

Spatio-Temporal Epidemic Type Aftershock Sequence Model for Mapping Earthquake Intensity in West Sumatra

Hidayatul Fikra, Dina Fitria*, Nonong Amalita, Tessa Octavia Mukhti

Departemen Statistika, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

*Corresponding author: dinafitria@fmipa.unp.ac.id

Submitted : 21 Mei 2024

Revised : 29 Mei 2024

Accepted : 30 Mei 2024

ABSTRACT

The occurrence of earthquakes is random spatially and temporally, so it is necessary to carry out research by estimating the probability of earthquakes appearing in the form of modeling to reduce the impact of earthquake events. This continues to be studied from both seismological and stochastic aspects. Point processes are examples of stochastic processes which explain seismic activity, one of them is epidemic type aftershock sequence (ETAS) model. It lackness ignores the location or spatial component of. Consequently, the components of time, location, and magnitude will be taken into consideration when discussing the ETAS model in this study. The spatio-temporal model is the name given to this concept. Therefore, in this research, mapping of earthquake intensity will be carried out in the West Sumatra region using the spatio-temporal ETAS model stated in conditional intensity function with eight parameters. The data used are earthquake events in the West Sumatra region with a magnitude threshold of 4 SR and a depth of ≤ 70 km for the period January 2000 to January 2024. Parameter model estimated using the maximum likelihood method and solved using the Davidon Fletcher Powell algorithm. The result shows area of West Sumatra with high earthquake intensity is coastal area, namely West Pasaman, Padang, Mentawai Islands and the South Pesisir. This makes the area vulnerable to seismic disasters.

Keywords: *Conditional Intensity Function, Earthquakes, Spatio-Temporal ETAS*



This is an open access article under the Creative Commons 4.0 Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2022 by author and Universitas Negeri Padang.

I. PENDAHULUAN

Secara geologis, Indonesia terletak di kawasan lingkaran api yang merupakan kawasan pertemuan Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Keadaan ini yang menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang berpotensi tinggi terhadap bencana alam khususnya gempa bumi. Fauzi (2018) menyatakan bahwa gempa bumi yang terbesar di dunia sekitar 80% terjadi di kawasan lingkaran api tempat pertemuan lempeng tektonik tersebut. Pada pertemuan tiga lempeng ini terjadi penambahan energi sehingga tidak tertampung lagi dan energi tersebut dikeluarkan dalam bentuk gempa bumi.

Sumatera Barat berada di antara sumber ancaman gempa bumi, yaitu pertemuan Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia yang terletak di sebelah barat Kepulauan Mentawai, *Mentawai Fault System* (MFS) terletak di bagian timur Kepulauan Mentawai dan membentang dari selatan ke utara, dan *Sumatera Fault System* (SFM) berada di darat Pulau Sumatera yang melewati sebagian kabupaten/kota di Sumatera Barat, seperti Kabupaten Pasaman, Kota Bukit Tinggi, Kota Padang Panjang, Kabupaten Tanah Datar, Kabupaten Solok, dan Kabupaten Solok selatan. Oleh karena itu, menyebabkan Sumatera Barat sebagai salah satu wilayah yang memiliki risiko tinggi terhadap bencana gempa bumi di Indonesia.

Kemunculan bencana gempa bumi dengan karakteristik acak dalam lokasi maupun waktu, maka diperlukannya melakukan prakiraan gempa bumi. Bidang seismologi dan probabilitas masih mengembangkan metode prakiraan gempa bumi. Menurut Veen (2008), proses titik adalah bagian dari proses stokastik yang bisa mendeskripsikan gempa bumi. Dalam metode ini, waktu dan lokasi gempa bumi dapat dilihat sebagai titik-titiknya, dan ukurannya adalah magnitudo atau kedalaman. Dalam hal ini, untuk memprediksi aktivitas gempa bumi dapat menggunakan fungsi intensitas bersyarat. Ogata (1988) menjelaskan bahwa fungsi intensitas bersyarat dapat menentukan probabilitas gempa bumi di suatu wilayah berdasarkan gempa bumi sebelumnya. Akibatnya, gempa bumi dapat dikurangi dengan manajemen bencana alam.

