z	-9.4422	112.9586	58.08	4.1	mb
32	2022-05-10T13:23:09.717Z	-9.4623	112.8972	53.54	4.4	mb
33	2022-01-10T10:28:14.789Z	-9.1167	112.8001	33.85	4.5	mb
34	2021-10-22T02:21:15.739Z	-8.6515	112.5513	72.87	4.9	mb
35	2021-07-08T11:28:40.584Z	-9.0308	112.995	61.07	4.4	mb
36	2021-06-07T17:28:50.367Z	-8.3185	112.4423	116.36	4.1	mb
37	2021-05-31T03:24:30.994Z	-8.7891	112.9834	83.43	4	mb
38	2021-05-21T12:09:22.756Z	-8.4206	112.332	106	5.8	mb
39	2021-04-10T23:54:58.852Z	-8.3613	112.469	113.16	5.1	mb
40	2021-04-10T12:49:16.778Z	-8.828	112.3753	66.43	4	mb
41	2021-04-10T07:00:15.485Z	-8.5707	112.5054	67	6	mb
42	2020-10-28T06:49:15.007Z	-8.5172	112.4335	85.06	4.1	mb
43	2020-07-04T19:09:22.584Z	-8.9337	112.3761	94.19	4.8	mb
44	2020-04-15T09:50:00.684Z	-8.597	112.5379	83.3	4.3	mb
45	2020-04-07T08:44:10.660Z	-9.3944	112.3674	59.11	4.3	mb
46	2020-04-07T08:03:00.023Z	-9.3569	112.3524	52.07	4.9	mb
47	2020-01-04T22:55:47.842Z	-8.5966	112.5814	84.15	4.7	mb
48	2019-11-29T19:52:43.046Z	-8.6778	112.3972	119.45	4.2	mb
49	2019-08-24T12:45:51.418Z	-8.5691	112.5809	79.99	4.1	mb
50	2019-05-16T14:39:02.534Z	-8.8569	112.5209	86.74	4.7	mb
51	2019-03-10T09:21:46.551Z	-9.2941	112.6658	65.17	5.1	mb
52	2019-02-13T19:58:47.640Z	-8.989	112.591	76.09	4.7	mb
53	2018-08-10T08:02:37.790Z	-8.9191	112.4763	89.73	4.3	mb

54	2018-08-08T06:09:23.550Z	-8.7694	112.4729	78.83	4.9	mb
55	2018-07-28T21:46:53.350Z	-9.4497	112.9341	51.63	4.4	mb
56	2018-07-28T00:14:03.850Z	-9.1026	112.8674	56.64	4.8	mb
57	2018-07-19T17:43:54.400Z	-9.4947	112.8012	39.89	4.6	mb
58	2018-07-19T12:17:09.140Z	-9.4199	112.9044	35	4.4	mb
59	2018-06-19T08:39:40.120Z	-9.2157	112.9014	25.17	4.4	mb
60	2018-05-11T07:54:25.410Z	-9.4004	112.424	48.25	4.4	mb
61	2017-12-23T21:22:38.220Z	-9.1504	112.4266	51.76	4.2	mb
62	2017-11-30T18:43:57.630Z	-9.4154	112.9803	59.76	4.5	mb
63	2017-04-27T07:03:13.120Z	-8.8121	112.4703	75.48	4.6	mb
64	2017-04-08T08:17:15.140Z	-8.1218	112.6216	61.71	3.9	mb
65	2017-01-29T11:57:29.240Z	-9.4266	112.9103	62.99	4.8	mb
66	2016-10-19T10:06:00.010Z	-9.428	112.9574	58.81	4	mb
67	2016-10-11T11:47:26.440Z	-8.4385	112.789	144.39	4	mb
68	2016-09-18T03:27:10.450Z	-8.9565	112.4156	82.37	4.2	mb
69	2016-05-06T17:14:46.720Z	-9.4775	112.9412	53.87	4.1	mb
70	2016-03-15T09:01:34.340Z	-8.7927	112.847	66.11	4	mb
71	2016-03-02T06:09:12.940Z	-8.6191	112.5355	78.32	5.1	mb
72	2015-09-10T16:19:23.630Z	-8.6226	112.4874	66.21	4.8	mb
73	2015-09-08T01:06:27.300Z	-8.4151	112.8838	31.02	4	mb
74	2015-07-26T11:26:13.460Z	-9.3764	112.6786	63.67	4	mb
75	2015-07-26T07:05:10.130Z	-9.2585	112.6695	52	5.9	mb
76	2015-07-09T19:47:48.750Z	-8.5802	112.5217	82.37	4	mb
77	2015-05-01T02:46:22.140Z	-9.4395	112.9109	61.38	5	mb
78	2015-03-10T23:31:22.470Z	-8.5156	112.5641	122.82	4.3	mb
79	2014-11-28T05:27:59.600Z	-9.0587	112.5287	47.72	4.1	mb
80	2014-09-06T19:50:21.090Z	-9.4391	112.5873	35	4.4	mb
81	2014-08-17T20:15:16.820Z	-9.3015	112.5382	58.34	4.3	mb
82	2014-06-06T22:18:39.580Z	-9.4914	112.9375	56.99	4.3	mb
83	2014-05-28T13:49:04.390Z	-9.0558	112.8697	76.17	4.4	mb
84	2014-02-11T06:46:18.680Z	-8.5831	112.5604	89	4.2	mb
85	2013-11-26T11:29:53.750Z	-9.4455	112.9276	61.39	4	mb
86	2013-10-05T11:10:21.520Z	-8.6832	112.5266	77.73	4.7	mb
87	2013-05-18T11:08:19.940Z	-9.377	112.472	35	4.4	mb
88	2012-08-07T14:32:13.690Z	-9.284	112.437	50.6	4.5	mb
89	2012-06-26T05:05:25.130Z	-8.583	112.544	75.9	4.6	mb
90	2011-06-19T16:35:45.910Z	-9.499	112.838	49.2	4.3	mb
91	2011-06-13T03:17:00.890Z	-8.717	112.461	76.4	4.2	mb
92	2011-05-18T05:01:39.470Z	-9.292	112.561	35	5.1	mb
93	2011-05-17T00:14:57.650Z	-9.203	112.585	28	5.7	mb
94	2011-02-10T23:19:29.940Z	-8.358	112.78	153.2	4.6	mb
95	2011-02-09T04:25:56.430Z	-8.921	112.532	85.3	4.2	mb
96	2010-12-19T19:15:40.140Z	-8.72	112.472	79.4	4.3	mb
97	2010-11-18T20:47:57.280Z	-8.942	112.402	12.9	4.2	mb
98	2010-08-16T22:19:17.250Z	-8.546	112.53	73.6	5	mb
99	2010-06-06T16:57:26.980Z	-8.572	112.451	87.6	5.1	mb
100	2010-06-04T16:47:27.770Z	-9.001	112.427	34.1	4.8	mb
101	2010-05-21T19:56:53.860Z	-9.463	112.844	51.3	4.6	mb
102	2010-04-02T04:07:36.100Z	-9.162	112.811	51.9	4.4	mb
103	2010-02-14T13:41:04.270Z	-8.973	112.569	106.3	4.9	mb

