

Model ETAS Spatio-Temporal pada Analisis Pemetaan Intensitas Kegempaan di Wilayah Sumatera

Andreas Rony Wijaya^{1*}

¹Program Studi Sains Data, Fakultas Informatika, Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Purwokerto 53147, Indonesia

*Corresponding author. Email: andreas@ittelkom-pwt.ac.id

ABSTRAK

Aktivitas seismik yang tinggi membuat Indonesia harus melakukan mitigasi bencana alam guna meminimalisir dampak bencana tersebut. Salah satu upaya penanggulangan dapat dilakukan dengan mengetahui kemungkinan terjadinya gempa bumi di suatu area. Gempa bumi yang bersifat acak tentunya tidak dapat ditentukan secara pasti. Oleh karena itu dapat digunakan kajian dalam statistika seismologi. Salah satu kajian dalam statistika seismologi yang membahas mengenai kejadian gempa bumi adalah model *epidemic type after shock sequence* (ETAS). Model ini menjelaskan mengenai aktivitas kegempaan utama yang disertai dengan gempa bumi susulan. Model ETAS yang hanya mempertimbangkan parameter waktu dan magnitudo kejadian, dikembangkan menjadi model ETAS spatio-temporal yang juga menjelaskan parameter spasial atau lokasi. Pada studi ini, model ETAS spatio-temporal digunakan pada aktivitas seismik di wilayah Sumatera pada tahun 2000-2022. Sumber data gempa bumi diperoleh di *United State Geological Survey* (USGS). Berdasarkan analisis data, model ETAS spatio-temporal yang dinyatakan dalam fungsi intensitas bersyarat menunjukkan bahwa gempa bumi yang terjadi di wilayah Sumatera yang mempunyai kekuatan magnitudo yang besar cenderung menghasilkan fungsi intensitas bersyarat yang besar juga. Komponen spasial dari model ETAS spatio-temporal dapat dijelaskan melalui pemetaan dari *peak ground acceleration* (PGA). Hasil pemetaan PGA menunjukkan bahwa aktivitas seismik di wilayah Sumatera rentan terjadi di sepanjang pantai utara dan barat wilayah Sumatera dengan besar nilai PGA berkisar antara 0.2 g sampai dengan 0.9 g. Semakin besar nilai PGA berarti semakin tingginya risiko kejadian gempa di wilayah tersebut yang ditandai dengan titik atau kontur yang berwarna kuning kemerah-merahan.

Kata Kunci:

Mitigasi; Gempa Bumi; Model ETAS Spatio-temporal; Fungsi Intensitas Bersyarat

ABSTRACT

High seismic activity forces Indonesia to mitigate natural disasters to minimize the impact of these disasters. One of the mitigation efforts that can be done is to know the possibility of an earthquake occurring in an area. Earthquakes, which are random phenomena, cannot be determined with certainty. Therefore, studies in seismological statistics can be used. One of the studies in seismological statistics that discusses the occurrence of earthquakes is the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model. This model describes the main seismic activity followed by aftershocks. The ETAS model, which only considers the parameters of time and event magnitude, was developed into a Spatio-temporal ETAS model, which also describes spatial parameters or locations. This study used the Spatio-temporal ETAS

model to analyze the Sumatra region's seismic activity from 2000-2022. Earthquake data sources are obtained from the United State Geological Survey (USGS). Based on data analysis, the Spatio-temporal ETAS model expressed in terms of the conditional intensity function shows that earthquakes that occur in the Sumatera region with a large magnitude tend to produce a large conditional intensity function as well. The spatial component of the spatio-temporal ETAS model can be explained by mapping the peak ground acceleration (PGA). The results of the PGA mapping show that seismic activity in the Sumatera region is prone to occur along the north and west coasts of the Sumatera region, with PGA values ranging from 0.2 g to 0.9 g. The larger the PGA value means, the higher the risk of an earthquake occurring in the area marked with a reddish-yellow dot or contour.

