

Model *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* (LGCP) untuk Pemetaan Risiko Gempa Bumi di Sumatra

Khalimatus Sakdiyah dan Achmad Choiruddin
Departemen Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: choiruddin@its.ac.id

Abstrak—Pulau Sumatra memiliki risiko terjadinya gempa bumi yang cukup tinggi dikarenakan adanya tumbukan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di sebelah barat Sumatra. Proses saling tekan kedua lempeng benua ini menyebabkan patahan yang memanjang di dasar laut wilayah Sumatra dan menyebabkan pembentukan zona subduksi yaitu batas antara lempeng yang menunjam dan massa batuan di atasnya serta gunung api di wilayah Sumatra. Berdasarkan ulasan tersebut diduga adanya pengaruh jarak sesar aktif, zona subduksi serta gunung api terhadap gempabumi yang terjadi di Pulau Sumatra dengan magnitudo ≥ 4 . Sebelum dilakukan pemodelan, maka dilakukan eksplorasi data yang meliputi uji *Chi-Squared* untuk mengetahui data mengikuti pola yang stasioner atau tidak dan uji korelasi spasial untuk mengetahui pola sebaran data. Analisis eksplorasi data memberikan hasil bahwa sebaran data gempabumi di Sumatra tidak mengikuti pola stasioner atau tidak homogen dan cenderung mengikuti *cluster* atau mengelompok. Kejadian gempa bumi yang inhomogen dan cenderung membentuk kelompok dimungkinkan karena adanya proses alami gempa bumi dengan efek faktor geologis. Hal ini memotivasi penulis untuk melakukan pemodelan menggunakan *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* (LGCP). Terdapat dua tahap estimasi parameter pada model *Inhomogeneous LGCP* dengan menggunakan *Berman-Turner* dan *Second-Order Composite Likelihood*. Hasil pemodelan *Inhomogeneous LGCP* didapatkan bahwa jarak terdekat sesar aktif dan zona subduksi berpengaruh signifikan terhadap intensitas terjadinya gempa bumi dengan magnitudo ≥ 4 di Pulau Sumatra sedangkan jarak terdekat gunung api tidak berpengaruh signifikan. Jika jarak sesar aktif terhadap pusat gempa bumi bertambah 100 km, maka risiko terjadinya gempa bumi di lokasi tersebut menurun 0.5924 kali. Sedangkan jika jarak zona subduksi ke pusat gempabumi bertambah 100 km maka risiko terjadinya gempa bumi di lokasi tersebut menurun 0.5294 kali. Model *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* dikatakan model yang baik untuk memodelkan gempa bumi di Sumatra berdasarkan *envelope K-function*. Pemetaan risiko hasil pemodelan memberikan hasil bahwa lokasi di Wilayah Sumatra yang memiliki risiko gempa bumi yang paling tinggi berada di ujung barat dan ujung timur Pulau Sumatera.

Kata Kunci—*Berman-Turner, Gunung Api, Second-Order Composite Likelihood, Sesar Aktif, Subduksi.*

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan suatu wilayah yang terbentuk akibat pertemuan tiga lempeng kerak bumi aktif yaitu Lempeng Eropa-Asia (Eurasia), Lempeng Pasifik dan Lempeng Indo-Australia. Ketiga lempeng bumi tersebut bergerak secara konvergen yang menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki tingkat kegempaan yang cukup tinggi [1]. Kondisi geologi Pulau Sumatra yang berada pada tepi selatan lempengan Benua (Eurasia) yang

berbenturan dengan lempeng Benua Indo-Australia menyebabkan patahan yang memanjang di dasar laut yang disebut Sesar Semangko. Batas antara lempeng yang menunjam dan massa batuan di atasnya disebut zona penunjaman atau bidang zona subduksi [2]. Indonesia juga merupakan jalur *The Pasific Ring of Fire* yang merupakan jalur rangkaian gunung api aktif di dunia. Indonesia memiliki kurang lebih 240 gunung berapi. Akibat letak geologis inilah Indonesia menjadi negara yang memiliki potensi gempa terbesar di dunia [3].

Selama 20 tahun terakhir telah tercatat delapan kejadian gempabumi dan tsunami terbesar di Indonesia. Tiga dari delapan peristiwa tersebut terjadi di Wilayah Sumatra yaitu di Daerah Aceh tahun 2004, di Pulau Nias tahun 2005 dan Kepulauan Mentawai tahun 2010 dengan kekuatan gempa di atas 7.5 M [3]. Gempabumi dengan magnitudo 6.2 M pada Selasa 2 Juli 2013 di Aceh terjadi pada sistem patahan. Oleh karena itu, sangat penting dilakukan pemodelan gempabumi di Sumatra dengan melibatkan informasi geologi seperti sesar aktif, zona subduksi dan gunung api.

