

# Analisis Risiko Gempabumi di Sumatera dengan *Cauchy Cluster Process*

Yuniar Mega Kartikasari<sup>1\*</sup>, Achmad Choiruddin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Statistics, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

\*Corresponding author: yuniarmegak@gmail.com

Received: 10 February 2022

Revised: 30 September 2022

Accepted: 30 September 2022

**ABSTRAK** – Pulau Sumatera adalah salah satu wilayah di Indonesia yang rawan terhadap gempabumi. Kondisi ini dikarenakan geografisnya yang dilalui oleh sesar aktif, zona subduksi, dan gunung berapi. Pada penelitian ini, persebaran gempabumi di Sumatera dimodelkan dengan mempertimbangkan efek *spatial trend* yang disebabkan oleh keberadaan zona subduksi, sesar aktif, dan gunung berapi dan efek *cluster* yang disebabkan aktivitas *mainshock* dan *aftershocks* menggunakan *inhomogeneous Cauchy cluster process*. Pada pemodelan *spatial trend*, terdapat indikasi bahwa terjadi multikolinearitas ditandai dengan korelasi yang tinggi antar faktor geografis, sehingga penelitian ini mempertimbangkan regularisasi ridge untuk mengatasi hal tersebut. Hasil eksplorasi data menunjukkan bahwa gempabumi di Sumatera tidak homogen dan membentuk cluster yang disebabkan karena faktor geologis seperti keberadaan gunung berapi, zona subduksi, dan sesar aktif. Pemodelan intensitas gempabumi dengan regularisasi ridge menghasilkan nilai AIC sebesar -2280648 yang mana lebih kecil daripada model tanpa regularisasi. Model *Cauchy cluster* dengan mempertimbangkan regularisasi ridge menghasilkan estimasi jumlah gempabumi utama sebanyak 63 dengan standar deviasi gempabumi susulan disekitar gempabumi utama sebesar 17,685 km. Semakin dekat suatu lokasi ke sesar aktif, risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat 1,6972 kali. Semakin dekat suatu lokasi ke zona subduksi, risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat sebesar 1,25899 kali, dan semakin dekat suatu lokasi ke gunung berapi risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat sebesar 1,55910 kali.

**Kata Kunci**– *spatial trend*, faktor geologis, multikolinearitas, intensitas, risiko.

**ABSTRACT** – Sumatra is one of the prone areas in Indonesia to earthquakes. This condition is due to its geography which is traversed by active faults, subduction zones, and volcanoes. In this study, the distribution of earthquake occurrences in Sumatra is modeled by considering the effects of spatial trends due to subduction zones, active faults, and volcanoes and also considering the cluster effects caused by mainshock and aftershock activities using the inhomogeneous Cauchy cluster process. In spatial trend modeling, there are indications that there is multicollinearity issue characterized by a high correlation among geographical factors, so this study considers ridge regularization to overcome this problem. The results of data exploration show that the earthquakes in Sumatra are not homogeneous and form clusters due to geological factors such as the presence of volcanoes, subduction zones, and active faults. Earthquake intensity modeling with ridge regularization produces an AIC value of -2280648 which is smaller than the model without regularization. The Cauchy cluster model by considering ridge regularization resulted in an estimated number of 63 mainshocks with a standard deviation of aftershocks around the mainshocks of 17.685 km. The closer a location to a fault, the risk of an earthquake occurring at that location increases by 1.6972 times. The closer a location to a subduction zone, the risk of an earthquake at that location increases by 1.25899 times, and the closer a location is to a volcano, the risk of an earthquake at that location increases by 1.55910 times.

**Keywords**– *spatial trend*, geological factors, multicollinearity, intensity, risk.

## I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada jalur sirkum pasifik atau yang dikenal dengan *Pacific Ring of Fire*, dimana 80% dari gempabumi di dunia terjadi di wilayah tersebut [1]. Selain itu, Indonesia juga berada pada pertemuan lempeng tektonik, yaitu lempeng Australia, lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Filipina yang menyebabkan adanya gempabumi, gunung berapi, dan topografi yang kasar [2]. Data menunjukkan bahwa Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki tingkat kegempaan yang tinggi di dunia, lebih dari 10 kali lipat tingkat kegempaan di Amerika Serikat [3]. Lempeng tektonik yang saling bertumbukan, mengakibatkan wilayah Indonesia memiliki lebih dari 295 sesar aktif yang menjadikan Indonesia sebagai kawasan rawan gempa dan tsunami [4].

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah tektonik aktif di dunia karena sepanjang wilayah Sumatera dilewati sesar aktif sekaligus berdekatan dengan subduksi [5]. Ada tiga sumber ancaman gempabumi di Sumatera, yaitu daerah subduksi pertemuan antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia, Mentawai *Fault System* (MFS), dan Sumatera *Fault System* (SFS) [6]. Selain itu, bagian tengah Pulau Sumatera berjajar pegunungan Bukit Barisan dari Aceh hingga Lampung dan terdapat gunung berapi aktif yang berpotensi menimbulkan gempa vulkanik. Hal ini menyebabkan Sumatera menjadi wilayah paling rentan terhadap gempabumi [7]. Sejarah mencatat gempa dengan skala besar sering terjadi di Sumatera beberapa diantaranya yaitu gempa Aceh-Andaman (26 Desember 2004) dengan magnitudo 9, gempa Padang (30 September 2009) dengan magnitudo 7,6, gempa Simeuleu-Aceh (11 April 2012) dengan magnitudo 8,4. Gempabumi paling dasyat terjadi di Aceh-Andaman (2004) dan menyebabkan korban meninggal di 10 negara Asia dan Timur Afrika sejumlah 283.100 orang [8]. Penelitian persebaran gempabumi berdasarkan model *spatial* atau *spatio-temporal point process* menjadi hal yang standar dilakukan. Model stasioner *Poisson point process* [9] mampu

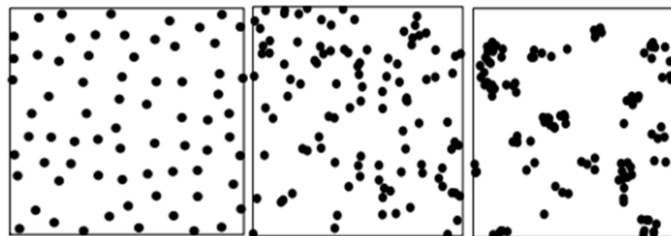
mendeteksi random process dari persebaran gempabumi dengan asumsi tidak ada keterkaitan antar kejadian gempabumi. Untuk merevisi model independen, beberapa model *cluster* juga dipertimbangkan pada analisis kejadian gempabumi diantaranya yaitu *Hawkes poin process* ([10]–[12]), *Thomas process* ([13]–[15]), *Gibbs process* ([16], [17]), *log-Gaussian Cox processes* (LGCP) ([18]–[20]), dan *Mixture Poisson Process* [21]. Sebagian besar penelitian mengasumsikan bahwa proses stasioner atau mendeteksi *non-stationarity* dengan kernel *smoothing*. Pada penelitian ini, risiko terjadinya gempabumi di pulau Sumatera dimodelkan dengan mempertimbangkan faktor geologis yang diduga mempengaruhi risiko terjadinya gempabumi yaitu sesar, zona subduksi, dan gunung berapi berdasarkan penelitian [16], [17], [22], [23].

