PROCEEDING SEMINAR NASIONAL IPA XV
Peran Ilmu Lingkungan untuk Kecermelangan Pendidikan Sains Menuju Indonesia Emas
Edisi 2025 I ISSN: 2962-2905

PENERAPAN DISTRIBUSI PROBABILITAS DAN ANALISIS SPASIAL UNTUK MENGIDENTIFIKASI POLA MULTISKALA SISTEM GEMPA

Tarisa Rohyani Sofyatun

Universitas Sebelas Maret, Kota Surakarta
Email korespondensi: tarisa.rs27@student.uns.ac.id

ABSTRAK

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang kompleks dan seringkali sulit diprediksi. Dalam artikel ini, kami melakukan review terhadap penggunaan distribusi probabilitas dan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa. Pendekatan ini memanfaatkan konsep distribusi probabilitas untuk menggambarkan kemungkinan terjadinya gempa pada suatu wilayah tertentu. Selain itu, analisis spasial digunakan untuk mengeksplorasi hubungan spasial antara gempa-gempa yang terjadi, membantu mengidentifikasi pola geografis dan perilaku temporal dari aktivitas seismik. Penulis merinci berbagai distribusi probabilitas yang telah digunakan dalam literatur untuk model gempa. Selanjutnya, dijelaskan bagaimana analisis spasial, termasuk teknik seperti clustering spasial dan interpolasi spasial, dapat memberikan wawasan tambahan tentang pola dan perilaku gempa di suatu wilayah. Melalui sintesis informasi dari distribusi probabilitas dan analisis spasial, artikel ini memberikan landasan untuk pengembangan model prediktif yang lebih akurat dan pemahaman yang lebih dalam tentang seismisitas suatu wilayah. Implikasi dari temuan ini dapat mendukung upaya mitigasi risiko bencana gempa bumi dan perencanaan pembangunan yang berkelanjutan

Kata kunci: Gempa Bumi; Distribusi Probabilitas; Analisis Spasial

PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang sangat kompleks dan sulit dipahami dengan baik. Proses-proses di dalam kerak bumi yang menyebabkan gempa terjadi melibatkan interaksi yang rumit antara lempeng tektonik, tekanan, dan pergerakan batuan di dalam bumi. Memahami dinamika yang mendasarinya merupakan tantangan besar bagi ilmuwan seismologi. Penelitian selama beberapa tahun terakhir telah mengungkapkan bahwa banyak aspek dalam dinamika gempa bumi dapat dijelaskan dengan pendekatan fisika statistik, tetapi penerapan, masih dalam tahap pengembangan.

Prediksi gempa bumi merupakan salah satu tujuan utama dalam ilmu seismologi. Kemampuan untuk memperkirakan waktu, lokasi, dan kekuatan gempa bumi bisa menyelamatkan banyak nyawa dan harta benda. Namun, hingga saat, prediksi gempa bumi yang akurat tetap menjadi tantangan besar. Penggunaan statistik fisika dalam menganalisis data seismik dan pemodelan dapat membuka pintu untuk meningkatkan prediksi gempa bumi. Seiring berkembangnya teknologi, jumlah data seismik yang dikumpulkan dari berbagai stasiun seismik di seluruh dunia semakin besar dan kompleks (de Arcangelis et al., 2016). Dalam mengelola dan menganalisis data seismik, diperlukan pendekatan yang canggih, termasuk metode statistik yang tepat. Penerapan fisika statistik dapat membantu menyaring informasi yang relevan dari data seismik yang sangat besar, dan mengungkap pola-pola yang mungkin tidak terlihat dengan metode lain (Fan et al., 2021).

Teknologi komputasi dan ilmu pengetahuan dalam bidang fisika statistik telah mengalami perkembangan pesat. Hal ini tentu membuka peluang baru dalam pemodelan dan analisis data seismik. Namun penerapan statistik fisika dalam seismologi masih relatif baru, dan masih banyak tantangan yang perlu diatasi (Firmando et al., 2021). Penggunaan data temporal dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menganalisis pola spasial dapat digunakan untuk menyelidiki perubahan pola dari waktu ke waktu. Analisis dapat dilakukan terhadap berbagai data, aspek waktu dalam analisis ini sangat krusial untuk mengevaluasi bagaimana pola berubah dari waktu ke waktu. Penerapan teknik SIG juga telah dilakukan dalam berbagai konteks, seperti menggambarkan fitur-fitur geomorfologi, dan menilai tingkat kerentanan terhadap bencana (Hadiana et al., 2021). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut tentang bagaimana penggunaan konsep-konsep statistik seperti distribusi probabilitas dan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa dapat digunakan secara efektif sehingga menjadi sangat relevan untuk menangani ancaman gempa bumi di masa depan. Sehingga rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana penggunaan distribusi probabilitas untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa?
2. Bagaimana penggunaan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa?