Kejadian gempabumi terjadi tidak merata atau inhomogen sehingga ada kecenderungan yang mempengaruhi hal tersebut. Salah satu faktor yang diduga dapat mempengaruhi kecenderungan gempabumi terjadi di suatu wilayah tertentu atau yang menyebabkan gempabumi tidak merata/inhomogen adalah faktor geologis suatu lokasi. Gempabumi yang terjadi cenderung membentuk kluster atau berkelompok. Pada penelitian ini menggunakan *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* (LGCP) untuk memodelkan gempabumi yang terjadi di Sumatra. *Model Log-Gaussian Cox Process* dapat mengakomodasi kluster yang terbentuk.

Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan faktor-faktor yang diduga memiliki pengaruh spasial terhadap terjadinya gempabumi di wilayah Sumatra memberikan analisis bahwa wilayah yang memiliki risiko bencana gempabumi yang tinggi berada di sekitar jalur patahan atau sesar semangko [4]. Pemodelan gempabumi berdasarkan *spatial point process* melibatkan faktor geologis telah dilakukan [5]-[6], dimana zona subduksi, sesar aktif, dan gunung berapi menjadi faktor geologis yang memantik terjadinya gempabumi. Penelitian terkait model *Log-Gaussian Cox Process* pernah digunakan untuk data gempabumi dengan magnitudo lebih besar sama dengan 4 [7]. Selain itu, model *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* juga pernah digunakan untuk data gempabumi di Pulau Sulawesi dan Maluku dengan mempertimbangkan faktor jarak gunung api, sesar aktif dan zona subduksi.

Berdasarkan dari uraian yang telah disampaikan dan beberapa penelitian sebelumnya, akan dilakukan pemodelan

gempabumi di wilayah Sumatra dengan mempertimbangkan jarak gempabumi terhadap masing-masing *covariate* yang paling dekat dengan menggunakan *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process*. Magnitudo gempabumi yang diteliti lebih dari sama dengan 4 berdasarkan rujukan [7]. *Covariate* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sesar aktif, zona subduksi dan gunung api.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Spasial Point Pattern

Spatial point process adalah himpunan titik-titik acak pada wilayah $B \subset S$ dengan memiliki indeks s sebagai keterangan lokasi. Realisasi dari *spatial point process* adalah *spatial point pattern* [8]. Terdapat 3 pola dasar dalam *point pattern* yaitu pola reguler, acak/independen dan *cluster*/kelompok. Pola reguler yaitu dimana titik-titik cenderung saling menjauh atau menyebar. Pola independen (acak) yaitu dimana titik-titik cenderung menunjukkan pola yang acak (random). Sedangkan pola *cluster* yaitu dimana titik-titik cenderung saling mendekat atau mengelompok [9].

B. Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process

Poisson process adalah model untuk *spatial point pattern* yang memiliki pola tidak ada interaksi/acak (*complete spatial randomness*). *Cox Process* merupakan perkembangan dari *Poisson process* yang diperoleh dengan mempertimbangkan fungsi intensitas *Poisson point process* sebagai realisasi dari *random field* [10]. *Cox point process* adalah *Poisson process* dengan fungsi intensitas yang random [9].

Jika $\mathbf{X}|\Lambda$ dimana \mathbf{X} mengikuti proses *Poisson* dengan fungsi intensitas Λ dan $\log \Lambda$ mengikuti proses *Gaussian* maka \mathbf{X} disebut *Log-Gaussian Cox Process* [8]- [10]. Fungsi intensitas random Λ dapat mewakili faktor lingkungan acak yang dapat mengakibatkan gempabumi. Pada penelitian ini $\log \Lambda$ dapat ditulis pada persamaan 1.

$$\log \Lambda(u) = \zeta + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta} + \phi(u), \tag{1}$$

dengan ζ merupakan *intercept*, $\mathbf{z}(u)$ adalah mewakili faktor geologis di lokasi u dan ϕ adalah *zero-mean stationary Gaussian random field* dengan fungsi kovarians $c(u, v, \boldsymbol{\theta}) = \sigma^2 \exp(-\|u - v\|/\gamma)$ dimana $\boldsymbol{\theta} = (\sigma^2, \gamma)^T$, sehingga fungsi intensitas *Log-Gaussian Cox Process* (LGCP) pada persamaan 2.

$$\rho(u; \boldsymbol{\beta}) = \exp(\zeta + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta} + \sigma^2/2) = \exp(\beta_0 + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta}) \tag{2}$$

Pair correlation atau $g(r)$ melihat kontribusi dari jarak antar titik yang sama dengan r . Adapun rumus *Pair Correlation* dari *Log-Gaussian Cox Process* pada persamaan 3.

$$g_{(\sigma^2, \gamma)} = \exp(\sigma^2 \exp(-r/\gamma)) \tag{3}$$

Keterangan:

- $g_{(\sigma^2, \gamma)}$: *pair correlation* LGCP
- σ^2 : varians dari random field
- γ : *scale parameter*
- r : batas *window*

Intensitas dan *pair correlation* merupakan fungsi dari model *Log-Gaussian Cox Process* (LGCP).

C. Intensitas

First order merupakan fungsi *non-negative* dari intensitas ρ pada *spatial point pattern* yang ditunjukkan pada persamaan 4.

$$\lambda(B) = \int_B \rho(u, \boldsymbol{\beta}) du \tag{4}$$

Dimana $\rho(u; \boldsymbol{\beta})$ adalah peluang mengobservasi satu titik di sebuah area yang sangat kecil dengan luas du dan berpusat di u [9].

