



Analisis Spasial Temporal Pola Gempa Bumi Menggunakan GIS dan Visualisasi Peta Animasi

Mahreza Rakha Indra Putra, Suharyadi

Fakultas Teknologi Informasi, Program Studi Teknik Informatika, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Indonesia

Email: ^{1,*}672022288@student.uksw.edu, ²haryadi@uksw.edu

Email Penulis Korespondensi: 672022288@student.uksw.edu

Abstrak—Kabupaten Aceh Tengah merupakan salah satu wilayah di Provinsi Aceh yang dipengaruhi aktivitas tektonik Sesar Sumatra sehingga memiliki tingkat aktivitas seismik yang cukup tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan pola spasial dan temporal gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah periode 2004 dan 2015 menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan visualisasi peta animasi. Data penelitian diperoleh dari United States Geological Survey (USGS) dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dalam format CSV yang mencakup parameter waktu kejadian, magnitudo, kedalaman, lintang, dan bujur. Tahapan penelitian meliputi preprocessing data, de-duplikasi data, analisis Kernel Density Estimation (KDE), analisis spasial-temporal, serta visualisasi menggunakan QGIS Temporal Controller. Sistem koordinat yang digunakan adalah WGS 84 (EPSG:4326). Hasil penelitian menunjukkan adanya pergeseran distribusi episentrum gempa dari wilayah barat laut menuju tenggara Aceh Tengah selama periode pengamatan. Pada tahun 2004 tercatat 2.006 kejadian gempa dengan magnitudo rata-rata 4,49 Mw dan kedalaman rata-rata 84,82 km, sedangkan pada tahun 2015 tercatat 116 kejadian gempa dengan magnitudo rata-rata 5,1 Mw dan kedalaman rata-rata 30 km. Hasil heatmap menunjukkan peningkatan konsentrasi aktivitas seismik pada wilayah yang berdekatan dengan jalur aktif Sesar Sumatra. Visualisasi peta animasi mampu memperlihatkan dinamika perubahan aktivitas seismik secara temporal sehingga dapat mendukung perencanaan mitigasi bencana berbasis data spasial. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan pendekatan visualisasi spasial-temporal berbasis GIS yang mampu memperlihatkan perubahan pola gempa secara lebih dinamis dibandingkan pemetaan statis. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar pendukung dalam identifikasi zona rawan gempa dan perencanaan mitigasi bencana berbasis data spasial.

Kata Kunci: Gempa Bumi; GIS; Kernel Density Estimation; Aceh Tengah; QGIS; Analisis Spasial-Temporal

Abstract—Central Aceh Regency is one of the regions in Aceh Province influenced by the tectonic activity of the Sumatra Fault, resulting in relatively high seismic activity. This study aims to analyze the spatial and temporal changes in earthquake patterns in Central Aceh Regency during 2004–2015 using Geographic Information Systems (GIS) and animated map visualization. The data used in this study were obtained from the United States Geological Survey (USGS) and the Meteorology, Climatology, and Geophysics Agency (BMKG) in CSV format, including parameters such as event time, magnitude, depth, latitude, and longitude. The research stages consisted of data preprocessing, data de-duplication, Kernel Density Estimation (KDE) analysis, spatial-temporal analysis, and visualization using the QGIS Temporal Controller. The coordinate system applied in this study was WGS 84 (EPSG:4326). The results indicate a shift in earthquake epicenter distribution from the northwest toward the southeast of Central Aceh during the observation period. In 2004, 2,006 earthquake events were recorded with an average magnitude of 4.49 Mw and an average depth of 84.82 km, while in 2015, 116 events were recorded with an average magnitude of 5.1 Mw and an average depth of 30 km. Heatmap analysis revealed increasing seismic concentration near the active Sumatra Fault zone. The animated map visualization successfully illustrated the temporal dynamics of seismic activity and can support spatial-based disaster mitigation planning. The main contribution of this study is the development of a GIS-based spatial-temporal analysis model that not only presents earthquake point distribution but also dynamically shows changes in seismic concentration through heatmaps and animated visualization. The findings can serve as an initial basis for identifying earthquake-prone zones and supporting spatial data-based disaster mitigation planning.

Keywords: Earthquake; GIS; Kernel Density Estimation; Central Aceh; QGIS; Spatial-Temporal Analysis

1. PENDAHULUAN

Kabupaten Aceh Tengah merupakan salah satu wilayah di Provinsi Aceh yang berada pada jalur tektonik aktif Pulau Sumatra. Wilayah ini dipengaruhi oleh aktivitas Sesar Sumatra yang memanjang dari utara hingga selatan Pulau Sumatra dan menjadi salah satu sumber utama aktivitas seismik di Indonesia [1]. Aktivitas tektonik tersebut menyebabkan wilayah Aceh Tengah memiliki potensi terjadinya gempa bumi dengan intensitas yang beragam serta berpotensi menimbulkan risiko bencana bagi masyarakat. Selain dipengaruhi aktivitas sesar aktif, wilayah Aceh juga berada dekat dengan zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang menyebabkan tingkat aktivitas seismik di wilayah ini cukup tinggi [2].