METODE PENELITIAN

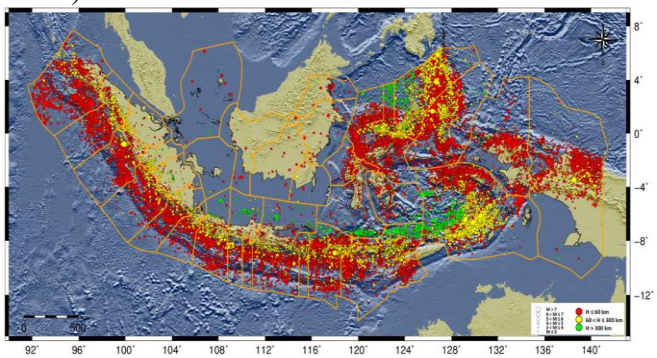
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan eksploratif dengan pemanfaatan fisika statistik dan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola serta perilaku gempa bumi. Pengumpulan data dilakukan melalui berbagai sumber, termasuk data seismik dari stasiun global seperti USGS dan BMKG, data spasial melalui Sistem Informasi Geografis (SIG), serta dataset temporal untuk mengamati perubahan pola gempa dari waktu ke waktu. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan distribusi probabilitas guna menentukan kemungkinan terjadinya gempa di suatu wilayah dalam periode tertentu. Selain itu, metode statistik seperti hukum Gutenberg-Richter dan analisis deret waktu digunakan untuk memahami frekuensi serta magnitudo gempa. Dalam analisis spasial, teknik seperti spatial autocorrelation,

hotspot analysis, dan clustering methods diterapkan dalam SIG untuk mengidentifikasi distribusi gempa. Hasil analisis kemudian divalidasi dengan data gempa historis untuk menguji keakuratan model serta melakukan simulasi prediksi potensi kejadian gempa di masa depan. Dari penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pola dan perilaku gempa, serta memberikan rekomendasi terkait mitigasi dan sistem peringatan dini berdasarkan penggunaan distribusi probabilitas dan analisis spasial yang telah ditemukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data dan karakteristik gempa di berbagai wilayah di Indonesia

Indonesia adalah negara yang didominasi oleh laut karena terletak di antara dua benua, yaitu Asia dan Australia, dan di antara dua lautan, yaitu Samudra Hindia dan Australia. Daerah daratannya terletak di Asia Tenggara di garis khatulistiwa antara dua samudera, yaitu Pasifik dan Hindia, serta dua benua, yaitu Australia dan Asia. Selain itu, koordinat astronomis Indonesia adalah 6°LU–11°LS (Lintang Utara–Lintang Selatan) dan 95°BT–141°BT (Bujur Timur) (Utomo et al., 2021).



Gambar 1. Peta hasil pemilihan gempa bumi 11 tahun pengamatan (2009-2019) dengan garis kuning adalah batas wilayah Indonesia dan juga batas provinsi.

Karena lokasinya berada di jalur pertemuan lempeng, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan lempeng Pasifik, bersama dengan sembilan lempeng kecil lainnya, Indonesia adalah negara kepulauan yang sangat rawan gempa bumi. Secara tidak langsung, dapat dipastikan bahwa lokasi gempa aktif berada di antara lempeng tektonik tersebut.