Menurut Harte (2010), model tipe epidemik dapat menjelaskan gempa bumi utama yang diikuti beberapa gempa bumi susulan. Dimana, gempa bumi utama dapat mempengaruhi gempa bumi susulan pada rentang waktu tertentu setelah gempa bumi utama. Oleh karena itu, gempa bumi susulan dianggap sebagai suatu epidemik. Zhuang (2002) mengembangkan model epidemik untuk menjelaskan serangkaian gempa bumi susulan yang dikenal sebagai *Epidemic Type Aftershock Sequence* (ETAS). Pada model ETAS terdapat periode waktu antara gempa bumi dan serangkaian gempa bumi susulan yang terjadi setelahnya. Model ETAS dengan memperhitungkan komponen lokasi disebut sebagai model ETAS spatio-temporal karena mempresentasikan fenomena alam yang diamati dari waktu ke waktu pada dimensi spasial (Wijaya, 2020). Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan intensitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat menggunakan model *Epidemic Type Aftershock Sequence* (ETAS) spatio-temporal untuk mengetahui daerah-daerah yang berpotensi tinggi terhadap gempa bumi dengan melihat intensitasnya di wilayah Sumatera Barat. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi dampak dari kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat.

II. METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian dan Sumber Data

Pada penelitian ini data yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari *website United States Geological Survey* (USGS), yaitu data gempa bumi yang mencakup bagian darat dan laut wilayah Sumatera Barat tepatnya pada koordinat $0.54^{\circ}LU-3.30^{\circ}LS$ dan $98^{\circ}BT-101.53^{\circ}BT$ periode Januari 2000 sampai Januari 2024. Variabel yang digunakan pada penelitian ini diambil berdasarkan atribut data gempa bumi yang berpengaruh terhadap intensitas gempa bumi, yaitu waktu kejadian gempa bumi, *longitude* gempa bumi, *latitude* gempa bumi, dan magnitudo gempa bumi.

B. Teknik Analisis Data

Pada penelitian ini dilakukan analisis data menggunakan fungsi intensitas bersyarat pada model ETAS spatio-temporal dengan bantuan *software Arcgis* dan *R Studio*. Tahapan analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengumpulkan data sekunder kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat pada koordinat $0.54^{\circ}LU - 3.30^{\circ}LS$ dan $98^{\circ}BT - 101.53^{\circ}BT$ periode Januari 2000–2024 dari *website* USGS.
2. Melakukan pre-processing data dengan pemilihan data gempa bumi yang berada pada ambang batas magnitudo 4 SR pada kedalaman ≤ 70 km dan variabel yang mempengaruhi intensitas gempa bumi.
3. Melakukan visualisasi data dalam bentuk peta untuk mengidentifikasi kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat menggunakan *software Arcgis* dan visualisasi dalam bentuk *scatter plot* untuk melihat hubungan antar variabel menggunakan *software R Studio*.
4. Menentukan model ETAS spatio-temporal dan asumsi-asumsinya kejadian gempa bumi. Model ETAS spatio-temporal adalah model yang mempresentasikan fenomena alam yang diamati dari waktu ke waktu dan dalam dimensi spasial. Pengembangan model ETAS dilakukan oleh Zhuang (2002) menjadi model ETAS spatio-temporal dengan penambahan komponen lokasi (x, y) , yaitu episenter kejadian gempa bumi, sehingga $\lambda(t, x, y, M|\mathcal{H}_t)$ menjadi fungsi intensitas bersyarat pada model ETAS spatio-temporal. Model ETAS spatio-temporal memiliki asumsi-asumsi sebagai berikut.
 - a. Laju kejadian gempa bumi utama yang tidak dipengaruhi oleh waktu (t) dan dipengaruhi oleh lokasi (x, y) dinyatakan sebagai

$$\mu(x, y) = \mu\rho(x, y) \tag{1}$$

Dengan $\rho(x, y)$ merupakan fungsi yang bergantung pada lokasi (x, y) , dimana x dan y masing-masing merupakan garis bujur dan garis lintang dari pusat gempa bumi.

- b. Probabilitas gempa bumi susulan dinyatakan dalam $\kappa(M)$.
- c. Distribusi probabilitas diasumsikan sebagai $g(t|\tau) = g(t - \tau)$ dimana τ merupakan waktu antar kejadian gempa bumi. Hal ini menunjukkan nilai dari jarak waktu antara satu kejadian dengan kejadian lainnya.
- d. Sebaran probabilitas lokasi kejadian (x, y) dan magnitudo gempa bumi susulan yang berhubungan dengan magnitudo dan lokasi gempa utama.

