

Pemodelan Risiko Gempa Bumi di Pulau Sumatera Menggunakan Model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*

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

Abstrak—Kondisi geografis Indonesia yang berada pada jalur sirkum pasifik dan terletak diantara pertemuan tiga lempeng tektonik menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan tingkat risiko gempa yang tinggi. Salah satu wilayah rawan gempa di Indonesia adalah pulau Sumatera karena kondisi geografisnya yang dilalui oleh sesar, zona subduksi, dan gunung berapi. Pada penelitian ini, kejadian gempa di pulau Sumatera dimodelkan dengan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* karena proses terjadinya gempa bumi secara umum diawali dengan gempa utama dan diikuti oleh gempa susulan, sehingga persebaran titik gempa di pulau Sumatera cenderung mengelompok di wilayah tertentu. Selain itu, terdapat kecenderungan bahwa gempa bumi terjadi di daerah yang dekat dengan gunung berapi, zona subduksi, dan sesar aktif. Hasil eksplorasi data menunjukkan bahwa data gempa bumi di pulau Sumatera tidak homogen yang dimungkinkan karena faktor geologis di pulau Sumatera seperti keberadaan gunung berapi, zona subduksi, dan sesar aktif. Selain itu, analisis menggunakan *K-function* menunjukkan bahwa pola persebaran gempa bumi di Sumatera cenderung membentuk *cluster*. Pemodelan kejadian gempa dengan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* menunjukkan faktor jarak subduksi dan sesar secara signifikan mempengaruhi risiko terjadinya gempa. Jika jarak suatu lokasi mendekati sejauh 100 km ke zona subduksi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1.9 kali sedangkan jika jarak suatu lokasi ke sesar mendekati sejauh 100 km, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1.7 kali. Validasi model dengan plot *envelope K-function* menunjukkan bahwa *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* baik digunakan untuk memodelkan data gempa di pulau Sumatera selama periode 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4 .

Kata Kunci— *Cluster, Cox Process, Gunung Berapi, Sesar, Zona Subduksi.*

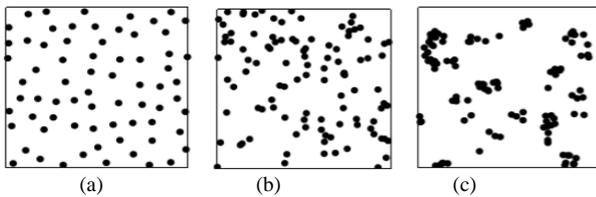
I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko gempa yang tinggi [1]. Hal tersebut terjadi karena posisi Indonesia yang berada pada jalur Sirkum Pasifik, dimana 80% dari total gempa bumi di dunia terjadi di wilayah tersebut. Sirkum pasifik adalah rangkaian pegunungan yang dimulai dari pegunungan Los Andes di Amerika Selatan, pegunungan di Amerika Tengah, Rocky Mountain di Amerika Utara, Kepulauan Aleuten, Jepang, Filipina dan masuk ke Indonesia melalui tiga jalur, yaitu Kalimantan, Sulawesi, dan Halmahera berlanjut ke kepulauan Papua dan membentuk tulang punggung pegunungan di Papua, Australia, dan berakhir di Selandia Baru. Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi. Berdasarkan proses kemunculannya, gempa bumi dibedakan menjadi beberapa

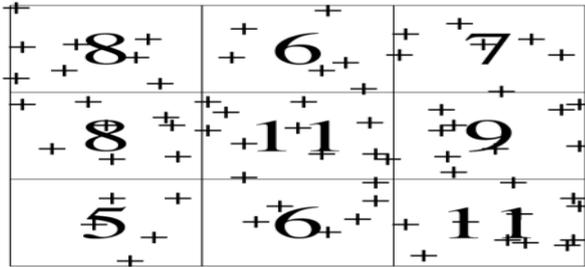
jenis yaitu *foreshock, mainshock, aftershock*, dan *earthquake swarm*. Tingkat kerawanan gempa di Indonesia bertambah dikarenakan wilayah Indonesia terletak diantara pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Samudra Pasifik.

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah tektonik aktif di dunia. Menurut kementerian ESDM, 6 dari 25 wilayah rawan gempa di Indonesia berada di Pulau Sumatera diantaranya yaitu Aceh, Jambi, Bengkulu, Lampung, Sumatera Barat, dan Sumatera Utara [2]. Tingginya risiko gempa di pulau Sumatera dipengaruhi oleh kondisi geografis wilayahnya, dimana sepanjang wilayah pulau Sumatera dilalui oleh sesar aktif, jalur gunung berapi, dan zona subduksi. Berdasarkan data yang dikumpulkan oleh BMKG, selama periode 2009-2018 telah terjadi 5937 gempa yang mengguncang pulau Sumatera dan 36% diantaranya termasuk dalam gempa berkekuatan besar. Selain itu, catatan sejarah dalam 20 tahun terakhir menunjukkan bahwa gempa dengan skala besar sering terjadi di pulau Sumatera. Beberapa gempa skala besar yang menimbulkan kerusakan bahkan menelan korban jiwa yaitu gempa Mentawai yang terjadi pada tahun 2010 dengan kekuatan gempa 7.7 M, gempa Nias yang terjadi pada tahun 2005 dengan kekuatan 8.6 M, dan gempa Aceh pada tahun 2004 yang menelan korban jiwa sebanyak 250.000 dan memicu terjadinya gempa dan tsunami di beberapa negara tetangga yaitu Thailand, Sri Lanka, dan India.