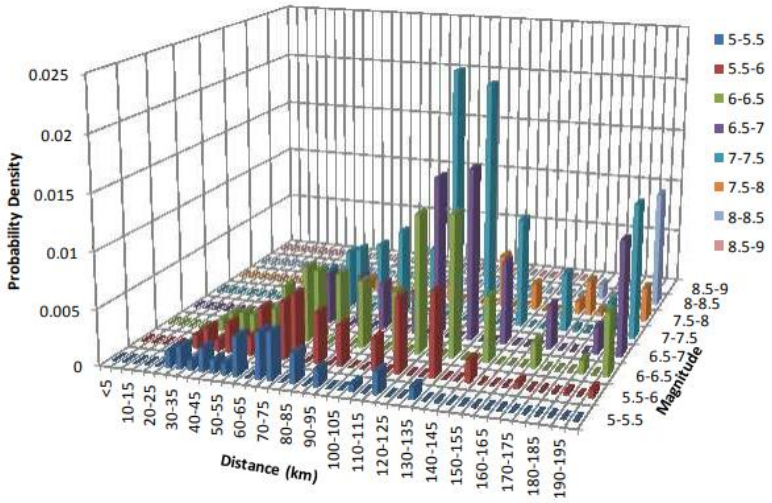
No	Provinsi	Jumlah Gempa dalam 11 tahun	rata-rata per-tahun	rata-rata per-bulan	rata-rata per-hari	Statistik Berdasarkan Magnitudo						Statistik Berdasarkan Kedalaman		
						M < 3	3 ≤ M < 4	4 ≤ M < 5	5 ≤ M < 6	6 ≤ M < 7	M ≥ 7	M ≤ 60 km	60 < H ≤ 300	H > 300 km
1	Aceh	2578	234.4	19.5	0.6	284	1091	992	193	14	4	2323	255	0
2	Bali	1165	105.9	8.8	0.3	630	424	102	8	1	0	1001	161	3
3	Banten	1010	91.8	7.7	0.3	84	556	328	39	3	0	868	140	2
4	Bengkulu	1578	143.5	12.0	0.4	99	747	594	132	6	0	1355	223	0
5	Gorontalo	2174	197.6	16.5	0.5	1141	666	336	29	2	0	846	1241	87
6	Jakarta	3	0.3	0.0	0.0	0	2	1	0	0	0	2	1	0
7	Jambi	168	15.3	1.3	0.0	5	85	74	4	0	0	39	126	3
8	Jawa Barat	3243	294.8	24.6	0.8	703	1689	761	80	9	1	2852	374	17
9	Jawa Tengah	773	70.3	5.9	0.2	122	440	194	16	1	0	608	131	34
10	Jawa Timur	3233	293.9	24.5	0.8	630	1722	793	79	9	0	2669	533	31
11	Kalimantan Barat	18	1.6	0.1	0.0	0	2	7	7	2	0	14	4	0
12	Kalimantan Selatan	13	1.2	0.1	0.0	0	3	6	1	3	0	9	3	1
13	Kalimantan Tengah	16	1.5	0.1	0.0	0	3	4	8	1	0	14	1	1
14	Kalimantan Timur	54	4.9	0.4	0.0	1	16	28	5	4	0	48	3	3
15	Kalimantan Utara	52	4.7	0.4	0.0	0	26	19	5	2	0	50	2	0
16	Kep. Bangka Belitung	10	0.9	0.1	0.0	0	4	4	2	0	0	8	1	1
17	Kepulauan Riau	11	1.0	0.1	0.0	0	0	1	5	5	0	9	1	1
18	Lampung	1257	114.3	9.5	0.3	174	683	343	55	2	0	1083	172	2
19	Maluku	8834	803.1	66.9	2.2	1476	2905	3841	581	26	5	5313	3117	404
20	Maluku Utara	7203	654.8	54.6	1.8	457	3455	2683	381	23	4	5689	1499	15
21	Nusa Tenggara Barat	6802	618.4	51.5	1.7	2543	3005	1130	115	8	1	5546	1226	30
22	Nusa Tenggara Timur	5312	482.9	40.2	1.3	1098	2673	1378	147	16	0	3628	1503	181
23	Papua	3144	285.8	23.8	0.8	382	1229	1302	216	13	2	2763	378	3
24	Papua Barat	1971	179.2	14.9	0.5	214	733	842	169	11	2	1756	202	13
25	Riau	43	3.9	0.3	0.0	2	26	12	2	1	0	19	23	1
26	Sulawesi Barat	1330	120.9	10.1	0.3	695	514	107	14	0	0	1319	10	1
27	Sulawesi Selatan	1280	116.4	9.7	0.3	386	638	240	15	1	0	1082	61	137
28	Sulawesi Tengah	8503	773.0	64.4	2.1	2378	4435	1528	150	11	1	6857	1610	36
29	Sulawesi Tenggara	391	35.5	3.0	0.1	55	185	138	12	1	0	323	24	44
30	Sulawesi Utara	4159	378.1	31.5	1.0	98	1317	2310	418	14	2	2404	1634	121
31	Sumatera Barat	1914	174.0	14.5	0.5	155	859	771	115	12	2	1647	264	3
32	Sumatera Selatan	204	18.5	1.5	0.1	28	105	63	8	0	0	110	86	8
33	Sumatera Utara	2543	231.2	19.3	0.6	471	1304	662	106	0	0	1981	558	4
34	Yogyakarta	639	58.1	4.8	0.2	109	382	135	12	1	0	590	49	0
	Jumlah	71628	6512	543	18	14420	31924	21929	3129	202	24	54825	15616	1187

Gambar 2. Perhitungan dan Pemilihan frekuensi gempa tiap provinsi tahun 2009-2019 berdasarkan waktu tahunan, bulanan, harian serta berdasarkan magnitudo dan kedalaman gempa