Berdasarkan keempat asumsi tersebut fungsi intensitas bersyarat dapat ditulis sebagai berikut.

$$\lambda(t, x, y|\mathcal{H}_t) = \mu(x, y) + \sum_{\{i: t_i < t\}} \kappa(M_i)g(t - t_i)f(x - x_i, y - y_i|M_i) \tag{2}$$

Dengan

- 1) $\mathcal{H}_t = \{(t_i, M_i), t_i < t\}$ menunjukkan seluruh kejadian gempa sebelum waktu t .

- 2) $\mu(x, y) = \mu\rho(x, y)$ adalah laju kejadian gempa bumi utama dengan memperhitungkan distribusi spasial, dimana (x, y) menunjukkan lokasi.
- 3) $\kappa(M)$ menunjukkan probabilitas kejadian gempa bumi susulan, dimana M merupakan magnitudonya dan dapat dinyatakan dalam bentuk.

$$\kappa(M) = Ae^{\alpha(M_i - M_0)}; A, \alpha, M_i - M_0 > 0 \tag{3}$$

Dengan A dan α adalah parameter, serta M_0 adalah ambang batas magnitudo

- 4) $g(t)$ menunjukkan fungsi densitas probabilitas waktu kejadian gempa yang memicu gempa susulan dapat dinyatakan dalam bentuk.

$$g(t) = \left(\frac{p-1}{c}\right) \left(1 + \frac{t-t_i}{c}\right)^{-p} \tag{4}$$

- 5) $f(x, y|M)$ adalah fungsi spasial gempa yang menjadi pemicu gempa susulan yang dapat ditulis sebagai berikut.

$$f(x, y|M) = \left(\frac{q-1}{\pi D^2 e^{\gamma(M-M_0)}}\right) \left(1 + \frac{x^2 + y^2}{D^2 e^{\gamma(M-M_0)}}\right)^{-q} \tag{5}$$

Persamaan (3), persamaan (4), dan persamaan (5) disubstitusikan ke persamaan (2) sehingga diperoleh fungsi intensitas bersyarat yang dinyatakan sebagai

$$\lambda(t, x, y|\mathcal{H}_t) = \mu\rho(x, y) + \sum_{t_i < t} (Ae^{\alpha(M_i - M_0)}) \left(\frac{(p-1)c^{p-1}}{(t-t_i+c)^p}\right) \left(\frac{q-1}{\pi D^2 e^{\gamma(M-M_0)}}\right) \left(\frac{(D^2 e^{\gamma(M-M_0)})^q}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (D^2 e^{\gamma(M-M_0)})^q}\right) \tag{6}$$

Persamaan (6) merupakan bentuk model ETAS spatio-temporal yang dinyatakan dalam intensitas bersyarat berdasarkan substitusi dari asumsi model ETAS spatio-temporal terhadap persamaan intensitas bersyarat. Oleh karena itu, terdapat delapan parameter yang akan diestimasi, yaitu parameter $\mu, A, c, \alpha, p, D, q$, dan γ . Parameter μ menunjukkan laju gempa bumi utama, parameter A adalah produktivitas kejadian gempa bumi susulan, parameter c menunjukkan skala waktu tingkat peluruhan gempa bumi susulan, parameter α merupakan besarnya efisiensi kejadian gempa bumi yang dapat menghasilkan gempa bumi susulan, parameter p menunjukkan laju peluruhan gempa bumi susulan, parameter D merupakan jarak koordinat titik kejadian gempa bumi ke-episenter, parameter q adalah skala jarak laju peluruhan gempa susulan, dan parameter γ merupakan efisiensi gempa bumi yang bebas terhadap produktivitas gempa susulan $\kappa(M)$.