Penelitian ini dilakukan untuk mendeteksi *spatial trend* dan efek *clustering* persebaran gempabumi di Sumatera. Pemodelan intensitas gempabumi menggunakan regularisasi *ridge regression* digunakan pada penelitian ini karena adanya korelasi yang tinggi antarkovariat sehingga. Model terbaik dalam pemodelan kasus gempabumi di Sumatera adalah *Cauchy cluster* [15], sehingga pada penelitian ini *Cauchy cluster process* dipilih untuk memodelkan efek *cluster* aktivitas gempabumi yang diawali gempa utama (*mainshocks*) dan diikuti gempa susulan (*aftershocks*). Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan informasi mengenai karakteristik persebaran gempabumi berdasarkan kondisi geografis wilayah Sumatera dan memodelkan kejadian gempabumi sehingga dapat berguna sebagai upaya mitigasi dan mengurangi kerugian akibat gempabumi.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Spatial Point Process

*Spatial point process* berguna sebagai model statistik pola titik yang diamati, dimana titik-titik tersebut mewakili lokasi beberapa objek penelitian. *Spatial point process*  $\mathbf{X}$  adalah mekanisme acak yang hasilnya adalah *point pattern*. *Spatial point pattern*  $\mathbf{x}$  adalah dataset yang berisi himpunan lokasi objek atau kejadian yang berada pada suatu jendela pengamatan tertentu  $B, B \subseteq \mathbb{R}^2$  yang ditulis  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ , dengan  $N(\mathbf{X} \cap B) = n$  adalah jumlah titik di  $B$ . Lokasi titik di  $B$  ditentukan dengan koordinat *cartesian* yaitu  $\mathbf{u} = (u_1, u_2) \in B, B \subseteq \mathbb{R}^2$  dimana  $u_1$  adalah *longitude* dan  $u_2$  adalah *latitude*.



Gambar 1 Pola Persebaran Point Pattern Regular (Kiri), Independen (Tengah), dan Cluster (Kanan)

Pada penelitian ini  $\mathbf{X}$  adalah proses terjadinya gempa. Terdapat 3 pola persebaran titik dalam *point pattern* yaitu pola reguler, acak/independen dan *cluster*/kelompok yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pola reguler yaitu titik-titik cenderung saling menjauh atau menyebar. Pola independen yaitu titik-titik cenderung menunjukkan pola yang acak dan posisi antar titik tidak saling terkait, sedangkan pola *cluster* titik-titik cenderung saling mengelompok [24].

### B. Intensitas

Intensitas adalah karakteristik deskriptif dasar dari suatu *point process* yang merupakan *first-order moment properties*. Intensitas adalah densitas rata-rata titik (jumlah titik yang diharapkan per unit area). Ekspektasi jumlah titik yang diamati pada *observation window*  $B$  ditunjukkan pada persamaan 1

$$\mu(B) = E[N(B)] = \int_B \rho(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u}, B \subseteq \mathbb{R}^2 \tag{1}$$

$\rho(\mathbf{u})$  adalah peluang mengobservasi sebuah titik di area yang sangat kecil dengan luas  $du$  dan pusat  $\mathbf{u}$ . Intensitas dapat konstan (homogen) dan bervariasi spasial (tidak homogen). Ketika intensitasnya bervariasi secara spasial, intensitas merupakan fungsi spasial yang salah satunya dipengaruhi oleh kovariat spasial  $z(\mathbf{u})$ . Intensitas dapat dimodelkan dalam bentuk model parametrik *log-linear* pada persamaan 2 dengan  $\beta$  adalah parameter yang diestimasi.

$$\rho(\mathbf{u}) = \rho(\mathbf{u}; \beta) = \exp(\beta^T \mathbf{z}(\mathbf{u})) \tag{2}$$

Pada kasus penelitian ini terkait gempabumi beserta kovariatnya,  $z(\mathbf{u})$  adalah jarak kovariat dalam hal ini faktor geologis ke titik gempabumi terdekat, dan  $\rho(\mathbf{u})$  adalah risiko atau peluang terdapat 1 gempabumi mayor (magnitudo  $\geq 5$ ) di suatu koordinat tertentu di Sumatera. Salah satu cara untuk menguji homogenitas dari data *points* yaitu uji *Chi-Squared*. *Observation window* dibagi menjadi  $m$  kotak bagian (grid) yaitu  $B_1, \dots, B_m$  yang disebut *quadrat count* dengan  $n_1, n_2, \dots, n_m$  adalah jumlah titik disetiap  $B_m$  [24].

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

$H_1 : \lambda(\mathbf{u}) \neq \lambda(\mathbf{v})$  (Intensitas Inhomogen)

$$\text{Statistik uji : } \chi^2_{hit} = \sum_{j=1}^m \frac{(n_j - t_j)^2}{t_j} = \sum_{j=1}^m \frac{\left(n_j - \frac{n}{m}\right)^2}{\left(\frac{n}{m}\right)}$$

Keterangan:

$n_j$  : jumlah titik di kotak ke-j

$n$  : jumlah titik keseluruhan dengan  $n = \sum_j n_j$

$m$  : jumlah kotak (grid)

$t_j$  : jumlah titik yang diharapkan di setiap kotak ke-j

$H_0$  ditolak jika nilai  $p$ -value kurang dari  $\alpha$  atau  $\chi^2_{hit} > \chi^2_{(\alpha,df)}$  dengan  $df = m - 1$ .

### C. Correlation Pixel Image

*Correlation Pixel Image* digunakan untuk mengetahui korelasi jarak antarkovariat pada format data *pixel image*. Metode *Pearson Correlation* diaplikasikan pada perhitungan *correlation pixel image*. Pada data *point process* gempabumi, menghitung koefisien korelasi antar kovariat yaitu kovariat  $z_1$  dan  $z_2$ , dengan  $M$  adalah banyaknya *pixel*, dituliskan pada persamaan 3 [25].

$$\text{Korelasi} = r_{z_1 z_2} = \frac{M \sum_{i=1}^M z_{1i} z_{2i} - \sum_{i=1}^M z_{1i} \sum_{i=1}^M z_{2i}}{\sqrt{M \sum_{i=1}^M z_{1i}^2 - \left(\sum_{i=1}^M z_{1i}\right)^2} \sqrt{M \sum_{i=1}^M z_{2i}^2 - \left(\sum_{i=1}^M z_{2i}\right)^2}} \quad (3)$$

Koefisien korelasi dapat bernilai positif atau negatif dan berada pada rentang -1 dan 1. Jika koefisien korelasi mendekati -1 atau 1 maka hubungan keeratan dua variabel semakin kuat. Jika nilainya mendekati 0, maka hubungan keeratan dua variabel semakin lemah. Tanda positif dan negatif pada koefisien korelasi menunjukkan arah hubungan. Koefisien korelasi bertanda positif artinya hubungan berbanding lurus. Koefisien korelasi bertanda negatif artinya hubungannya berbanding terbalik.

### D. Ripley's K-function

Dalam teori statistik, korelasi diklasifikasikan sebagai *second order moment*. *Second order moment* untuk *point process* terkait dengan penghitungan hubungan pasangan titik. *Second order* dari sebuah *point process* di suatu wilayah  $B$  adalah  $\rho^{(2)}$  seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.

$$\rho^{(2)}(B) = \iint_B \mathbf{1}[(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in B] \rho^{(2)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\psi}) \, d\mathbf{u} \, d\mathbf{v} \quad (4)$$

dengan  $\rho^{(2)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\psi}) \, d\mathbf{u} \, d\mathbf{v}$  adalah peluang mengobservasi sepasang titik di dua wilayah yang sangat kecil dengan pusat  $\mathbf{u}$  dan  $\mathbf{v}$  dan luas  $d\mathbf{u}$  dan  $d\mathbf{v}$ , dan  $\mathbf{1}$  adalah fungsi indikator yang bernilai 1 jika  $\mathbf{u}$  dan  $\mathbf{v}$  adalah elemen dari  $B$  [26].