D. Pair Correlation Function

Pair correlation function dapat digunakan untuk menentukan apakah *point pattern* acak, reguler atau *cluster*. *Pair correlation function* atau $g(r)$ hanya melihat kontribusi dari jarak antar titik yang sama dengan r dengan rumus untuk dua dimensi sebagai berikut [9].

$$g(u, v, \boldsymbol{\theta}) = \frac{\rho^2(u, v, \boldsymbol{\theta})}{\rho(u)\rho(v)}, \tag{5}$$

Jika nilai $g(u, v, \boldsymbol{\theta}) > 1$, berarti jarak antar *point pattern* saling berdekatan dan cenderung berkelompok/*cluster*, sedangkan jika $g(u, v, \boldsymbol{\theta}) < 1$, berarti jarak antar *point pattern* saling berjauhan atau reguler dan jika $g(u, v, \boldsymbol{\theta}) = 1$, berarti tidak terdapat keterkaitan antara lokasi u dengan lokasi v atau acak [8]. *Pair correlation function* merupakan *second order properties* dari *spatial point pattern*.

E. Uji Chi-Squared

Pengujian stasioneritas data spasial yang digunakan untuk mengetahui data yang digunakan mengikuti pola yang stasioner atau tidak. Pengujian stasioneritas data spasial dapat menggunakan uji *chi-squared* dengan hipotesis sebagai berikut [9].

Hipotesis

H_0 = Data mengikuti pola stasioner

H_1 = Data tidak mengikuti pola stasioner

Statistik uji :

$$X_{hit}^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(\text{observed} - \text{expected})^2}{\text{expected}} = \sum_{j=1}^m \frac{\left(n_j - \frac{n}{m}\right)^2}{\left(\frac{n}{m}\right)} \tag{6}$$

Keterangan :

n_j : banyaknya *point* di kotak bagian ke- j

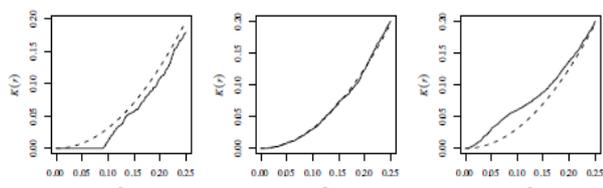
n : jumlah seluruh *point*

m : jumlah seluruh kotak bagian

Jika ditetapkan tingkat signifikansi α sebesar 0,05, maka H_0 ditolak jika nilai *P-value* kurang dari α atau $X_{hitung}^2 > X_{(\alpha, df)}^2$ dengan $df = m-1$, sehingga dapat disimpulkan bahwa data tidak mengikuti pola stasioner.

F. K-function

K-function merupakan cara menganalisis korelasi spasial dalam *point pattern* yang di populerkan oleh Ripley [11]. Konsep dari *K-function* adalah menghitung jarak antar semua pasangan titik berbeda dan merupakan jumlah rata-rata kumulatif dari jarak antar poin yang kurang dari atau sama dengan nilai r . Korelasi spasial digunakan untuk menentukan klasifikasi *spasial point pattern* apakah reguler atau titik cenderung menghindari satu sama lain), indenpenden atau

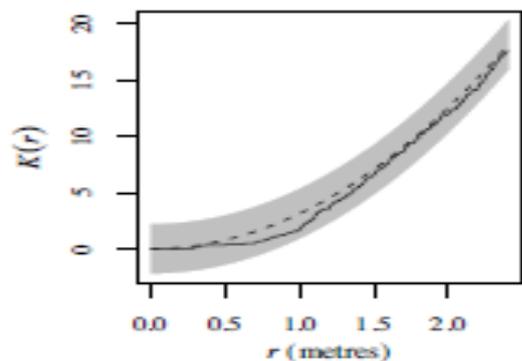


Gambar 1. Kurva K -function.

Keterangan :

K -function empiris $\hat{K}(r)$: garis padat

K -function poisson process $K_{pois}(r)$: garis putus-putus



Gambar 2. Global envelope interval data swedish pines.

Tabel 1. Variabel penelitian

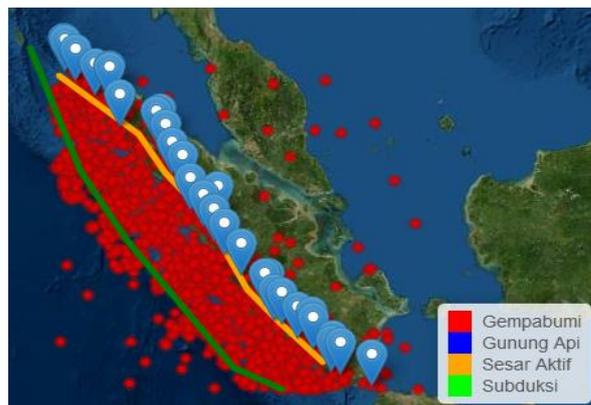
Variabel	Keterangan	Satuan
Y	Koordinat lintang (<i>latitude</i>) dan bujur (<i>longitude</i>) tempat terjadinya gempa bumi di Sumatra	Derajat Koordinat
X_1	Koordinat lintang (<i>latitude</i>) dan bujur (<i>longitude</i>) lokasi sesar aktif di Sumatra	Derajat Koordinat
X_2	Koordinat lintang (<i>latitude</i>) dan bujur (<i>longitude</i>) lokasi zona subduksi di Sumatra	Derajat Koordinat
X_3	Koordinat lintang (<i>latitude</i>) dan bujur (<i>longitude</i>) lokasi gunung api di Sumatra	Derajat Koordinat