Dari hasil pemilihan, tercatat 71.628 kejadian gempa bumi di wilayah teritorial Negara Indonesia selama 11 tahun pengamatan gempa (2009–2019). Berdasarkan 34 provinsi di Indonesia, frekuensi gempa bumi dihitung secara tahunan, bulanan, dan harian, serta magnitudo dan kedalaman gempa. Data yang dikumpulkan dan dipilah selama 11 tahun menunjukkan bahwa wilayah Indonesia mengalami aktivitas gempa tektonik rata-rata 6.512 kejadian per tahun, 543 kejadian per bulan, dan 18 kejadian per tahun (Sabtaji, 2020). Berdasarkan data gempa bumi tersebut, gempa bumi di Indonesia memiliki beberapa karakteristik, seperti berlangsung dalam waktu yang sangat singkat, terjadi di lokasi tertentu, dan berpotensi terulang lagi di lokasi yang sama. Gempa bumi yang terjadi di wilayah Indonesia belum dapat diprediksi kapan waktu terjadinya. Sehingga diperlukan distribusi probabilitas dan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa.

Penerapan distribusi probabilitas untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa

Analisis probabilitas gempa dengan metode Gaussian dan nilai PGA, periode ulang gempa bumi, dan pendekatan PSHA *(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)* adalah beberapa distribusi probabilitas yang dapat digunakan dalam analisis gempa bumi. Analisis probabilitas gempa dengan metode Gaussian adalah cara untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di suatu area. Hal tersebut menggunakan persamaan Gaussian untuk menghitung periode ulang gempa bumi dan kemudian menggunakan nilai rata-rata gempa untuk menghitung prosentase kemungkinan gempa bumi yang akan datang. Analisis probabilitas gempa dengan metode Gaussian dan nilai PGA digunakan untuk menghitung risiko gempa bumi dan mengurangi kerusakan yang ditimbulkannya.



Gambar 3. Hasil deaggregation M dan R pada PGA dari semua sumber gempa untuk periode ulang 500 tahun untuk single site

Berdasarkan gambar 3, analisis seismic hazard merupakan analisis yang bertujuan untuk menghitung besarnya tingkat goncangan tanah yang diakibatkan oleh bencana gempa bumi. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) adalah metode analisis bahaya gempa yang didasarkan pada definisi fungsi distribusi probabilitas, yang memperhitungkan dan menggabungkan ketidakpastian dari skala kejadian gempa, lokasi, dan frekuensi kejadiannya untuk mendapatkan gambaran yang menyeluruh tentang tingkat bahaya atau lokasi yang ditinjau (Indri al., 2022). Konsep dasar dari pendekatan PSHA *(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)* menghitung risiko gempa bumi dengan menghitung total semua gerakan tanah yang mungkin terjadi dan kejadian gempa bumi di masa depan. PSHA tidak secara jelas

menunjukkan "magnitudo (M) dan jarak (R) dari lokasi ke sumber gempa" yang mungkin memberikan kontribusi terbesar terhadap ancaman terhadap lokasi. Dalam situasi seperti ini, pengetahuan PSHA tentang M dan R yang dominan dan tunggal dalam desain gempa tidak mencukupi (Fan et al., 2021). Namun, dengan peluang yang relatif sama bagi setiap asumsi untuk berpartisipasi dalam analisis, konsep PSHA ini sangat menguntungkan karena berbagai asumsi tentang sumber gempa potensial dan perulangan gempa dapat digabungkan menjadi satu asumsi.

Deagregasi seismik merupakan fokus dari konsep PSHA, yang diharapkan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap lokasi dan dapat memberikan gambaran umum mengenai magnitudo dan jarak gempa untuk sumber gempa tertentu. Peta deagregasi seismic umumnya menunjukkan distribusi probabilitas kekuatan gempa untuk periode ulang tertentu, seperti 500 tahun atau 2500 tahun. Tingkat kejadian rata-rata yang merupakan fungsi dari magnitudo dan/atau jarak diperlukan untuk prosedur deagregasi. Deagregasi dapat dilakukan dengan memisah suku-suku yang berkaitan dengan magnitude dan jarak dari integrasi persamaan (1) berikut:

$$\lambda_x^{(i,mj)}(x) = P\big(M = m_j\big) \int_R \quad P_i\big(X > m|m_j, r\big) \int_R^{(i)} \quad (r)dr \qquad (1)$$