Keywords:

Mitigation; Earthquakes; Spatio-temporal ETAS Model; Conditional Intensity Function

Format Sitasi:

A. R. Wijaya, "Model ETAS Spatio-Temporal pada Analisis Pemetaan Intensitas Kegempaan di Wilayah Sumatera", *Jambura J. Math.*, vol. 5, No. 1, pp. 179-188, 2023, doi: <https://doi.org/10.34312/jjom.v5i1.17359>

1. Pendahuluan

Manajemen bencana alam merupakan suatu upaya penanggulangan bencana alam yang dilakukan sesaat setelah terjadinya bencana hingga pascakejadian bencana, bahkan dapat dilakukan sebelum terjadinya bencana. Manajemen bencana alam ini dilakukan guna meminimalisir dampak dari suatu bencana tersebut. Salah satu upaya manajemen bencana alam sebelum terjadinya bencana adalah mitigasi bencana [1]. Mitigasi bencana ini berupa usaha dalam meminimalisir dampak dan bahayanya dari kejadian bencana melalui proses pengumpulan dan analisis data. Salah satu jenis dari mitigasi bencana adalah prakiraan kemunculan suatu kejadian bencana.

Wilayah di Indonesia yang cukup rawan terjadi bencana adalah di sekitar wilayah Sumatera dan sekitarnya. Salah satu bencana yang sering terjadi di wilayah Sumatera adalah gempa bumi. Tingginya tingkat kerawanan bencana di wilayah Sumatera ini dipicu oleh keadaan geografisnya, yang banyak terdapat sesar aktif, zona subduksi, serta terdapat gunung berapi yang masih aktif [2]. Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya aktifitas tektonik yang menimbulkan patahan-patahan baru yang aktif, baik di darat maupun di lautan. Aktifitas tersebut yang memicu terjadinya gempa bumi dengan kekuatan magnitude yang besar di wilayah Sumatera.

Kemunculan bencana gempa bumi yang mempunyai karakteristik acak, baik dalam lokasi kejadian dan juga waktu kejadian, membuat prakiraan kejadian bencana ini menjadi hal penting. Metodologi prakiraan kejadian gempa bumi terus dikembangkan baik secara konsep keilmuan seismologi maupun aspek probabilistik. Pada aspek keilmuan seismologi dilakukan analisis patahan gempa seperti pada [3] dan analisis jalur sesar di Yogyakarta [4]. Aspek probabilistik yang membahas metodologi prakiraan gempa adalah statistika seismologi, seperti yang dilakukan dengan analisis secara Cauchy *cluster Process* [5], serta analisis dengan metode *probabilistic seismic hazard* [6].

Pada statistika seismologi, untuk menjelaskan fenomena yang mempunyai sifat acak dapat digunakan teori proses stokastik. Salah satu bidang kajian dalam proses stokastik adalah proses titik. Pada proses titik, gempa bumi yang terjadi pada waktu dan lokasi tertentu bisa direpresentasikan sebagai sebuah titik, sementara itu besaran yang terkait terhadap suatu titik adalah magnitudo ataupun kedalaman [7]. Prakiraan aktivitas gempa bumi pada proses titik dapat ditentukan melalui fungsi intensitas bersyarat.

Menurut Ogata [8], fungsi intensitas bersyarat berperan dalam memperkirakan peluang atau intensitas seberapa sering gempa bumi terjadi pada suatu wilayah berdasarkan histori kejadian gempa bumi sebelumnya. Intensitas gempa bumi merupakan banyaknya kejadian gempa bumi per satuan waktu. Oleh karena itu, dengan diketahuinya intensitas gempa bumi di suatu wilayah, dapat dilakukan suatu manajemen bencana alam agar dapat meminimalisir dampak dari bencana tersebut.