acak, dan *clustering* (antar titik cenderung berdekatan atau berkelompok). K -function dapat diilustrasikan pada Gambar 1.

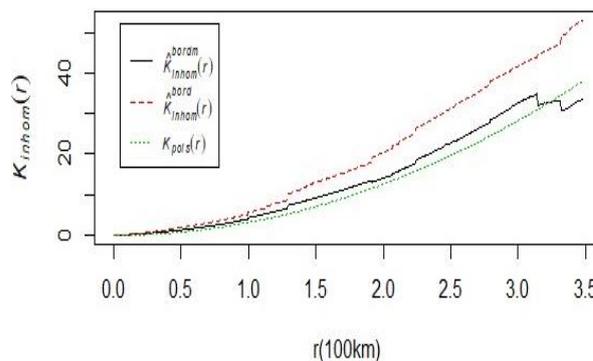
Gambar 1 merupakan ilustrasi antara K -function empiris $\hat{K}(r)$ dengan K -function teoritis *poisson process* $K_{pois}(r)$, dimana untuk menentukan plot sebaran data menggunakan perbandingan antara $\hat{K}(r)$ dengan $K_{pois}(r)$. $K_{pois}(r)$ digunakan sebagai pembanding dikarenakan pada $K_{pois}(r)$ menggambarkan pola persebaran yang independen. Gambar 1(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 bahwa sebaran data cenderung saling menjauh atau reguler. Jika $\hat{K}(r) = K_{pois}(r)$ seperti pada Gambar 1(b) maka sebaran data cenderung acak atau independen. Gambar 1(c) merupakan kebalikan dari kurva pada 1(a) yang berarti bahwa jika $\hat{K}(r) > K_{pois}(r)$ maka sebaran data cenderung membentuk kelompok-kelompok atau mengklaster [9].

G. Estimasi Parameter

Pada penelitian ini, estimasi parameter dilakukan dalam dua *step* atau dua langkah. Langkah pertama menggunakan metode



Gambar 3. Persebaran gempa bumi di Sumatra dengan magnitudo ≥ 4 pada tahun 2009-2018.



Gambar 4. K -function plot untuk mendeteksi pola sebaran data gempa bumi di Sumatra.

Tabel 2. Estimasi parameter $\hat{\beta}$, $\hat{\sigma}^2$, dan $\hat{\gamma}$

Parameter	Koefisien	Exp(Koef)	Z-value
$\hat{\beta}_0$	4.6894	108.7879	20.7619
$\hat{\beta}_1$ (Sesar)	-0.5236	0.5924	-6.6682
$\hat{\beta}_2$ (Subduksi)	-0.6361	0.5294	-8.4949
$\hat{\sigma}^2$	1.5614	-	-
$\hat{\gamma}$	0.2536	-	-

Berman-Turner approximation untuk mengestimasi parameter β . Langkah yang kedua menggunakan metode *second order composite likelihood* untuk mengestimasi parameter σ^2 dan γ .

1) Step 1 : Berman-Turner

Berman dan Turner mengembangkan fungsi *likelihood* dari *inhomogeneous Poisson point process* untuk mendekati fungsi *likelihood* dari *Generalized Linier Model Poisson*. *Inhomogeneous Poisson point process* memiliki parameter β , bentuk log-likelihood untuk β sebagai berikut.

$$\log L(\beta) = \sum_{i=1}^n \log \rho(\beta; u_i) - \int_B \rho(u; \beta) du \tag{7}$$

Berman-Turner menggunakan metode kuadratur numerik, sehingga $\int_B \rho(u; \beta) du$ dapat didekati dengan $\sum_{i=1}^{n+d} \rho(u_i; \beta) w_i$ dimana d adalah banyaknya *dummy point*, sehingga didapatkan persamaan 8.

$$\log L(\beta) = \sum_{i=1}^{n+d} (I_i \log \rho(u_i; \beta) - \rho(u_i; \beta) w_i) \tag{8}$$

Dimana $I_i = 1$ jika u_i adalah data poin dan $I_i = 0$ jika u_i adalah *dummy point*.