Pada penelitian mengenai pemodelan resiko gempa bumi ini, risiko terjadinya gempa di pulau Sumatera dimodelkan menggunakan *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dengan mempertimbangkan dependensi lokasi dan variabel yang diduga mempengaruhi risiko terjadinya gempa yaitu sesar, zona subduksi, dan gunung berapi. Ketiga variabel tersebut dipilih berdasarkan penelitian serupa tentang gempa bumi seperti pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* digunakan untuk memodelkan kejadian gempa karena persebaran gempa di pulau Sumatera tidak homogen dan proses terjadinya gempa diawali dengan gempa utama yang diikuti oleh gempa susulan. Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan informasi mengenai karakteristik persebaran gempa bumi berdasarkan kondisi geografis wilayah pulau Sumatera dan memodelkan kejadian gempa. Sehingga dapat berguna bagi masyarakat dan pemerintah sebagai upaya mitigasi dan mengurangi kerugian yang dialami masyarakat akibat gempa bumi.



Gambar 1. Pola persebaran *point pattern*: (a) regular, (b) independen (tengah), dan (c) cluster.



Gambar 2. Ilustrasi *quadrat coun*.

II. LANDASAN TEORI

A. *Spatial Point Process*

Spatial Point Process \mathbf{X} adalah suatu mekanisme random dimana *output* dari mekanisme tersebut berupa *spatial point pattern* [3]. *Spatial point pattern* \mathbf{x} adalah himpunan hasil observasi di *observation window* B , $B \subset S$ yang secara matematis dituliskan dalam Persamaan 1.

$$\mathbf{x} = \{x_u, u \in B\}, B \subset S \tag{1}$$

Spatial point pattern memiliki tiga jenis pola persebaran yaitu reguler, independen, dan cluster. Gambar 1 menunjukkan visualisasi pola persebaran *point pattern* [4]. Gambar 1 menunjukkan bahwa pada pola reguler data *point* cenderung saling menjauh satu sama lain, pada pola independen data *point* menyebar secara random dan tidak membentuk pola tertentu, sedangkan pada pola cluster data *point* cenderung saling berdekatan satu dan lainnya.

B. *Poisson Process*

Poisson Process yang dibatasi dalam wilayah B dimana $B \subset S$, maka:

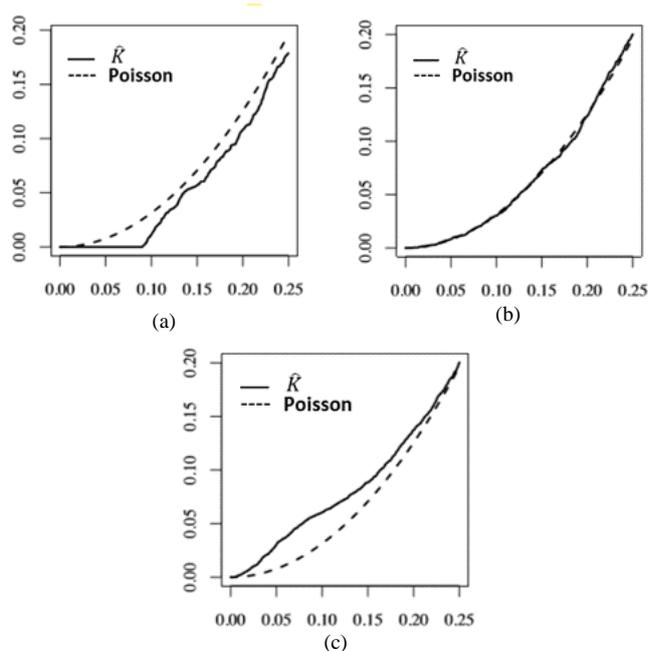
- Banyaknya titik gempu di wilayah B atau $N(B)$ berdistribusi Poisson dengan mean $\mu (B)$
- Jika wilayah B_1, B_2 , dan seterusnya saling bebas satu dan lainnya, maka banyak titik gempu di masing-masing wilayah saling independen [4].