Konsep menghitung nilai *K-function* yaitu dengan menghitung jarak antar semua pasangan titik berbeda  $\mathbf{u}_i$  dan  $\mathbf{u}_j$ , ( $d_{ij} = \|\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j\|$ ) dan *K-function* merupakan rata-rata kumulatif jumlah *data points* yang terletak pada radius  $r$  dari *typical data point*. Apabila pola titik cenderung membentuk *cluster* maka jarak antar pasang titik akan semakin kecil, yang artinya jarak antar titik yang kurang dari atau sama dengan nilai  $r$  akan semakin banyak. Apabila intensitas inhomogen, untuk menganalisis pola persebaran *spatial point pattern* digunakan *inhomogeneous K-function* pada persamaan 5 dengan  $w_{ij} = 1/\rho(\mathbf{u}_i)\rho(\mathbf{u}_j)$  adalah penambahan bobot untuk pasangan titik  $\mathbf{u}_i$  dan  $\mathbf{u}_j$ .

$$\hat{K}_{inhom}(r) = \frac{1}{|B|} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\mathbf{1}\{d_{ij} \leq r\}}{\hat{\rho}(\mathbf{u}_i)\hat{\rho}(\mathbf{u}_j)} e(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j; r) \quad (5)$$

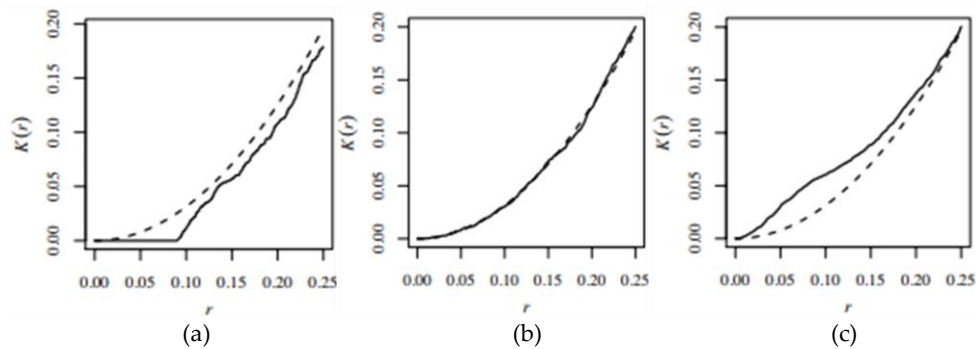
Keterangan :

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

$\mathbf{1}$  : fungsi indikator, jika  $\{d_{ij} \leq r\}$  maka diberi nilai 1, selain itu diberi nilai 0.

$e(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j; r)$  : *edge correction*

$\hat{\rho}(\mathbf{u}_i)$  : nilai estimasi dari  $\rho(\mathbf{u}_i)$ .



Gambar 2 Grafik K-function

Visualisasi *ripley K-function* dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar 2 merupakan ilustrasi antara *K-function* empiris  $\hat{K}(r)$  dengan *K-function* teoritis *Poisson process*  $K_{pois}(r)$ . *K-function* dilambangkan dengan garis padat sedangkan garis *Poisson process* dilambangkan dengan garis putus-putus. Gambar 2 (a) terdapat kurva yang menunjukkan bahwa *K-function* empiris lebih rendah daripada *K-function* teoritis *Poisson process*  $\hat{K}(r) < K_{pois}(r)$  yang berarti bahwasebaran data cenderung saling menjauh. Jika  $\hat{K}(r) = K_{pois}(r)$  seperti pada Gambar 2 (b) maka sebaran data cenderung acak atau independen. Jika  $\hat{K}(r) > K_{pois}(r)$  maka sebaran data cenderung membentuk kelompok yang ditunjukkan oleh Gambar 2 (c).

**E. Cauchy Cluster Process**

*Cauchy cluster process* adalah bentuk khusus dari *Neyman-Scott Cox process*. *Cox process* adalah *Poisson process* yang memiliki *random intensity*. Misalkan  $C$  merupakan *Poisson process (mainshock)* dengan intensitas  $\kappa > 0$ . Selanjutnya akan muncul proses baru  $X_c, c \in C$  dinamakan *offspring process* dengan fungsi intensitas pada persamaan 6,

$$\rho_c(\mathbf{u}; \boldsymbol{\beta}) = \exp(\zeta + \boldsymbol{\beta}^T z(\mathbf{u}))k(\mathbf{u} - \mathbf{c}; \omega) \tag{6}$$

dengan  $k$  merupakan *probability density function (pdf)* pada *Cauchy cluster process* dari distribusi jarak antara *offspring* dan *mother process* dengan parameter dengan parameter  $\omega$  dituliskan pada persamaan 7 [27].

$$k(\mathbf{u}; \omega) = \frac{1}{2\pi\omega^2} \left( 1 + \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{\omega^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \tag{7}$$

*Mother points* dalam penelitian ini adalah lokasi terjadinya gempa bumi utama (*mainshock*) sedangkan lokasi terjadinya gempa bumi susulan (*aftershock*) sebagai *offspring points*.  $\mathbf{X} = \cup_{c \in C} \mathbf{X}_c$  *Cauchy cluster process* yang memiliki fungsi intensitas pada persamaan 8 dengan  $\kappa$  adalah intensitas *Poisson process (mainshock)* [28].

$$\rho(\mathbf{u}; \boldsymbol{\beta}) = \kappa \exp(\boldsymbol{\beta}^T z(\mathbf{u})) \tag{8}$$

Rumus *pair correlation function* dan *K-function* pada model *Cauchy* ditulis pada persamaan 9 dan 10 [27].

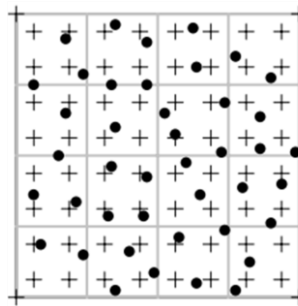
$$g(r; \psi) = 1 + \frac{1}{8\pi\kappa\omega^2} \left( 1 + \frac{\|r\|^2}{4\omega^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \tag{9}$$

$$K(r; \psi) = \pi r^2 + \frac{1}{\kappa} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{4\omega^2}}} \right) \tag{10}$$

Jika nilai  $\omega$  semakin kecil, maka jarak antara gempa susulan ke gempa utama semakin pendek, sehingga *cluster* yang terbentuk cenderung rapat dan jika nilai  $\kappa$  semakin kecil, maka jumlah gempa utama yang terjadi juga semakin sedikit.

**F. Regularisasi Ridge**

Fungsi *log-likelihood* pada pemodelan *Poisson point process* didekati dengan regresi *Poisson* melalui *quadrature schemes* dengan menambah *dummy point*, membagi *observation window (B)* menjadi  $m$  *tiles*, dan menggunakan *Dirichlet tessellation* atau diagram *Voronoi* untuk menghasilkan *quadrature weight*. Semua *quadrature points (data point dan dummy point)* memiliki bobot yang sama yaitu  $w_i = |T_m|/q, i = 1, 2, \dots, n+d$ , dengan  $n$  jumlah *data points*,  $d$  jumlah *dummy points*,  $|T_m|$  adalah luas area *tile* ke- $m$ , dan  $q$  adalah jumlah *quadrature point* di  $T_m$ . Ilustrasi *quadrature scheme* ditunjukkan pada Gambar 3 [28].