5. Melakukan inisialisasi parameter awal secara *default*, yaitu $\mu = 1, A = 0.01, c = 0.01, \alpha = 1, p = 1.3, D = 0.01, q = 2$, dan $\gamma = 1$ (Ogata, 1988) sesuai dalam *packages* ETAS untuk mengestimasi parameter fungsi intensitas bersyarat pada model ETAS spatio-temporal.
6. Mengestimasi parameter model dengan metode maksimum *likelihood*. Metode ini merupakan salah satu metode untuk menduga nilai parameter (Bain dan Engelhard, 1962). Tahap awal pada metode maksimum *likelihood*, yaitu mengetahui fungsi densitas bersama. Misalkan $L(\theta) = f(x_1, \dots, x_n; \theta), \theta \in \Omega$, menyatakan fungsi densitas probabilitas X_1, X_2, \dots, X_n . Maka himpunan dari beberapa observasi x_1, \dots, x_n , suatu nilai $\hat{\theta}$ dalam Ω pada $L(\theta)$ adalah maksimum yang diketahui sebagai *maximum likelihood estimator* (MLE) dari θ . Nilai $\hat{\theta}$ menunjukkan nilai θ jika memenuhi

$$f(x_1, \dots, x_n; \hat{\theta}) = \max_{\theta \in \Omega} f(x_1; \theta) \dots f(x_n; \theta)$$

maximum likelihood estimator ($\hat{\theta}$) dapat ditulis sebagai

$$\hat{\theta} = \max_{\theta \in \Omega} L(\theta)$$

Memaksimumkan $L(\theta)$ berarti memaksimumkan logaritma dari fungsi *likelihood*, sehingga

$$\hat{\theta} = \max_{\theta \in \Omega} \log L(\theta)$$

Parameter $\hat{\theta}$ disebut *maximum likelihood estimator* jika memenuhi $\frac{dL(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}} = 0$ dan $\frac{d^2L(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}^2} < 0$.

Jika diberikan kejadian $\{(t_i, x_i, y_i), i = 1, \dots, n\}$ pada interval waktu pengamatan $(0, T)$, lokasi (x, y) dan intensitas bersyarat $\lambda(t, x, y|\mathcal{H}_t)$. Menurut Ogata dan Zhuang (2006), fungsi *log likelihood* dapat ditulis dalam bentuk persamaan 7.

$$\ln L(\theta) = \ln \left(\prod_{i=1}^n \lambda(t_i, x_i, y_i|\mathcal{H}_t) \right) - \int_0^t \int_0^y \int_0^x \lambda(t, x, y|\mathcal{H}_t) dx dy dt \tag{7}$$

7. Menentukan tingkat akurasi fungsi intensitasbersyarat pada model ETAS spatio-temporal menggunakan *Akaike Information Criterion* (AIC) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$AIC = -2 \log \hat{L} + 2k \quad (8)$$

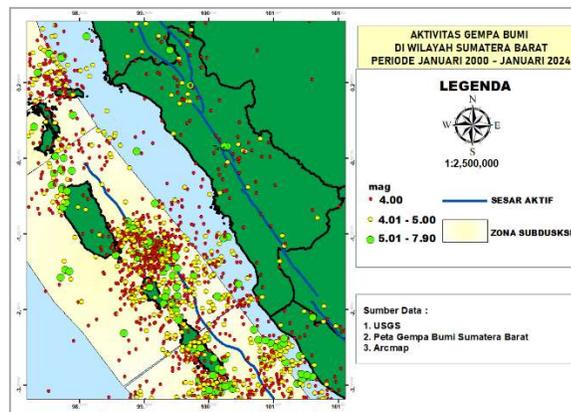
Dengan $\log \hat{L}$ menunjukkan maksimum *log-likelihood* pada suatu model dan k menyatakan banyaknya parameter yang sesuai dalam model.

8. Melakukan pemetaan intensitas gempa bumi menggunakan model ETAS saptio-temporal di wilayah Sumatera Barat.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