C. *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*

Model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* adalah salah satu bentuk dari *Cox Process*, dimana \mathbf{C} adalah gempu utama yang dibangkitkan dari proses *Poisson* yang stasioner dengan *intensity* $\kappa > 0$ [5]. Maka $X_{c \in C}$ adalah gempu susulan merupakan proses *Poisson* independen dengan fungsi intensitas yang dituliskan pada Persamaan (2).

$$\rho_c(u; \beta) = \exp(\beta^T x(u))k(u - c; \omega) \tag{2}$$

dengan k adalah fungsi kepadatan peluang dari distribusi jarak antara gempu susulan dan gempu utama dengan parameter ω , maka $X = \bigcup_{c \in C} X_c$ adalah *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dengan fungsi intensitas $\rho(u; \beta)$ pada Persamaan (3).



Gambar 3. Visualisasi *K-function*: (a) Regular (b) Independen dan (c) Cluster.

$$\rho(u; \beta) = \kappa \exp(\beta^T x(u)) \tag{3}$$

Salah satu bentuk spesifik *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* yaitu *Thomas Cluster Process*. Pada *Thomas Cluster Process*, fungsi kepadatan peluang jarak antara gempu susulan dan gempu utama saling independen dan berdistribusi normal [6]. Fungsi k pada *Thomas Cluster Process* dapat dilihat pada Persamaan (4) [6].

$$k(u) = \exp(-\|u\|^2/(2\omega^2))/(2\pi\omega^2) \tag{4}$$

Rumus *pair correlation function Thomas Cluster Process* ditulis pada Persamaan (5).

$$g(u) = 1 + (4\pi\omega^2)^{-1} \exp(-\frac{\|u\|^2}{4\omega^2})/\kappa \tag{5}$$

Jika nilai ω semakin kecil, maka jarak antara gempu susulan dan gempu utama semakin pendek, sehingga cluster yang terbentuk cenderung rapat, dan jika nilai κ semakin kecil, hal ini mengakibatkan jumlah gempu utama pada suatu wilayah juga semakin sedikit sebanding dengan semakin kecilnya nilai κ .

D. *Eksplorasi Data*

Chi-Squared Test dilakukan untuk menguji apakah data pengamatan yang digunakan dalam penelitian mengikuti pola yang stasioner atau tidak. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini yaitu:

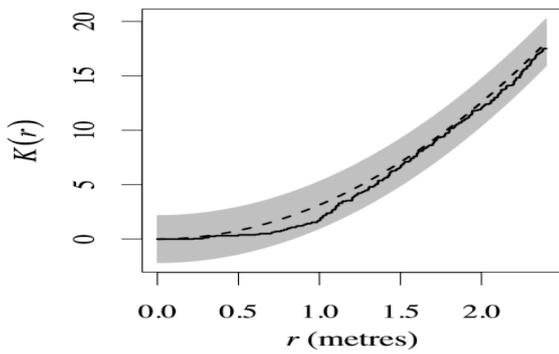
- H_0 : Data mengikuti pola yang stasioner
- H_1 : Data mengikuti pola yang tidak stasioner

Statistik uji yang digunakan yaitu χ_{hit}^2 yang diperoleh menggunakan rumus pada Persamaan (6).

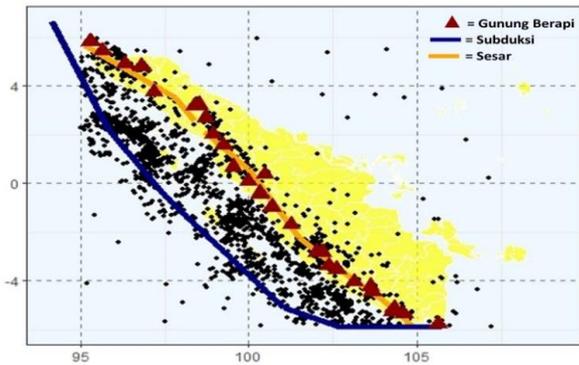
$$\chi_{hit}^2 = \sum_j \frac{(n_j - o)^2}{o} \tag{6}$$

Keterangan:

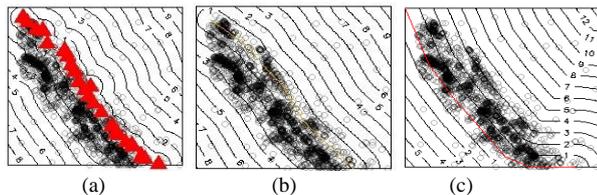
- n_j : Banyaknya point di *quadrat count* ke- j
- o : Ekspektasi banyaknya point di *quadrat count*



Gambar 4. Visualisasi envelope K-function data swedishpines.



Gambar 5. Persebaran Gempa di Pulau Sumatera Pada Tahun 2009-2018 dengan Magnitudo ≥ 4 .



Gambar 6. Jarak titik gempa terhadap (a) Gunung berapi (b) Sesar (c) Zona subduksi (dalam satuan 100 km).