Schoenberg [9] membagi proses titik menjadi dua jenis, yakni proses titik *self-exciting* yang kejadiannya dapat memicu kejadian-kejadian yang lain, dan proses titik *self-correcting* yang kejadiannya dapat menghambat kejadian yang lain. Salah satu penerapan proses titik *self-exciting* adalah pada kejadian gempa bumi beserta gempa susulannya. Kejadian gempa bumi yang besar biasanya disertai dengan rentetan gempa bumi susulan, sehingga bisa direpresentasikan melalui model tipe epidemik. Hal ini diungkap pada penelitian Harte [10]. Berdasarkan model pada penelitian tersebut, rentetan gempa susulan diasumsikan bersifat bagaikan sebaran epidemi, yaitu terjadinya gempa besar berpengaruh terhadap terjadinya gempa susulan dalam selang waktu tertentu dan berlangsung lama setelah terjadinya gempa utama.

Salah satu model tipe epidemik adalah model *epidemic type aftershock sequence (ETAS)* yang menganalisis gempa bumi berdasarkan intensitasnya. Fungsi intensitas bersyarat menjadi hal penting dari model tersebut. Fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* dapat digunakan untuk mengetahui aktivitas gempa bumi susulan. Model *ETAS* diterapkan pada kejadian gempa bumi di wilayah Iran dengan data dari 1983-2017 dengan ambang batas magnitude 4 SR [11]. Sementara itu, untuk kejadian gempa bumi di Indonesia, model *ETAS* diterapkan pada analisis gempa bumi di Sumatera [12] dan di area pantai selatan Pulau Jawa [7] yang menghasilkan prakiraan intensitas gempa bumi di kedua wilayah tersebut. Akan tetapi, pada penerapan model *ETAS* tersebut tidak menunjukkan bagaimana pemetaan intensitas gempa bumi di masing-masing wilayah tersebut terkonsentrasi pada area mana. Model tersebut hanya memperlihatkan besar intensitas gempa bumi tanpa ada informasi mengenai pemetaan lokasi yang rawan terjadinya gempa bumi.

Pada penelitian ini ditambahkan komponen lokasi kejadian pada model *ETAS*, sehingga dapat disebut sebagai model *ETAS* spatio-temporal. Model ini menghasilkan fungsi intensitas bersyarat yang dapat memetakan intensitas gempa bumi di masing-masing area. Model *ETAS* spatio-temporal diterapkan untuk analisis intensitas kegempaan di wilayah Sumatera dengan mempertimbangkan komponen lokasi kejadian (epicenter). Analisis mengenai *peak ground acceleration (PGA)* dilakukan yang dipetakan di sepanjang wilayah Sumatera berdasarkan histori epicenter kejadian gempa bumi. Pemetaan tersebut akan berguna dalam memperlihatkan area yang rawan gempa bumi, semakin tinggi nilai *PGA* maka akan semakin rawan area tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dari upaya mitigasi gempa bumi.

2. Metode

2.1. Langkah-langkah Penelitian

Berikut adalah lima langkah yang dilakukan pada penelitian ini.

1. Mengidentifikasi aktivitas gempa bumi beserta gempa bumi susulannya di Wilayah Sumatera.
2. Menentukan asumsi, parameter, dan variabel yang mempengaruhi intensitas

terjadinya gempa bumi.

3. Mengestimasi parameter fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* spatio-temporal untuk aktivitas kegempaan yang terjadi di wilayah Sumatera dan sekitarnya dengan metode *likelihood* maksimum.
4. Menentukan penyelesaian model dan menggambarkan grafik fungsi intensitas bersyarat dari model *ETAS* spatio-temporal.
5. Menganalisis pemetaan nilai *peak ground acceleration* pada area gempa bumi di wilayah Sumatera.

2.2. Data dan Sumber Data

Model *ETAS* spatio-temporal diterapkan ke data gempa bumi yang terjadi di wilayah Sumatera dalam rentang waktu Januari 2000 hingga November 2022. Data tersebut bersumber dari *United State Geological Survey (USGS)* [13], badan geologi dari Amerika Serikat. Ambang batas magnitudo ditentukan sebesar 5 *mb* dan kedalamannya ≤ 70 km. Koordinat geografis yang digunakan adalah pada posisi 5° LS- 7° LU dan 92° BT-107° BT. