

PEMODELAN RISIKO GEMPA BUMI DI PULAU SULAWESI DAN MALUKU MENGGUNAKAN MODEL *INHOMOGENEOUS THOMAS CLUSTER PROCESS*

Budiono Rahman¹⁾, Tiani Wahyu Utami²⁾, Fatkhurokhman Fauzi³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Muhammadiyah Semarang
Email: budionor294@gmail.com

Abstrak

Pulau Sulawesi dan Maluku merupakan wilayah rawan gempa, wilayah tersebut dilalui oleh gunung berapi, sesar dan zona subduksi serta menjadi pintu masuk sirkum pasifik di Indonesia. Hasil eksplorasi data menunjukkan bahwa data kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku tidak homogen dan membentuk pola *cluster*. Pemodelan risiko kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku dengan *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* menunjukkan bahwa faktor jarak gunung berapi, sesar dan zona subduksi secara signifikan mempengaruhi risiko terjadinya gempa di wilayah tersebut, dimana jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke gunung berapi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1,8 kali. Kemudian, jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke sesar, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 0,7 kali serta jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke zona subduksi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 0,9 kali. Validasi model dengan plot *envelope K-Function* menunjukkan bahwa *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* baik digunakan untuk memodelkan data gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku tahun 2009-2020 dengan magnitude ≥ 4.5 .

Kata Kunci: Gempa Bumi, Gunung Berapi, Sesar, Suduksi, *Spatial Point Process*, *Inhomogeneous Thomas Cluster Procces*.

Abstract

The islands of Sulawesi and Maluku are earthquake-prone areas, the area is traversed by volcanoes, faults and subduction zones and is the entrance to the Pacific circum in Indonesia. The results of data exploration show that the data on the occurrence of earthquakes on the islands of Sulawesi and Maluku is not homogeneous and forms a pattern cluster. Modeling the risk of earthquakes in Sulawesi and Maluku Island using Inhomogeneous Thomas Cluster Process shows that the distance factor of volcanoes, faults and subduction zones significantly affects the risk of an earthquake in the area, where if the distance of a location is closer to 100 km to the volcano, the risk of an earthquake around that location increases by 1.8 times. Then, if the distance of a location is closer to 100 km to the fault, then the risk of an earthquake around that location increases by 0.7 times and if the distance of a location is closer to 100 km to the subduction zone, the risk of an earthquake around that location increases by 0.9 times. Model validation with K-Function envelope plot shows that Inhomogeneous Thomas Cluster Process is good for modeling earthquake data on Sulawesi and Maluku islands in 2009-2020 with magnitude ≥ 4.5 .

Keywords: *Earthquake, Subduction, Fault, Volcano, Spatial Point Process, Inhomogeneous Thomas Cluster Process.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko gempa bumi yang tinggi (Ihsan, 2008). Berdasarkan publikasi dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi yang dirangkum dalam Katalog Gempa Bumi Merusak di Indonesia, menyebutkan bahwa jumlah kejadian gempa bumi merusak di Indonesia pada tahun 2000-2014 sebanyak 105 kejadian (Supartoyo et al, 2014). Menurut Bird (2003), menjelaskan bahwa kondisi tektonik Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng besar dunia menyebabkan daerah tersebut berpotensi mengalami banyak kejadian gempa.

Gempa bumi merupakan gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energi regangan elastis batuan yang menyebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi pada lapisan *lithosfer* (Bullen, 1965). Menurut Undang-Undang No. 27 tahun 2007, gempa bumi diartikan sebagai peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan oleh faktor alam dan faktor *non* alam maupun faktor manusia, sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda serta dampak psikologis.

Pulau Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang kompleks (Hall et al, 2011). Struktur-struktur yang teridentifikasi di Sulawesi hingga saat ini masih aktif bergerak dan sering menghasilkan gempa. Menurut Engdahl (2007), sebaran sumber gempa mengelempok di bagian subduksi utara Sulawesi. Setidaknya gempa dengan magnitude 7,1 telah terjadi di zona subduksi Sangihe di tahun 2014 (Gunawan et al, 2016). Selain Pulau Sulawesi daerah laut Maluku juga termasuk dari penutupan cekungan samudera sebagai akibat dari tabrakan dua busur samudera, yaitu busur Halmahera dan Sangihe (Widiwijayanti et al, 2004). Laut Maluku terletak di daerah konvergensi tiga lempeng litosfer, yaitu Eurasia, Laut Filipina dan Australia. Palung yang terbentuk di bagian barat Pulau Halmahera dan utara Pulau Buru dan Seram

merupakan akibat dari aktivitas tektonik yang berlangsung. Menurut Hall dan Wilson (2000), palung yang terbentuk cukup dalam berkisar antara 4500 hingga 7000 meter, dimana wilayah tersebut merupakan zona tektonik aktif yang berpotensi membangkitkan tsunami apabila gempa bumi.

Beberapa dampak yang ditimbulkan oleh kejadian gempa bumi menurut kajian yang dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, melaporkan bahwa kejadian gempa bumi merusak di Pulau Sulawesi dan Maluku sejak tahun 2009-2018 setidaknya terdapat 12 kejadian. Gempa di Wilayah Sulawesi Utara pada tahun 2012 mengakibatkan 5 orang meninggal, 16 orang luka berat, 37 orang luka ringan dan 303 rumah rusak berat. Selain itu, pada tahun 2018 gempa berkekuatan 7,6 SR mengakibatkan bencana di Kabupaten Palu, Donggala, Sigi dan Parigi Moutong, tercatat sebanyak 2113 orang meninggal dunia, 1309 orang hilang, 4612 orang mengalami luka-luka serta puluhan ribu bangunan mengalami kerusakan. Adapun di Wilayah Maluku Utara, kejadian gempa yang mengakibatkan kerusakan terjadi pada tahun 2013 dengan jumlah korban 1 orang luka-luka dan 17 rumah rusak berat (Supartoyo, 2015). Oleh karena itu, upaya mitigasi perlu dilakukan secara dini dan optimal untuk meminimalasi dampak bencana gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku. Salah satu upaya mitigasi yang perlu dilakukan adalah dengan membuat peta titik-titik lokasi yang rawan gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku serta melakukan pemodelan kejadian gempa di wilayah tersebut dengan pendekatan *spatial point process*.