2) Step 2: Second-Order Composite Likelihood

Model yang sesuai untuk *point process* yang memiliki pola berkelompok atau *cluster*. Metode *composite likelihood* berdasarkan intensitas momen kedua $\rho^2(u, v; \theta)$ dengan persamaan berikut.

$$\log CL(\theta) = \sum_i \sum_{j \neq i} a(u_i, u_j) \left[\log \rho^2(u_i, u_j; \theta) - \log \int_{B \times B} a(u_i, u_j) \rho^2(u_i, u_j; \theta) du_i du_j \right] \quad (9)$$

Keterangan :

θ : parameter yang di estimasi (σ^2 dan γ)

a : fungsi pembobot

H. Keabakan Model

Pada penelitian ini untuk mengetahui kebaikan model menggunakan *envelope*. *Envelope* membandingkan hasil dari model *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* dengan plot *K-function* data. Apabila *K-function* data berada pada interval *envelope K-function* maka model dapat dikatakan baik. Pada Gambar 2. merupakan contoh visualisasi *plot envelope K-function* dari data *Swedishpines* dimana area abu-abu merupakan area interval *envelope* [9].

I. Gempa Bumi

Gempa Bumi (*earthquake*) adalah peristiwa bergetar atau bergoncangnya bumi karena pergerakan atau pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat adanya pergerakan lempeng tektonik. Berdasarkan penyebabnya gempa bumi dapat dibedakan menjadi gempa bumi tektonik, vulkanik, runtuh, dan buatan manusia. Gempa bumi tidak dapat terjadi di sembarang tempat, tapi umumnya gempa bumi terjadi di sekitar batas lempeng yang membentuk jalur gempa bumi dunia, dan sekitar sesar [12].

J. Sesar

Sesar merupakan rekahan yang mengalami geser-geseran yang jelas. Pergeseran tersebut berkisar dari beberapa milimeter sampai ratusan meter sedangkan panjangnya mulai dari beberapa desimeter sampai hingga ribuan meter. Sesar dapat terjadi pada segala macam batuan dengan tipe yang beragam. Sesar pada struktur batuan dapat mengakibatkan perubahan maupun perkembangan topografi, mengubah aliran air dibawah dan diatas permukaan serta merusak stratigrafi batuan dan sebagainya. Terdapat 3 jenis sesar yaitu sesar normal, sesar naik dan sesar geser [12].

K. Zona Subduksi

Zona Subduksi merupakan daerah zona seismik aktif, sebagian besar gempa bumi terjadi di daerah ini, baik gempa bumi dangkal, menengah maupun dalam sebagai hasil dari penunjaman lithosfer. Terjadinya zona subduksi dimulai dengan dua lempeng (benua dan samudera) yang bergerak mendekat antara satu dengan yang lainnya. Kemudian terjadi konvergen, plat samudera melengkung dan terdorong ke bawah plat benua yang lebih tebal dan lebih stabil [13].

L. Gunung Api

Gunung berapi merupakan bentuk yang dihasilkan oleh magma yang muncul ke permukaan bumi. Gunung api hanya terdapat pada tempa tertentu, yaitu pada jalur punggung tengah samudera, pada jalur pertemuan dua buah lempeng kerak bumi, dan pada titik-titik panas di muka bumi baik di

benua maupun di samudera (*hot spot*). Sebagian besar gunung api yang aktif di dunia berada di pertemuan lempeng tektonik dan muncul di daerah-daerah yang berada di dalam di Lautan Pasifik yang disebut "cincin gunung api" (*ring of fire*) [14].

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data dan Variabel Penelitian

Sumber data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang diambil dari laman website Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia www.bmkg.go.id untuk data koordinat dan magnitudo gempa bumi, laman website Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) untuk data koordinat lokasi gunung api, serta peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017 untuk data koordinat lokasi sesar aktif dan subduksi. *Observation Window* pada penelitian ini adalah $B = [104.51773, 119.2955] \times [-6.518365, 7.378783] 100$ km. Detail Variabel penelitian dijelaskan pada Tabel 1.

B. Langkah Analisis

Langkah-langkah analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

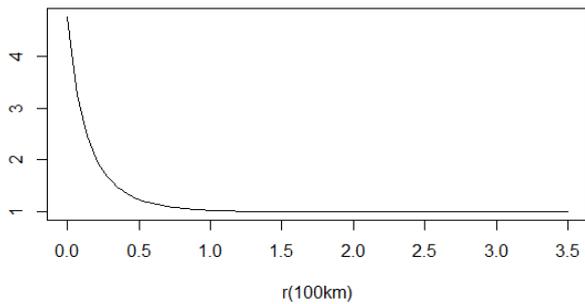
1. Menentukan batas *observation window* wilayah Sumatra
2. Menghitung dan menentukan jarak terdekat gempa bumi dengan masing-masing gunung api, sesar, dan subduksi dengan menggunakan jarak *Euclidean* yaitu $\sqrt{(Long_1 - Long_2)^2 - (Lat_1 - Lat_2)^2}$, sehingga notasi pada masing-masing *covariate* menjadi $Z(u)$
3. Melakukan visualisasi pada data gempa bumi, sesar, dan zona subduksi dengan menggunakan *package spatstat* melalui *Software R*
4. Melakukan analisis eksplorasi data dengan langkah sebagai berikut.
 - a. Melakukan identifikasi stasioneritas pada data menggunakan *chi-Squared test*
 - b. Jika hasil *Chi-Squared test* memberikan hasil bahwa data memiliki pola yang tidak stasioner maka dilakukan identifikasi korelasi spasial menggunakan *inhomogeneous K-function* dengan *package kinhom Software R*
5. Estimasi parameter menggunakan *Berman-turner dan second order composite likelihood*
6. Mendapatkan model
7. Mendapatkan kebaikan model menggunakan *envelope K-function*
8. Melakukan pemetaan risiko hasil pemodelan
9. Menarik kesimpulan dan saran.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