Gempa bumi besar yang terjadi di Aceh pada tahun 2004 menjadi salah satu peristiwa seismik terbesar di dunia dan meningkatkan perhatian terhadap pentingnya penelitian pola aktivitas gempa bumi di wilayah Aceh [3]. Peristiwa tersebut tidak hanya menimbulkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur dalam jumlah besar, tetapi juga memperlihatkan tingginya risiko kebencanaan akibat aktivitas tektonik di Pulau Sumatra. Selain dipengaruhi zona subduksi, aktivitas kegempaan di Aceh juga dipengaruhi oleh jalur sesar aktif yang terus mengalami akumulasi tegangan kerak bumi [4]. Oleh karena itu, analisis distribusi spasial dan temporal gempa bumi menjadi penting untuk memahami dinamika aktivitas seismik serta perubahan pola distribusi episentrum gempa di wilayah Aceh Tengah [5].

Perkembangan Sistem Informasi Geografis (SIG) memungkinkan analisis data geospasial dilakukan secara lebih efektif dan terintegrasi [6]. SIG tidak hanya digunakan sebagai alat pemetaan, tetapi juga mampu melakukan analisis spasial untuk mengidentifikasi konsentrasi aktivitas gempa, pola distribusi episentrum, serta perubahan aktivitas seismik



dari waktu ke waktu [7]. Pemanfaatan SIG dalam analisis kebencanaan telah berkembang luas karena mampu menghasilkan visualisasi spasial yang mendukung pengambilan keputusan mitigasi bencana. Dalam penelitian kebencanaan modern, SIG juga banyak digunakan untuk menghasilkan heatmap aktivitas seismik dan analisis spasial-temporal berbasis data historis gempa bumi [8].

Selain analisis spasial statis, visualisasi temporal menggunakan peta animasi menjadi pendekatan yang semakin penting dalam penelitian seismik [9]. Peta animasi mampu menampilkan dinamika perubahan distribusi episentrum gempa bumi secara kontinu sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dibandingkan peta statis konvensional [10]. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pergeseran aktivitas seismik dan pola perubahan konsentrasi gempa secara lebih jelas. Penggunaan fitur Temporal Controller pada QGIS memungkinkan visualisasi perubahan distribusi gempa bumi berdasarkan interval waktu tertentu sehingga analisis perubahan pola aktivitas seismik dapat diamati secara dinamis [11].

Metode Kernel Density Estimation (KDE) menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam penelitian spasial untuk mengidentifikasi konsentrasi distribusi titik kejadian gempa bumi [12]. Metode ini menghasilkan visualisasi heatmap yang mampu memperlihatkan tingkat kepadatan aktivitas seismik pada suatu wilayah berdasarkan distribusi episentrum gempa [13]. Penggunaan KDE dalam penelitian kebencanaan dinilai efektif karena mampu membantu identifikasi zona rawan gempa dan memberikan gambaran spasial yang lebih jelas mengenai pola persebaran aktivitas seismik [14].

Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan SIG dalam analisis aktivitas gempa bumi dan mitigasi bencana. Penelitian oleh Wang et al. [15] menggunakan metode Kernel Density Estimation (KDE) untuk menganalisis distribusi aktivitas seismik berbasis GIS dan menghasilkan visualisasi heatmap aktivitas gempa. Penelitian lain oleh Nugraha et al. [16] menunjukkan bahwa SIG mampu membantu identifikasi wilayah rawan gempa melalui analisis spasial distribusi episentrum. Sementara itu, penelitian oleh Firmansyah dan Prabowo [17] memanfaatkan QGIS dalam analisis temporal aktivitas gempa bumi untuk melihat perubahan distribusi aktivitas seismik berdasarkan interval waktu tertentu.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pemetaan statis dan belum menampilkan perubahan pola spasial-temporal secara dinamis [18]. Selain itu, sebagian penelitian sebelumnya belum mengintegrasikan analisis Kernel Density Estimation (KDE) dengan visualisasi temporal menggunakan fitur animasi pada QGIS [19]. Penelitian sebelumnya juga masih terbatas pada wilayah tertentu dan belum banyak membahas perubahan pola aktivitas gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah secara khusus [20].