Lampiran 2. Data Kepadatan Penduduk

No.	Kecamatan	Kepadatan Penduduk (jiwa/km ²)
1	Donomulyo	366
2	Kalipare	677
3	Pagak	598
4	Bantur	504
5	Gedangan	467
6	Sumbermanjing	443
7	Dampit	995
8	Tirto Yudo	489
9	Ampelgading	765
10	Poncokusumo	991
11	Wajak	967
12	Turen	2.006
13	Bululawang	1.508
14	Gondanglegi	1.151
15	Pagelaran	1.704
16	Kepanjen	2.523
17	Sumber Pucung	1.654
18	Kromengan	1.129
19	Ngajum	917
20	Wonosari	951
21	Wagir	1.221
22	Pakisaji	2.459
23	Tajinan	1.491
24	Tumpang	1.135
25	Pakis	2.886
26	Jabung	588
27	Lawang	1.682
28	Singosari	1.566
29	Karangploso	1.457
30	Dau	1.663
31	Pujon	554
32	Ngantang	410
33	Kasembon	580
34	Batu	2.145
35	Junrejo	2.176
36	Bumiaji	479
37	Kedungkandang	5.216
38	Sukun	9.370
39	Klojen	1.0654
40	Blimbing	1.0270
41	Lowokwaru	7.248

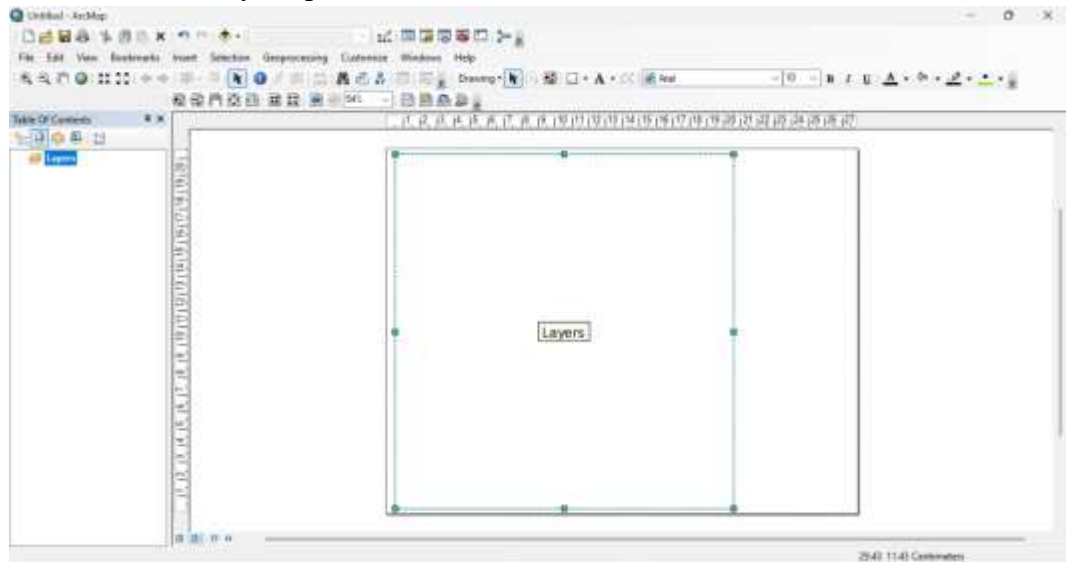
Tabel data atribut kawasan permukiman yang diperoleh dari Ina-Geoportal dan diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Shape_Area menunjukkan luas area permukiman (m^2) dan Shape_Length menunjukkan panjang batas area permukiman (m).