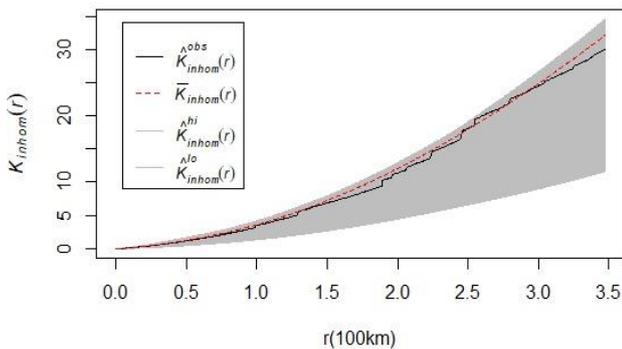
A. Karakteristik Gempa Bumi di Sumatra Tahun 2009-2018

Gempa bumi dengan magnitudo ≥ 4 pada tahun 2009-2018 telah terjadi sebanyak 2154 kejadian di Pulau Sumatera. Berikut merupakan persebaran gempa bumi di Sumatera.

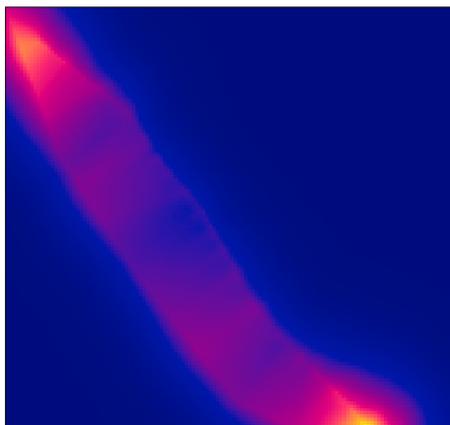
Gambar 3 menunjukkan gempa bumi di Sumatra terletak menyebar dari timur hingga ke barat dan cenderung lebih banyak di bagian selatan Pulau Sumatra. Pada bagian selatan Pulau Sumatra juga terdapat sesar aktif yang memanjang di daratan Pulau Sumatra dengan jumlah segmen sesar sebanyak 19 segmen. Zona subduksi juga terdapat memanjang di laut



Gambar 5. Pair correlation plot model inhomogeneous LGCP gempa bumi di Sumatra.



Gambar 6. Keabaikan model gempa bumi Sumatra menggunakan envelope K-function.



Gambar 7. Pemetaan prediksi risiko gempa bumi.

selatan Pulau Sumatra. Wilayah Sumatra memiliki 30 gunung api yang menyebar di seluruh wilayah Sumatra. Kejadian gempabumi di Pulau Sumatra berdasarkan Gambar 3 banyak terjadi di sekitar sesar aktif, zona subduksi dan gunung api. Hal ini diduga adanya pengaruh jarak antara gempabumi dengan sesar aktif, zona subduksi dan gunung api di Pulau Sumatra.

B. Eksplorasi Data

Ekplorasi data dilakukan untuk mengetahui apakah data *spatial point pattern* mengikuti pola yang stasioner serta untuk mengetahui korelasi spasial dari data. Uji stasioneritas menggunakan *Chi-Squared test* dengan menggunakan taraf signifikansi 0.05. Pada hasil pengujian didapatkan nilai signifikansi sebesar $2.2e-16$ (0.000) lebih kecil dari 0.05 dan nilai χ^2_{hitung} sebesar 6936.7. Nilai $\chi^2_{(\alpha; m-1)}$ dengan α 5% dan derajat bebas sebesar 103 didapatkan sebesar 128,8039. Nilai χ^2_{hitung} yang diperoleh lebih dari $\chi^2_{(\alpha; m-1)}$, maka keputusan yang di ambil adalah Tolak H_0 (lihat Bab 2E).

Kesimpulan yang didapatkan adalah data *spatial point pattern* yang digunakan tidak mengikuti pola yang stasioner.

K-function plot digunakan untuk menentukan klasifikasi *spasial point pattern* apakah reguler/saling menjauh, independen/acak, dan *clustering*/mengelompok. Hasil *Chi-Squared test* didapatkan bahwa data mengikuti pola yang tidak stasioner sehingga pada pengujian korelasi spasial menggunakan *Inhomogeneous K-function plot*.

