

PREDIKSI RISIKO GEMPA MENGGUNAKAN MODEL *SPATIAL POINT PROCESS*

Earthquake Risk Prediction using the Spatial Point Process Model

Budiono Rahman¹, Tiani Wahyu Utami², Fatkhurokhman Fauzi^{3*}

¹Badan Pusat Statistik Kabupaten Konawe Selatan

Jalan Poros 60 Andoolo, Konawe Selatan, 93811, Sulawesi Tenggara, Indonesia

^{2,3}Program Studi Statistika, Fakultas Sains dan Teknologi Pertanian, Universitas Muhammadiyah Semarang

Jalan Kedungmundu Raya 22, Kota Semarang, 50273, Jawa Tengah, Indonesia

E-mail Corresponding Author: fatkhurokhmanf@unimus.ac.id

Abstrak: Pertemuan lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik terjadi di sekitar Pulau Sulawesi dan Maluku. Pertemuan ketiga lempeng ini menyebabkan sering terjadi gempa bumi. Faktor-faktor yang mempengaruhi gempa bumi secara geologis adalah jarak terhadap zona subduksi, gunung berapi, dan sesar aktif. Untuk keperluan mitigasi risiko bencana gempa bumi, perlu dilakukan prediksi risiko terjadinya gempa bumi. Pada penelitian ini menggunakan model *inhomogeneous thomas cluster process* yang digunakan untuk memprediksi risiko kejadian gempa bumi. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah koordinat zona subduksi, sesar aktif, dan gunung api di pulau Sulawesi dan Maluku. Hasil yang diperoleh berdasarkan fungsi K gempa bumi di pulau Sulawesi dan Maluku membentuk *cluster*. Uji *chi-square* menyimpulkan kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku bersifat *inhomogen* (tidak homogen). Berdasarkan model estimasi *inhomogeneous thomas cluster process*, variabel zona subduksi, sesar aktif, dan gunung berapi mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap terjadinya gempa bumi. Dari ketiga variabel yang mempengaruhi terjadinya gempa terbesar (1,8 kali) adalah variabel letak gunung api. Berdasarkan hasil prediksi, Provinsi Gorontalo, Sulawesi Utara, Sulawesi Tengah, Maluku, dan Maluku Utara memiliki risiko gempa bumi yang tinggi.

Kata Kunci: Gempa Bumi, *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*, *Spatial Point Process*

Abstract: The meeting of the Eurasian Plate, the Indo-Australian Plate, and the Pacific Plate is around the islands of Sulawesi and Maluku. The meeting of these three plates causes frequent earthquakes. The factors that affect earthquakes geologically are distance to subduction zones, volcanoes, and active faults. For the purposes of mitigating the risk of earthquake disaster, it is necessary to predict the risk of earthquake occurrence. In this study, the *inhomogeneous Thomas cluster process model* is used to predict the risk of earthquake events. The variables used in this study are the coordinates of subduction zones, active faults, and volcanoes on the islands of Sulawesi and Maluku. The results obtained based on the *K-function* of earthquakes on the islands of Sulawesi and Maluku form clusters. The *chi-square test* concludes that earthquake events on the islands of Sulawesi and Maluku are *inhomogeneous* (not homogeneous). Based on the *inhomogeneous Thomas cluster process estimation model*, the variables of subduction zones, active faults, and volcanoes have a significant effect on the occurrence of earthquakes. Of the three variables that affect the occurrence of the largest earthquake (1.8 times) is the variable location of the volcano. Based on the results of predictions, the provinces of Gorontalo, North Sulawesi, Central Sulawesi, Maluku, and North Maluku have a high risk of earthquakes.

Keywords: Earthquake, *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*, *Spatial Point Process*

1. PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia merupakan negara yang menjadi pertemuan tiga lempeng aktif [1], [2]. Lempeng aktif tersebut menyebabkan seringnya intensitas gempa di Indonesia. Lempeng aktif tersebut diantaranya lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia dan lempeng Pasifik [3]. Rata-rata gempa tektonik selama kurun waktu 11 tahun sebanyak 6.512 kejadian per tahunnya [4].

Salah satu margin aktif secara waktu geologi, struktur serta tektonik adalah daerah Sulawesi dan sekitarnya [5]. Pertemuan ketiga lempeng (lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia dan lempeng Pasifik) konvergen berada di wilayah Sulawesi dan sekitarnya di masa Neogen. Hal tersebut menyebabkan subduksi, sesar, dan *thrust* berkembang di semua jenis struktur dan skala akibat konvergensi. Subduksi Sulawesi Utara, sesar Gorontalo, sulu *thrust*, Maluku masih aktif dan kembali aktif.

Keaktifan lempeng tersebut menyebabkan gempa bumi sering terjadi di Pulau Sulawesi dan Maluku. Gempa bumi tersebut menyebabkan beberapa korban berjatuh dalam beberapa tahun terakhir. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi melaporkan 12 gempa besar terjadi di Indonesia pada tahun 2009-2018. Gempa terjadi di Palu sebesar 7,6 Skala *Richter* (SR) mengguncang Palu-Donggala-Sigi-Parigi Moutong [6]. Gempa tersebut mengakibatkan 7.764 korban (orang luka-luka 4.612 orang, meninggal 2.113 orang, hilang 1.039 orang).