Laju tahunan rata-rata kejadian dapat dituliskan sebagai fungsi jarak dari site ke sumber saja seperti persamaan (2):

$$\lambda_x^{(i,r_k)}(x) = P(R = r_k) \int_M \quad P_i(X > m|m, r_k) \int_M^{(i)} \quad (m)dr \qquad (2)$$

Lalu,laju tahunan rata-rata kejadian yang diekspresikan sebagai fungsi magnitude dan jarak dari site ke sumber dituliskan melalui persamaan (3):

$$\lambda_x^{(i,m_j,r_k)}(x) = P\big(M = m_j\big)P(R = r_k)P_i\big(X > x|m_j, r_k\big) \qquad (3)$$

Laju tahunan rata-rata kejadian untuk sumber i untuk magnitude ke-j dan jarak ke-k diberikan oleh persamaan (1) sampai dengan (3). Oleh karena itu, laju tahunan rata-rata untuk sumber ke-i menjadi:

$$\lambda_x^{(i,m,r)}(x) = \sum_{jk} \quad \lambda_x^{(i,m_j,r_k)}(x) \qquad (4)$$

Sedang laju tahunan rata-rata untuk semua sumber akan menjadi:

$$\lambda_x^{(m,r)}(x) = \sum_i \quad \lambda_x^{(i,m,r)}(x) \qquad (5)$$

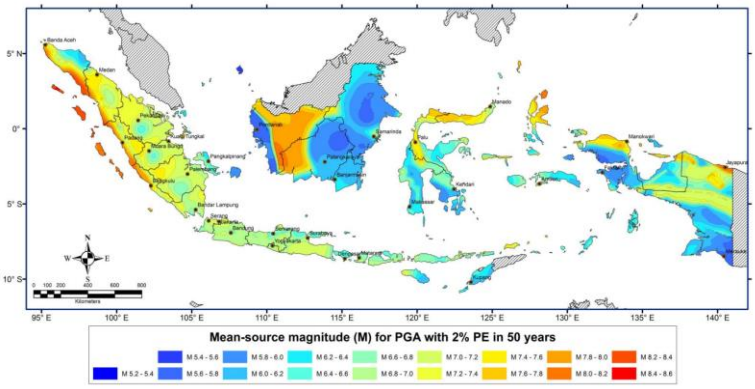
Deagregasi magnitude untuk semua sumber M_D adalah:

$$M_D = \sum_i \quad \frac{M_D \lambda_x^{(i,m_j,r_k)}(x)}{\lambda_x^{(i,m_j,r_k)}(x)} \qquad (6)$$

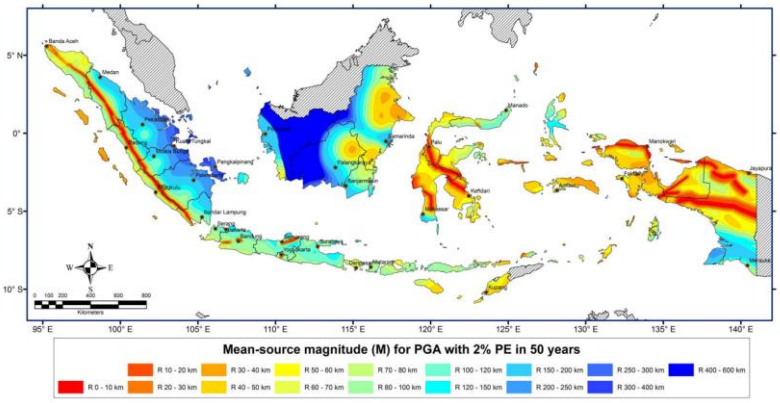
Deagregasi jarak untuk semua sumber R_D adalah:

$$R_D = \sum_i \quad \frac{M_D^i \lambda_x^{(i,m,r)}(x)}{\lambda_x^{(m,r)}(x)} \qquad (7)$$

Secara keseluruhan, deagregasi serupa dengan memecahkan teka-teki bahaya gempa bumi, yang memberikan pemahaman tentang pentingnya magnitude dan jarak khusus dalam gempa bumi. Harus dicatat bahwa teknik ini secara matematis merupakan perluasan dari analisis probabilitas dasar. Hal tersebut tentu tidak menggantikan studi sosiologi dari suatu daerah untuk memilih gempa desain.