**Gambar 3** Quadrature Schemes (Data points (•), Dummy Points (+), Batas Tile (Garis Abu-Abu)).

Fungsi likelihood untuk mengestimasi  $\beta$  dapat dilihat pada persamaan 11 dan bentuk *composite likelihood* ditulis pada persamaan 12.

$$L(\mathbf{u}; \beta) = \exp(1 - \mu(B)) \prod_{u \in X \cap B} \rho(u; \beta) \theta \tag{11}$$

$$L(\mathbf{u}; \beta) = \exp\left(1 - \int_B \rho(u; \beta) du\right) \prod_{u \in X \cap B} \rho(u; \beta) \tag{11}$$

$$\log L(\mathbf{u}; \beta) = \sum_{i=1}^n \log(\rho(u_i; \beta)) - \int_B \rho(u; \beta) du \tag{12}$$

Regularisasi merupakan alternatif dalam seleksi variabel dan parameter estimasi secara bertahap. Secara umum regularisasi diterapkan dengan memaksimalkan persamaan 13 [29].

$$Q(\mathbf{u}; \beta) = \log L(\mathbf{u}; \beta) + \lambda P(\beta) \tag{13}$$

$\log L(\mathbf{u}; \beta)$  merupakan *composite likelihood* yang tertulis pada persamaan 12.  $P(\beta)$  merupakan *penalty ridge* ditulis pada persamaan 14.

$$P(\beta) = \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \tag{14}$$

$\lambda \geq 0$ , dengan  $\lambda$  adalah *tuning parameter* yang didapatkan dengan metode BIC (*Bayesian Information Criterion*). Persamaan 14 disubstitusi pada persamaan 13 sehingga regularisasi *ridge* pada fungsi *composite likelihood* diterapkan dengan meminimumkan persamaan 15.

$$Q(\mathbf{u}; \beta) = \log L(\mathbf{u}; \beta) + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j \tag{15}$$

Menggunakan pendekatan *numerical quadrature*  $\int_B \rho(u; \beta) du \approx \sum_{i=1}^{n+d} \rho(u_i; \beta) w_i$  dengan  $n$  jumlah *data points*,  $d$  jumlah *dummy points*, dan  $w_i$  adalah *quadrature weights*, maka persamaan 16 disederhanakan menjadi berikut.

$$\log L(\mathbf{u}; \beta) \approx \sum_{i=1}^{n+d} w_i (y_i \log(\rho(u_i; \beta)) - \rho(u_i; \beta)) \tag{16}$$

Bentuk *log-likelihood* pada persamaan 16 menyerupai *log-likelihood* dari *weighted Poisson regression*.

**G. Second Order Maximum Composite Likelihood**

*Second-order maximum composite likelihood* adalah metode estimasi parameter untuk mendapatkan nilai estimator parameter cluster  $\psi = (\kappa; \omega)^T$ . Fungsi *second order composite likelihood* dibangun dari semua pasangan titik data  $u_i, u_j$  ditunjukkan pada persamaan 17.

$$\log CL(\psi) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \left( w(u_i, u_j) \left( \log \rho^{(2)}(u_i, u_j; \psi) - \log \int_B \int_B w(u_i, u_j) \rho^{(2)}(\cdot) du_i du_j \right) \right) \tag{17}$$

$w$  adalah fungsi bobot, untuk memudahkan perhitungan maka  $w(u_i, u_j) = \mathbf{1}\{\|u_i - u_j\| \leq R\}$ ,  $R > 0$  merupakan batas atas jarak korelasi dari model. Hasil penurunan persamaan 17 terhadap  $\psi$  yaitu sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial \psi} \log CL(\psi) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w(u_i, u_j) \frac{\kappa_2(u_i, u_j; \psi)}{\rho^{(2)}(u_i, u_j; \psi)} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w(u_i, u_j) \frac{\kappa_2(w)}{\rho^{(2)}(w)} \tag{18}$$

$$\kappa_2(u_i, u_j; \psi) = \frac{\partial}{\partial \psi} \rho^{(2)}(u_i, u_j; \psi)$$

Estimasi parameter *second-order composite likelihood* dapat diaplikasikan pada *packages spatstat* dengan menggunakan *Software R* menggunakan fungsi *kppm* [24].

**H. Kebaikan Model**

Kriteria model terbaik pada penelitian ini menggunakan AIC (*Akaike Information Criterion*). Model terbaik dipilih berdasarkan nilai AIC terkecil [29]. Rumus AIC ditunjukkan pada persamaan 19 dengan  $L_{max}$  adalah *maximum composite likelihood*  $\log CL(\psi)$  pada persamaan 17 dan  $q$  adalah banyaknya parameter yang diestimasi secara keseluruhan (parameter *cluster* dan parameter  $\beta$ ).

$$AIC = -2L_{max} + 2q \tag{19}$$

Nilai AIC pada penelitian ini digunakan untuk membandingkan model tanpa regularisasi dengan model yang menggunakan regularisasi *ridge*. Model terbaiknya didapatkan dari nilai AIC terkecil.

**I. Gempabumi dan Faktor Geologis**

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). Gempabumi dapat dikelompokkan menjadi beberapa macam berdasarkan penyebabnya yaitu tektonik, vulkanik, runtuh, jatuhnya meteor, dan gempabumi buatan manusia. Gempabumi tektonik adalah gempabumi yang disebabkan oleh pelepasan energi elastis yang tersimpan dalam lempeng tektonik. Gempabumi vulkanik adalah gempabumi yang disebabkan oleh kegiatan gunung berapi. Magma yang berada pada kantong di bawah gunung tersebut mendapat tekanan dan melepaskan energinya secara tiba-tiba sehingga menimbulkan getaran tanah [30].

Subduksi merupakan pertemuan (tumbukan) dua lempeng akibat adanya pergerakan lempeng yang saling mendekat (lempeng benua dan lempeng samudera). Kedua lempeng yang bergerak saling menekan, sehingga terjadi pembengkokan pada lempeng samudera (sudut subduksi) yang kemudian menyusup ke bawah lempeng benua. Besar sudut subduksi dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan lempeng atasnya [31]. Sesar atau patahan (*fault*) adalah bidang batas antara dua fraksi kulit bumi yang mengalami gerakan relatif, biasanya merupakan daerah yang relatif lemah, mengalami retakan atau terdapat celah. Dampak gempabumi yang terjadi dipengaruhi oleh pergerakan model gerak relatif batuan yang terjadi di sekitar sesar tersebut. Jenis sesar dibedakan menjadi tiga, yaitu sesar naik (*reverse fault*), sesar turun (*normal fault*) dan sesar mendatar (*strike slip fault*)

**III. METODOLOGI PENELITIAN**

**A. Sumber Data**

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder berupa koordinat data gempabumi, sesar, subduksi dan gunung berapi di wilayah Sumatera. Data gempa yang digunakan adalah kejadian gempabumi di Sumatera tahun 2004-2018 dengan magnitudo gempa  $\geq 5$  yang diambil pada *website USGS (United States Geological Survey) Earthquake Catalog* (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Data gunung berapi diambil dari *website Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG)*, data sesar dan subduksi diambil dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. *Observation window* yang digunakan pada penelitian ini berbentuk persegi panjang (*rectangle*) yaitu  $B = [104,51773; 121,18117] \times [-6,8635; 7,378783]$  (100 km<sup>2</sup>).