Mitigasi bencana perlu dilakukan salah satunya dengan memodelkan risiko gempa dengan metode *spatial point process*. *Spatial point process* adalah suatu model statistik yang berpola titik dalam ruang d-dimensi, dimana titik tersebut mewakili lokasi [7]. Sebaran titik dalam hal ini bisa berupa titik kejadian gempa, titik rasi bintang, kecelakaan, kasus COVID-19, dan lain-lain. Hal tersebut merupakan fokus utama dari *spatial point process* [8].

Penerapan metode *spatial point process* pernah dilakukan untuk mengevaluasi lokasi SPBU di Surabaya. Penelitian tersebut menggunakan metode *spatial poisson point process*, dikarenakan data SPBU di Surabaya mengikuti distribusi *poisson*. Hasil analisis menunjukkan bahwa pola SPBU tidak homogen. Penelitian tersebut dapat menambah wawasan tentang pola persebaran SPBU, yang dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan dalam menambah jumlah SPBU di wilayah Surabaya [9].

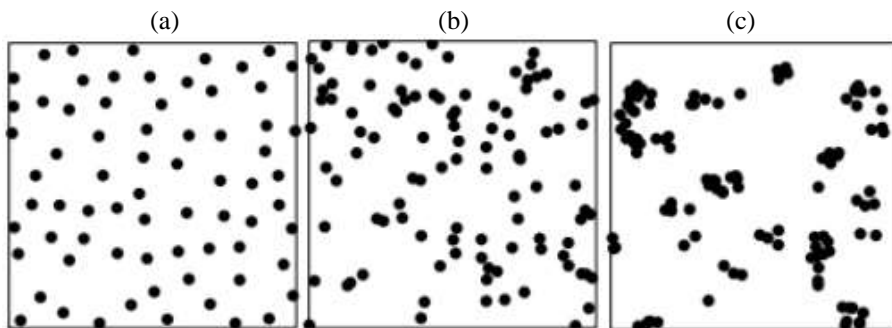
Hubungan antara keberadaan pasar modern dengan toko kelontong di Surabaya pernah dimodelkan dengan metode *spatial point process*. Penelitian tersebut menggunakan data titik kordinat pasar modern dan kelontong berdasarkan *google maps*. Hasil analisis menunjukkan bahwa keberadaan pasar modern mempengaruhi keberadaan toko kelontong, dan penambahan densitas minimarket dapat meningkatkan peluang keberadaan toko kelontong. Kesimpulannya, penambahan jumlah pasar modern tidak mematikan keberadaan toko kelontong di sekitarnya dan justru memicu daya saing toko kelontong [10].

Penelitian terkait *spatial point process* pernah dilakukan oleh [11]. Kasus yang digunakan pada penelitian tersebut adalah persebaran COVID-19 di Surabaya Raya. Model *inhomogeneous Thomas cluster process* pada penelitian tersebut menghasilkan model yang baik. Penelitian tentang *spatial point process* lainnya [12], [13], [14], [15].

Berdasarkan beberapa penelitian tentang metode *spatial point process* di atas menunjukkan bahwa metode tersebut mampu memodelkan data berbasis kordinat dengan baik. Mitigasi terhadap risiko bencana alam seperti gempa bumi yang terjadi di Pulau Maluku dan Sulawesi sangat penting dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini akan memprediksi risiko kejadian gempa dengan pendekatan *spatial point process* di pulau Maluku dan Sulawesi. Pendekatan *spatial point process* yang digunakan adalah *inhomogeneous Thomas cluster process*. Variabel yang akan digunakan pada penelitian ini adalah kordinat subduksi, sesar, dan gunung berapi.

2. METODOLOGI

Model statistik yang digunakan untuk menganalisis pola persebaran lokasi (titik gempa, pohon, kasus penyakit, dan lain sebagainya) yang bersifat random disuatu wilayah adalah *spatial point process*. Karena objek penelitian berupa wilayah maka efek wilayah (korelasi) tidak dapat dihindarkan [8]. Berdasarkan jenis persebarannya korelasi spasial dibagi menjadi 3 pola yaitu *cluster*, *random*, dan *reguler*. Berikut gambar pola persebaran korelasi spasial.



Gambar 1. Pola Dasar (a). Reguler, (b). Random dan (c). Cluster [11]

Berdasarkan Gambar 1(a) terlihat bahwa pola dasar reguler membentuk titik pola menyebar secara beraturan. Sedangkan Gambar 1(b) titik-titik menyebar secara *random*. Pada Gambar 3(c) titik-titik cenderung berkelompok membentuk *cluster*. *Mother process* (\mathbf{C}) merupakan tahap bentukan *Thomas cluster process* yang merupakan suatu *poisson process* dengan intensitas κ . Di sekitar *mother process* terdapat fungsi yaitu *offspring process*. Dimana $\mathbf{X}_{\mathbf{C}}, \mathbf{c} \in \mathbf{C}$.

$$\rho_{\mathbf{c}}(\mathbf{u}; \boldsymbol{\beta}) = \exp(\boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}(\mathbf{u}))k(\mathbf{u} - \mathbf{c}; \omega) \quad (1)$$