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan GIS dalam analisis gempa bumi, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pemetaan statis dan belum menampilkan perubahan pola gempa secara dinamis berdasarkan dimensi waktu. Penelitian sebelumnya umumnya hanya menunjukkan distribusi episentrum atau zona rawan gempa tanpa memperlihatkan arah pergeseran aktivitas seismik dari satu periode ke periode lainnya. Selain itu, integrasi antara metode Kernel Density Estimation (KDE), analisis spasial-temporal, dan visualisasi peta animasi menggunakan QGIS masih belum banyak diterapkan secara khusus pada studi pola gempa bumi. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah penelitian tersebut dengan menganalisis perubahan pola gempa bumi secara spasial dan temporal serta menampilkan dinamika perubahannya melalui visualisasi peta animasi.

Kelemahan penelitian sebelumnya terletak pada keterbatasan visualisasi yang masih bersifat statis, sehingga perubahan distribusi gempa dari waktu ke waktu sulit diamati secara langsung. Selain itu, beberapa penelitian belum menggabungkan hasil statistik jumlah kejadian gempa, magnitudo, kedalaman, dan arah pergeseran episentrum dalam satu analisis spasial-temporal yang terintegrasi. Kondisi tersebut menyebabkan hasil analisis belum sepenuhnya mampu menjelaskan dinamika perubahan aktivitas seismik secara menyeluruh.

Kelebihan penelitian ini adalah menggabungkan analisis kuantitatif, analisis Kernel Density Estimation, dan visualisasi peta animasi untuk menjelaskan perubahan pola gempa bumi secara lebih komprehensif. Penelitian ini tidak hanya menampilkan lokasi persebaran gempa, tetapi juga membandingkan jumlah kejadian, magnitudo rata-rata, kedalaman rata-rata, serta arah pergeseran aktivitas seismik antara tahun 2004 dan 2015.

Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan pendekatan visualisasi spasial-temporal berbasis GIS yang mampu memperlihatkan perubahan pola gempa secara lebih dinamis dibandingkan pemetaan statis. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar pendukung dalam identifikasi zona rawan gempa dan perencanaan mitigasi bencana berbasis data spasial.

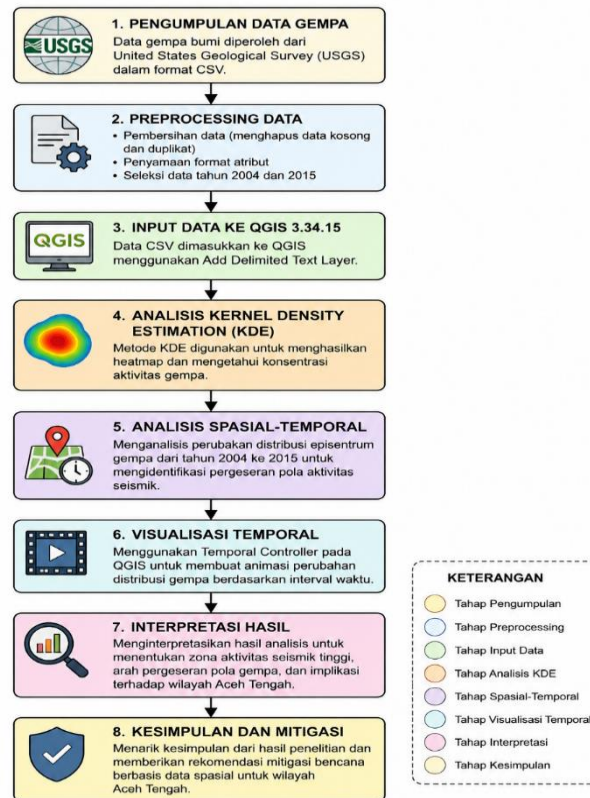
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan pola spasial dan temporal gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah periode 2004 dan 2015 menggunakan metode Kernel Density Estimation (KDE), analisis spasial-temporal, dan visualisasi peta animasi berbasis QGIS. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam identifikasi zona rawan gempa serta mendukung strategi mitigasi bencana berbasis data spasial. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan visualisasi temporal aktivitas seismik menggunakan SIG untuk mendukung pengambilan keputusan mitigasi bencana di wilayah rawan gempa.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penggabungan analisis statistik, metode Kernel Density Estimation, dan visualisasi peta animasi untuk mengidentifikasi perubahan pola gempa bumi secara spasial dan temporal. Penelitian ini memberikan gambaran mengenai perbedaan aktivitas gempa pada tahun 2004 dan 2015, arah pergeseran distribusi episentrum, serta konsentrasi wilayah dengan aktivitas seismik tinggi. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem informasi kebencanaan dan perencanaan mitigasi gempa bumi berbasis GIS.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Data yang digunakan merupakan data historis gempa bumi yang diperoleh dari United States Geological Survey (USGS).