**B. Variabel Penelitian**

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini dijelaskan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Variabel Penelitian

Variabel	Keterangan
$x_1$	Himpunan titik koordinat lokasi gempabumi di wilayah Sumatera
$x_2$	Himpunan titik koordinat lokasi sesar aktif di wilayah Sumatera
$x_3$	Himpunan titik koordinat lokasi subduksi di wilayah Sumatera
$x_4$	Himpunan titik koordinat lokasi gunung api di wilayah Sumatera

**C. Langkah Analisis**

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

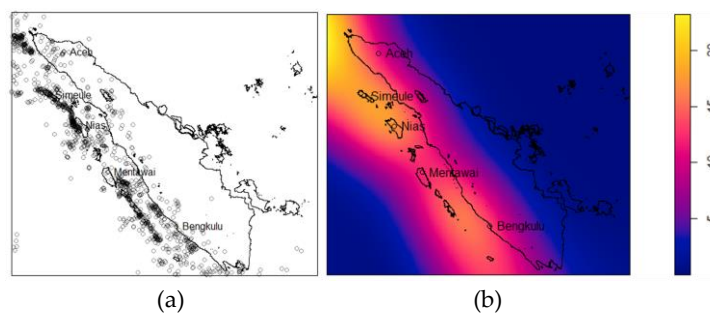
- 1) Mengumpulkan data koordinat gempa, sesar, subduksi dan gunung berapi.
- 2) *Pre-processing* data dengan memilih data koordinat gempa sesuai dengan batasan magnitudo gempa, koordinat sesar, koordinat subduksi, dan koordinat gunung berapi berdasarkan batas *observation window*.
- 3) Menghitung jarak terdekat dari masing-masing titik koordinat sesar, subduksi dan gunung berapi ke titik gempabumi terdekat.
- 4) Mengidentifikasi homogenitas/stasioner persebaran gempabumi dengan menggunakan uji *Chi-squared*.
- 5) Mendeksripsikan data gempabumi di wilayah Sumatera beserta faktor geologisnya berupa korelasi *pixel image*.
- 6) Mengidentifikasi secara visual dengan menggunakan grafik *inhomogen K-function* untuk mengetahui korelasi titik persebaran gempabumi.
- 7) Memodelkan persebaran titik gempabumi dengan kovariatnya menggunakan *Cauchy cluster process* dengan mempertimbangkan regularisasi *ridge*.
- 8) Melakukan estimasi parameter faktor geologis  $\beta$  pada pemodelan fungsi intensitas dengan regularisasi *ridge*.

- 9) Melakukan estimasi parameter cluster  $\psi = (\kappa; \omega)^T$  dengan *Second-Order Maximum Composite Likelihood*.
- 10) Mengecek kebaikan model dengan melihat nilai AIC.
- 11) Memprediksi persebaran gempabumi di Sumatera menggunakan model yang didapat dan memetakan hasil prediksi risiko gempabumi di Sumatera.

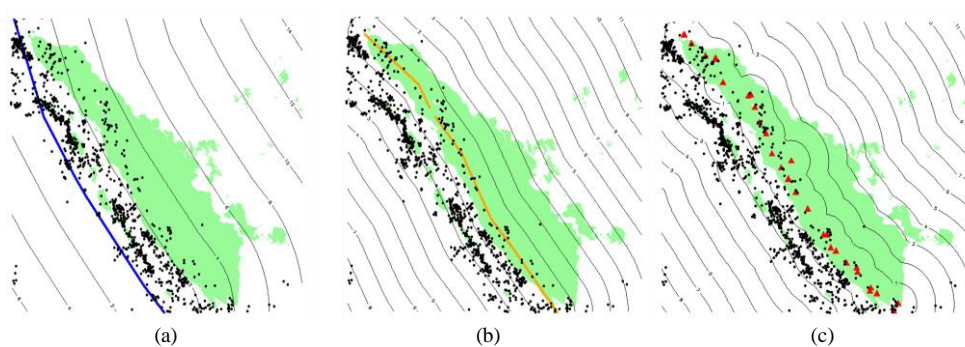
#### IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

##### A. Karakteristik Persebaran Gempabumi di Sumatera Tahun 2004-2018

Sepanjang tahun 2004-2018, sebanyak 10868 gempabumi terjadi di wilayah Sumatera dengan 1195 diantaranya berkekuatan  $\geq 5M$ . Gambar 4 (a) menunjukkan terjadi pengelompokan titik-titik gempa di wilayah tertentu dan tidak merata di seluruh wilayah. Lokasi gempabumi cenderung mengelompok di daerah tertentu tersebut ditunjukkan dengan intensitas gempabumi pada Gambar 4 (b) bernilai tinggi di wilayah Aceh, Simeulue, Pulau Nias, Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat, dan Lampung. Hal tersebut diakibatkan faktor geologis yaitu adanya subduksi, sesar, dan gunung berapi. Wilayah provinsi Aceh diapit oleh dua segmen yaitu segmen Aceh dan juga segmen Seulimeum. Selain itu, pulau Simuelue juga merupakan daerah yang rawan gempa dan tsunami karena letaknya yang berada dekat dengan zona subduksi.



**Gambar 4** (a) *Planar Point Pattern* Gempabumi di Sumatera (b) Intensitas gempabumi dengan *Kernel Smoothing* di Wilayah Sumatera

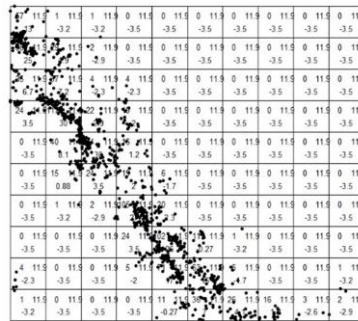


**Gambar 5** *Contour Plot* Jarak Gempabumi Terhadap Kovariat di Wilayah Sumatera (100 km)

Visualisasi jarak titik gempabumi bumi ke zona subduksi ditampilkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 (a), titik gempabumi dengan magnitudo  $\geq 5$  paling banyak menyebar di area subduksi dengan radius antara 0 sampai 300 km yang berarti wilayah yang berada pada radius  $\pm 300$  km dari subduksi memiliki risiko gempabumi lebih tinggi daripada wilayah lainnya. Nilai maksimum dari jarak terdekat subduksi ke titik gempabumi adalah 1505,085 km. Jarak sebaran gempabumi terbanyak terhadap sesar (Gambar 5 (b)) dan gunung berapi (Gambar 5 (c)) juga berada pada radius antara 0 sampai 300 km, artinya wilayah dengan radius 0 sampai 300 km dari sesar dan gunung berapi memiliki risiko tinggi terhadap gempabumi daripada daerah lainnya. Nilai maksimum dari jarak gempabumi ke sesar terdekat sebesar 1211,671 km, sedangkan nilai maksimum jarak gempabumi ke gunung berapi sebesar 1181,528 km.