$k(\mathbf{u})$ adalah fungsi kepadatan peluang (PDF) dari selang antara *offspring* dan \mathbf{C} dengan parameter ω . Lokasi terjadinya gempa bumi utama berlaku berperan sebagai *mother points*, sedangkan gempa susulan sebagai *offspring points*. Fungsi kepadatan peluang dari *Thomas cluster process* adalah sebagai berikut [7].

$$k(\mathbf{u}) = (2\pi\omega^2)^{-1} \exp(-\|\mathbf{u}\|^2 / (2\omega^2)) \quad (2)$$

Fungsi kepadatan peluang yang dimiliki oleh model *Thomas cluster process* saling independen dan berdistribusi normal *bivariate* $N(0, \omega^2 \mathbf{I})$ [16]. Ketika nilai ω semakin kecil *cluster* yang dihasilkan akan semakin rapat, *number of parents* akan lebih kecil Ketika nilai κ semakin kecil [11].

$$\rho(\mathbf{u}; \boldsymbol{\beta}) = \kappa \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}(\mathbf{u})) \quad (3)$$

K-function pada pada *Thomas process* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K(r) = \pi r^2 + \frac{1}{\kappa} \left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4\omega^2}\right) \right) \quad (4)$$

Untuk mengetahui apakah data bersifat homogen atau heterogen dilakukan pengujian *chi-square* [17]. Langkah pertama sebelum dilakukan pengujian *chi-square* observasi *window* dibagi menjadi *quadrat*, dimana n_1, n_2, \dots, n_m merupakan jumlah *point* di setiap *quadrat*. Hipotesis pada uji *chi-square* sebagai berikut.

$$H_0: \rho(\mathbf{u}) = \rho(\mathbf{v}); \mathbf{u}, \mathbf{v} \in B \text{ (intesitas kejadian bersifat homogen)}$$

$$H_1: \rho(\mathbf{u}) \neq \rho(\mathbf{v}); \mathbf{u}, \mathbf{v} \in B \text{ (intesitas kejadian bersifat tidak homogen)}$$

statistik uji *chi-square*.

$$\chi_{hitung}^2 = \sum_{j=1}^m \frac{n_j - e_j}{e_j} \quad (5)$$

Dengan

n_j : *number of points* pada *quadrat count* ke- j

e_j : *Number of expectations* point pada *quadrat count* ke- j

m : jumlah *quadrature*

Hipotesis nol ditolak jika $\chi_{hitung}^2 > \chi_{\alpha, df}^2$ dengan $df = m - 1$ atau $P\text{-value} < \alpha$ [8].

Metode yang digunakan untuk mengetahui hubungan antar variabel salah satunya adalah korelasi. Pada metode *spatial point process*, teknik yang digunakan untuk mengukur ketergantungan antar titik/lokasi adalah *K-function* [18]. Konsep metode *K-function* adalah menghitung jarak antara semua pasang titik berbeda dalam suatu *point pattern*.

$$\hat{K}_{inhom} = \frac{1}{D^p|B|} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ \frac{\|u_i - u_j\|}{\hat{\rho}(u_i)\hat{\rho}(u_j)} \right\} e(u_i; u_j; r) \tag{6}$$

Dengan nilai $D = \frac{1}{|B|} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\rho}(u_i)}$

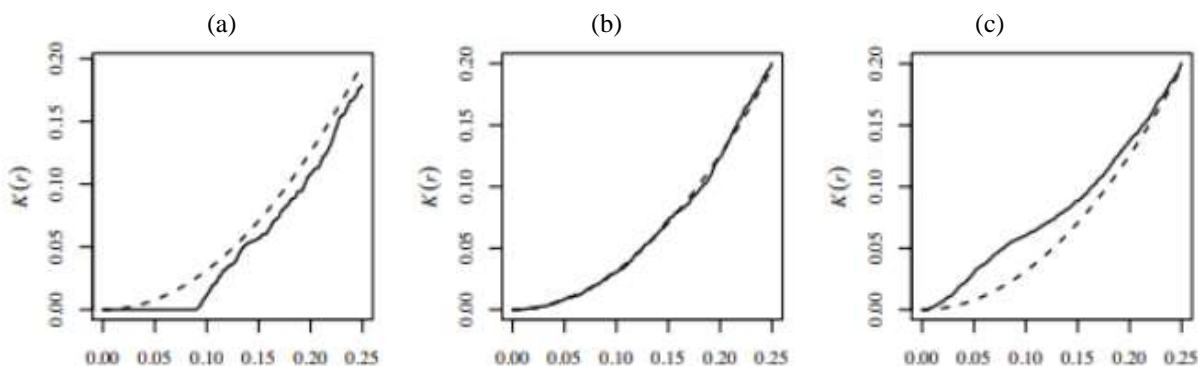
$h_{ij}(u_i; u_j; r)$: bobot *edge correction*

$|B|$: *observation window*

$\hat{\rho}(u_i)$: estimasi $\rho(u_i)$

$\hat{\rho}(u_j)$: estimasi $\rho(u_j)$

Berdasarkan perhitungan *K-function* $\hat{K}(r)$ dapat divisualisasikan sebagai berikut.