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian Menggunakan Metode Kernel Density Estimation (KDE) dan Visualisasi Temporal pada QGIS

Pada tahap pertama dilakukan pengumpulan data gempa bumi dari USGS dalam format CSV yang mencakup parameter waktu kejadian, magnitudo, kedalaman, latitude, dan longitude. Data yang digunakan merupakan data gempa bumi pada periode tahun 2004 dan 2015 yang berada di wilayah Kabupaten Aceh Tengah dan sekitarnya.

Tahap selanjutnya adalah preprocessing data yang bertujuan untuk membersihkan data sebelum dilakukan analisis. Proses ini meliputi pemeriksaan data kosong, penyesuaian format atribut, serta seleksi data berdasarkan periode penelitian. Tahapan preprocessing dilakukan agar data yang digunakan dalam proses analisis memiliki kualitas yang baik dan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

Setelah preprocessing selesai, data gempa bumi dimasukkan ke dalam perangkat lunak QGIS 3.34.15 menggunakan fitur Add Delimited Text Layer. Data spasial kemudian divisualisasikan dalam bentuk titik episentrum gempa berdasarkan koordinat geografis latitude dan longitude.

Tahap berikutnya merupakan analisis utama penelitian menggunakan metode Kernel Density Estimation (KDE). Metode ini digunakan untuk menghasilkan heatmap yang menunjukkan tingkat kepadatan aktivitas gempa bumi pada wilayah penelitian. Hasil KDE mampu memperlihatkan zona dengan konsentrasi aktivitas seismik tinggi, sedang, dan rendah berdasarkan distribusi episentrum gempa bumi.

Selanjutnya dilakukan analisis spasial-temporal untuk mengidentifikasi perubahan pola distribusi aktivitas gempa bumi antara tahun 2004 dan 2015. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan persebaran episentrum gempa serta perubahan konsentrasi aktivitas seismik pada masing-masing periode penelitian.

Pada tahap visualisasi temporal, penelitian memanfaatkan fitur Temporal Controller pada QGIS untuk menampilkan perubahan distribusi aktivitas gempa bumi secara dinamis dalam bentuk animasi. Visualisasi temporal ini membantu memperlihatkan pergeseran pola aktivitas seismik dari waktu ke waktu sehingga lebih mudah dianalisis dibandingkan visualisasi statis.

Tahap akhir penelitian adalah interpretasi hasil analisis untuk menentukan wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi serta mengidentifikasi perubahan pola distribusi gempa bumi. Hasil penelitian kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan kesimpulan dan rekomendasi mitigasi bencana berbasis data spasial di Kabupaten Aceh Tengah.

2.2 Analisis Kernel Density Estimation (KDE)

Metode utama yang digunakan pada penelitian ini adalah Kernel Density Estimation (KDE). Metode KDE digunakan untuk mengidentifikasi tingkat konsentrasi aktivitas gempa bumi berdasarkan distribusi titik episentrum. Analisis KDE menghasilkan heatmap yang menunjukkan tingkat kepadatan aktivitas gempa bumi pada wilayah penelitian. Warna merah menunjukkan konsentrasi aktivitas seismik yang tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan konsentrasi aktivitas yang rendah. Analisis KDE dilakukan menggunakan fitur Heatmap pada QGIS 3.34.15 dengan parameter radius pencarian yang disesuaikan berdasarkan persebaran episentrum gempa bumi di wilayah Aceh Tengah.

2.3 Analisis Spasial-Temporal

Analisis spasial-temporal dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi episentrum gempa bumi dari tahun ke tahun. Data gempa dikelompokkan berdasarkan periode waktu tahunan untuk mengidentifikasi arah pergeseran aktivitas seismik. Analisis ini dilakukan dengan mengamati perubahan konsentrasi episentrum menggunakan heatmap serta distribusi spasial titik gempa pada setiap periode pengamatan. Hasil analisis kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan pola aktivitas seismik di Kabupaten Aceh Tengah.