[illegible]

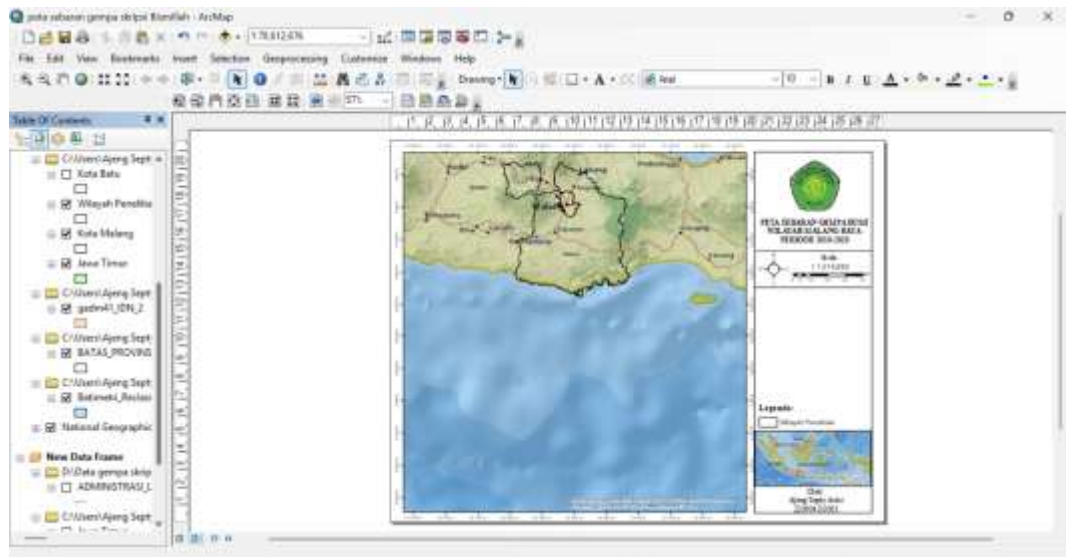
Lampiran 4. Pengolahan Data KDE Menggunakan Software Arcgis

Berikut tahapan dalam penggunaan software Arcgis untuk mengolah data:

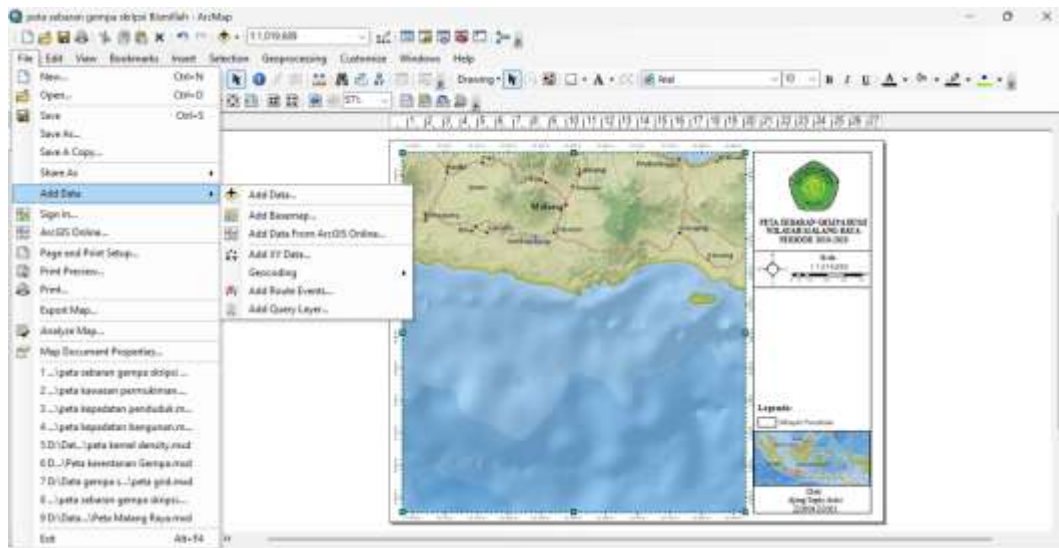
- Langkah pertama yaitu di buka Software ArcMap 10.8 dan buka halaman baru untuk membuat layout peta.