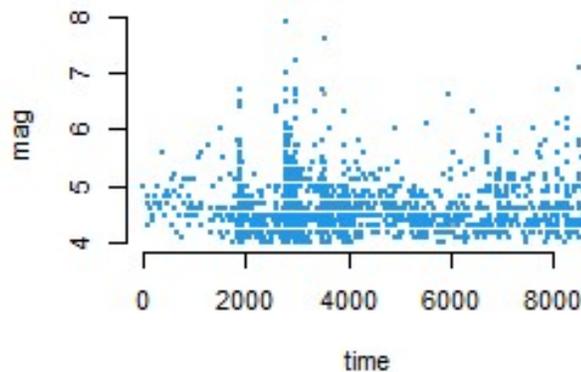
A. Aktivitas Gempa Bumi

Sumatera Barat terletak pada koordinat $0.54^{\circ}\text{LU} - 3.30^{\circ}\text{LS}$ dan $98^{\circ}\text{BT} - 101.53^{\circ}\text{BT}$. Aktivitas tektonik wilayah Sumatera Barat didominasi oleh penunjaman lempeng Indo-Australia ke bawah lempeng Eurasia yang menjadikan Sumatera Barat berada di zona subduksi. Selain itu aktivitas gempa bumi tersebar di sekitar Sesar Mentawai dan Sesar Sumatera. Aktivitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat periode Januari 2000 sampai Januari 2024 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Aktivitas Gempa Bumi di Wilayah Sumatera Barat

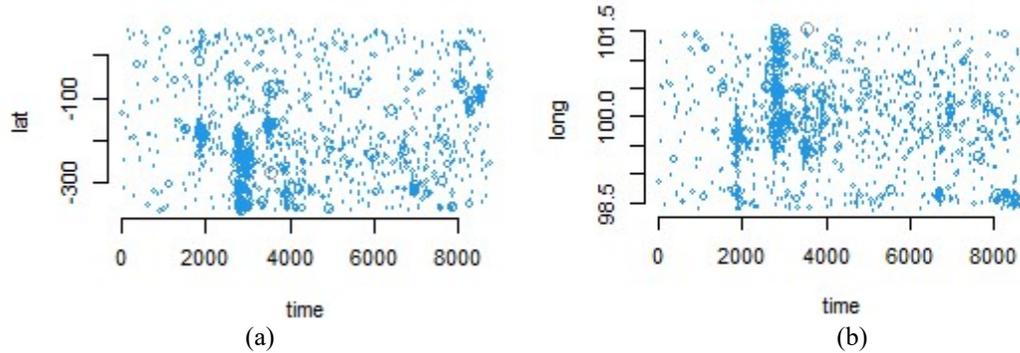
Pada Gambar 1 dapat diketahui bahwa aktivitas gempa bumi sebanyak 1731 kejadian di wilayah Sumatera Barat cenderung terjadi di kawasan pesisir Sumatera Barat. Kawasan ini berada di jalur patahan aktif yaitu Sesar Mentawai dan zona subduksi. Selain itu aktivitas gempa bumi darat menyebar di sekitar patahan aktif Sumatera yang melewati beberapa Kabupaten/Kota di Sumatera barat. Selanjutnya hubungan waktu dengan magnitudo kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Waktu dengan Magnitudo Kejadian Gempa Bumi

Kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat dengan magnitudo besar dapat dilihat pada Gambar 2, yaitu pada waktu ke-2811 tanggal kejadian 12 September 2007 dengan magnitudo sebesar 7.9 SR, gempa pada waktu ke-2812 tanggal kejadian 13 September 2007 dengan magnitudo sebesar 7 SR, gempa pada waktu ke-2977 tanggal

kejadian 25 februari 2008 berkekuatan 7.2 SR, gempa pada waktu ke-3560 tanggal kejadian 30 September 2009 yang berkekuatan 7.6 SR, dan gempa terbaru pada waktu ke-8514 tanggal kejadian 24 April 2023 berkekuatan 7.1 SR. Selanjutnya hubungan waktu dengan lokasi kejadian gempa bumi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. (a) Hubungan Waktu Terhadap *Latitude* Kejadian Gempa Bumi dan
(b) Hubungan Waktu Terhadap *Longitude* Kejadian Gempa Bumi

Pengelompokkan aktivitas gempa bumi pada suatu wilayah di Sumatera Barat berdasarkan lokasi dan waktu kejadian gempa bumi dapat dilihat pada Gambar 3 (a) dan (b). Pengelompokkan kejadian gempa bumi tersebut terjadi pada koordinat $0,54^{\circ}LU - 2^{\circ} - 3.30^{\circ}LS$ dan $99^{\circ} - 101.5^{\circ}BT$ $53^{\circ}BT$ pada kisaran waktu ke-3000. Pengelompokkan aktivitas kejadian gempa bumi tersebut terjadi di wilayah pesisir Sumatera Barat tepatnya di sekitar wilayah Sesar Mentawai dan zona subduksi.