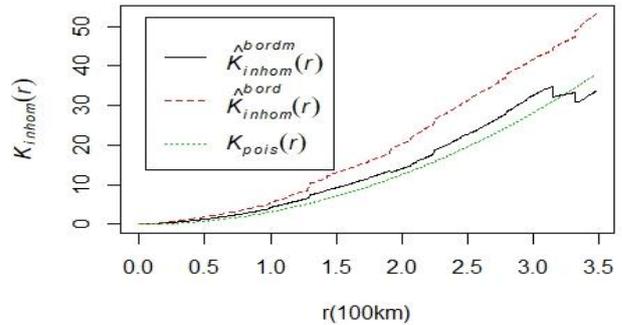
Karena data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *point*, maka untuk menentukan nilai n_j sebelumnya *observation window* dibagi menjadi beberapa bagian yang sama besar, sehingga didalam *observation window* terdapat beberapa bagian yang lebih kecil dimana antara bagian satu dengan yang lainnya saling bebas yang disebut *quadrat count* dan banyaknya data *point* di tiap *quadrat count* saling independen, sehingga n_j di tiap *quadrat count* didapatkan dengan menghitung banyaknya titik yang berada di *quadrat count* tersebut dan nilai o didapatkan dari jumlah keseluruhan poin di *observation window* dibagi dengan banyaknya *quadrat count*. Hasil pengujian akan memberikan keputusan tolak H_0 jika nilai $\chi^2_{hit} > \chi^2_{\alpha,df}$ atau *p-value* yang diperoleh dari hasil pengujian kurang dari α [4]. Contoh visualisasi dari *quadrat count* dapat dilihat pada Gambar 2.

E. Ripley K-Function

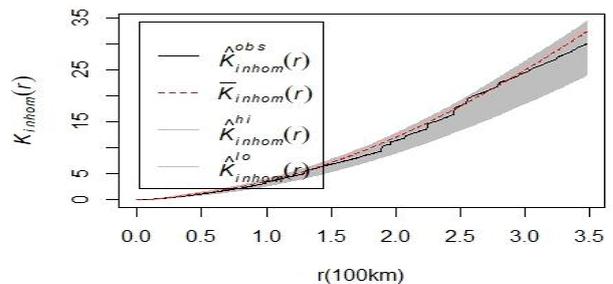
K-function adalah salah satu cara yang digunakan untuk mengetahui pola persebaran *spatial point pattern* membentuk pola reguler, independen, atau *cluster* seperti pada Gambar 1. Konsep menghitung nilai *K-function* yaitu dengan menghitung jarak antar semua pasangan titik berbeda (d_{ij}). Jika hasil uji *chi-squared* menyimpulkan bahwa data berasal dari proses yang stasioner, maka cara yang digunakan untuk menganalisis pola persebaran *point pattern* adalah dengan

2	0	0	1	0	0	0	0
23	89	2	0	1	1	0	0
28	57	3	1	0	0	1	0
13	33	29	1	1	1	1	0
63	154	71	4	0	1	0	0
15	15	44	42	1	0	0	1
0	63	91	39	1	0	0	1
0	16	42	54	4	2	1	0
1	6	24	18	11	4	2	0
0	1	7	97	92	10	1	0
0	0	7	93	77	18	2	1
1	0	4	15	96	59	4	2
0	0	1	4	37	117	25	4

Gambar 7. *Quadrat count* data gempa di pulau Sumatera.



Gambar 8. Pengujian korelasi spasial data *spatial point pattern* dengan grafik *inhomogeneous K-function*.



Gambar 9. Plot envelope K-function model *inhomogeneous Neyman-Scott cox process*.

melihat plot *K-function*. Rumus untuk menghitung nilai *K-function* ditulis pada Persamaan 7.

$$\hat{K}(r) = \frac{|B|}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \mathbf{I}\{d_{ij} \leq r\} e_{ij}(r) \quad (7)$$

Apabila hasil uji *chi-squared* menyimpulkan bahwa data berasal dari proses yang tidak stasioner, maka cara yang digunakan untuk menganalisis pola persebaran *spatial point pattern* yaitu *inhomogeneous K-function*. Rumus yang digunakan untuk menghitung *inhomogeneous K-function* dapat dilihat pada Persamaan (8).

$$\hat{K} \frac{1}{D^p |B|} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \mathbf{I} \left\{ \frac{\|x_i - x_j\|}{\hat{\rho}(x_i) \hat{\rho}(x_j)} \right\} (x_i; x_j; r) \quad (8)$$

inhom

Perbedaan *inhomogeneous K-function* dengan *K-function* yaitu adanya penambahan bobot sebesar $w_i = 1/\rho(u_i)$ sedangkan pasangan u_i dan u_j akan ditambahkan bobot sebesar $w_{ij} = 1/\rho(u_i)\rho(u_j)$. Visualisasi *ripley K-function* baik *K-function* maupun *inhomogeneous K-function* untuk setiap pola dapat dilihat pada Gambar 3.

Garis lurus yang pada Gambar 3 menunjukkan garis \hat{K} sedangkan garis putus-putus menunjukkan garis Poisson. Jika garis \hat{K} berada di bawah garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola reguler. Jika garis \hat{K} berada tepat di garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola

Tabel 1.
Variabel penelitian

No	Variabel	Keterangan
1	Y	Koordinat gempa bumi
2	X ₁	Jarak gempa ke sesar terdekat
3	X ₂	Jarak gempa ke subduksi terdekat
4	X ₃	Jarak gempa ke gunung berapi terdekat

Tabel 2.
Nilai estimasi dari $\hat{\kappa}$, $\hat{\beta}$, dan $\hat{\omega}$

Koefisien	Estimasi	1/Exp (Beta)
$\hat{\kappa}$	1.8511104	
$\hat{\omega}$	0.1530991	
$\hat{\beta}_0$	4.6894181	0.009192
$\hat{\beta}_1$ (Sesar)	-0.5235562	1.68802
$\hat{\beta}_2$ (Subduksi)	-0.6361314	1.889158

independen, sedangkan jika garis \hat{K} berada di atas garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola *cluster* [4].

F. Estimasi Parameter

Berman Turner adalah metode *numerical quadrature* yang digunakan untuk mengestimasi parameter model *inhomogeneous Poisson point process* agar bentuk likelihood nya mendekati bentuk likelihood dari *Generalized Linier Model Poisson*. Jika \mathbf{X} adalah model *inhomogeneous Poisson point process* dengan parameter β dengan fungsi log-likelihood disajikan pada Persamaan (9).

$$\log L(\beta) = \sum_{i=1}^n \log \rho(\beta; u_i) - \int_B \rho(u; \beta) du \quad (9)$$

dengan pendekatan *numerical quadrature*, didapatkan Persamaan (10).

$$\int_B f(u) du = \sum_i w_i f(u_i) \quad (10)$$

Persamaan (10) dapat disederhanakan menjadi persamaan (11).

$$\log L(\beta) = \sum_{i=1}^{n+q} (I_i \log \rho(u_i; \beta) - \rho(u_i; \beta) w_i) \quad (11)$$

Dengan q adalah banyak *dummy point* dan I_i adalah fungsi indikator dimana $I_i = 1$ jika u_j adalah data *point* dan $I_i = 0$ jika u_j adalah *dummy point* [4].

G. Second-Order Composite Likelihood

Second-Order Composite Likelihood adalah metode estimasi parameter yang digunakan untuk mendapatkan estimator parameter *cluster* $\theta = (\kappa; \omega)^T$. Fungsi *second order composite likelihood* dibangun dari semua pasangan titik data x_i, x_j dapat dilihat pada Persamaan (12) [4].

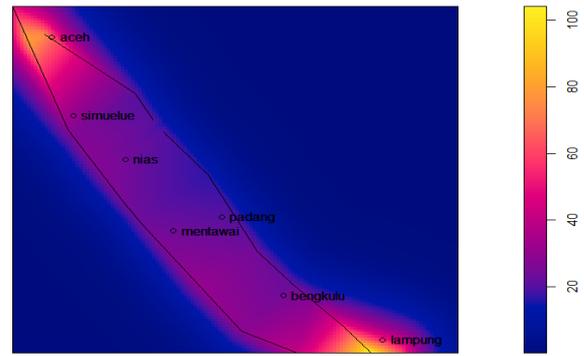
$$\log CL(\theta) = \sum_i \sum_{j \neq i} [\log \rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta) - \log \int_B \int_B \rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta) du_i du_j] \quad (12)$$

Hasil penurunan persamaan (12) terhadap θ ditulis pada persamaan (13).

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \log CL(\theta) = \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\kappa_2(u_i, u_j; \theta)}{\rho^{(2)}(u_i, u_j; \theta)} - \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\langle \kappa_2 \rangle}{\langle \rho^{(2)} \rangle} \quad (13)$$

H. Kebaikan Model

Kebaikan model pada penelitian ini dicek menggunakan plot *envelope K-function*. Suatu model dikatakan baik untuk



Gambar 10. Plot hasil prediksi *intensity* gempa di pulau Sumatera.

memodelkan data jika p lot nilai *K-function* data asli berada pada interval *envelope K-function*. Gambar 4 menunjukkan contoh visualisasi dari plot *envelope K-function* data *Swedishpines* [4].

Gambar 4 menunjukkan bahwa plot nilai *K-function* dari data *Swedishpines* berada pada interval *envelope K-function*, sehingga model yang digunakan cocok untuk memodelkan data *Swedishpines*.

I. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi. Berdasarkan proses kemunculannya, gempa bumi dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu *foreshock*, *mainshock*, *aftershock*, dan *earthquake swarm*. *Foreshock* adalah gempa-gempa yang terjadi sebelum gempa utama atau *mainshock* dan *aftershock* adalah gempa-gempa susulan yang terjadi setelah gempa utama sedangkan berdasarkan penyebab terjadinya, gempa bumi dikelompokkan menjadi beberapa macam yaitu gempa bumi tektonik dan gempa bumi vulkanik. Gempa bumi tektonik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh pergerakan lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik dan gempa bumi vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas gunung berapi [7].

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data dan Variabel Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder berupa koordinat data gempa di pulau Sumatera pada rentang tahun 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4 yang diunduh dari laman web BMKG, koordinat sesar dan koordinat subduksi diperoleh dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, sedangkan koordinat gunung berapi diperoleh dari laman web Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). *Observation window* dalam penelitian ini yaitu $[94.160120, 107.473420] \times [-5.872401, 6.647552]$ (100 km)². Variabel yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Tabel 1.

B. Langkah Analisis

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini untuk mencapai tujuan penelitian yaitu sebagai berikut.

- Mengumpulkan data gempa di Indonesia tahun 2009-2018.
- Pre-processing* data dengan memilih sejumlah data berdasarkan batasan wilayah pulau Sumatera dan kekuatan gempa di wilayah tersebut.

- c. Membuat visualisasi data untuk mengetahui karakteristik persebaran gempa di pulau Sumatera.
- d. Melakukan analisis eksplorasi data.
- e. Menganalisis korelasi spasial untuk mengetahui pola persebaran titik gempa.
- f. Melakukan pemodelan data gempa di pulau Sumatera dengan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*.
- g. Mengecek kebaikan model dengan melihat plot *envelope K-function*.
- h. Menarik kesimpulan dan saran.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Gempa bumi Berdasarkan Faktor Geologi Sesar, Subduksi, dan Gunung Berapi

Selama tahun 2009-2018, terjadi sebanyak 2153 gempa dengan kekuatan ≥ 4 magnitudo di pulau Sumatera. Persebaran titik gempa besar yang terjadi di pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan bahwa titik-titik terjadinya gempa cenderung mengelompok di wilayah-wilayah tertentu yaitu di wilayah yang berdekatan dengan zona subduksi, sesar, dan gunung berapi. Menurut catatan BMKG, daerah-daerah rawan gempa di pulau Sumatera yaitu Lampung, Sumatera Barat, Bengkulu, Aceh, dan Sumatera Utara.

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa sebagian besar titik gempa yang terjadi di Aceh berada di daratan. Hal tersebut disebabkan karena kondisi geografis provinsi Aceh yang diapit oleh dua segmen yaitu segmen Aceh dan segmen Seulimeum. Selain itu, pulau Simeuleu yang berada di provinsi Aceh juga merupakan daerah yang sangat rawan gempa dan tsunami dikarenakan letaknya yang berdekatan dengan zona subduksi.

Provinsi Sumatera Utara juga merupakan daerah rawan gempa di pulau Sumatera dimana Gambar 5 menunjukkan bahwa sebagian besar titik gempa nya berada di laut yaitu di sekitar pulau Nias. Hal tersebut disebabkan karena kondisi geografis pulau Nias yang berada dekat dengan zona subduksi. Wilayah rawan gempa di pulau Sumatera yang lain adalah provinsi Sumatera Barat, dimana sebagian besar titik gempa berada diantara kota Padang dan pulau Mentawai. Salah satu penyebab tingginya risiko gempa bumi di Sumatera Barat yaitu karena adanya 7 segmen sesar Sumatera yang berada di Sumatera Barat yaitu segmen Siulak, segmen Suliti, segmen Sumani, segmen Sianok, segmen Sumpur, segmen Barumun, dan segmen Angkola.

Selain itu, persebaran titik gempa bumi pada Gambar 5 juga menunjukkan adanya pengelompokan titik-titik gempa di wilayah provinsi Bengkulu dan Lampung, artinya kedua wilayah tersebut juga merupakan wilayah rawan gempa di pulau Sumatera. Menurut data yang dihimpun dari BMKG, sepanjang tahun 2016 telah terjadi gempa bumi sebanyak 346 kali di provinsi Bengkulu dan hingga bulan Juli 2018 provinsi Lampung masih sering dilanda gempa dengan kekuatan besar. Hal tersebut diakibatkan adanya aktifitas subduksi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia yang berada di laut dan aktifitas sesar Sumatera yang berada di darat.

Risiko gempa yang tinggi di pulau Sumatera tidak terlepas dari kondisi geografisnya yang dilalui oleh zona subduksi, sesar, dan jalur gunung berapi. Gambar 6 merupakan visualisasi yang menunjukkan jarak titik-titik gempa terhadap

zona subduksi, sesar, dan gunung berapi untuk mengetahui seberapa banyak titik gempa yang berada dekat dengan zona subduksi, sesar, dan gunung berapi.