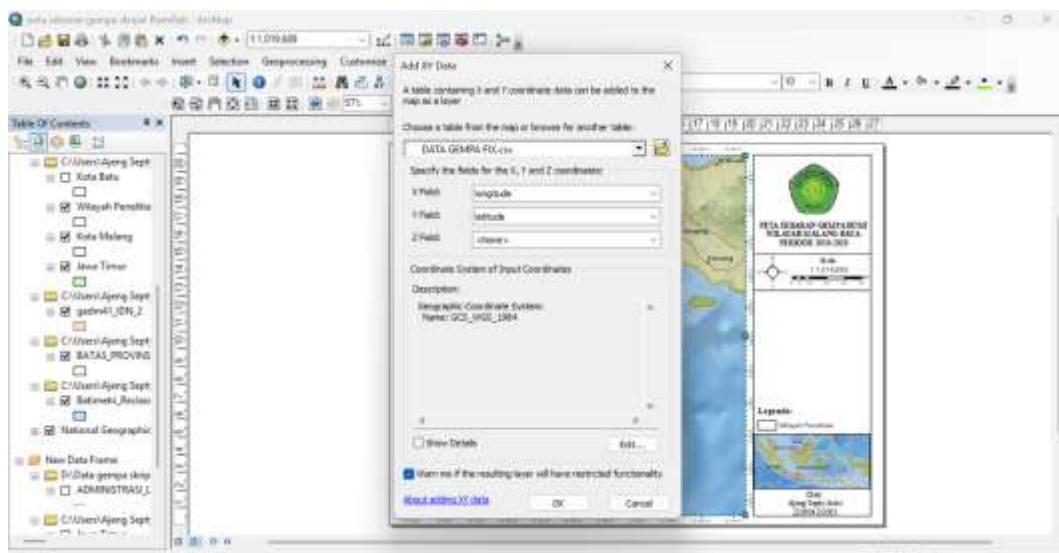
- Input Data Administrasi Wilayah Penelitian dilakukan dengan membuat peta dasar wilayah penelitian menggunakan data administrasi batas kecamatan Malang Raya. Klik kanan Layers → Add Data → pilih data administrasi batas kecamatan → Add



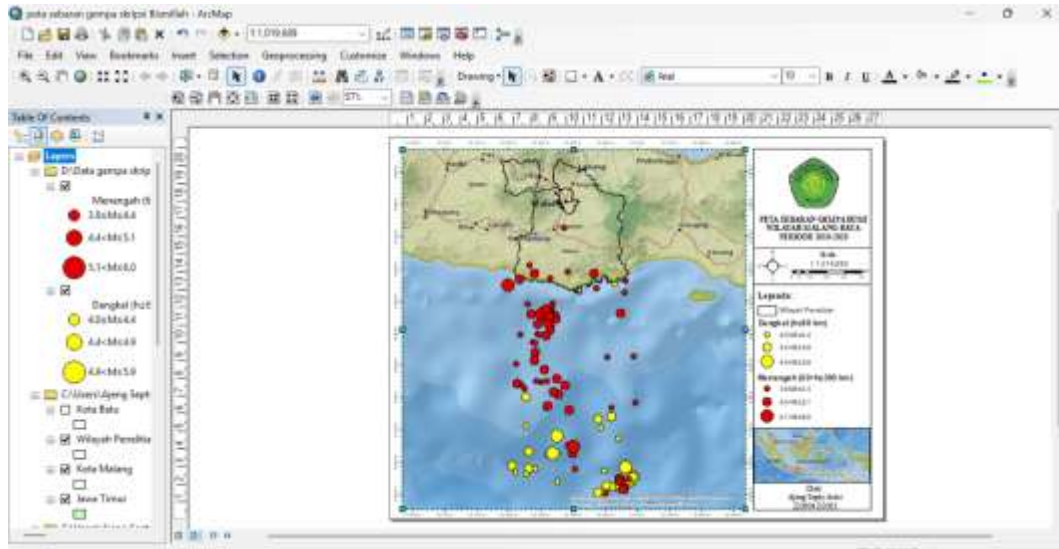
- Input Data Kejadian Gempa Bumi dengan memasukkan data kejadian gempa bumi berupa titik episenter gempa yang telah disesuaikan dengan wilayah penelitian. Klik kanan Layers → Add Data → pilih XY Data → Add.



- Setelah itu diatur sistem koordinat data menggunakan Geographic Coordinate System → WGS 1984 > ok.