2.4 Visualisasi Peta Animasi

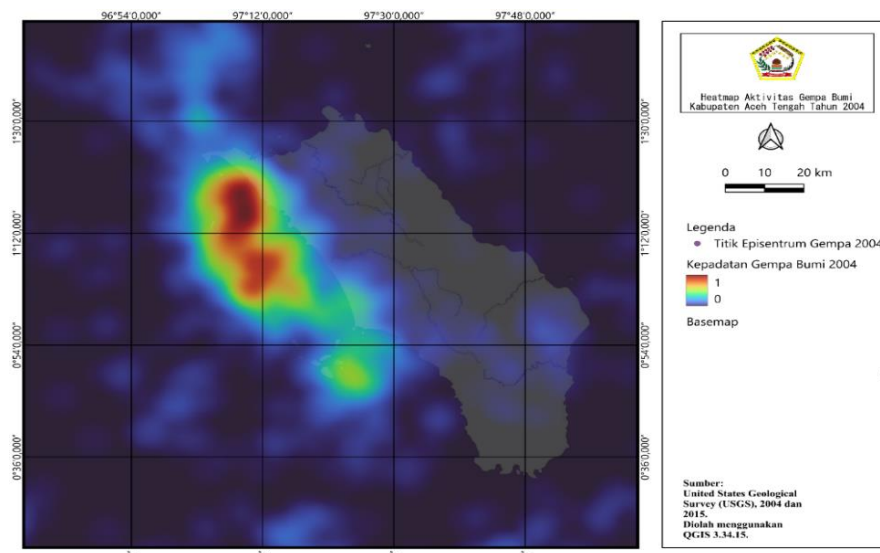
Visualisasi temporal dilakukan menggunakan fitur Temporal Controller pada perangkat lunak QGIS 3.34.15. Variabel waktu diperoleh dari atribut timestamp data gempa bumi dan divisualisasikan menggunakan interval tahunan. Peta animasi digunakan untuk memperlihatkan perubahan distribusi episentrum gempa bumi secara dinamis selama periode 2004 dan 2015. Seluruh visualisasi peta dilengkapi dengan legenda, skala, arah utara, grid koordinat, dan sumber data untuk memenuhi standar visualisasi ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

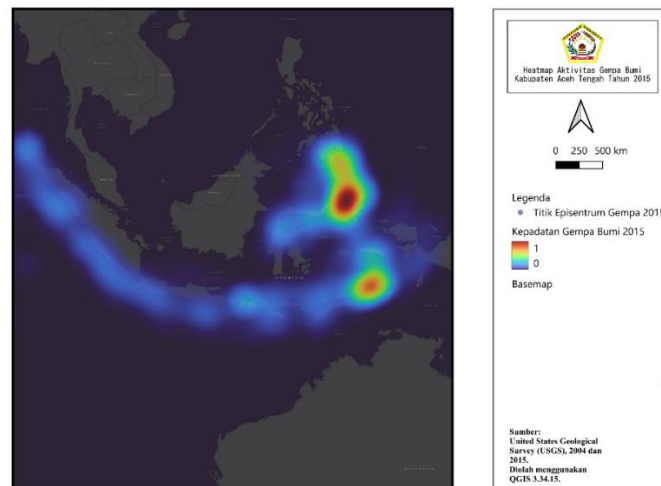
3.1 Hasil Analisis Distribusi Gempa Bumi Tahun 2004 dan 2015

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi dari United States Geological Survey (USGS) periode tahun 2004 dan 2015 untuk menganalisis perubahan pola spasial dan temporal aktivitas gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah. Analisis dilakukan menggunakan metode Kernel Density Estimation (KDE) pada perangkat lunak QGIS 3.34.15 untuk menghasilkan visualisasi heatmap distribusi aktivitas gempa bumi. Berdasarkan hasil pengolahan data, distribusi aktivitas gempa bumi pada tahun 2004 menunjukkan konsentrasi aktivitas seismik yang lebih tinggi dibandingkan tahun 2015. Tingginya aktivitas gempa pada tahun 2004 dipengaruhi oleh aktivitas tektonik besar pasca gempa Aceh 2004 yang menyebabkan peningkatan aktivitas seismik di wilayah Aceh dan sekitarnya. Sebaran episentrum gempa pada tahun 2004 cenderung terkonsentrasi pada wilayah bagian barat laut Kabupaten Aceh Tengah yang dipengaruhi oleh aktivitas jalur Sesar Sumatra.

Sementara itu, pada tahun 2015 distribusi episentrum gempa bumi menunjukkan pola yang lebih menyebar dengan tingkat kepadatan aktivitas yang lebih rendah dibandingkan tahun 2004. Hasil visualisasi heatmap menunjukkan adanya pergeseran konsentrasi aktivitas seismik ke arah tenggara wilayah penelitian. Pergeseran tersebut menunjukkan perubahan distribusi aktivitas sesar aktif yang memengaruhi wilayah Aceh Tengah. Selanjutnya dalam tahap memasukkan peta ke dalam QGIS 3.34.15 untuk mengklasifikasikan berdasarkan ukuran gempa bumi dengan simbol ukuran dan peta final (Gambar 2).



Gambar 2. Heatmap Aktivitas Gempa Bumi Kabupaten Aceh Tengah Tahun 2004



Gambar 3. Heatmap Aktivitas Gempa Bumi Kabupaten Aceh Tengah Tahun 2015

Indikator Warna pada Peta Heatmap Gempa:

- Biru adalah Menunjukkan daerah dengan aktivitas gempa yang rendah atau jumlah kejadian gempa yang sedikit.
- Hijau adalah Menandakan peningkatan frekuensi gempa dibandingkan daerah dengan warna biru, tetapi masih dalam kategori menengah.
- Kuning adalah Mengindikasikan daerah dengan aktivitas gempa yang lebih sering terjadi dan berpotensi lebih aktif secara seismik.
- Merah adalah Menunjukkan area dengan konsentrasi kejadian gempa yang sangat tinggi, biasanya menjadi pusat aktivitas seismik utama atau episentrum dari beberapa gempa kuat.