B. Estimasi Parameter Model ETAS Spatio-Temporal

Analisis plot sebelumnya memberikan gambaran aktivitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat berdasarkan waktu dan lokasi kejadian gempa bumi, selanjutnya yaitu mengestimasi parameter model ETAS spatio-temporal dengan metode maksimum *likelihood* dan penyelesaiannya menggunakan Davidon Fletcher-Powell pada gempa bumi di wilayah Sumatera Barat periode 2000-2024. Pada proses estimasi parameter model ETAS spatio-temporal, dipilih nilai pendekatan awal yang kemudian dijadikan inisial parameter untuk mengestimasi parameter model. Hasil estimasi parameter model ETAS spatio-temporal kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat ditunjukkan pada Tabel 1.

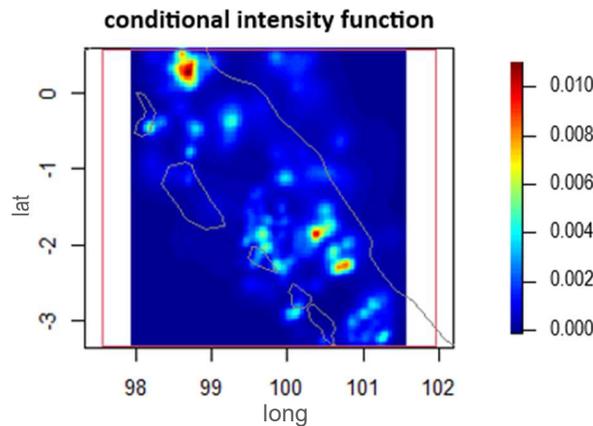
Tabel 1. Estimasi Parameter Model ETAS Spatio-Temporal

Iterasi	1	2	3	4	5	6	7
$\ln L$	-19705.36	-19612.57	-19616.23	-19615.06	-19615.23	-19615.21	-19615.21
μ	0.5122	1.2429	0.9979	1.0307	1.0254	1.0262	1.0261
A	0.2843	0.2996	0.2844	0.2862	0.2859	0.2859	0.2859
c	0.0218	0.0196	0.0212	0.0211	0.0211	0.0211	0.0211
α	1.1686	1.1792	1.1792	1.1792	1.1792	1.1792	1.1792
p	1.1749	1.1533	1.1691	1.1671	1.1674	1.1674	1.1674
D	78.1649	82.5798	82.4891	82.5537	82.5463	82.5475	82.5473
q	1.7435	1.7792	1.7847	1.7846	1.7846	1.7846	1.7846
γ	0.3460	0.3551	0.3537	0.3539	0.3539	0.3539	0.3539
AIC	39426.72	39241.14	39248.47	39246.13	39246.47	39246.41	39246.42

Nilai estimasi parameter model ETAS spatio-temporal pada Tabel 1 membutuhkan sebanyak 7 iterasi. Hasil estimasi parameter yang optimal terdapat pada iterasi ke-2 dengan nilai *Akaike Information Criterion* terkecil sebesar 39241.14. Berdasarkan model ETAS spatio-temporal pada persamaan (6) dan estimasi parameter pada Tabel 1, diperoleh model ETAS spatio temporal pada data gempa bumi di wilayah Sumatera Barat yang dinyatakan dalam fungsi intensitas bersyarat sebagai berikut.

$$\lambda(t, x, y | \mathcal{H}_t) = 1.2429\rho(x, y) + \sum_{t_i < t} (0.2996e^{1.1791(M-M_0)}) \left(\frac{(1.1533)0.0196^{(0.0196)}}{(t - t_i + 0.0093)^{1.0301}} \right) \left(\frac{0.7792}{82.5798^2 \pi e^{0.3551(M-M_0)}} \right) \left(\frac{(82.5798^2 e^{0.3551(M-M_0)})^{1.7792}}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (82.5798^2 e^{0.3551(M-M_0)})^{82.5798}} \right) \quad (9)$$