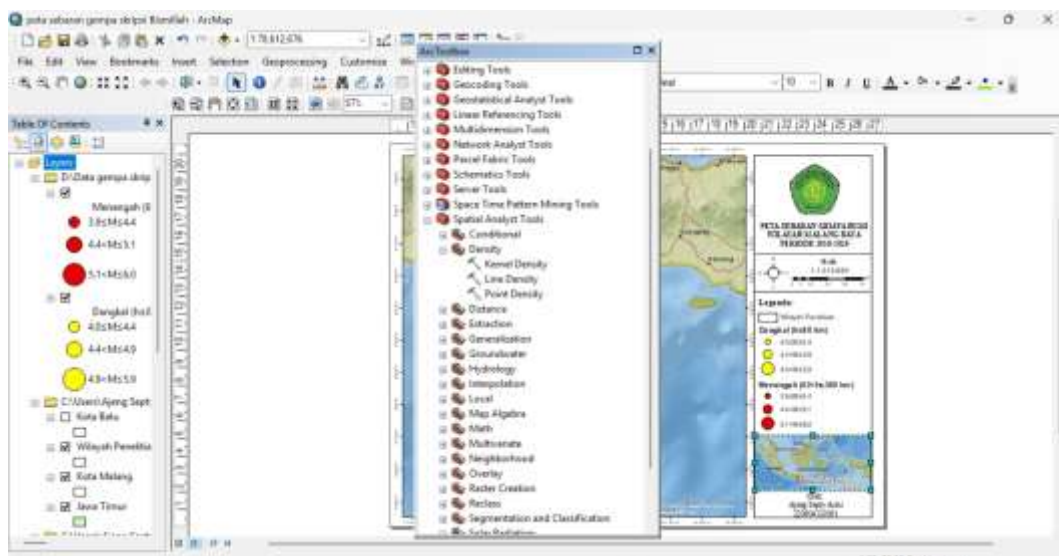


- Setelah data gempa berhasil ditampilkan, dilakukan pengecekan atribut gempa melalui Attribute Table. Data gempa kemudian diseleksi berdasarkan parameter kedalaman sesuai dengan klasifikasi penelitian. Attribute Table → Select By Attributes

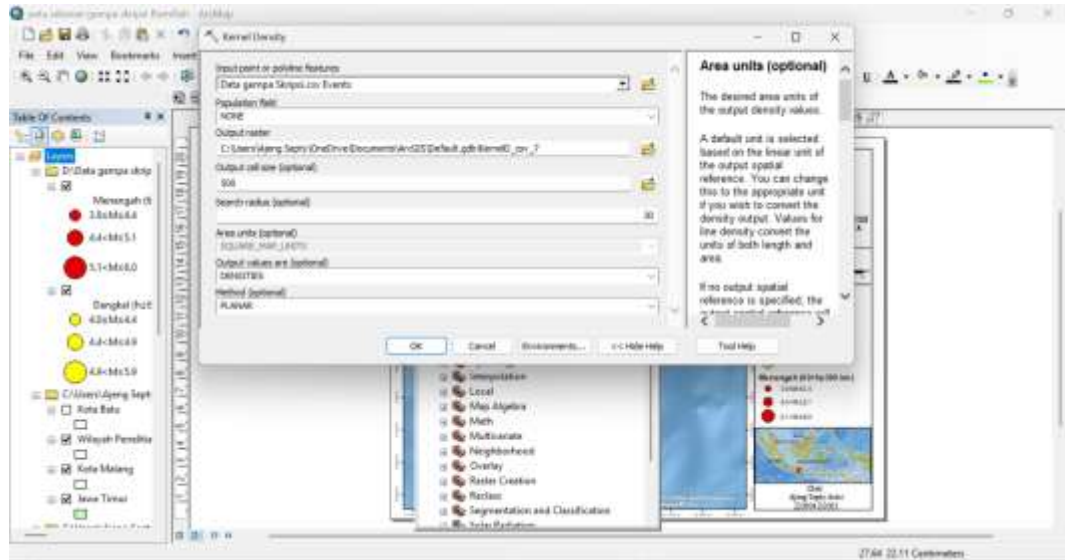


- Setelah data episenter gempa hasil seleksi diperoleh, dilakukan analisis kepadatan kejadian gempa menggunakan metode Kernel Density.

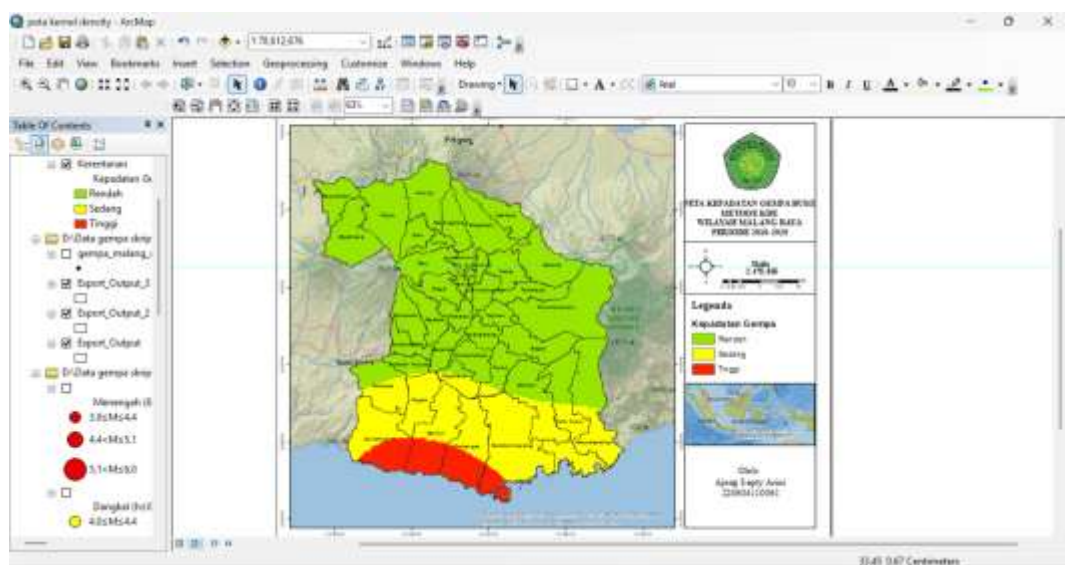
ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Density → Kernel Density.