Penelitian mengenai risiko gempa bumi menggunakan data *spatial point pattern* (SPP) dengan metode metode *neyman-scott cox process* (NSCP) pernah dilakukan oleh Trisnisa et al (2019), analisis dilakukan untuk pemetaan risiko gempa bumi di Pulau Jawa. Hasil penelitian tersebut

menyimpulkan bahwa kejadian gempa bumi di Pulau Jawa membentuk pola *cluster*, serta jarak antara titik gempa menuju gunung berapi dan subduksi terdekat dianggap signifikan berpengaruh terhadap distribusi gempa bumi di pulau Jawa. Adapun penelitian menggunakan *spatial point pattern* (SPP) dengan pendekatan model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* pernah dilakukan oleh Virania et al (2021), analisis menggunakan studi kasus yang berbeda, yakni pemodelan risiko penyebaran kasus Covid-19 di Surabaya Raya. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* sangat baik digunakan untuk memodelkan kasus yang diamati.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dilakukan untuk memodelkan risiko terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku menggunakan *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*. Model yang diperoleh akan digunakan untuk memprediksi risiko persebaran kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku sebagai upaya mitigasi bencana. Kejadian gempa bumi tersebut akan dikaitkan dengan beberapa kovariat seperti koordinat subduksi, sesar dan gunung berapi.

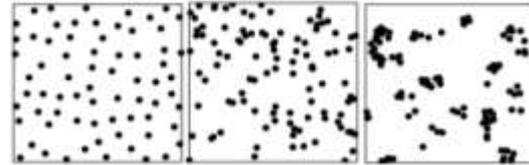
Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Observation window* dibatasi pada *latitude* lebih dari -6.926426847059551 dan kurang dari 4.2063329870791444 serta pada *longitude* lebih dari 118.5340648633433 dan kurang dari 134.92502131464263. Data yang digunakan adalah data kejadian gempa bumi harian yang terjadi antara tahun 2009 hingga 2020 pada magnitude ≥ 4.5 .

TINJAUAN PUSTAKA

1. *Spatial Point Process*

Spatial point process \mathbf{X} adalah himpunan bagian acak yang berasal dari suatu batasan tertentu $B \subset \mathbb{R}^2$. Bentuk realisasi dari *spatial point process* adalah *spatial point pattern* $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ dengan $n(\mathbf{X} \cap B)$ adalah jumlah poin yang berada pada suatu *observation window* B (Moller dan

Waagepetersen, 2007). Berdasarkan korelasi spasial, terdapat 3 pola dasar dalam *point pattern* yaitu *regular*, independen (*random*) dan kelompok (*cluster*). Ketiga pola dasar tersebut dapat divisualisasikan seperti pada gambar 1.



Gambar 1 Pola Dasar dalam *Point Pattern*

Pola regular pada gambar 1 menunjukkan bahwa titik-titik dalam wilayah pengamatan cenderung menjauh satu sama lain. Pada pola independen (*random*), titik-titik cenderung menunjukkan pola yang acak (*complete spatial randomness*). Sedangkan pada pola kelompok (*cluster*) titik-titik cenderung berdekatan satu dan lainnya.

1.1 *Poisson Process*

Poisson process merupakan salah satu model untuk *spatial point pattern* yang memiliki pola acak (*complete spatial randomness*). Sebuah *poisson process* \mathbf{X} pada \mathbb{R}^2 dengan fungsi intensitas ρ dan *observation window* $B \subseteq \mathbb{R}^2$ dengan $\mu(B) > 0$, sehingga $n(B)$ atau jumlah objek atau kejadian di B berdistribusi *poisson* dengan mean $\mu(B)$ dan poin di \mathbf{X}_B merupakan independent dengan fungsi intensitas $\rho(\mathbf{u})$, dimana $\mathbf{u} \in B$.

Terdapat dua tipe *poisson process*, tipe pertama yaitu jika $\rho(\mathbf{u})$ merupakan sebuah konstanta untuk semua $\mathbf{u} \in W$, maka *poisson process homogen*. Sedangkan tipe kedua terdapat sebuah *point process* yang disebut *inhomogeneous poisson process* (Daley dan Vere-Jones, 2007). *Inhomogeneous poisson process* merupakan suatu *poisson process* dengan fungsi intensitas $\rho(\mathbf{u})$ yang tidak konstan dan bervariasi sesuai dengan perubahan lokasi.

1.2 *Thomas Cluster Process*

Thomas Cluster Process terbentuk dari dua tahapan yang pertama yaitu *mother process*. *Mother process* (C) merupakan

suatu *Poisson process* dengan intensitas κ . Selanjutnya, akan muncul proses baru $\mathbf{X}_c, c \in C$ yang dinamakan *offspring processes* yang tersebar disekitar *mother process* dengan fungsi intensitas seperti pada persamaan 1.

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

$k(\mathbf{u})$ merupakan *probability density function* (pdf) dari distribusi jarak antara *offspring* dan *mother process* dengan parameter ω , dimana $\mathbf{X} = \cup_{c \in C} \mathbf{X}_c$ merupakan *Thomas Cluster Process* dengan induk C dan *offspring* $\mathbf{X}_c, c \in C$.

2. Analisis Eksplorasi Data

Analisis eksplorasi data pada *point process* digunakan untuk mengetahui stasioner atau homogenitas data dan mengetahui pola persebaran data dengan menggunakan analisis korelasi spasial. Stasioneritas suatu data dapat diketahui dari *first order properties*. Sedangkan pola persebaran data dapat diketahui dari *second order properties*.