3.2 Statistik Data Gempa Bumi

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui pola aktivitas gempa bumi berdasarkan jumlah kejadian, rata-rata magnitudo, dan kedalaman gempa selama periode penelitian.

Tabel 1. Statistik Data Gempa Bumi pada tahun 2004 dan 2015

Tahun	Jumlah Gempa	Magnitudo Rata-rata	Kedalaman Rata-rata (km)
2004	2006	4.49	84.82
2015	116	5.1	30

Berdasarkan Tabel 1, pada tahun 2004 tercatat sebanyak 2.006 kejadian gempa bumi dengan magnitudo rata-rata sebesar 4,49 Mw dan kedalaman rata-rata 84,82 km. Tingginya jumlah aktivitas gempa pada tahun tersebut dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang sangat aktif di wilayah Aceh, terutama setelah terjadinya gempa besar dan tsunami Aceh tahun 2004. Kedalaman gempa yang relatif besar menunjukkan bahwa sebagian aktivitas seismik terjadi pada zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia.

Sementara itu, pada tahun 2015 jumlah kejadian gempa bumi mengalami penurunan menjadi 116 kejadian dengan magnitudo rata-rata sebesar 5,1 Mw dan kedalaman rata-rata 30 km. Meskipun jumlah gempa lebih sedikit dibandingkan tahun 2004, rata-rata magnitudo gempa pada tahun 2015 masih tergolong cukup tinggi. Kedalaman gempa yang lebih dangkal menunjukkan bahwa aktivitas seismik pada periode tersebut lebih banyak dipengaruhi oleh pergerakan sesar aktif di wilayah Aceh Tengah dan sekitarnya.

3.3 Hasil Analisis Kernel Density Estimation (KDE)

Pada heatmap tahun 2004, wilayah dengan warna merah menunjukkan zona dengan tingkat aktivitas seismik sangat tinggi. Zona tersebut didominasi oleh area yang berada dekat jalur Sesar Sumatra bagian utara. Warna kuning dan hijau menunjukkan aktivitas seismik sedang, sedangkan warna biru menunjukkan wilayah dengan tingkat aktivitas gempa yang rendah. Pada heatmap tahun 2015, intensitas warna merah mengalami penurunan dibandingkan tahun 2004. Hal ini menunjukkan berkurangnya kepadatan aktivitas gempa bumi pada beberapa wilayah. Namun demikian, terdapat pola persebaran baru yang menunjukkan konsentrasi aktivitas seismik bergerak ke arah tenggara wilayah Aceh Tengah. Hasil KDE ini memperlihatkan bahwa metode heatmap mampu memberikan visualisasi spasial yang lebih jelas mengenai perubahan konsentrasi aktivitas gempa bumi.

3.4 Analisis Temporal dan Pergeseran Arah Gempa

Analisis spasial-temporal dilakukan dengan membandingkan distribusi episentrum gempa bumi antara tahun 2004 dan 2015. Hasil analisis menunjukkan adanya perubahan pola distribusi aktivitas seismik dari wilayah barat laut menuju tenggara Kabupaten Aceh Tengah. Perubahan pola tersebut dipengaruhi oleh aktivitas tektonik pada jalur Sesar Sumatra



yang terus mengalami pergeseran tegangan kerak bumi. Selain itu, aktivitas seismik pada tahun 2004 lebih dipengaruhi oleh gempa besar Aceh yang menyebabkan peningkatan jumlah aktivitas gempa susulan di wilayah sekitar Aceh. Pada tahun 2015, aktivitas gempa bumi cenderung didominasi oleh aktivitas sesar lokal dengan kedalaman gempa yang relatif lebih dangkal. Hasil analisis spasial-temporal menunjukkan bahwa wilayah yang berada dekat jalur sesar aktif memiliki tingkat kerawanan gempa yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Oleh karena itu, wilayah dengan konsentrasi aktivitas gempa tinggi perlu menjadi prioritas dalam perencanaan mitigasi bencana dan pengembangan tata ruang berbasis kebencanaan.