**B. Uji Chi-Squared**

Uji *chi-squared* digunakan untuk mengetahui apakah data gempabumi di Sumatera terdapat *spatial trend*. Sebelum dilakukan pengujian, *observation window* dibagi menjadi  $10 \times 10$  *grid* seperti yang tertera pada Gambar 6. Pada setiap *grid* dihitung banyaknya titik gempabumi, jumlah titik gempabumi ditunjukkan pada bagian kanan atas, jumlah titik yang diharapkan pada setiap *grid* ditunjukkan pada kiri atas, dan nilai *pearson residual* pada bagian bawah. Hasil uji *Chi-Squared* menunjukkan nilai  $p\text{-value } 2,2 \times 10^{-16} < 0,05$ , artinya pada taraf signifikansi 5%, persebaran gempabumi di Sumatera tidak homogen. Jadi, terdapat *spatial trend* secara signifikan pada persebaran gempabumi di Sumatera dimana salah satunya disebabkan oleh faktor geologis yang pada penelitian ini merupakan jarak terdekat gempabumi ke sesar, subduksi dan gunung berapi.



**Gambar 6** *Quadrat Count Data* Gempabumi di Sumatera

Perhitungan *pearson residual* dicontohkan untuk *grid* pada baris pertama kolom ke dua, dengan jumlah titik gempabumi pada *grid* tersebut adalah 1, dan jumlah titik gempabumi yang diharapkan adalah 11,9 titik. Pada Gambar 4.3 ditunjukkan bahwa nilai *pearson residual* sebesar -3,2. Nilai *pearson residual* pada *grid* ke-*j* tersebut diperoleh dari perhitungan sebagai berikut.

$$Pearson\ Residual_j = \frac{n_j - t_j}{\sqrt{t_j}} = \frac{1 - 11,9}{\sqrt{11,9}} = -3,2$$

Nilai dari *pearson residual* yang negatif menunjukkan bahwa jumlah titik gempabumi di *grid* ke-*j* lebih sedikit daripada jumlah titik gempabumi yang diharapkan pada *grid* tersebut.

**C. Korelasi Pixel Image (Korelasi Antar Faktor Geologis)**

Korelasi *pixel image* digunakan untuk menganalisis korelasi jarak antar kovariat ke titik gempabumi terdekat. Metode yang digunakan adalah *Pearson correlation*. Hasil perhitungan korelasi *pixel image* didapatkan nilai korelasi yang sangat tinggi ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2** Matriks Korelasi *Pixel Image*

Kovariat	Gunung berapi	Sesar	Subduksi
Gunung berapi	1	0,9948	0,7069
Sesar	0,9948	1	0,7907
Subduksi	0,7069	0,7907	1

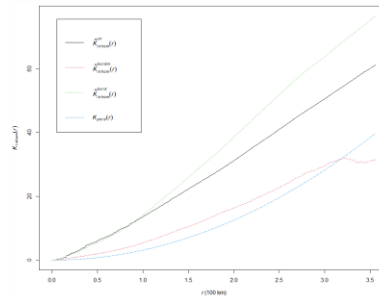
Korelasi antara kovariat sesar dengan gunung berapi sebesar 0,9948 , yang artinya jika jarak sesar ke titik gempabumi terdekat semakin jauh maka jarak gunung berapi ke titik gempabumi terdekat juga semakin jauh dan sebaliknya. Nilai korelasi *pixel image* kovariat subduksi dengan kovariat sesar sebesar 0,7907 yang tergolong memiliki korelasi cukup tinggi, artinya semakin jauh jarak subduksi ke titik gempabumi terdekat maka semakin jauh pula jarak sesar ke titik gempabumi terdekat, dan sebaliknya. Nilai korelasi *pixel image* kovariat subduksi dengan kovariat gunung berapi sebesar 0,7069 yang tergolong memiliki korelasi cukup tinggi, artinya semakin jauh jarak subduksi ke titik gempabumi terdekat maka semakin jauh pula jarak gunung berapi ke titik gempabumi terdekat, dan sebaliknya. Nilai korelasi yang tinggi antar kovariat khususnya pada kovariat gunung berapi dengan sesar dapat menyebabkan terjadinya multikolinearitas, sehingga untuk menghindari estimator yang bersifat bias, dalam pemodelan intensitas pada kasus gempabumi di Sumatera ini menggunakan regularisasi *ridge*.

**D. Korelasi Spasial (Korelasi Antar Kejadian Gempabumi)**

Korelasi spasial digunakan untuk mengetahui pola persebaran titik gempabumi di Sumatera, yang dilakukan dengan meninjau plot *inhomogeneous K-function* dikarenakan pada hasil pengujian *Chi-Squared* didapat intensitas gempabumi di Sumatera inhomogen.

Garis *inhomogeneous K-function* tanpa *edge correction* (hitam), garis *inhomogeneous K-function* dengan *border correction* (hijau), dan garis *inhomogeneous K-function* dengan *modified border correction* (merah) pada Gambar 7 berada diatas garis *Poisson process* yang berwarna biru, yang berarti persebaran gempabumi di Sumatera membentuk pola *cluster*. *Inhomogeneous K-function* dengan *modified border correction* menunjukkan adanya pengelompokkan khususnya pada radius kurang dari 320 km.





Gambar 7 Inhomogeneous K-function Data Gempabumi Sumatera

**E. Pemodelan Persebaran Gempabumi di Sumatera Menggunakan Regularisasi Ridge untuk Cauchy Cluster Process**

Hasil uji *chi-squared* dan *K-function* mengonfirmasi bahwa model *Cauchy* adalah model yang sesuai untuk pemodelan persebaran gempabumi di Sumatera. Terdapat 2 kelompok parameter yaitu estimasi parameter *cluster*  $\psi = (\kappa; \omega)^T$  dan parameter pengaruh faktor geologis  $\beta$  yang diestimasi dengan metode dua step. Pada proses mengestimasi parameter untuk regularisasi *ridge* dibutuhkan *tuning parameter* dalam penelitian ini adalah  $\lambda$ , setiap  $\lambda$  memiliki estimasi parameter yang berbeda-beda, pemilihan nilai  $\lambda$  tersebut berdasarkan nilai BIC terkecil. Daftar nilai  $\lambda$  tertulis pada Lampiran ., dengan nilai  $\lambda$  terpilih tertulis pada Tabel 3.

Tabel 3 Nilai  $\lambda$  Terpilih dan BIC

Lambda	BIC
14,11055	-4000,16

Hasil estimasi parameter dengan menggunakan nilai  $\lambda$  sebesar 14,11055 ditunjukkan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Estimasi Parameter Model Cauchy Cluster dengan Regularisasi Ridge

Parameter	Estimasi	1/Exp( $\hat{\beta}$ )
$\hat{\kappa}$	0,26481	
$\hat{\omega}$	0,17685	
Intercept ( $\hat{\beta}_0$ )	3,72995	0,02399
Jarak gempabumi ke sesar ( $\hat{\beta}_1$ )	-0,15677	1,16972
Jarak gempabumi ke subduksi ( $\hat{\beta}_2$ )	-0,23031	1,25899
Jarak gempabumi ke gunung ( $\hat{\beta}_3$ )	-0,44411	1,55910

Dengan menggunakan nilai  $\hat{\kappa}$  dan  $\hat{\omega}$  pada Tabel 4, serta luas *observation window* sebesar 237,3253 (100km)<sup>2</sup>, didapat informasi estimasi jumlah gempabumi utama sebanyak 63 dengan *scale* gempabumi susulan disekitar gempabumi utama sebesar 17,685 km. Tanda negatif pada parameter menunjukkan jarak terdekat gempabumi ke faktor geologis berbanding terbalik dengan risiko terjadinya gempabumi. Setiap penambahan 100 km jarak suatu lokasi ke sesar aktif terdekat, risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut berkurang  $\exp(-0,15677) = 0,85490$  kali atau dapat dikatakan semakin dekat suatu lokasi ke sesar aktif, risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat  $1/\exp(-0,15677) = 1,6972$  kali. Semakin dekat suatu lokasi ke zona subduksi dan gunung berapi, risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat masing-masing sebesar 1,25899 dan 1,55910 kali.