Gambar 4. Peta deagregasi magnitude (M) pada PGA dengan 2% probabilitas terlampaui dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) dari hasil analisis deagregasi



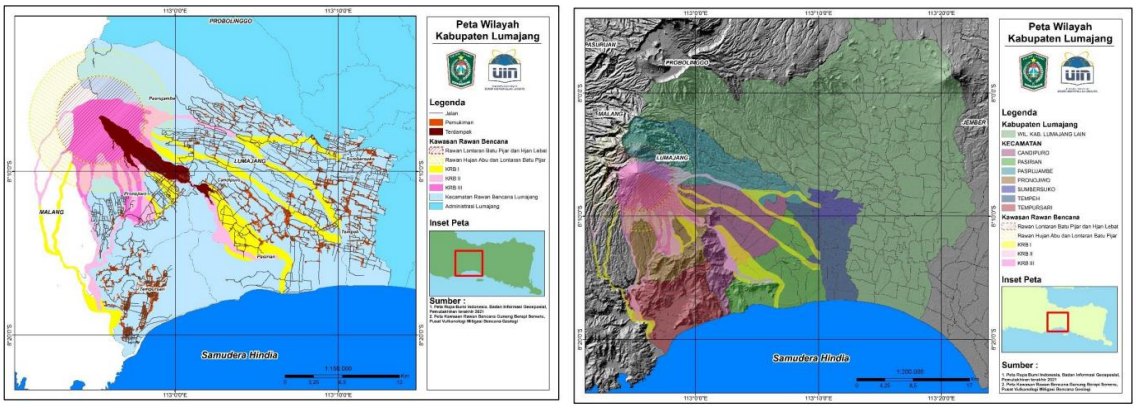
Gambar 5. Peta deagregasi jarak sumber gempa (R) pada PGA dengan 2% probabilitas terlampaui dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) dari hasil analisis deagregasi

Nilai percepatan puncak/*Peak Ground Acceleration* (PGA), juga dikenal sebagai percepatan tanah, di mana notasi PGA adalah g, yang merupakan akselerasi akibat gravitasi, adalah salah satu parameter yang dapat digunakan untuk menghitung bahaya kegempaan. Salah satu cara untuk menghitung nilai PGA adalah dengan menggunakan pendekatan PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) (Indri et al., 2022).

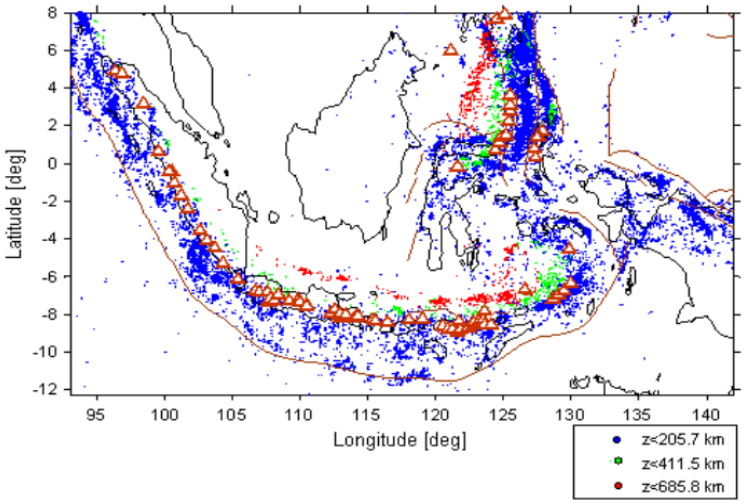
Penerapan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa

Penerapan fisika statistik dalam pemahaman dinamika multi skala sistem gempa adalah pendekatan yang memungkinkan ilmuwan untuk mengkaji gempa bumi dengan lebih mendalam melibatkan penggunaan konsep-konsep statistik seperti distribusi probabilitas dan analisis spasial untuk mengidentifikasi pola dan perilaku gempa. Dengan menganalisis data gempa menggunakan metode statistik dan penelitian, membuka peluang untuk meramalkan dan mengelola risiko gempa bumi dengan lebih baik, sambil menghadapi tantangan kompleksitas dan ketidakpastian yang terkait dengan fenomena alam (Fan et al., 2021).

Proses titik gempa diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu: proses titik *self-exciting*, di mana kejadian dapat memicu peristiwa lain. Kedua, proses titik self-correcting, di mana kejadian dapat menghambat peristiwa lain. Salah satu aplikasi dari proses *self-correcting* tampak pada peristiwa seismik, seperti gempa bumi dan gempa susulannya. Gempa bumi besar umumnya disertai serangkaian gempa susulan, dan fenomena ini dapat dijelaskan melalui model tipe epidemi, di mana gempa bumi signifikan memengaruhi terjadinya gempa susulan dalam rentang waktu tertentu, yang berlangsung lama setelah gempa utama (Ramadhan, 2022)



Gambar 6. Peta Gambaran Wilayah Rawan Dan Terdampak Erupsi Semeru Pada 7 Wilayah Kecamatan