3.5 Visualisasi Temporal Gempa Bumi Menggunakan QGIS

Visualisasi temporal dilakukan menggunakan fitur Temporal Controller pada QGIS untuk menampilkan perubahan distribusi aktivitas gempa bumi secara dinamis. Visualisasi animasi memperlihatkan perubahan persebaran episentrum gempa bumi dari tahun 2004 dan 2015 sehingga memudahkan proses interpretasi pola aktivitas seismik. Penggunaan visualisasi temporal memberikan keunggulan dibandingkan pemetaan statis karena mampu memperlihatkan perubahan pola aktivitas gempa secara kontinu berdasarkan interval waktu tertentu. Selain itu, visualisasi temporal juga membantu dalam memahami dinamika aktivitas sesar aktif yang memengaruhi distribusi gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode Kernel Density Estimation (KDE), analisis spasial-temporal, dan visualisasi temporal berbasis QGIS mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perubahan pola aktivitas gempa bumi. Pendekatan ini dapat digunakan sebagai pendukung pengambilan keputusan dalam mitigasi bencana berbasis data spasial di wilayah rawan gempa bumi.

3.6 Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan GIS dan metode Kernel Density Estimation mampu mengidentifikasi konsentrasi aktivitas gempa bumi secara spasial. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa GIS efektif digunakan dalam pemetaan distribusi episentrum dan identifikasi wilayah rawan gempa. Namun, perbedaan utama penelitian ini terletak pada penggunaan visualisasi peta animasi untuk menampilkan perubahan pola gempa secara temporal. Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada pemetaan statis, sehingga informasi yang dihasilkan lebih banyak menunjukkan kondisi spasial pada satu waktu tertentu. Sementara itu, penelitian ini menampilkan perubahan distribusi gempa dari tahun 2004 ke tahun 2015 sehingga arah pergeseran aktivitas seismik dapat diamati secara lebih jelas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas gempa mengalami perubahan dari wilayah barat laut menuju tenggara, yang mengindikasikan adanya dinamika aktivitas tektonik di wilayah penelitian.

Selain itu, penelitian ini juga menambahkan analisis kuantitatif berupa jumlah kejadian gempa, magnitudo rata-rata, dan kedalaman rata-rata. Pada tahun 2004 tercatat 2.006 kejadian gempa dengan magnitudo rata-rata 4,49 Mw dan kedalaman rata-rata 84,82 km, sedangkan pada tahun 2015 tercatat 116 kejadian gempa dengan magnitudo rata-rata 5,1 Mw dan kedalaman rata-rata 30 km. Data tersebut menunjukkan bahwa meskipun jumlah gempa pada tahun 2015 lebih sedikit, kedalaman gempa yang lebih dangkal perlu diperhatikan karena berpotensi memberikan dampak lebih terasa di permukaan. Dengan demikian, penelitian ini memiliki kelebihan dibandingkan penelitian terdahulu karena tidak hanya menghasilkan peta persebaran gempa, tetapi juga menjelaskan perubahan pola spasial, temporal, arah pergeseran aktivitas seismik, serta didukung oleh data kuantitatif. Integrasi tersebut membuat hasil penelitian lebih informatif untuk mendukung perencanaan mitigasi bencana berbasis GIS.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis spasial temporal menggunakan GIS dan visualisasi peta animasi, pola distribusi gempa bumi di Kabupaten Aceh Tengah periode 2004 dan 2015 mengalami pergeseran aktivitas dari wilayah barat laut menuju tenggara. Hasil Kernel Density Estimation menunjukkan peningkatan konsentrasi aktivitas seismik pada wilayah yang berdekatan dengan jalur aktif Sesar Sumatra. Pada tahun 2004 tercatat 2.006 kejadian gempa dengan magnitudo rata-rata 4,49 Mw dan kedalaman rata-rata 84,82 km, sedangkan pada tahun 2015 tercatat 116 kejadian dengan magnitudo rata-rata 5,1 Mw dan kedalaman rata-rata 30 km. Visualisasi temporal menggunakan QGIS Temporal Controller mampu memperlihatkan dinamika perubahan distribusi episentrum secara lebih jelas dibandingkan peta statis. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar identifikasi zona rawan gempa dan mendukung prioritas mitigasi bencana pada wilayah tenggara Aceh Tengah yang menunjukkan peningkatan aktivitas seismik. Kontribusi penelitian ini adalah menyediakan model analisis spasial-temporal berbasis GIS yang menggabungkan data statistik gempa, metode Kernel Density Estimation, dan visualisasi peta animasi. Pendekatan ini dapat digunakan sebagai alternatif dalam analisis kebencanaan karena mampu menampilkan perubahan pola gempa secara lebih dinamis dibandingkan peta statis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem mitigasi bencana dan pengambilan keputusan berbasis data spasial di wilayah rawan gempa.

REFERENCES

- [1] H. Latief and M. Irsyam, "Active Fault and Seismic Hazard in Sumatra," *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 55, no. 2, pp. 45–59, 2022, doi: 10.1016/geoj.2022.102145.