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa garis proses *Poisson* berada di bawah garis *K-function* data yang berarti terdapat korelasi antara titik-titik dalam proses spasial sehingga asumsi independensi tidak terpenuhi dan cenderung memiliki sebaran data yang berkelompok atau mengklaster. Dengan demikian model yang dapat digunakan untuk data gempabumi dengan magnitudo lebih besar sama dengan 4 di Pulau Sumatra adalah *Cox Process*.

C. Estimasi Parameter

Pada penelitian ini, estimasi parameter dilakukan dalam dua langkah. Langkah pertama menggunakan metode *Berman-Turner approximation* untuk mengestimasi parameter β . Langkah yang kedua menggunakan metode *Second Order Composite Likelihood* untuk mengestimasi parameter σ^2 dan γ . Pemilihan model terbaik menggunakan *backward* yaitu seleksi variabel bekerja dengan cara memasukkan semua variabel independen terlebih dahulu, kemudian variabel yang tidak berpengaruh signifikan dalam model akan dikeluarkan dalam model. Pada pemodelan pertama yaitu model lengkap didapatkan bahwa jarak terdekat gunung api terhadap gempabumi tidak signifikan dikarenakan *Z-value* yang didapatkan sebesar 0.7726 lebih kecil dari nilai kritis Z pada α 0.05 yaitu sebesar 1.96, sehingga selanjutnya variabel jarak gunung api dikeluarkan dari model. Dari estimasi yang telah dilakukan setelah variabel jarak terdekat gunung api dikeluarkan, maka diperoleh hasil sebagai berikut.

Berdasarkan tabel 2, jarak sesar aktif dan zona subduksi terhadap gempabumi memiliki nilai absolut *Z-value* yang lebih besar dari nilai kritis Z dengan $\alpha = 0.05$ sebesar 1.96 sehingga secara statistik jarak terdekat sesar aktif dan zona subduksi terhadap terhadap jumlah gempabumi yang terjadi di sekitar wilayah tersebut. Dari hasil estimasi yang dilakukan diperoleh fungsi intensitas *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* sebagai berikut.

$$\hat{\rho}(u) = \exp(4.6894 - 0.5236Z_1(u) - 0.6361Z_2(u)) \tag{10}$$

Berdasarkan persamaan 10, dapat diperoleh beberapa informasi. Jika jarak pusat gempa ke sesar aktif bertambah 100 km, maka risiko terjadi gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5924 kali. Jika pusat gempabumi memiliki jarak ke zona subduksi bertambah 100 km, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5294 kali. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin dekat suatu lokasi di Sumatra ke zona subduksi dan sesar aktif maka akan meningkatkan risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut.

Pair Correlation untuk *Log-Gaussian Cox Process* pada persamaan berikut.

$$\hat{g}(\sigma^2, \gamma) = \exp(1.5614 \exp(-r/0.2536)) \tag{11}$$

Pair correlation juga dapat disajikan dalam bentuk plot. Estimasi *plot* $\hat{g}(\sigma^2, \gamma)$ persamaan 11 dapat dilihat pada Gambar 5.

Nilai *pair correlation* model *Inhomogeneous LGCP* untuk radius 0 hingga 350 km bernilai lebih dari 1. Jika nilai *pair correlation* lebih dari 1, maka sesuai bahwa pola titik gempa bumi pada model *Inhomogeneous LGCP* membentuk pola yang cenderung mengelompok atau cluster. Pada radius yang sangat kecil (mendekati 0 km), *pair correlation* yang di dapatkan bernilai 4.76549, pada radius 120 km *pair correlation*nya bernilai 0.013848, dan pada radius 350 km bernilai 1,000002.

D. Kebaikan Model

Pada penelitian ini untuk mengetahui kebaikan model menggunakan *envelope K-function*. Visualisasi *plot envelope K-function* dari data gempa bumi dapat dilihat pada Gambar 6.

Area abu-abu merupakan area interval *envelope*. Pada Gambar 6 diketahui bahwa *K-function* data berada pada area berwarna abu-abu atau berada dalam interval *envelope K-function*. Sehingga model *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* pada persamaan (10) dan (11) dapat dikatakan model yang baik.

E. Pemetaan Hasil Pemodelan

Berdasarkan model yang telah diperoleh, dapat dilakukan pemetaan risiko kejadian gempabumi di Pulau Sumatra. Gambar 7 merupakan visualisasi dari pemetaan prediksi risiko gempabumi Pulau Sumatera.