- Parameter yang digunakan yaitu: Input point features > titik episenter gempa > Population field > None > Output cell size > 500 meter > Search radius (bandwidth) > 30 km > Area unit scale factor > Square Kilometers > ok.



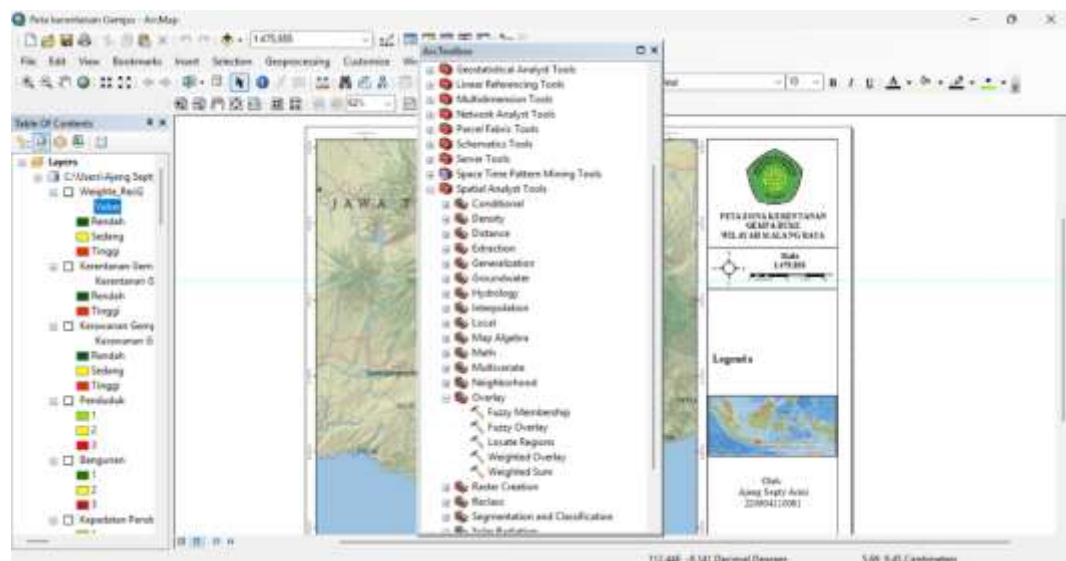
- Hasil pengolahan Kernel Density berupa data raster yang menunjukkan nilai kepadatan kejadian gempa. Raster tersebut kemudian diklasifikasikan menjadi 3 kelas menggunakan Symbology → Classified untuk membedakan tingkat kepadatan gempa rendah, sedang, dan tinggi.



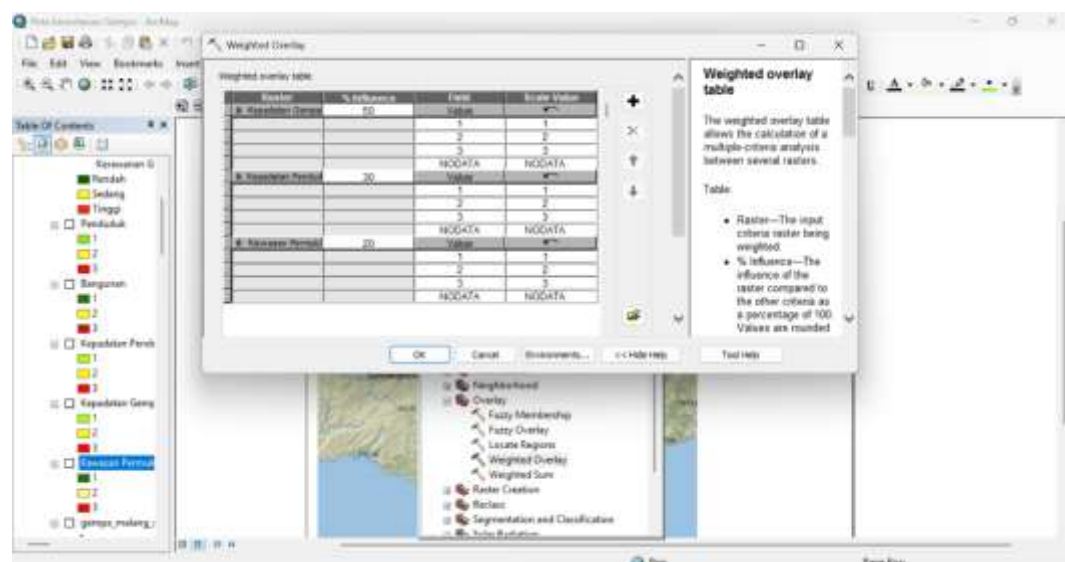
Lampiran 5. Overlay Parameter dan Pembuatan Peta Kerentanan Menggunakan Software Arcgis