Gambar 7. Peta plot kegempaan di wilayah Indonesia dengan magnitude Mw 3,5-7,2 katalog EHB(1964 - 2005), Engdahl et al. (1998)

Metode untuk mengetahui parameter seismik dan tektonik suatu wilayah adalah dengan hubungan Gutenberg-Richter dijelaskan sebagai berikut ini: (Rohadi et al., 2023)

$$log\ n(M) = a - bM \quad (8)$$

dimana n(M) adalah jumlah gempabumi dengan magnitude M. Nilai-a merupakan parameter seismik yang besarnya bergantung banyaknya gempa dan untuk wilayah tertentu bergantung pada penentuan volume dan time window. Nilai-b merupakan parameter tektonik biasanya mendekati 1 dan menunjukkan jumlah relatif dari getaran yang kecil dan yang besar. Nilai-b dihitung dengan metode maksimum likelihood, menggunakan persamaan yang diberikan Utsu (1965) yaitu:

$$b = \frac{0.434}{\underline{M} - Mmin} \quad (9)$$

(Rohadi et al., 2023)

dimana M adalah magnitude rata-rata dan M.min adalah magnitude minimum atau magnitude completeness. Perhitungan Standar deviasi menggunakan formula dari Shi dan Bolt (1982) sebagai berikut, dengan n adalah jumlah gempa pada sampling perhitungan

$$\delta b = 2.30 b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(M_i - \underline{M}\right)^2 / (n-1)} \qquad (10)$$

Faktor spasial dikenali sebagai elemen kunci dalam perancangan model spasial, contoh penerapaannya adalah pada situs geowisata di Geopark Nasional Pongkor, yaitu dengan memanfaatkan pemetaan sistem informasi geografis melalui aplikasi ArcGIS dan sistem informasi geografis untuk memberikan pemahaman kognitif berdasarkan faktor geografis.. Pendekatan spasial ini mampu merambah kegiatan pariwisata di atraksi geografis, sehingga menciptakan berbagai manfaat, termasuk pelestarian keanekaragaman, situs dan lokasi wisata, serta meningkatkan ekonomi pariwisata sebagai sumber pendapatan bagi masyarakat lokal di Kawasan Geopark Nasional Pongkor (Habibullah et al., 2022).

Salah satu contoh model tipe epidemi adalah model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS), yang menganalisis gempa bumi berdasarkan intensitasnya. Fungsi intensitas bersyarat menjadi aspek kunci karena dapat digunakan untuk memahami aktivitas gempa susulan. Penambahan komponen lokasi ke model ETAS, menjadikannya model ETAS spasial-temporal, karena menghasilkan fungsi intensitas bersyarat yang memetakan intensitas gempa bumi di setiap area. Model ETAS spasial-temporal diterapkan untuk menganalisis intensitas gempa di wilayah Sumatera, dengan mempertimbangkan komponen lokasi (episenter). Analisis mengenai percepatan tanah puncak (PGA) dilakukan, dipetakan sepanjang wilayah Sumatera berdasarkan sejarah episenter peristiwa gempa bumi. Pemetaan ini bermanfaat untuk mengidentifikasi area yang rentan terhadap gempa bumi; semakin tinggi nilai PGA, maka semakin rentan area tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai dasar upaya mitigasi gempa bumi. Namun, penerapan model ETAS tidak menunjukkan konsentrasi intensitas gempa bumi pada area tertentu; model tersebut hanya menampilkan besarnya intensitas gempa bumi tanpa memberikan informasi mengenai pemetaan lokasi yang rentan terhadap gempa bumi (Wijaya et al., 2023).

Dengan menggunakan konsep dasar fisika statistik, seperti distribusi probabilitas dan model statistik, penulisan ini dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang pola dan perilaku gempa bumi. Dalam praktiknya, penulisan ini mencakup pengumpulan data gempa melalui seismometer dan jaringan pemantauan gempa. Data tersebut kemudian dianalisis dengan metode statistik, seperti analisis spasial untuk mengidentifikasi pola spasial gempa di suatu wilayah, analisis frekuensi untuk memahami frekuensi kejadian gempa, dan analisis temporal untuk memeriksa perubahan seiring waktu. Hasil dari analisis, dapat memberikan wawasan tentang dinamika multi skala sistem gempa, termasuk adanya klaster gempa atau interaksi antara gempa-gempa tertentu. Penerapan fisika statistik dalam pemahaman dinamika gempa juga membantu dalam memprediksi risiko gempa bumi dan mengembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif (Firmando et al., 2021).