Risiko gempa bumi di Sumatra dilambangkan dengan warna. Jika warna area semakin cerah menandakan bahwa area tersebut memiliki risiko terjadinya gempa bumi yang semakin tinggi. Pemetaan risiko hasil pemodelan yang telah didapatkan memperlihatkan bahwa lokasi di Pulau Sumatra yang memiliki risiko gempa bumi yang tinggi berada di ujung barat dan ujung timur Pulau Sumatra. Daerah yang memiliki risiko tinggi terjadinya gempabumi yaitu Provinsi Lampung, dan Provinsi Aceh. Pemetaan kejadian gempabumi ini terletak membentang dan memanjang mengikuti pola zona subduksi dan sesar aktif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan didapatkan bahwa gempabumi yang terjadi di Pulau Sumatra berada di bagian selatan Pulau Sumatra dan menyebar merata dari bagian timur ke barat dengan jumlah kejadian 2154 kejadian gempabumi. Secara visual, lokasi sesar aktif berada di daratan bagian selatan Pulau Sumatra dan zona subduksi berada memanjang di laut bagian selatan Pulau Sumatra. Gunung api di Sumatra sebanyak 30 gunung api dan terletak menyebar. Gempa bumi terjadi di sekitar lokasi sesar aktif, zona subduksi dan gunung api. Data gempa bumi Sumatra tidak mengikuti pola yang stasioner serta cenderung membentuk cluster. Pemodelan kejadian gempabumi di Sumatra dengan mempertimbangkan jarak terdekat sesar aktif, zona subduksi dan gunung api memberikan hasil bahwa jarak terdekat sesar aktif dan zona subduksi berpengaruh signifikan terhadap kejadian gempabumi yang memiliki magnitudo lebih besar sama dengan 4 di Pulau Sumatra. Namun jarak terdekat gunung api dengan gempabumi tidak berpengaruh signifikan. Semakin dekat suatu lokasi ke zona subduksi dan sesar aktif

maka akan meningkatkan risiko terjadinya gempabumi di wilayah tersebut. Model *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* dapat dikatakan sebagai model yang baik untuk data gempabumi di Pulau Sumatra. Pemetaan risiko hasil pemodelan yang telah didapatkan memperlihatkan bahwa lokasi di Pulau Sumatra yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi berada di ujung barat dan ujung timur Pulau Sumatra yaitu Provinsi Aceh dan Provinsi Lampung yang keduanya berdekatan dengan sesar aktif dan zona subduksi. Penelitian ini dapat menjadi saran bagi pihak penanggulangan bencana untuk memantau aktivitas sesar serta subduksi yang berada di Wilayah Sumatra, mengawasi kegiatan masyarakat di area yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi, memberikan rambu-rambu peringatan bahaya gempabumi di sekitar wilayah sesar dan zona subduksi serta mempersiapkan peralatan dan bahan untuk penanganan darurat bencana gempabumi yang disiagakan di area tersebut. Selain itu dapat pula memasang alat pendeteksi gempabumi di lokasi-lokasi yang dekat dengan lokasi sesar aktif serta zona subduksi. Letak gunung api dan sesar terletak pada lokasi yang sangat berdekatan sehingga memungkinkan terdapat korelasi yang sangat tinggi. Penelitian ini tidak melakukan deteksi secara mendalam mengenai efek multikolinieritas, namun dapat dilanjutkan pada penelitian selanjutnya [10]. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan karakteristik gempabumi yang lain seperti perbedaan kedalaman gempabumi dengan menggunakan *Multitype Log-Gaussian Cox Process* [15].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. H. Natawidjaja, "Tectonic Setting Indonesia dan Pemodelan Sumber Gempa dan Tsunami," Geoteknologi-LIPI, Jakarta, 2007.
- [2] D. H. Natawidjaja, "Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup," Geoteknologi-LIPI, Jakarta, 2007.
- [3] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, "Waspada Gempa," BMKG, Jakarta, 2004.
- [4] K. Amri, "Wilayah Risiko Bencana Gempa Bumi pada Jalur Patahan Semangko di Kabupaten Tanah Datar Provinsi Sumatra Barat," Universitas Indonesia, 2010.
- [5] 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, 2017, doi: 10.1007/s00477-016-1294-7.
- [6] 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, 2019, doi: 10.12962/j27213862.v2i2.6825.
- [7] 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, 2018, doi: 10.1007/s00477-018-1579-0.
- [8] J. Moller and R. P. Waagepetersen, *Statistical Inference and Simulation for Spatial Point Processes*, 1st ed. London: Chapman and Hall/CRC, 2004.
- [9] A. Baddeley, E. Rubak, and R. Turner, *Spatial Point Patterns Methodology and Applications with R*, 1st ed. London: Chapman and Hall/CRC, 2015.
- [10] A. Choiruddin, J. F. Coeurjolly, and F. Letu , "Convex and non-convex regularization methods for spatial point processes intensity estimation," *Electron. J. Stat.*, vol. 12, no. 1, 2018, doi: 10.1214/18-EJS1408.
- [11] B. D. Ripley, "Modelling spatial patterns," *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 39, no. 2, 1977, doi: 10.1111/j.2517-6161.1977.tb01615.x.
- [12] Sunarjo, M. T. Gunawan, and S. Pribadi, *Gempabumi Edisi Populer*, Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2012.
- [13] Malik, "Pola Subduksi Daerah Bengkulu dengan Metode Segmen Irisan Vertikal," Skripsi, Akademi Meteorologi dan Geofisika, 2009.
- [14] S. Bronto, *Apa yang dapat dilakukan oleh Ilmuwan Yogyakarta terhadap*

Gunung Api Merapi dan Lingkungan Hidup di Sekitarnya? Yogyakarta: STTN Yogyakarta, 1996.

[15] 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, 2020, doi: 10.1007/s11222-019-09911-y.