Gambar 2. Plot K-Function (a). Regular, (b). Independen (c). Cluster [11]

Penaksiran dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama penaksiran parameter menggunakan metode *maximum composite likelihood orde 1* di *first order* untuk β [11]. Sedangkan tahap kedua adalah menaksir parameter menggunakan metode *maximum composite likelihood orde 2* pada model *cluster*. Parameter yang ditaksir pada penelitian ini adalah β dan parameter *cluster* (ω dan κ).

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah jarak pusat gempa ke gunung berapi terdekat, jarak pusat gempa ke sesar terdekat, jarak pusat gempa ke subduksi terdekat. Sumber data diperoleh dari *website* Badan Meterologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Pusat Studi Gempa Nasional, Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG). Kejadian gempa yang dianalisis pada penelitian ini adalah $\geq 4,5$ Skala *Richter* (SR). Adapun *Observation window* dalam penelitian ini, yaitu *latitude* [-6,926426847059551, 4,2063329870791444] dan *longitude* [118,5340648633433, 134,92502131464263] atau (100 km²).

Tabel 1. Variabel Penelitian

No	Variabel	Keterangan
1	u	Koordinat pusat gempa bumi
2	$Z_1(u)$	Jarak pusat gempa ke gunung berapi terdekat
3	$Z_2(u)$	Jarak pusat gempa ke sesar terdekat
4	$Z_3(u)$	Jarak pusat gempa ke subduksi terdekat

Adapun langkah penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mengunduh data gempa.

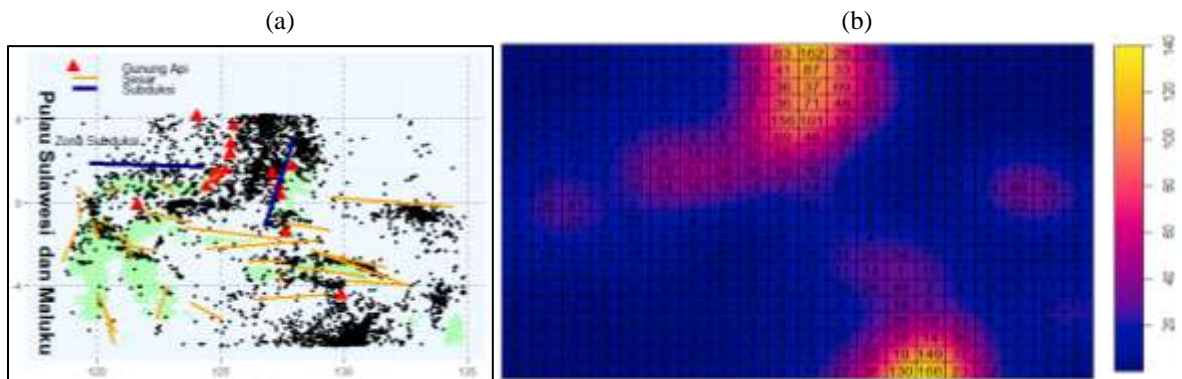
2. Menentukan *observation window*.
3. Ekstraksi kordinat *latitude* dan *longitude* lokasi keadian subduksi, gempa, gunung berapi, dan sesar, menjadi objek dua dimensi (*point pattern*).
4. Menghitung jarak menggunakan metode *euclidean* pada variabel kovariat terhadap lokasi titik gempa.
5. Visualisasi data.
6. Uji *chi-square*.
7. Visualisasi korelasi spasial data dengan melihat plot *inhomogen K-function*.
8. Pemodelan menggunakan metode *inhomogeneous Thomas cluster process*.
9. Evaluasi model dengan melihat plot *envelope K-Function*.
10. Prediksi risiko kejadian gempa bumi di pulau Maluku dan Sulawesi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Eksplorasi Kejadian Gempa Bumi

Kami memulai analisis ini dengan melihat sebaran gempa di pulau Sulawesi dan Maluku. Sebaran gempa yang digambarkan pada Gambar 3 (a) merupakan gempa dengan magnitudo ≥ 4.5 Skala Richter (SR). Terdapat 4.303 gempa yang terjadi sepanjang tahun 2009-2020. Kejadian gempa digambarkan dengan poin berwarna hitam, dimana titik kejadian gempa tersebut cenderung mengelompok dibagian utara dan bagian selatan Pulau Maluku. Gempa sering terjadi di wilayah laut sedangkan di wilayah daratan sangat jarang terjadi.

Unit *square* berukuran 20x20 dibentuk untuk menggambarkan kejadian gempa di Pulau Maluku dan Sulawesi. Gambar 3 (b) menunjukkan jumlah kejadian gempa bumi pada setiap *unit square area*. *Unit square* yang berwarna cerah menunjukan intensitas kejadian gempa terbanyak banyak. Kejadian gempa tertinggi sebanyak 166 kali. Gempa tersebut terletak di bagian selatan pulau maluku.



Gambar 3. Persebaran Gempa Bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi dengan Maginitude ≥ 4.5 (a) peta persebaran gempa (b) kejadian gempa bumi setiap *unit square*

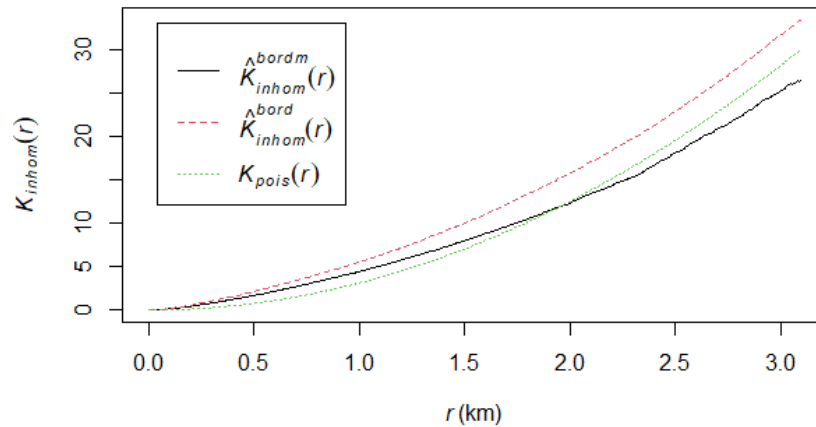
Berdasar Gambar 3 (a) terlihat bahwa sebaran kejadian gempa sangat heterogen. Untuk membuktikannya dilakukan uji statistik menggunakan uji *chi-square*. Langkah awal pengujian *chi-square* adalah memetakan kejadian gempa pada suatu kuadrat *count*. Pada penelitian ini menggunakan 100 *grid*. Langkah selanjutnya adalah menghitung *chi-square*.

Tabel 2. Uji *Chi-Square*

χ^2	<i>P-value</i>	Hipotesis	Keputusan
9938,1	$2,2 \times 10^{16}$	H_0 : intesitas kejadian gempa di pulau Maluku dan Sulawesi bersifat homogen H_1 : intesitas kejadian gempa di pulau Maluku dan Sulawesi bersifat tidak homogen	Tolak H_0

Dengan nilai $\chi^2_{tabel} = 123,23$ yang lebih kecil dari $\chi^2_{hitung} = 9938,1$ memberikan keputusan H_0 ditolak. Hal tersebut memutuskan bahwa intensitas kejadian gempa di Pulau Maluku dan Sulawesi bersifat tidak homogen. Selain itu gempa bumi dapat juga dipengaruhi oleh faktor geologis di sekitar wilayah tersebut.

Karena hasil uji *chi-square* menunjukkan pola yang tidak homogen maka perlu dilihat korelasi spasial. Korelasi spasial bertujuan untuk mengetahui apakah data termasuk dalam bentuk reguler, independen atau membentuk suatu *cluster*. Hal tersebut dapat dilihat dari grafik *inhomogeneous K-function*.



Gambar 4. Plot Inhomogeneous K-Function

Berdasarkan Gambar 4 K-function dengan *edge correlation* (garis merah putus-putus) berada diatas garis K-function untuk *poisson process* (garis putus-putus hijau). Situasi tersebut memberi kesimpulan bahwa sebaran data gempa bumi di Maluku dan Sulawesi membentuk kelompok atau *cluster*. Sehingga langkah selanjutnya pada penelitian ini adalah memodelkan kejadian gempa dengan menggunakan metode *inhomogeneous Thomas cluster process*.

3.2. Pemodelan Inhomogeneous Thomas Cluster Process

Pemodelan *inhomogeneous Thomas cluster process* pada penelitian ini dilakukan dengan dua tahap. Pertama, melakukan estimasi untuk parameter β yang diestimasi menggunakan pendekatan *Berman-Turner*. Tahap kedua, melakukan estimasi untuk parameter κ dan ω yang diestimasi menggunakan metode *second order composite likelihood*. Adapun hasil estimasi dari parameter β , κ dan ω disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Estimasi dari $\hat{\kappa}$, $\hat{\beta}$ dan $\hat{\omega}$ pada Model dengan Variabel Kovariat Gunung Berapi, Sesar dan Zona Subduksi

Parameter	Estimasi	Exp (Koefisien)	Z-value
$\hat{\kappa}$	0,5372375		
$\hat{\omega}$	0,2570459		
$\hat{\beta}_0$	3,3558007	0,03488	14,0403
$\hat{\beta}_1$	-0,603622	1,82873	-6,4204***
$\hat{\beta}_2$	0,3824713	0,68217	3,7554***
$\hat{\beta}_3$	0,1543964	0,85693	2,5215***

***Signifikan pada alpha 0,05

Berdasarkan Tabel 3, dapat disimpulkan bahwa faktor geografis yaitu jarak sesar, zona subduksi, dan gunung berapi secara signifikan berpengaruh terhadap risiko terjadinya gempa bumi. Persamaan model *inhomogeneous Thomas cluster process* sebagai berikut:

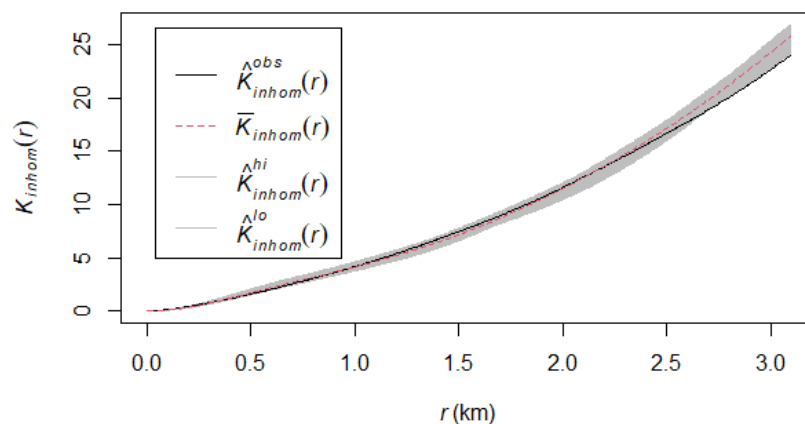
$$\hat{\rho}(\mathbf{u}) = 0,537 \exp(3,356 - 0,604Z_1(\mathbf{u}) + 0,382Z_2(\mathbf{u}) + 0,154Z_3(\mathbf{u})) \tag{7}$$

Persamaan 7 dapat diinterpretasikan sebagai berikut: (1). apabila jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke gunung berapi, risiko gempa bumi akan meningkat sebesar 1,8 kali, (2) apabila jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke sesar, risiko gempa bumi akan meningkat sebesar 0,7 kali (3) apabila suatu lokasi mendekati 100 km ke zona subduksi, risiko gempa akan meningkat sebesar 0,9 kali.

Estimasi parameter *cluster* dapat dilihat pada nilai nilai $\hat{\kappa}$ dan $\hat{\omega}$. Diperoleh nilai $\hat{\kappa}$ sebesar 0,5372375 dengan luas *window area* 224,829 km persegi. Perkiraan gempa dapat diketahui dengan cara mengalikan nilai $\hat{\kappa}$ dengan luas *windows* areanya. Perkiraan gempa di Sulawesi dan Maluku sebanyak 121 gempa utama. Nilai $\hat{\omega}$ sebesar 0,2570459 atau 25,70 km menunjukkan nilai standar deviasi dari titik gempa susulan terbesar di sekitar gempa utama.

3.3. Kebaikan Model

Setelah didapatkan model risiko kejadian gempa bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi, kemudian melakukan validasi model. Validasi model bertujuan untuk mengetahui seberapa baik model diperoleh dalam menggambarkan intensitas kejadian gempa bumi di wilayah tersebut. Validasi model dalam penelitian ini menggunakan *envelope K-Function*. Perbandingan dilakukan antara Plot *K-Function* dari data *point* asli dengan hasil dari simulasi model dari *inhomogeneous Thomas cluster process*. Simulasi dilakukan sebanyak 99 kali, karena berdasarkan hasil percobaan semakin banyak simulasi maka *confident interval* yang dihasilkan juga semakin lebar. Adapun *plot envelope K-Function* pada model dengan variabel jarak gempa terhadap sesar aktif, gunung berapi, dan zona subduksi dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini.

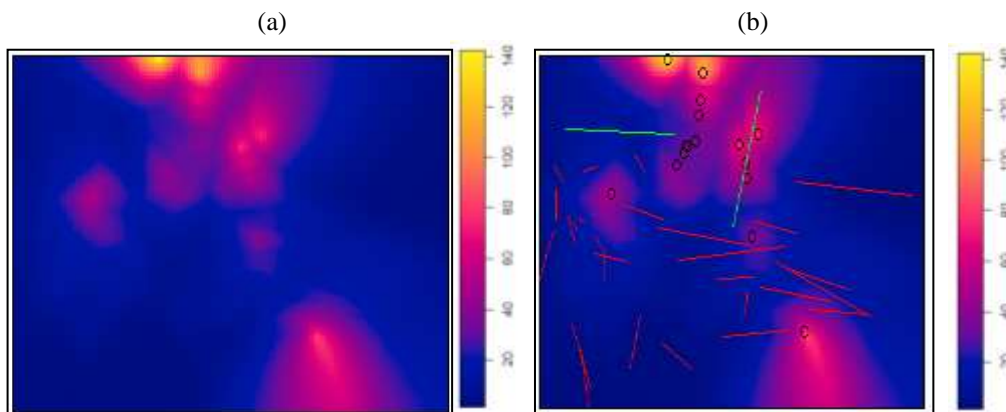


Gambar 5. *Envelope K-Function Model Inhomogeneous Thomas Cluster Process*

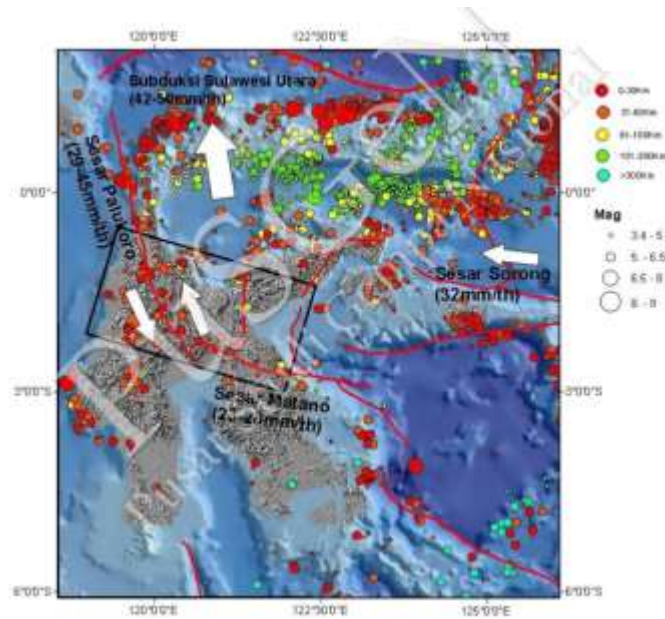
Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa data kejadian gempa bumi (garis hitam) di Pulau Maluku dan Sulawesi berada pada rentang interval *envelope K-Function*. Hal ini menunjukkan bahwa model mempunyai performansi yang baik untuk memodelkan data kejadian gempa bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi.

3.4. Prediksi Risiko Gempa Bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi

Setelah mengevaluasi model, langkah selanjutnya adalah melakukan prediksi risiko kejadian gempa bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi. Prediksi dilakukan untuk melihat seberapa daerah mana saja yang berisiko tinggi untuk terjadi gempa di kemudian hari.



Gambar 6. a) Plot Hasil Prediksi Intensity Gempa di Pulau Maluku dan Sulawesi, b) Plot Hasil Prediksi Intensity Gempa di Pulau Maluku dan Sulawesi dengan Titik Lokasi Gunung Berapi, Sesar, dan Subduksi



Gambar 7. Struktur Geologi Regional Pulau Sulawesi [19]

Berdasarkan Gambar 6, daerah yang memiliki risiko terjadinya gempa bumi adalah Pulau Sulawesi dan sekitarnya. Karena daerah tersebut terdapat 28 sesar aktif, 2 zona subduksi, dan 16 gunung berapi. Keterangan lengkap terkait prediksi risiko daerah rawan gempa berdasarkan pemodelan *inhomogeneous Thomas cluster process* terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Prediksi Risiko Kejadian Gempa Bumi

No	Provinsi	Tingkat Risiko
1	Gorontalo	Risiko tinggi
2	Sulawesi Utara	Risiko tinggi
3	Sulawesi Tengah	Risiko tinggi
4	Maluku	Risiko tinggi
5	Maluku Utara	Risiko tinggi
6	Sulawesi Tenggara	Risiko rendah
7	Sulawesi Selatan	Risiko rendah
8	Sulawesi Barat	Risiko rendah

Berdasarkan peta sumber bahaya gempa di Indonesia [20] wilayah Sulawesi Utara, Gorontalo, Sulawesi Tengah, dan Maluku Utara memiliki risiko kejadian gempa yang tinggi. Sesar aktif di Pulau Maluku dan Sulawesi dengan kedalaman 0-30 Km mengumpul pada Pulau Sulawesi bagian tengah ke Utara dan Pulau Maluku (lihat Gambar 7) [19]. Selain itu, pertemuan beberapa lempeng terjadi wilayah Maluku dan Sulawesi bagian utara yang menyebabkan risiko gempa tinggi.

4. KESIMPULAN

Karakteristik gempa bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi menyebar secara heterogen. Sebaran gempa bumi berada di bagian pulau Sulawesi bagian utara dan bagian selatan pulau Maluku. Hal ini dibuktikan dengan uji *chi-square* yang memberikan hasil signifikan. Selain itu karakteristik gempa bumi di Pulau Maluku dan Sulawesi dipengaruhi secara efek spasial.

Berdasarkan pemodelan *inhomogeneous Thomas cluster process* faktor-faktor yang mempengaruhi intensitas gempa bumi di pulau Sulawesi dan Maluku adalah gunung berapi, sesar dan zona subduksi. Risiko gempa akan meningkat sebesar 1.8 kali jika lokasi gunung berapi mendekati 100 km. Sedangkan risiko gempa bumi akan meningkat sebesar 0.7 dan 0.9 jika letak sesar serta zona subduksi mendekati 100 km. Secara keseluruhan model *inhomogeneous Thomas cluster process* baik dalam memodelkan intensitas gempa bumi di Maluku dan Sulawesi.

Hasil prediksi menggunakan model *inhomogeneous Thomas cluster process* menunjukkan bahwa risiko gempa tertinggi berada di wilayah Sulawesi bagian utara. Daerah dengan risiko tertinggi diantaranya adalah Provinsi Gorontalo, Provinsi Sulawesi Utara, Provinsi Sulawesi Tengah, Provinsi Maluku dan Provinsi Maluku Utara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. R. Pratiwi, Asnuddin, Hamdiah, and St. Hasriani, "Pendidikan Kespro dalam Menghadapi Situasi Darurat Bencana sebagai Upaya Peningkatan Kesejahteraan dan Reproduksi Sehat," *Indonesian Journal of Community Dedication*, vol. 2, no. 2, pp. 39–44, Aug. 2020, [Online]. Available: <http://jurnal.stikesnh.ac.id/index.php/community/article/view/322>
- [2] J. P. Ke, E. Labudasari, E. Rochmah, and K. Kunci, "LITERASI BENCANA DI SEKOLAH: SEBAGAI EDUKASI UNTUK MENINGKATKAN PEMAHAMAN KEBENCANAAN," *METODIK DIDAKTIK*, vol. 16, no. 1, pp. 41–48, 2020.
- [3] A. Muda Lubis, K. R. Simatupang, and E. Purwanto, "TELAAH ULANG PERGERAKAN LEMPENG TEKTONIK INDO-AUSTRALIA DENGAN MENGGUNAKAN DATA GPS TAHUN 1994-2016," *JoP*, vol. 5, no. 2, pp. 12–16, 2020.
- [4] A. Sabtaji, "STATISTIK KEJADIAN GEMPA BUMI TEKTONIK TIAP PROVINSI DI WILAYAH INDONESIA SELAMA 11 TAHUN PENGAMATAN (2009-2019)," *BULETIN METEOROLOGI, KLIMATOLOGI, DAN GEOFISIKA*, vol. 1, no. 7, pp. 31–46, 2020.
- [5] G. Pasau and A. Tanauma, "PEMODELAN SUMBER GEMPA DI WILAYAH SULAWESI UTARA SEBAGAI UPAYA MITIGASI BENCANA GEMPA BUMI," *JURNAL ILMIAH SAINS*, vol. 11, no. 2, pp. 202–209, Oct. 2011, doi: 10.35799/jis.11.2.2011.208.
- [6] E. Mardhatillah, A. Anggraini, and M. Nukman, "Tinjauan Perubahan Stress Coulomb Ko-Seismik Pada Sekuens Gempa Palu M 7,5 28 September 2018," *Jurnal Fisika Indonesia*, vol. 24, no. 3, p. 175, Dec. 2020, doi: 10.22146/jfi.v24i3.58237.
- [7] F. Trisnisa, R. Metrikasari, R. Rabbanie, K. Sakdiyah, and A. Choiruddin, "Model inhomogeneous spatial cox processes untuk pemetaan risiko gempabumi di pulau jawa," *Inferensi*, vol. 2, no. 2, pp. 107–111, 2019.
- [8] A. Baddeley, G. Nair, S. Rakshit, G. McSwiggan, and T. M. Davies, "Analysing point patterns on networks — A review," *Spat Stat*, vol. 42, p. 100435, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2020.100435>.
- [9] A. N. Syaifulloh, N. Iriawan, and P. P. Oktaviana, "Analisis Pola Persebaran Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) Wilayah Surabaya Menggunakan Spatial Poisson Point Process," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213480565>
- [10] R. Z. Almas, "Analisis Hubungan Spasial Antara Keberadaan Pasar Modern (Minimarket, Supermarket, dan Hypermarket) dengan Toko Kelontong di Surabaya Menggunakan Model Marked Poisson Point Process," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235854729>
- [11] T. A. Virania, A. Choiruddin, and V. Ratnasari, "Analisis Risiko Penyebaran Kasus Covid-19 di Surabaya Raya Menggunakan Model Thomas Cluster Process," *Inferensi*, vol. 4, no. 1, p. 57, Mar. 2021, doi: 10.12962/j27213862.v4i1.8874.
- [12] A. Baddeley and Y.-M. Chang, "Robust algorithms for simulating spatial cluster processes," *J Stat Comput Simul*, pp. 1–26, Jan. 2023, doi: 10.1080/00949655.2023.2166045.
- [13] A. Choiruddin, F. F. Hannanu, J. Mateu, and V. Fitriyanah, "COVID-19 transmission risk in Surabaya and Sidoarjo: an inhomogeneous marked Poisson point process approach," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, doi: 10.1007/s00477-023-02393-5.

- [14] Y. Liu, J. Tian, W. Zheng, and L. Yin, “Spatial and temporal distribution characteristics of haze and pollution particles in China based on spatial statistics,” *Urban Clim*, vol. 41, p. 101031, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101031>.
- [15] W.-H. Chiang, X. Liu, and G. Mohler, “Hawkes process modeling of COVID-19 with mobility leading indicators and spatial covariates,” *Int J Forecast*, vol. 38, no. 2, pp. 505–520, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.07.001>.
- [16] T. Stindl and F. Chen, “Spatiotemporal ETAS Model with a Renewal Main-Shock Arrival Process,” *J R Stat Soc Ser C Appl Stat*, vol. 71, no. 5, pp. 1356–1380, Nov. 2022, doi: 10.1111/rssc.12579.
- [17] D. Böhning, P. Sangnawakij, and H. Holling, “Estimating risk and rate ratio in rare events meta-analysis with the Mantel–Haenszel estimator and assessing heterogeneity,” 2022, doi: doi:10.1515/ijb-2021-0087.
- [18] B. D. Ripley, “Modelling Spatial Patterns,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 39, no. 2, pp. 172–192, Jan. 1977, doi: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1977.tb01615.x>.
- [19] M. R. Daryono, “Paleoseismologi Tropis Indonesia (Dengan Studi Kasus Di Sesar Sumatra, Sesar Palukoro-Matano, Dan Sesar Lembang),” 2018. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134660736>
- [20] Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia) and Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (Indonesia), *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*.