2.1 Intensitas

Uji *Chi-Squared* dilakukan untuk menguji apakah data pengamatan yang digunakan dalam penelitian mengikuti pola yang homogen atau tidak. Sebelum melakukan pengujian homogenitas data maka *observation window* yang ada dibagi menjadi *quadrat count*, dimana n_1, n_2, \dots, n_m , merupakan jumlah *point* disetiap kotak bagian. Adapun uji yang digunakan adalah uji *chi-squared* dengan hipotesis pengujian sebagai berikut:

$$H_0: \rho(\mathbf{u}) = \rho(\mathbf{v}); \mathbf{u}, \mathbf{v} \in B$$

$$H_1: \rho(\mathbf{u}) \neq \rho(\mathbf{v}); \mathbf{u}, \mathbf{v} \in B$$

Adapun statistik uji yang digunakan dapat ditulis pada persamaan 2.

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

Keterangan:

n_j : banyaknya *point* di *quadrat count* ke- j

e_j : ekspektasi banyaknya *point* di *quadrat count* ke- j

m : jumlah kotak bagian/*quadrature*

Hasil pengujian akan menolak hipotesis nol jika $\chi_{hit}^2 > \chi_{\alpha; df}^2$ dengan $df = m - 1$ atau *P-value* $< \alpha$ (Baddeley et al, 2015).

2.2 K-Function

Teknik yang paling populer untuk menganalisis korelasi spasial pada *spatial point process* adalah *K-Function* yang diusulkan oleh Ripley (Ripley, 1977). Adapun rumus *K-Function* dengan intensitas *inhomogen* dapat ditulis seperti pada persamaan 3.

$$\hat{K}_{inhom} = \frac{1}{D^p |B|} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{I} \left\{ \frac{\|u_i - u_j\|}{\hat{\rho}(u_i) \hat{\rho}(u_j)} \right\} e(u_i; u_j; r) \quad (3), \text{ dimana nilai } D = \frac{1}{|B|} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\rho}(u_i)}$$

Keterangan:

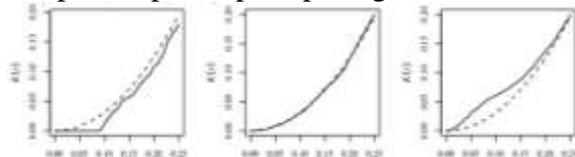
$h_{ij}(u_i; u_j; r)$: bobot *edge correction*

$|B|$: luas area *observation window*

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

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

Berdasarkan hasil *K-Function* $\hat{K}(r)$ yang telah dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan 3, sehingga dapat dilakukan visualisasi terhadap *K-Function* empiris $\hat{K}(r)$ bersama dengan *K-Function* teoritis dari *Poisson process* $K_{pois}(r) = \pi r^2$, sehingga didapatkan plot seperti pada gambar 2.



Gambar 2 *K-Function Plot*

Gambar 2 menunjukkan *Function* empiris $\hat{K}(r)$ bersama dengan *K-Function* teoritis dari *Poisson process*. Kurva dengan garis putus-putus merupakan plot dari *K-Function* teoritis dari *Poisson process*. Sedangkan *K-*

Function empiris dilambangkan dengan *solid line*. Ada tiga tipe plot yang terbentuk, dimana pada kondisi pertama garis *K-Function* empiris berada dibawah garis *K-Function* teoritis $\widehat{K}(r) < K_{pois}(r)$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jenis titik dalam pola ini memiliki tetangga (*neighbour*) lebih sedikit daripada yang diharapkan apabila pola tersebut benar-benar acak. Pola ini konsisten membentuk pola *regular*. Kondisi kedua dimana *K-Function* empiris bertumpukan dengan garis *K-Function* teoritis $\widehat{K}(r) = K_{pois}(r)$, artinya jenis titik dalam pola ini memiliki tetangga (*neighbour*) sesuai dengan yang diharapkan. Kondisi ketiga, dimana *K-Function* empiris berada diatas garis *K-Function* teoritis $\widehat{K}(r) > K_{pois}(r)$ yang artinya jenis titik dalam pola ini memiliki tetangga (*neighbour*) lebih banyak daripada yang diharapkan. Kondisi ini konsisten membentuk pola *cluster* (Baddeley et al, 2015).

3. Estimasi Parameter

Penaksiran parameter dilakukan pada penelitian ini untuk menaksir nilai parameter β dan parameter model *cluster*, yaitu ω dan κ . Pada penelitian ini, penaksiran parameter β di *first order* menggunakan metode *maximum composite likelihood orde 1*. Sedangkan penaksiran parameter model *cluster* digunakan metode *maximum composite likelihood orde 2*.

3.1 Maximum Composite Likelihood Orde 1

Model *inhomogeneous poisson process* dengan intensitas $\rho(\mathbf{u}; \beta)$ terdapat parameter yang dinotasikan dengan β . Adapun fungsi *log-likelihood* dapat dituliskan pada persamaan 4.

$$\log L(\beta; \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n \rho(\beta; \mathbf{u}_i) - \int_B \rho(\beta; \mathbf{u}) du \quad (4)$$

Berdasarkan persamaa di atas, diketahui bahwa fungsi *log-likelihood* dari *inhomogeneous poisson process* melibatkan integral dari *observation window* B . Oleh karena itu, penaksiran parameter dengan

fungsi *likelihood* tersebut tidak dapat dihitung dengan tepat, sehingga dibutuhkan perhitungan secara numerik. Metode *numerical quadrature* dikembangkan untuk *inhomogeneous poisson point process* agar fungsi *likelihood* nya mendekati fungsi *likelihood* dari *generalized linear poisson model*. Menggunakan pendekatan *numerical quadrature*, maka $\int_B \rho(\beta; \mathbf{u}) du$ dapat didekati

$$\text{oleh } \sum_{i=1}^{n+q} \rho(\beta; \mathbf{u}_i) w_i, \text{ dimana } w_i \text{ merupakan}$$

bobot *quadrature* dan q merupakan banyaknya *dummy point*, sehingga persamaan 4 dapat ditulis menjadi persamaan 5 berikut ini.

$$\log L(\beta; \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{n+q} (I_i \log \rho(\beta; \mathbf{u}_i) - \rho(\beta; \mathbf{u}_i) w_i) \quad (5)$$

Nilai I_i bernilai 1 jika \mathbf{u}_i merupakan sebuah data poin. Sedangkan untuk \mathbf{u}_i yang merupakan *dummy point* I_i bernilai 0.