**F. Kebaikan Model**

Kebaikan model untuk membandingkan model *Cauchy cluster process* dengan mempertimbangkan regularisasi *ridge* dan model tanpa regularisasi dalam memodelkan gempabumi di pulau Sumatera dapat dilihat dari nilai AIC. Nilai AIC model *Cauchy cluster* disajikan pada Tabel 5.

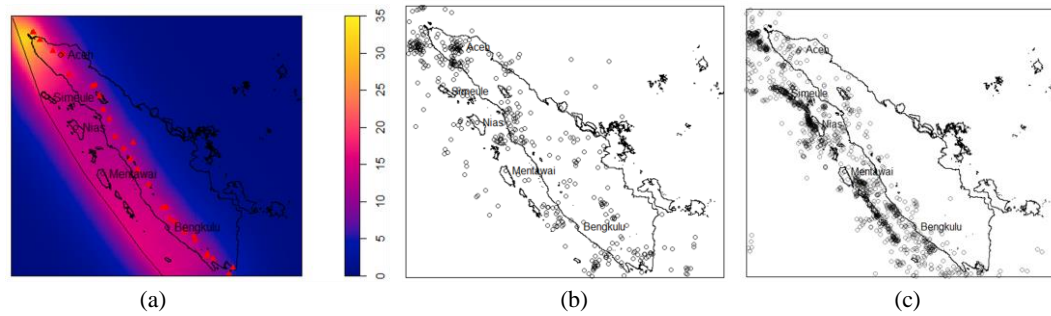
Tabel 5 Kebaikan Model Cauchy Cluster Process

Model	AIC
<i>Cauchy cluster</i> (tanpa regularisasi)	-1882746
<i>Cauchy cluster</i> (regularisasi <i>ridge</i> )	-2280648

Tabel 5 menunjukkan bahwa AIC terkecil terdapat pada model *Cauchy cluster process* dengan regularisasi *ridge*. Nilai AIC yang dihasilkan yaitu -2280648. Jadi dapat disimpulkan, model terbaik dalam pemodelan persebaran gempabumi di Sumatera adalah model *Cauchy cluster process* dengan regularisasi *ridge*.

**G. Prediksi Persebaran Gempabumi di Wilayah Sumatera**

Hasil prediksi persebaran gempabumi di Sumatera menggunakan *Cauchy cluster process* dengan regularisasi *ridge* ditampilkan pada Gambar 8 (a).



**Gambar 8** (a) Prediksi Gempabumi di Sumatera Menggunakan Model Cauchy Cluster dengan Regularisasi Ridge. (b) Generate Point Pattern *rCauchy* Model *Cauchy Cluster* dengan Regularisasi Ridge. (c) Point Pattern Gempabumi di Sumatera.

Gambar 8 (a) menunjukkan bahwa risiko gempabumi di pulau Sumatera cenderung tinggi di daerah yang letaknya dekat zona subduksi yaitu di bagian barat pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia dan diprediksi paling tinggi di wilayah yang berada di bagian atas pulau Sumatera. Hal tersebut terjadi karena bagian atas Sumatera merupakan wilayah dekat dengan zona subduksi dan terdapat 5 gunung berapi yaitu Weh, Jaboe, Seulawah Agam, Peuet Sagoe, dan Geureudong. Daerah-daerah di Sumatera yang berada di wilayah risiko gempabumi tinggi diantaranya yaitu provinsi Aceh (Banda Aceh dan pulau Simuelue), Sumatera Utara (pulau Nias), Sumatera Barat (kepulauan Mentawai), Lampung, dan Bengkulu. Gambar 8 (b) merupakan bangkitan *rCauchy* dengan menggunakan *software R* dan Gambar 8 (c) adalah *point pattern* kejadian gempabumi di Sumatera. Pada Gambar 8 (b) didapatkan titik-titik kejadian gempabumi berdasarkan parameter yang dihasilkan pada model *Cauchy cluster process* dengan mempertimbangkan regularisasi *ridge* memiliki hasil yang hampir sama dengan dengan peta prediksi. Pada *point pattern* kejadian gempabumi di Sumatera juga memiliki letak persebaran gempabumi yang hampir sama dengan peta prediksi yang sangat jelas terlihat yaitu menyebar di sekitar zona subduksi, sesar aktif, dan gunung berapi, serta pada wilayah wilayah provinsi Aceh yang paling tinggi beresiko terjadi gempabumi, disusul di pulau Nias, kepulauan Mentawai, Lampung, dan Bengkulu. Hal tersebut terjadi karena bagian atas dan bagian bawah pulau Sumatera merupakan wilayah pertemuan antara zona subduksi dan juga sesar aktif.

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

**A. Kesimpulan**

Berdasarkan analisis data gempabumi di wilayah Sumatera, diperoleh kesimpulan yaitu secara visual lokasi gempabumi tersebar secara tidak merata. Lokasi gempabumi cenderung mengelompok di daerah tertentu yang ditunjukkan dengan intensitas gempabumi. Titik gempabumi dengan magnitudo  $\geq 5$  paling banyak menyebar di area subduksi, sesar, dan gunung berapi. Sebagian besar gempabumi terjadi di radius 0-300 km dari zona subduksi, sesar, dan gunung berapi. Uji *chi-squared* dan korelasi spasial menyimpulkan bahwa persebaran gempabumi di wilayah Sumatera tidak homogen dan membentuk *cluster*. Pada korelasi *pixel image* menghasilkan nilai korelasi yang tinggi antar kovariat khususnya pada kovariat gunung berapi dengan sesar yaitu sebesar 0,9948. Pola persebaran titik gempabumi di Sumatera adalah *cluster*/mengelompok. Model terbaik yang menghasilkan nilai AIC terkecil dalam pemodelan gempabumi di Sumatera adalah *Cauchy cluster process* dengan regularisasi *ridge* nilai AIC sebesar -2280648. Estimasi jumlah gempabumi utama yang dihasilkan sebesar 63 dengan gempabumi susulan menyebar sebesar 17,685 km di sekitar gempabumi utama. Daerah di wilayah Sumatera yang diprediksi rawan terjadi gempabumi adalah wilayah yang terletak di bagian atas pulau Sumatera yaitu provinsi Aceh dan Sumatera Utara, dan bagian barat pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia yaitu provinsi Sumatera Barat (Mentawai, Nias, dan Simeulue) dan Bengkulu.

**B. SARAN**

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan yang diperoleh, rekomendasi yang dapat dipertimbangkan yaitu pemerintah yang daerahnya termasuk ke dalam daerah rawan gempa sebaiknya melakukan mitigasi dan melakukan upaya mengurangi kerugian yang ditimbulkan oleh gempabumi, serta dapat memasang alat untuk mendeteksi tsunami sehingga dapat digunakan untuk peringatan dini bagi masyarakat. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah dapat menggunakan model *multitype point process* untuk menganalisis karakteristik gempabumi berdasarkan magnitudo (kekuatan gempa) atau kedalaman gempabumi (gempabumi dangkal, gempabumi dalam, dan gempabumi menengah). Penelitian selanjutnya juga dapat mempertimbangkan faktor lain seperti pengaruh curah hujan, suhu, dan parameter pasang surut (kemiringan, regangan, gravitasi). Spatio-temporal analysis juga dapat dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya [33-34].