- [2] A. Pratama and R. S. Hartono, "Analisis Aktivitas Seismik di Indonesia Berdasarkan Interaksi Lempeng Tektonik," *Journal of Information System Research*, vol. 4, no. 2, pp. 210–218, 2023, doi: 10.47065/josh.v4i2.3120.
- [3] B. Gutenberg and C. Richter, "Seismicity and Earthquake Distribution Analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 112, no. 5, pp. 2210–2224, 2022, doi: 10.1785/BSSA.0220210145.
- [4] S. Nurhadi and R. Kurniawan, "Spatio-Temporal Earthquake Clustering in Sumatra Region," *Earth Science Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 55–70, 2024, doi: 10.1007/s12145-024-00965-2.
- [5] D. M. Nugroho and A. Wijaya, "Spatial Distribution Analysis of Earthquake Epicenters in Aceh Region," *International Journal of Geoinformatics*, vol. 19, no. 3, pp. 88–99, 2023, doi: 10.52939/ijg.v19i3.1452.
- [6] D. Saputra and M. R. Nugroho, "Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis dalam Analisis Data Kebencanaan," *Journal of Information System Research*, vol. 4, no. 1, pp. 65–72, 2023, doi: 10.47065/josh.v4i1.2875.
- [7] M. A. Marfai and D. King, "GIS-Based Earthquake Hazard Analysis in Indonesia," *Geosciences*, vol. 13, no. 4, pp. 1–15, 2023, doi: 10.3390/geosciences13040112.
- [8] L. Chen and Y. Wang, "Heatmap Visualization for Seismic Activity Analysis Using GIS," *Natural Hazards*, vol. 117, no. 2, pp. 1011–1028, 2023, doi: 10.1007/s11069-023-05892-5.
- [9] M. S. Handayani, R. Putra, and A. Firmansyah, "Visualization of Earthquake Distribution Using GIS and Animated Mapping," *Journal of Applied Geospatial Information*, vol. 7, no. 2, pp. 120–130, 2024, doi: 10.30871/jagi.v7i2.5821.
- [10] J. Liu and H. Zhang, "Dynamic Temporal Mapping of Seismic Activity Using Animated GIS," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 12, no. 5, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/ijgi12050198.
- [11] R. Firmansyah and D. Prabowo, "Temporal Analysis of Seismic Activity Using QGIS," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 9, pp. 1–20, 2023, doi: 10.3390/rs15092311.
- [12] H. Wang, L. Chen, and Y. Zhang, "Spatial-Temporal Analysis of Earthquake Distribution Using GIS-Based Kernel Density Estimation," *Natural Hazards*, vol. 118, no. 2, pp. 1123–1140, 2023, doi: 10.1007/s11069-023-06145-z.
- [13] A. Kurniawan and T. Saputro, "Kernel Density Estimation for Seismic Density Mapping," *Geodesy and Geodynamics*, vol. 15, no. 4, pp. 255–266, 2024, doi: 10.1016/j.geog.2024.01.008.
- [14] A. Fadli, T. K. Priyambodo, A. E. Putra, and W. Suryanto, "Kernel Density Estimation for Seismic Hazard Mapping in Indonesia: Influence of Kernel Function, Bandwidth Size, and Grid Resolution," *Trends in Sciences*, vol. 22, no. 8, p. 10064, 2025, doi: 10.48048/tis.2025.10064.
- [15] Y. Wang, H. Zhang, and L. Chen, "Spatial-Temporal Analysis of Earthquake Distribution Using GIS-Based Kernel Density Estimation," *Natural Hazards*, vol. 118, no. 2, pp. 1123–1140, 2023, doi: 10.1007/s11069-023-06145-z.
- [16] A. Nugraha, T. Purnomo, and S. Rahman, "Spatial Analysis of Earthquake Distribution Using Geographic Information System," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 12, no. 7, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/ijgi12070245.
- [17] R. Firmansyah and D. Prabowo, "Temporal Analysis of Seismic Activity Using QGIS," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 9, pp. 1–20, 2023, doi: 10.3390/rs15092311.
- [18] S. Abdullah and R. Mahendra, "Static Mapping Limitation in Earthquake Spatial Analysis," *Journal of Spatial Science*, vol. 18, no. 1, pp. 50–63, 2022, doi: 10.1080/14498596.2022.2020154.
- [19] P. Ramadhan and M. Akbar, "Integration of KDE and Temporal GIS Visualization for Earthquake Analysis," *Journal of Geospatial Analytics*, vol. 6, no. 3, pp. 99–112, 2024, doi: 10.1080/jga.2024.112233.
- [20] T. Hidayat and R. Saputra, "Spatial-Temporal Seismic Pattern Analysis in Sumatra Region," *Earthquake Science*, vol. 37, no. 2, pp. 88–101, 2024, doi: 10.1016/j.eqsci.2024.02.006.