Gambar 6 menunjukkan bahwa jarak titik gempa terhadap gunung berapi berada pada radius 0-700 km, jarak titik gempa terhadap sesar berada pada radius 0-800 km, dan jarak titik gempa terhadap zona subduksi berada pada radius 0-1100 km. Jika dibandingkan dengan gunung berapi dan sesar, sebagian besar titik gempa berada dekat dengan zona subduksi dengan radius 0-300 km. Hal tersebut menunjukkan bahwa daerah-daerah yang jaraknya berada pada radius 0-300 km dari zona subduksi memiliki risiko yang lebih tinggi daripada daerah yang lain. Menurut peta wilayah pulau Sumatera, daerah-daerah yang berada dekat dengan zona subduksi diantaranya yaitu pulau Simeuleu, Nias, dan kepulauan Mentawai.

B. Uji Chi-Squared

Uji *Chi-Squared* dilakukan untuk mengetahui apakah data gempa bumi mengikuti pola stasioner atau tidak. Sebelum dilakukan pengujian, *observation window* terlebih dahulu dibagi menjadi 104 *quadrat count* lalu dihitung banyaknya titik gempa bumi pada tiap-tiap *quadrat count* seperti pada Gambar 7.

Gambar 7 menunjukkan bahwa banyaknya titik gempa bumi pada tiap *quadrat count* sangat berbeda satu dan lainnya, sehingga diduga data gempa bumi mengikuti pola yang tidak stasioner. Dengan pengujian menggunakan taraf signifikansi sebesar 0.05, diperoleh *p-value* sebesar $< 2.2e-16$. Karena *p-value* < 0.05 , maka diperoleh kesimpulan bahwa data gempa bumi di pulau Sumatera mengikuti pola yang tidak stasioner, artinya dimungkinkan terdapat faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi jumlah terjadinya gempa bumi yang menyebabkan banyaknya kejadian gempa bumi di tiap daerah pulau Sumatera berbeda.

C. Analisis Korelasi Spasial

Analisis korelasi spasial dilakukan untuk mengetahui pola persebaran gempa bumi. Korelasi spasial dilakukan dengan melihat plot *inhomogeneous K-function* karena hasil pengujian menggunakan uji *Chi-Squared* menyimpulkan bahwa data gempa bumi mengikuti pola yang tidak stasioner. Plot *inhomogeneous K-function* data gempa bumi di pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan garis *inhomogeneous K-Function* data gempa bumi yang berwarna merah berada diatas garis *Poisson process* yang berwarna hijau, artinya persebaran data gempa bumi di pulau Sumatera membentuk pola *cluster*. Posisi *line plot inhomogeneous K-Function* data gempa bumi yang posisinya tidak terlalu jauh diatas garis *Poisson* memungkinkan bahwa efek inhomogen lebih besar dari *cluster*.

D. Pemodelan Gempa bumi Menggunakan Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process

Estimasi parameter untuk pemodelan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* pada penelitian ini dilakukan dengan dua tahap karena hasil uji *Chi-Squared* menyimpulkan bahwa data gempa bumi di pulau Sumatera mengikuti pola yang tidak stasioner dan hasil analisis korelasi spasial menunjukkan bahwa titik-titik gempa bumi

membentuk pola *cluster*, sehingga ada dua parameter yang harus diestimasi yaitu parameter β yang diestimasi menggunakan pendekatan *Berman-Turner* dan parameter κ yang diestimasi menggunakan metode *second order composite likelihood*.

Hasil pemodelan data gempa bumi di pulau Sumatera menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dengan taraf signifikansi 5% menyimpulkan bahwa faktor geografis jarak sesar dan subduksi signifikan mempengaruhi risiko kejadian gempa bumi di pulau Sumatera, sedangkan faktor jarak gunung berapi tidak signifikan mempengaruhi risiko terjadinya gempa bumi di pulau Sumatera. Artinya, risiko gempa bumi tiap daerah di pulau Sumatera berbeda-beda, tergantung pada jarak daerah tersebut ke sesar dan subduksi. Karena variabel jarak ke gunung berapi tidak signifikan, maka dilakukan pemodelan ulang tanpa memasukkan faktor jarak gunung berapi dan diperoleh nilai estimator untuk parameter κ, β , dan ω yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai $\hat{\kappa}$ yang diperoleh dari hasil estimasi yaitu 1.8511104 dan $\hat{\omega}$ yaitu 0.1530991, artinya 380 gempa utama diperkirakan terjadi di wilayah pulau Sumatera, dengan risiko gempa susulan pada masing-masing gempa utama dipengaruhi oleh kondisi geografis yaitu jarak lokasi terjadinya gempa utama dengan sesar dan zona subduksi, dimana titik-titik gempa susulan tersebar di sekitar gempa utama dengan standar deviasi sebesar 15.30 km. Setelah mengestimasi parameter, diperoleh model intensitas dari *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* sebagai berikut.