## REFERENSI

- [1] D. Hermon, "The strategic Model of Tsunami Based in Coastal Ecotourism Development at Mandeh Regions, West Sumatera, Indonesia", *Journal of Environment and Earth Sciende*, vol 6, 2016.
- [2] Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O., & Calais, E., "Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8),2003.
- [3] Arnold, E.P., "Southeast Asia Association on Seismology and Earthquake Engineering", *Series on Seismology*, vol. 5.
- [4] Ibrahim, "BMKG soft launching uji coba sistem peringatan dini gempa," BMKG, 2019. <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=bmkg-soft-launching-uji-coba-sistem-peringatan-dini-gempa&lang=ID&tag=press-release>.
- [5] R. McCaffrey, "The tectonic framework of the Sumatran subduction zone," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 37, pp. 345–366, 2009.
- [6] R. Triyono, "Ancaman gempabumi di Sumatera tidak hanya bersumber dari Mentawai megathrust," *Geofis. Klas I Padang Panjang*, 2015.
- [7] Sosilawati et al., *Sinkronisasi program dan pembiayaan pembangunan jangka pendek 2018-2020*. Jakarta: Pusat Pemrograman dan Evaluasi Keterpaduan Infrastruktur PUPR, Badan Pengembangan Infrastruktur Wilayah, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.
- [8] BMKG, *Katalog gempabumi signifikan dan merusak 1821-2018*. Jakarta: Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedeputan Bidang Geofisika Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019.
- [9] Y. Ogata, "Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes", *Journal of the American Statistical Association, Ann. Inst. Stat. Math.*, vol. 83, pp. 9–27, 1988.
- [10] D. Vere-Jones and T. Ozaki, "Some examples of statistical estimation applied to earthquake data," *Ann. Inst. Stat. Math.*, vol. 34, no. 1, pp. 189–207, 1982.
- [11] Y. Ogata, "Space-time point-process models for earthquake occurrences," *Ann. Inst. Stat. Math.*, vol. 50, no. 2, pp. 379–402, 1998.
- [12] E. W. Fox, F. P. Schoenberg, J. S. Gordon, and others, "Spatially inhomogeneous background rate estimators and uncertainty quantification for nonparametric Hawkes point process models of earthquake occurrences," *Ann. Appl. Stat.*, vol. 10, no. 3, pp. 1725–1756, 2016.
- [13] D. Vere-Jones, "Stochastic models for earthquake occurrence," *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 32, no. 1, pp. 1–45, 1970
- [14] K. Türkyilmaz, M. N. M. van Lieshout, and A. Stein, "Comparing the Hawkes and trigger process models for aftershock sequences following the 2005 Kashmir earthquake," *Math. Geosci.*, vol. 45, no. 2, pp. 149–164, 2013.
- [15] A. Choiruddin, Aisah, F. Trisnisa, and N. Iriawan, "Quantifying the Effect of Geological Factors on Distribution of Earthquake Occurrences by Inhomogeneous Cox Processes," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 178, no.5, pp.1579-1592, 2021.
- [16] S. Anwar, A. Stein, and J. L. van Genderen, "Implementation of the marked Strauss point process model to the epicenters of earthquake aftershocks," *Adv. geo-spatial Inf. Sci. Taylor Fr. London*, pp. 125–140, 2012.
- [17] M. Siino, G. Adelfio, J. Mateu, M. Chiodi, and A. D'Alessandro, "Spatial pattern analysis using hybrid models: an application to the Hellenic seismicity," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 31, no. 7, pp. 1633–1648, 2017, doi: 10.1007/s00477-016-1294-7.
- [18] M. Siino, G. Adelfio, and J. Mateu, "Joint second-order parameter estimation for spatio-temporal log-Gaussian Cox processes," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 32, no. 12, pp. 3525–3539, 2018.
- [19] A. Choiruddin, F. Cuevas-Pacheco, J.-F. Coeurjolly, and R. Waagepetersen, "Regularized estimation for highly multivariate log Gaussian Cox processes," *Stat. Comput.*, vol. 30, no. 3, pp. 649–662, 2020.
- [20] A. Choiruddin, T.Y. Susanto, R. Metrikasari, "Two-Step Estimation for Modeling the Earthquake Occurrences in Sumatra by Neyman–Scott Cox Point Processes", *Soft Computing in Data Science (SCDS)*, vol. 1489, pp.146-159, 2021.
- [21] Aisah, N. Iriawan, and A. Choiruddin., "On the earthquake modeling by using Bayesian Mixture Poisson process," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 7s, pp. 3350–3358, 2020.
- [22] F.Trisnisa, R.Metrikasari, R.Rabbanie, K Sakdiyah, and A.Choiruddin, "Model Inhomogeneous Spatial Cox Processes untuk Pemetaan Risiko Gempabumi di Pulau Jawa", *Jurnal Inferensi.*, vol 2, no.2, pp.107-111, 2019.
- [23] R. Mertikasari and A. Choiruddin, "Pemodelan Risiko Bencana Gempa Bumi di Pulau Sumatera Menggunakan Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes," *Jurnal Sains dan Seni ITS.*, vol 9, no. 2, D102-D107, 2020.
- [24] A. Baddeley, E. Rubak, and R. Turner, *Spatial point patterns: methodology and applications with R*. CRC press, 2015.
- [25] Neto, A. M., Victorino, A. C., Fantoni, I., Zampieri, D. E., Ferreira, J. V., & Lima, D. A., "Image Processing Using Pearson 's Correlation Coefficient : Applications on Autonomous Robotics ", 2013.
- [26] J. Møller and R. P. Waagepetersen, *Statistical inference and simulation for spatial point processes*. CRC Press, 2003.
- [27] R. P. Waagepetersen, "An estimating function approach to inference for inhomogeneous Neyman–Scott processes," *Biometrics*, vol. 63, no. 1, pp. 252–258, 2007.
- [28] A. Choiruddin, J.-F. Coeurjolly, and F. Letué, "Adaptive lasso and Dantzig selector for spatial point processes intensity estimation," *To appear in Bernoulli*.
- [29] G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, "An Introduction to Statistical Learnin", *Springer*, vol. 103, 2013.
- [30] Sunarjo, M. T. Gunawan, and S. Pribadi, *Gempabumi edisi populer*, 2nd ed. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2012.
- [31] A. Akmam, "Subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di pantai barat Sumatera Barat," *Sainstek J. Sains dan Teknol.*, vol. 3, no. 1, pp. 52–59, 2016.
- [32] V. Svejdar, H. Küchenhoff, L. Fahrmeir, J. Wassermann, and S. Husen, "External forcing of earthquake swarms at Alpine regions: example from a seismic meteorological network at Mt. Hochstaufen SE-Bavaria," *Nonlinear Process. Geophys.*, vol. 18, no. 6, 2011.
- [33] G.P.D. Sohíben, L. Laome, A. Choiruddin, and H. Kuswanto. "COVID-19 Pandemic's Impact on Return on Asset and Financing of Islamic Commercial Banks: Evidence from Indonesia" *Sustainability*, vol. 14, no. 3, pp. 1128, 2022.
- [34] Suhartono, F. Hikmawati, E. Setyowati, N. A. Salehah, and A. Choiruddin. "A novel hybrid GSTARX-RNN model for forecasting space-time data with calendar variation effect," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1463, no. 1, p. 012037, 2020.



© 2022 by the authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).