Persamaan 5 juga dapat ditulis seperti pada persamaan 6 (Berman dan Turner, 1992).

$$\log L(\beta; \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{n+q} (y_i \log \rho(\beta; \mathbf{u}_i) - \rho(\beta; \mathbf{u}_i) w_i) \quad (6)$$

dimana $y_i = I_i/w_i$, persamaan 6 ekuivalen dengan fungsi *likelihood weighted poisson* yang diberi bobot w_i .

3.2 Maximum Composite Likelihood Orde 2

Maximum composite likelihood orde 2 merupakan salah satu metode penaksiran parameter model *clustered point process* $\theta = (\kappa, \omega)^T$ pada persamaan 7 dituliskan fungsi *composite likelihood orde 2* yang dibangun dari semua titik data $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$ (Baddeley et al, 2015).

$$\log CL(\theta) = \sum_i \sum_{j \neq i} w(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) \left[\log \rho^{(2)}(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j; \theta) - \log \int_B \int_B w(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) \rho^{(2)}(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j; \theta) du_i du_j \right] \quad (7)$$

Nilai w pada persamaan 7 merupakan fungsi pembobot, untuk memudahkan perhitungan maka nilai $w(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) = 1\{\|\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j\| \leq R\}$ dengan $R > 0$ merupakan batas atas korelasi

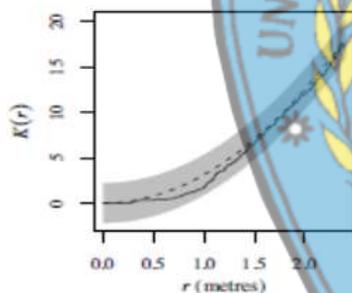
dari model. Fungsi *composite score* yang merupakan turunan pertama *fungsi likelihood* terhadap θ , dapat dituliskan seperti pada persamaan 8.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \log CL(\theta) = \sum_i \sum_{j \neq i} w(u_i, u_j) \frac{\kappa_2(u_i, u_j; \theta)}{\rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta)} \quad (8), \text{ dimana } \kappa_2(u_i, u_j; \theta) = \frac{\partial}{(\partial \theta) \rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta)} \text{ dan}$$

$$(l, w) = \iint_{B \ B} w(u_i, u_j) \rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta) du_i du_j.$$

4. Kebaikan Model

Kebaikan model yang dihasilkan dapat dilihat menggunakan plot *envelope K-Function*. Suatu model dikatakan baik untuk memodelkan data tertentu jika plot *K-Function* data *point* asli berada pada data interval *envelope K-Function*. Ilustrasi dari plot *envelope K-Function* pada data *Swedishpines*, dimana area abu-abu merupakan area interval *envelope* seperti ditunjukkan pada gambar 3 (Baddeley et al, 2015).



Gambar 3 Plot Envelope K-Function

Selain menggunakan plot *envelope K-Function*, model terbaik dapat dipilih berdasarkan nilai BIC terkecil. Kriteria BIC dapat didefinisikan seperti pada persamaan 9 berikut ini.

$$-2\ell_n(\hat{\beta}) + p \log\{\mu(W)\} \quad (9)$$

p merupakan banyaknya parameter yang ditaksir ($\hat{\beta}$), pada prakteknya, nilai $\mu(W)$ tidak diketahui, sehingga dapat didekati dengan $n(W)$, maka kriteria BIC juga dapat didefinisikan seperti pada persamaan 10 (Choiruddin et al, 2020).

$$BIC = -2\ell_n(\hat{\beta}) + p \log\{n(W)\} \quad (10)$$

$\ell_n(\hat{\beta})$ merupakan *maximum composite likelihood* orde 1 seperti pada persamaan 2.14. $n(W)$ merupakan jumlah titik yang ada

dalam sebuah *observation window* W dan p merupakan jumlah parameter yang ada dalam model.

5. Gempa Bumi

Gempabumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Gempabumi akan terjadi apabila penumpukan energi pada batas lempeng yang bersifat *konvergen* (bertumbukan), *divergen* (saling menjauh) dan *transform* (berpapasan) atau pada sesar dan blok batuan tersebut tidak mampu lagi menahan batas elastisitasnya ((Sunarjo et al., 2012).

6. Faktor Geologis

Subduksi merupakan pertemuan (tumbukan) dua lempeng akibat adanya pergerakan lempeng yang saling mendekat (lempeng benua dan lempeng samudera). Besar sudut subduksi dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan lempeng atasnya (Akman, 2016).

Sesar adalah struktur rekahan yang telah mengalami pergeseran. Sesar dapat dibagi kedalam beberapa jenis tergantung pada arah relatif pergeserannya. Selama sesar dianggap suatu bidang datar, maka konsep jurus dan kemiringan juga dapat dipakai, dengan demikian jurus dan kemiringan dari suatu bidang sesar dapat diukur dan ditentukan (Noor, 2009).

Gunung berapi muncul akibat magma dari dalam bumi bergerak naik ke atas permukaan. Naiknya magma ke permukaan disebabkan oleh dua hal yaitu aktifitas tektonik dan konduksi panas. Naiknya magma ke permukaan disebabkan oleh adanya aktifitas tektonik yang bermula dari ketidakseimbangan litostatik di dalam bumi. Sedangkan naiknya magma karena konduksi panas terjadi karena aliran panas dari kantung magma ke lapisan batuan terdekat (Setiawan, 2014; Hermon, 2015).

METODE

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder berupa koordinat lokasi kejadian gempa bumi harian di wilayah Pulau Sulawesi dan Maluku pada rentang tahun 2009-2020 dengan magnitudo ≥ 4.5 SR yang diperoleh dari laman web Badan Meterologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sedangkan koordinat data sesar dan zona subduksi diperoleh dari Pusat Studi Gempa Nasional melalui publikasi Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Selain itu, data koordinat gunung berapi diperoleh dari laman web Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG).

Tabel 1 Variabel Penelitian

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

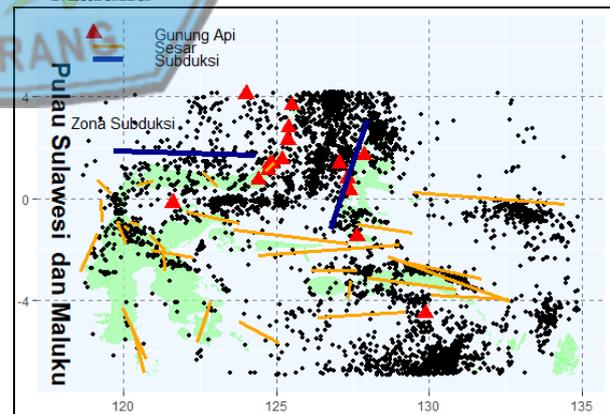
Langkah-langkah analisis data di atas adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data gempa di Indonesia tahun 2009-2020.
2. Melakukan *pre-processing* data dengan memilih sejumlah data berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan, yakni hanya memasukkan data pada wilayah Pulau Sulawesi dan Maluku serta kekuatan gempa di wilayah tersebut.
3. Menentukan *observation window* yang akan diamati.
4. Mengubah koordinat *latitude* dan *longitude* lokasi kejadian gempa bumi serta lokasi subduksi, sesar dan gunung berapi menjadi sebuah objek yang merempresentasikan sebuah *point pattern* dalam bidang dua dimensi.
5. Menghitung jarak masing-masing variabel kovariat terhadap lokasi titik gempa menggunakan jarak *euclidean*.
6. Membuat visualisasi data untuk mengetahui karakteristik persebaran gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku.

7. Melakukan analisis eksplorasi data dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 - a. Melakukan identifikasi homogenitas/stasioner data menggunakan uji *chi-square*.
 - b. Jika hasil uji *chi-square* menyatakan intensitas *inhomogen*, maka dilakukan visualisasi dengan menggunakan grafik *inhomogen K-Function* untuk mengetahui korelasi spasial data.
8. Melakukan pemodelan kejadian gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku dengan *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*.
9. Estimasi parameter dilakukan dengan menggunakan *maximum composite likelihood* orde 1 dan *maximum composite likelihood* orde 2.
10. Melakukan pengecekan kebaikan model menggunakan plot *envelope K-Function*.
11. Memprediksi kasus kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku menggunakan model yang diperoleh serta memetakan hasil prediksi kejadian gempa bumi di wilayah tersebut.
12. Melakukan penarikan kesimpulan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Deskriptif Karakteristik Persebaran Gempa Bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku



Gambar 4 Persebaran Gempa Bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku

Gambar 4 menunjukkan persebaran kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku selama tahun 2009-2020, diketahui bahwa jumlah kejadian gempa sebanyak 4303 dengan magnitudo ≥ 4.5 SR yang divisualisasikan dalam bentuk *point pattern* berwarna hitam, dimana titik kejadian gempa

tersebut cenderung mengelompok di beberapa wilayah tertentu, yaitu bagian utara Maluku dan Sulawesi, wilayah laut Maluku dan Nusa Tenggara Timur hingga kepala burung Papua. Selain itu, keberadaan kovariat gempa yakni gunung berapi yang divisualisasikan dalam bentuk segi tiga berwarna merah juga menyebar dari bagian utara Sulawesi-Maluku hingga wilayah laut Maluku. Kemudian, persebaran sesar aktif divisualisasikan berupa garis berwarna orange dan tersebar serta melintasi hampir seluruh wilayah Pulau Sulawesi dan Maluku hingga kepala burung Papua. Sedangkan zona subduksi divisualisasikan dalam bentuk garis berwarna biru, garis pertama melintasi wilayah laut Sulawesi Tengah, Sulawesi Utara hingga Gorontalo dan garis zona subduksi kedua melintasi seluruh wilayah Maluku Utara.

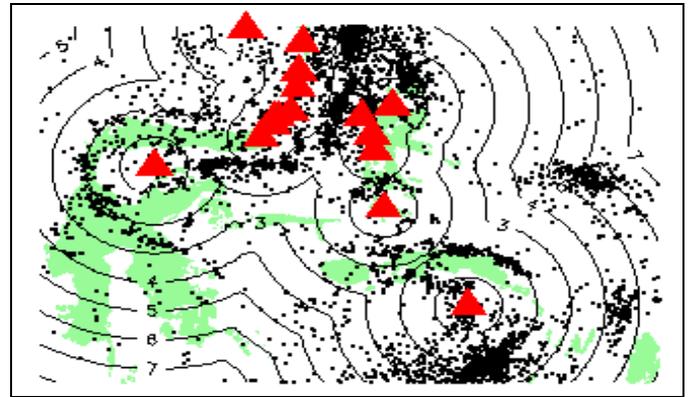


Gambar 5 Jumlah kejadian gempa pada unit *square*

Gambar 5 menunjukkan jumlah kejadian gempa bumi pada setiap unit *square area*, diketahui bahwa jumlah kejadian gempa tertinggi pada unit *square area* yang ditunjukkan oleh area berwarna cerah, yaitu sebanyak 162 dan 166 kejadian, dimana masing-masing terjadi tepat di bagian utara Pulau Sulawesi dan Provinsi Maluku. Selain itu, dapat dijelaskan bahwa intensitas gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku memiliki rata-rata sebesar 87.2, dimana secara visual pada area yang memiliki intensitas > 100 , maka akan memiliki warna yang semakin cerah serta menandakan bahwa area tersebut memiliki intensitas gempa yang tinggi. Sedangkan pada area yang memiliki intensitas < 40 , maka akan

memiliki warna yang semakin gelap serta menandakan bahwa area tersebut memiliki intensitas yang rendah.

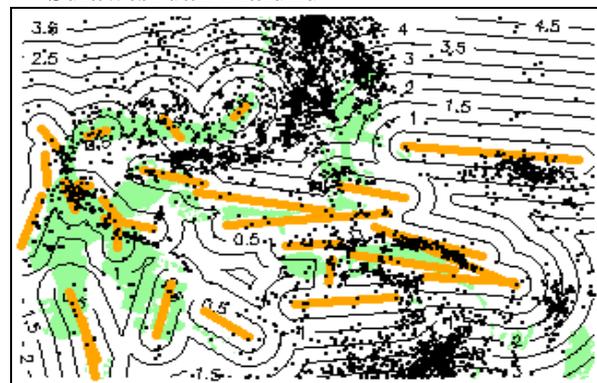
2. Deskripsi Persebaran Gunung Berapi di Pulau Sulawesi dan Maluku



Gambar 6 Persebaran gunung berapi di Pulau Sulawesi dan Maluku

Gambar 6 merupakan visualisasi yang menunjukkan persebaran gunung berapi di Pulau Sulawesi dan Maluku dalam bentuk plot kontur, dimana sebagian besar gunung berapi terdistribusi di bagian utara Pulau Sulawesi dan Maluku. Selain itu, kontur yang membentuk garis hitam dimulai dari pusat gunung api pada skala 1:100 km, sehingga dapat dijelaskan bahwa jarak titik gempa terhadap gunung berapi berada pada radius 0-700 km dari pusat gunung berapi, dimana gempa tersebar hingga ke kepala burung Papua dan bagian selatan Pulau Sulawesi. Berdasarkan hal tersebut, dapat dinyatakan bahwa daerah-daerah yang berada pada radius 0-700 km dengan titik gunung merupakan daerah yang berpotensi memiliki risiko gempa bumi yang tinggi.

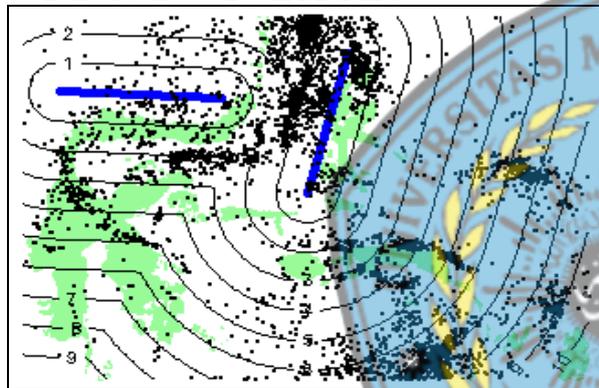
3. Deskripsi Persebaran Sesar di Pulau Sulawesi dan Maluku



Gambar 7 Persebaran sesar di Pulau Sulawesi dan Maluku

Gambar 7 merupakan visualisasi yang menunjukkan persebaran sesar di Pulau Sulawesi dan Maluku dalam bentuk plot kontur, diketahui bahwa sesar terdistribusi hampir di seluruh wilayah Sulawesi dan Maluku hingga ke kepala burung Papua. Selain itu, kontur yang membentuk garis hitam dimulai dari pusat garis sesar pada skala 1:100 km, sehingga dapat dijelaskan bahwa jarak titik gempa terhadap sesar berada pada radius 0-450 km dari pusat garis sesar. Berdasarkan hal tersebut, dapat dinyatakan bahwa daerah-daerah yang berada pada radius 0-450 km dengan titik sesar merupakan daerah yang memiliki risiko gempa bumi yang tinggi.

4. Deskripsi Persebaran Zona Subduksi di Pulau Sulawesi dan Maluku



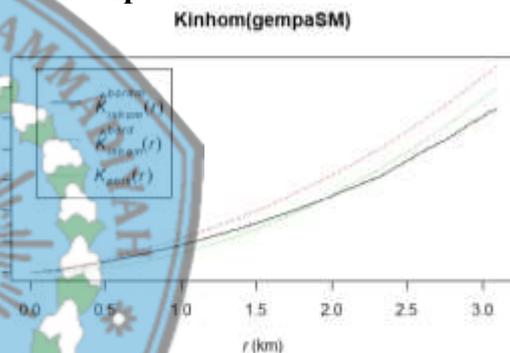
Gambar 8 Persebaran zona subduksi di Pulau Sulawesi dan Maluku

Gambar 8 merupakan visualisasi yang menunjukkan persebaran zona subduksi di Pulau Sulawesi dan Maluku dalam bentuk plot kontur, diketahui bahwa zona subduksi melintasi bagian utara Sulawesi, yaitu Gorontalo, Sulawesi Utara dan Sulawesi Tengah. Kemudian, melintas di sepanjang wilayah Maluku Utara. Selain itu, kontur yang membentuk garis hitam dimulai dari pusat garis sesar pada skala 1:100 km, sehingga dapat dijelaskan bahwa jarak titik gempa terhadap zona subduksi berada pada radius 0-1000 km dari pusat zona subduksi. Berdasarkan hal tersebut, dapat dinyatakan bahwa daerah-daerah yang berada pada radius 1000 km dengan zona subduksi merupakan daerah yang memiliki risiko gempa bumi yang tinggi.

5. Uji Chi-Square

Hasail uji *chi-squared* pada data kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku, diketahui bahwa bahwa nilai statistik uji yang diperoleh sebesar 9938.1 dengan nilai derajat bebas sebesar 99, dimana nilai derajat bebas dihitung dengan rumus $m-1$, m merupakan banyaknya *quadrat count* yang dibentuk, sehingga diperoleh nilai *P-value* sebesar 2.2×10^{-16} . Berdasarkan hal tersebut, dapat dinyatakan menolak hipotesis H_0 , karena nilai *P-value* $< \alpha$ (0.05). Artinya data kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku mengikuti pola yang tidak homogen atau stasioner. Selain itu, dimungkinkan terdapat faktor geologis yang secara signifikan mempengaruhi kejadian gempa bumi tersebut.