Berikut tahapan pembuatan peta kerentanan menggunakan software Arcgis:

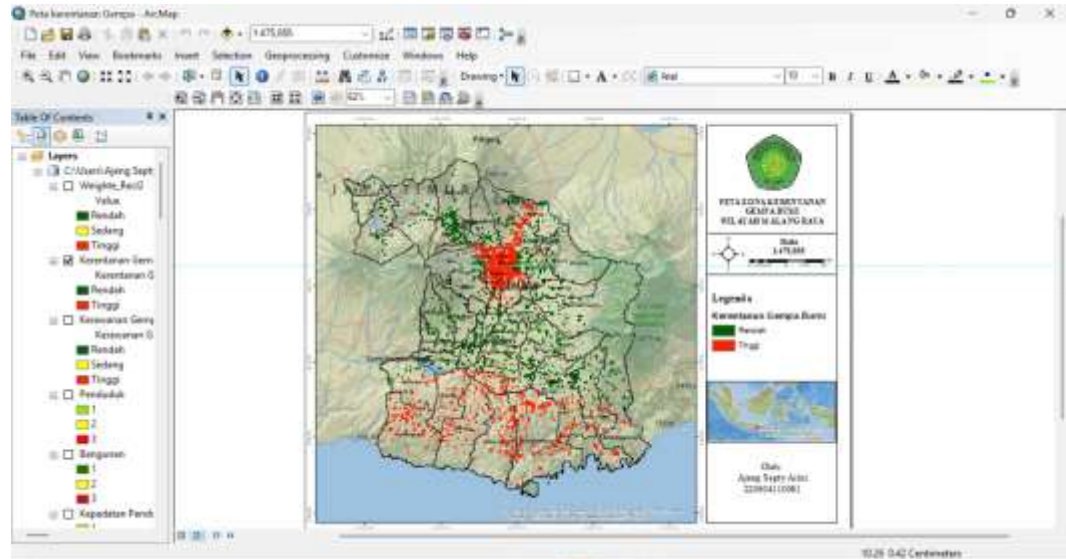
- Langkah pertama pengumpulan tiga parameter yaitu peta hasil KDE, peta kepadatan penduduk, dan peta kawasan permukiman. Dan diklasifikasikan masing-masing menjadi 3 tingkat yaitu: rendah, sedang, dan tinggi.
- Hasil klasifikasi dari tiga parameter kemudian dilakukan proses *overlay* menggunakan metode *Weighted Overlay*.



- Setelah itu masing-masing parameter diberikan bobot berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap kerentanan gempa, yaitu kepadatan gempa (KDE) sebesar 50%, kepadatan penduduk sebesar 30%, dan kawasan permukiman sebesar 20%.



- Selanjutnya ArcGIS melakukan perhitungan berdasarkan nilai kelas dan bobot setiap parameter sehingga menghasilkan peta tingkat kerentanan gempa wilayah Malang Raya yang diklasifikasikan menjadi kelas rendah, sedang, dan tinggi.

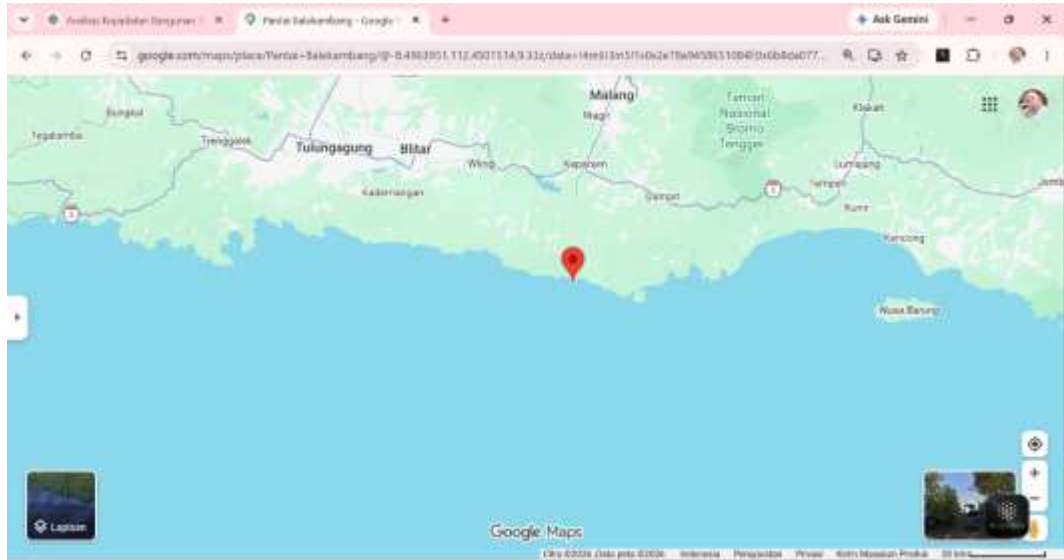


Lampiran 6. Contoh Perhitungan *Kernel Density Estimation*

1. Menentukan lokasi elevasi (x) yang dihitung kerapatan gempa. Sebagai contoh lokasi yang dipilih yaitu Pantai Balekambang dengan koordinat $(-8,4034, 112,5391)$.

x (latitude) = $-8,4034$

x (longitude) = $112,5391$



Contoh lokasi elevasi (x) yang merupakan Pantai Balekambang.