KESIMPULAN

Gempa bumi besar sering terjadi di berbagai lokasi, termasuk Indonesia, menekankan urgensi analisis risiko gempa dalam manajemen penanggulangan bencana. Integrasi analisis dampak risiko gempa bumi menjadi krusial. Berdasarkan hasil data literatur diatas menunjukkan bahwa penggabungan konsep distribusi probabilitas membantu dalam memodelkan kejadian gempa secara lebih akurat. Analisis spasial juga membuktikan menjadi alat yang efektif untuk mengidentifikasi pola spasial gempa, yang dapat menjadi dasar bagi upaya mitigasi risiko gempa di wilayah-wilayah yang rentan. Melalui integrasi metode ini, artikel ini memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana distribusi probabilitas dan analisis spasial dapat bekerja bersama untuk meningkatkan pemahaman kita tentang pola dan perilaku gempa, serta dapat menjadi landasan untuk pengembangan strategi mitigasi yang lebih

efektif. Selain itu, teknologi komputasi dan ilmu pengetahuan dalam bidang fisika statistik telah mengalami perkembangan pesat, sehingga prediksi gempa bumi menjadi sangat relevan untuk menangani ancaman gempa bumi di masa depan. Fisika statistik memungkinkan pemodelan perilaku pada skala yang penting untuk memahami bagaimana gempa besar berkembang dari gempa-gempa kecil.

DAFTAR PUSTAKA

De Arcangelis, L., Godano, C., Grasso, J. R., & Lippiello, E. (2016). Statistical physics approach to earthquake occurrence and forecasting. *Physics Reports*, *628*, 1-91.

Fan, J., Meng, J., Ludescher, J., Chen, X., Ashkenazy, Y., Kurths, J., ... & Schellnhuber, H. J. (2021). Statistical physics approaches to the complex Earth system. *Physics reports*, *896*, 1-84.

Firmando, A., Wijaya, H., & Yuwono, A. (2021). Analisis Riwayat Waktu Gempa Sesar pada Sistem Fondasi Tiang. JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil, 205-220.

Habibullah, S. L., & Priyono, K. D. (2022). *Analisis Spasial Pada Kawasan Geopark Nasional Pongkor Terhadap Pembangunan Berkelanjutan Geowisata di Kabupaten Bogor* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).

Hadiana, A. I., Komarudin, A., Putra, E. K., Melina, ., Yuniarti, R., Ilyas, R., & Kasyidi, F. (2024). Analisis spasial temporal kerentanan bencana alam dalam mendukung ketahanan terhadap bencana di Indonesia. Jurnal ICT: Information Communication & Technology, 20(2). https://doi.org/10.36054/jict-ikmi.v20i2.379

Indri, R., Taunaumang, H., & Tumimomor, F. R. (2022). Analisis Bahaya Gempa Bumi Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis di Wilayah Likupang, Minahasa Utara. *Jurnal FisTa: Fisika dan Terapannya*, *3*(1), 34-38.

Ishomyl, M. (2020). Implementasi Wireless Sensor Network Pada Simulasi Peringatan Gempa Bumi Menggunakan Sensor SW-420. *Journal of Telecommunication Network (Jurnal Jaringan Telekomunikasi)*, *10*(1), 38-44.

Natawidjaja, D. H. (2021). Riset Sesar Aktif Indonesia dan Peranannya dalam Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami.

Ramadhan, I. (2022). *Analisis Spasial Ketersediaan Dan Keterjangkauan Fasilitas Pelayanan Kesehatan Pada Wilayah Rawan Dan Terdampak Bencana Erupsi Gunung Semeru* (Bachelor's thesis, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta-FIKES).

Rohadi Supriyanto. (2023). Studi Seismotektonik Sebagai Indikator Potensi Gempabumi Di Wilayah Indonesia, 111-121.

Sabtaji, A. (2020). Statistik kejadian gempa bumi tektonik tiap provinsi di wilayah Indonesia selama 11 tahun pengamatan (2009-2019). *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, *1*(7), 31-46.)

Utomo, D. P., & Purba, B. (2019). Penerapan Datamining pada Data Gempa Bumi Terhadap Potensi Tsunami di Indonesia. In Prosiding Seminar Nasional Riset Information Science (SENARIS) (Vol. 1, pp. 846-853).

Widodo, T., Hepta, Y., & Fairuz, H. (2017). Aplikasi sistem informasi geografis dan penginderaan jauh untuk zonasi kerawanan bencana gempa bumi sesar lembang. Jurnal Dialog Dan Penanggulangan Bencana, 8(1), 54-68.

Wijaya, A. R. (2023). Model ETAS Spatio-Temporal pada Analisis Pemetaan Intensitas Kegempaan di Wilayah Sumatera. *Jambura Journal of Mathematics*, *5*(1), 179-188.