6. Korelasi Spasial



Gambar 9 Plot *Inhomogeneous K-function*

Gambar 9 menunjukkan bahwa dari pengujian secara visual yang dilakukan dengan menggunakan grafik *Inhomogeneous K-Function*, diketahui bahwa garis merah putus-putus yang merupakan *K-Function* dengan *edge correction* berada di atas garis hijau putus-putus yang merupakan *K-Function* untuk *Poisson process*, sehingga dapat disimpulkan bahwa sebaran data gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku membentuk pola *cluster*.

7. Pemodelan Kejadian Gempa Bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku

Hasil pemodelan kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku menggunakan model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* dengan taraf signifikansi sebesar 5% ($\alpha=0.05$), diketahui bahwa faktor geografis yaitu jarak gunung berapi, sesar dan zona subduksi secara signifikan berpengaruh

terhadap risiko terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku. Hal ini ditunjukkan oleh nilai Z -value pada masing-masing variabel kovariat lebih besar dari nilai Z_{tabel} pada α 0.05, yaitu sebesar 1.96. Selanjutnya, berdasarkan hasil estimasi diperoleh nilai $\hat{\kappa}$ dan $\hat{\omega}$ yang merupakan nilai estimasi untuk parameter *cluster*, sehingga diperoleh nilai $\hat{\kappa}$ sebesar 0.5372375

dengan luas *window area* 224.829 km persegi, maka perkiraan kejadian gempa utama di Pulau Sulawesi dan Maluku dapat dihitung dengan cara mengalikan nilai pada parameter $\hat{\kappa}$ dan luas *window area*, sehingga

dapat dinyatakan bahwa sebanyak 121 gempa utama diperkirakan terjadi di Pulau Sulawesi dan Maluku dengan risiko gempa susulan pada masing-masing gempa utama dipengaruhi oleh kondisi geografis, yaitu jarak terjadinya gempa utama dengan gunung berapi, sesar dan zona subduksi. Selain itu, titik-titik gempa susulan tersebar di sekitar gempa utama dengan standar deviasi yang ditunjukkan oleh nilai $\hat{\omega}$, yaitu sebesar 0.2570459 atau 25.70 km. Temuan ini merepresentasikan teori yang dikemukakan oleh Choiruddin et al (2018), bahwa jika nilai ω semakin kecil maka *cluster* yang terbentuk semakin rapat dan jika nilai κ semakin kecil, maka *number of parent* juga akan lebih sedikit.

Berdasarkan hasil estimasi parameter, diperoleh model intensitas dari model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* sebagai berikut:

$$\hat{\mu}(u) = 0.537 \exp(3.356 - 0.604Z_1(u) + 0.382Z_2(u) + 0.154Z_3(u))$$

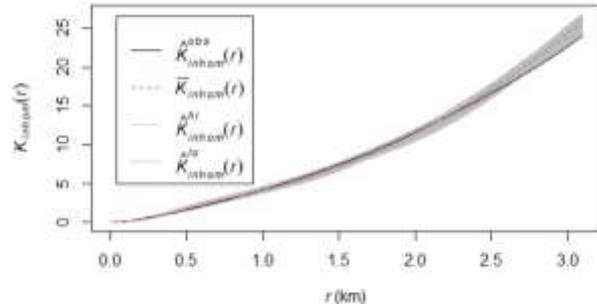
Berdasarkan persamaan di atas, dapat dijelaskan bahwa risiko terjadinya gempa bumi di suatu lokasi adalah sebagai berikut:

1. Jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke gunung api, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1,8 kali atau hampir dua kali lipat lebih berisiko.
2. Jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke sesar, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar

0,7 kali atau hampir satu kali lipat lebih berisiko.

3. Jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke zona subduksi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 0,9 kali atau hampir satu kali lipat lebih berisiko.

8. Keباikan Model

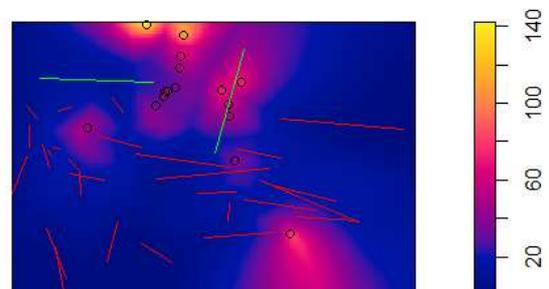


Gambar 10 Envelope K -Function

Model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*

Gambar 10 menunjukkan plot *Envelope K-Function* pada model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*, diketahui bahwa data kejadian gempa bumi berada pada interval *envelope K-Function*. Hal ini ditunjukkan oleh garis hitam lurus berada pada area yang diarsir, artinya model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* baik digunakan untuk memodelkan data kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku pada rentang tahun 2009-2020 dengan magnitude ≥ 4.5 . Selain itu, plot K -Function di atas juga menunjukkan bahwa pada radius ≥ 250 km, ada kemungkinan model *overfit* karena interval dari *envelope K-Function* cenderung melebar ke atas.

9. Prediksi Risiko Gempa



Gambar 11 Plot hasil prediksi *intensity* gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku

Gambar 11 menunjukkan peta hasil prediksi risiko gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku menggunakan model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*,

diketahui bahwa bahwa risiko gempa di wilayah bagian utara Pulau Sulawesi cenderung sangat tinggi dibanding wilayah lainnya, dimana wilayah tersebut letaknya dikelilingi oleh 16 gunung berapi dan 2 zona subduksi serta sebanyak 28 sesar aktif yang menyebar hampir di Seluruh wilayah Pulau Sulawesi dan Maluku. Adapun daerah-daerah rawan gempa secara spesifik dapat dijelaskan pada tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 1 Status Daerah Berdasarkan Hasil Prediksi Risiko Gempa Bumi