Sumber: Google Maps (2026)

2. Menghitung jarak antara lokasi elevasi dengan titik episenter gempa pertama (x_1) dengan koordinat:

(x_1) latitude = $-8,568$

(x_1) longitude = $112,9143$

Selisih Koordinat:

$(x-x_1)$ latitude = $(-8,4034) - (-8,568) = 0,1646$

Ubah ke km = $0,1646 \times 111 = 18,2706$ km

$(x-x_1)$ longitude = $112,5391 - 112,9143 = -0,3752$

Ubah ke km = $(-0,3752) \times 111 = -41,6482$ km

Jarak *Euclidean*:

$$d^i = \sqrt{(x - x_1 \text{ lat})^2 + (x - x_1 \text{ lon})^2}$$

$$d^i = \sqrt{(18,2706)^2 + (-41,6482)^2}$$

$$d^i = 45.47861137 \text{ km}$$

3. Menentukan nilai jarak ternormalisasi ($u^T u$), dimana nilai $h = 30$ km.

$$u^T u = \frac{d^2}{h^2}$$

$$u^T u = \frac{(45,47861137)^2}{(30)^2}$$

$$u^T u = 2,298116$$

dengan syarat:

$$u^T u \leq 1$$

Jika:

$$u^T u > 1$$

maka nilai kernel = 0 karena titik tersebut berada di luar radius bandwidth.

4. Menghitung nilai *Kernel Quartic*

Fungsi *Kernel Quartic* untuk data spasial dua dimensi yang digunakan (Silverman, 1986):

$$K_2(u) = \begin{cases} 3\pi^{-1}(1 - u^T u)^2 & \text{jika } u^T u < 1 \\ 0 & \text{jika } u^T u \geq 1 \end{cases}$$

Karena $u^T u = 2,2982 \geq 1$, maka:

$$K_2(u) = 0$$

Perhitungan nilai kernel dilakukan pada seluruh titik kejadian gempa yang digunakan (103 data gempa). Karena jumlah data cukup banyak, proses perhitungan nilai kernel tidak dihitung secara manual. Setiap nilai kernel dari masing-masing titik gempa kemudian dijumlahkan untuk memperoleh nilai total kontribusi kepadatan gempa pada lokasi pengamatan.

5. Menghitung nilai kepadatan (KDE)

KDE dihitung menggunakan persamaan:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K_2 \left\{ \frac{1}{h} (x - X_i) \right\}$$

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K_2 \left\{ \frac{1}{h} (x - X_i) \right\}$$

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{103 \times (30)^2} \sum_{i=1}^{103} K_2 (u_i)$$

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{92.700} \sum_{i=1}^{103} K_2 (u_i)$$

Hasil penjumlahan seluruh kontribusi kernel kemudian dimasukkan ke dalam persamaan KDE sehingga diperoleh nilai kepadatan gempa pada lokasi pengamatan.

$$\hat{f}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{103} K_2(u_i)}{92.700}$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual pada lokasi Pantai Balekambang diperoleh nilai KDE sebesar:

$$\hat{f}(x) = 9,88535 \times 10^{-5}$$

Nilai tersebut menunjukkan tingkat kepadatan kejadian gempa pada titik pengamatan berdasarkan distribusi dan jarak seluruh episenter gempa terhadap lokasi tersebut.

Lampiran 7. Contoh Perhitungan *Weighted Overlay*

1. Menentukan lokasi/grid yang dihitung kerentannannya. Sebagai contoh kecamatan Klojen dengan parameter yang diklasifikasikan menjadi 3 tingkat.

KDE (kepadatan gempa) = 1

Kepadatan penduduk = 3

Kawasan permukiman = 3

2. Memberi bobot pada setiap parameter.

KDE (kepadatan gempa) = 50%

Kepadatan Penduduk = 30%

Kawasan Perukiman = 20%

3. Menghitung nilai akhir *overlay*

Perhitungan dilakukan dengan persamaan:

$$OutRas = (Ras1 \times Weight1) + (Ras2 \times Weight2) + (Ras3 \times Weight3)$$

$$OutRas = (KDE \times 50\%) + (Kepadatan penduduk \times 30\%) +$$

$$(Kawasan permukiman \times 20\%)$$

$$OutRas = (1 \times 0,5) + (3 \times 0,3) + (3 \times 0,2)$$

$$OutRas = 2$$

Nilai akhir tersebut kemudian digunakan sebagai dasar klasifikasi tingkat kerentanan menjadi kelas 1 dan 2 yang menunjukkan hasil penggabungan dari seluruh parameter berdasarkan bobot yang telah ditentukan.

.