Berdasarkan model ETAS spatio-temporal pada persamaan (9) dapat diketahui bahwa di wilayah Sumatera Barat terdapat 1.2429 laju gempa bumi dasar dengan 1.0301 produktivitas gempa bumi susulan, sedangkan laju peluruhan gempa bumi susulan sebesar 0.2996, dengan 0.0196 skala waktu dan 1.7792 skala jarak laju peluruhan gempa susulan, pada jarak 82.5798 dari koordinat titik kejadian gempa bumi ke-episentier. Efisiensi kejadian gempa bumi yang menghasilkan gempa bumi susulan sebesar 1.1792 sedangkan efisiensi gempa bumi yang independen terhadap produktivitas gempa susulan sebesar 0.3551. Sehingga dapat dilakukan pemetaan intensitas gempa bumi di Sumatera Barat periode 2000-2024 yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Intensitas Gempa Bumi di wilayah Sumatera Barat

Secara keseluruhan besarnya intensitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat pada Gambar 4 berkisar antara 0.002 hingga 0.010. Aktivitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat yang memiliki intensitas tinggi terhadap gempa bumi terletak pada koordinat 0° – 1°LU dan 98.7° – 99°BT berdekatan dengan wilayah Pasaman Barat, pada koordinat 2°LS dan 104°BT yang berdekatan dengan wilayah Padang dan Kepulauan Mentawai, dan pada koordinat 3.8°LS dan 99° – 100.8°BT berdekatan dengan wilayah Pesisir Selatan. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah yang berada di sekitar koordinat yang mempunyai intensitas tinggi terhadap gempa bumi rawan mengalami bencana gempa bumi. Sehingga diperlukannya suatu manajemen bencana pada wilayah Pasaman Barat, Padang, Kepulauan Mentawai, dan Pesisir Selatan untuk mengurangi dampak dari bencana gempa bumi.

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis menggunakan model *Epidemic Type Aftershock Sequence* (ETAS) spatio-temporal untuk pemetaan intensitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat menunjukkan bahwa estimasi parameter yang optimal, yaitu pada itersai ke-2 dengan nilai *Akaike Information Criterion* (AIC) terkecil yaitu sebesar 39241.14. Berdasarkan hasil estimasi tersebut, maka diperoleh intensitas gempa bumi di wilayah Sumatera Barat yang berkisar antara 0.002 hingga 0.010. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah di Sumatera Barat dengan intensitas yang tinggi terhadap gempa bumi adalah Pasaman Barat, Padang, Kepulauan Mentawai, dan Pesisir Selatan. Hal ini menunjukkan wilayah tersebut memiliki potensi tinggi terhadap bencana gempa bumi. Sehingga diperlukannya suatu mitigasi bencana pada wilayah-wilayah yang rawan terhadap gempa bumi untuk meminimalisir dampak dari bencana tersebut. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat melakukan pemetaan intensitas gempa bumi menggunakan model ETAS spatio-temporal yang dinyatakan dalam intensitas bersyarat untuk mengurangi dampak bencana gempa bumi di wilayah lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Abror Fauzi, S. A. (2018). Indonesia di Lingkaran Api Pasifik. Diakses pada 25 September 2024, dari <https://indonesiabaik.id/infografis/indonesia-di-lingkaranapi-pasifik>.
- Akaike, H. (2011). Akaike's information criterion. *International encyclopedia of statistical science*, 25-25.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2024). Gempabumi Dirasakan. Diakses Online pada 15 Desember 2023, dari <https://www.bmkg.go.id/>.
- Fletcher, R., & Powell, M. J. (1963). A rapidly convergent descent method for minimization. *The computer journal*, 6(2), 163-168.
- Harte, D. (2010). PtProcess: An R package for modelling marked point processes indexed by time. *Journal of Statistical Software*, 35, 1-32.
- Kurnia, A. I., Pratiwi, H., & Sugiyanto, S. (2019). Penerapan Model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) pada Data Gempa Bumi di Nusa Tenggara Barat. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 10, No. 1, pp. 510-514).
- Ogata, Y. (1988). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical association*, 83(401), 9-27.
- Veen, A., & Schoenberg, F. P. (2008). Estimation of space-time branching process models in seismology using an em-type algorithm. *Journal of the American Statistical Association*, 103(482), 614-624.
- Wijaya, A. R. (2023). Model ETAS Spatio-Temporal pada Analisis Pemetaan Intensitas Kegempaan di Wilayah Sumatera. *Jambura Journal of Mathematics*, 5(1), 179-188.
- Zhuang, J., Ogata, Y., & Vere-Jones, D. (2002). Pengelompokan stokastik kejadian gempa ruang-waktu. *Jurnal Asosiasi Statistik Amerika*, 97 (458), 369-380.