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

Tabel 1 menunjukkan status risiko gempa pada daerah-daerah yang ada di Pulau Sulawesi dan Maluku. Secara garis besar daerah dengan status risiko tinggi meliputi Gorontalo, Sulawesi Utara, Sulawesi Tengah, Maluku dan Maluku Utara. Hal ini ditunjukkan oleh daerah yang berwarna cerah yang memiliki intensitas gempa sebesar ≥ 140 seperti pada gambar 4.8. Sedangkan daerah dengan status risiko rendah ditunjukkan pada daerah berwarna gelap yang memiliki intensitas gempa sebesar < 100 yang meliputi Sulawesi Tenggara, Sulawesi Selatan dan Sulawesi Barat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Maluku membentuk pola *cluster*, dimana sebagian besar gempa terjadi pada radius 0-700 km ke gunung berapi, radius 0-450 km ke sesar dan berada pada radius 0-1000 km ke zona subduksi.
2. Faktor geologis yang signifikan mempengaruhi kejadian gempa bumi

di Pulau Sulawesi dan Maluku berdasarkan pemodelan dengan *Inhomogeneous Thomas Cluster Process*, yaitu gunung berapi, sesar dan zona subduksi. Adapun jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke gunung api, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1,8 kali atau hampir dua kali lipat. Kemudian, jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke sesar, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 0,7 kali atau hampir satu kali lipat serta jika jarak suatu lokasi mendekati 100 km ke zona subduksi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 0,9 kali atau hampir satu kali lipat.

3. Hasil prediksi menggunakan model *Inhomogeneous Thomas Cluster Process* menunjukkan bahwa daerah-daerah rawan gempa di Pulau Sulawesi dan Maluku terletak di bagian utara Pulau Sulawesi meliputi Sulawesi Tengah, Sulawesi Utara dan Gorontalo serta meliputi utara Pulau Maluku dan wilayah laut Maluku-Nusa Tenggara Timur.

Daftar Pustaka

- Akmam. 2016. *Subduksi Lempeng Indo-Australia pada Lempeng Eurasia di Pantai Barat Sumatera Barat*. Jurnal Saintek, Vol. 1 (1). ISSN: 2085-8019.
- Baddeley, E., Rubak dan R. Turner. 2015. *Spatial point patterns: methodology and application with R*. CRC Press.
- Bird, P. 2003. *An Update Digital Model of Plate Boundaries, Geochem. Geophys. Geosyst.* 4(3), 1027, doi: 10.1029/2001GC000252.
- Bullen, K. E dan Bruce, A. B. 1965. *An Introduction to The Theory of Seismology (Fourth Edition)*. Cambridge University Press.
- Choiruddin, A., Coeurjolly, J. & Letue, F. 2018. *Convex and non-convex regularization methods for spatial*

- point processes intensity estimation*. Electronic Journal of Statistics, 1 (12), pp. 1210-1255.
- Choiruddin, A., Coeurjolly, J.-F. & Waagepetersen, R. 2020. *Information criteria for inhomogeneous spatial*. arXiv preprint arXiv:2003.03880.
- Daley, D., & Vere-Jones, D. 2007. *An Introduction to The Theory of Point Process: Volume II: general theory and structure*. Springer Science and Bussines Media.
- Engdahl, et al. 2007. *Teleseismic relocation and assessment of seismicity (1918-2005) in the region of the 2004 M_w 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 M_w 8.6 Nias island great earthquakes*. Bulletin of the Seismological Society of America, 97, S43-S61.
- Hall, et al. 2011. *The SE Asian gateway: history and tectonics of Australia-Asia collision*. Geological Society of London Special Publication.
- Hermon, D. 2015. *Geografi Bencana Alam*. Jakarta: Rajawali Pers.
- <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/ata-dasar-gunungapi>. Diakses tanggal 20 Agustus 2021.
- https://dataonline.bmkg.go.id/data_gempa_bumi. Diakses tanggal 19 Agustus 2021.
- Kementerian, ESDM. 2013. *Pengenalan Gempa Bumi*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kementrian, PUPR. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- M. Ihsan. 2008. *Analisis Ketahanan Gempa pada Struktur Rumah Tradisional Sumatra*. Depok: Universitas Indonesia.
- Møller, J., & Waagepetersen, R. 2007. *Modern Statistics for Spatial Point Processes*. Scandinavian Journal of Statistics, 4 (34), pp. 634-684.
- Noor, D. 2009. *Pengantar Geologi Edisi Pertama*. Bogor: Pakuan University Press.
- Ripley, B. 1977. *Modelling Spatial Patterns*. Journal of The Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 2 (39), pp. 172-192.
- Saputera, H., et al. 2016. *Studi Analisis Parameter Gempa dan Pola Sebarannya Berdasarkan Data Multi-Station (Studi Kasus Kejadian Gempa Pulau Sulawesi tahun 2000-2014)*. Makassar: Universitas Negeri Makassar.
- Sulaeman, C. dan Cipta, A. *Model Intesitas Gempa Bumi di Maluku Utara*. Bandung: Badan Geologi.
- Sunarjo, Gunawan dan Pribadi. 2012. *Gempa Bumi Edisi Populer*. Jakarta: BMKG.
- Supartoyo, et al. 2014. *Katalog Gempa Bumi Merusak di Indonesia tahun 1612-2014 (Edisi Kelima)*. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Supartoyo. 2015. *Gempa Bumi Laut Maluku tanggal 15 November 2014*. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Trisnisa, F., et al. 2019. *Model Inhomogeneous Spatial Cox Processes untuk Pemetaan Risiko Gempa Bumi di Pulau Jawa*. Jurnal Inferensi. Vol.2(2), September 2019. ISSN: 0216-308X.
- Virania, T. A., et al. 2021. *Analisis Risiko Penyebaran Kasus Covid-19 di Surabaya Raya Menggunakan Thomas Cluster Process*. Jurnal Inferensia. Vol. 4(1), Maret 2021. ISSN: 0216-308X.
- Widiwijayanti, Tiberi, Deplus, Diament, M., & Mikhailov, V. 2004. *Geodynamic evolution of the northern Molucca Sea area (Eastern Indonesia) constrained by 3-D gravity field inversion*. Journal Tectonophysics, p. 203-222.