$$\hat{\rho}(u) = 1.85 \times \exp(4.69 - 0.524X_1(u) - 0.636X_2(u)) \quad (14)$$

Persamaan (14) menunjukkan risiko gempa di suatu lokasi dipengaruhi oleh jarak terhadap sesar dan zona subduksi dimana bila jarak suatu lokasi ke sesar Sumatera mendekat 100 km, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat hampir dua kali lipat (1.7 kali), sedangkan bila jarak suatu lokasi ke zona subduksi mendekat 100 km, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat hampir dua kali lipat (1.9 kali).

E. Kebaikan Model

Kebaikan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dalam memodelkan data gempa bumi di pulau Sumatera dapat dilihat dari plot *envelope K-function* pada Gambar 9. Gambar 9 menunjukkan plot nilai *K-function* dari data gempa Sumatera berada pada interval *envelope K-function*. Hal tersebut ditunjukkan bahwa garis hitam lurus berada pada area yang diarsir, artinya model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* baik digunakan untuk memodelkan data gempa bumi tahun 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4 . Perlu diperhatikan bahwa pada radius diatas 250 km, ada kemungkinan model *underfit* karena interval *envelope K-function* pada Gambar 9 melebar kebawah.

F. Peta Prediksi Risiko Gempa bumi di Pulau Sumatera

Peta hasil prediksi risiko gempa di pulau Sumatera menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* ditunjukkan pada Gambar 10. Gambar 10 menunjukkan bahwa risiko gempa di pulau Sumatera

cenderung tinggi di daerah yang letaknya diapit oleh sesar dan zona subduksi yaitu di bagian pinggir pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia. Daerah-daerah di pulau Sumatera yang berada di wilayah risiko gempa tinggi dan sangat tinggi diantaranya yaitu provinsi Aceh (Banda Aceh dan pulau Simuelue), Lampung, Sumatera Utara (pulau Nias), Sumatera Barat (kepulauan Mentawai dan kota Padang), dan Bengkulu. Hal tersebut terjadi karena bagian atas dan bawah pulau Sumatera merupakan wilayah pertemuan antara sesar dan zona subduksi, sedangkan wilayah pinggir pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudera Hindia berdekatan dengan zona subduksi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan yaitu persebaran kejadian gempa di pulau Sumatera mengelompok di daerah-daerah yang dekat dengan zona subduksi, sesar, dan gunung berapi, dimana sebagian besar gempa terjadi di radius 0-300 km dari zona subduksi. Daerah di pulau Sumatera yang rawan gempa karena lokasinya berdekatan dengan zona subduksi di samudra Hindia yaitu pulau Simuelue, pulau Nias, kepulauan Mentawai, Bengkulu, dan Lampung, sedangkan daerah yang rawan gempa karena adanya aktifitas sesar yaitu provinsi Sumatera Barat. Pemodelan dengan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* menunjukkan bahwa zona subduksi dan sesar adalah faktor geografis yang secara signifikan mempengaruhi tingginya kejadian gempa di pulau Sumatera, dimana setiap pengurangan 100 km jarak suatu lokasi terhadap zona subduksi akan meningkatkan risiko gempa di lokasi tersebut sebesar 1.9 kali lipat dan setiap pengurangan 100 km jarak suatu lokasi terhadap sesar akan meningkatkan risiko gempa di lokasi tersebut sebesar 1.7 kali lipat. Hasil prediksi menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* menunjukkan daerah rawan gempa di pulau Sumatera terletak di bagian atas pulau Sumatera yaitu provinsi Aceh dan Sumatera Utara, bagian bawah pulau Sumatera yaitu Lampung, dan bagian pinggir pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia yaitu provinsi Sumatera Barat dan Bengkulu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ihsan, "Analisa Ketahanan Gempa pada Struktur Rumah Tradisional Sumatra," Universitas Indonesia, 2008.
- [2] Kementrian ESDM, *Pengenalan Gempa Bumi*. Jakarta: Kementrian ESDM, 2013.
- [3] 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: <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1294-7>.
- [4] A. Baddeley, E. Rubak, and R. Turner, *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [5] S. S. Anwar, A. A. Stein, and G. J. L. Van, *Implementation of The Marked Strauss Point Process Model to The Epicenters of Earthquake Aftershocks*, *Advances in Geo-Spatial Information Science*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [6] J. Moller and R. P. Waagepetersen, "Modern statistics for spatial point process," *Scand. J. Stat.*, vol. 34, no. 4, pp. 643–684, 2017, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9469.2007.00569>.
- [7] Sunarjo, Gunawan, and Pribadi, *Gempa Bumi Edisi Populer*. Jakarta: BMKG, 2012.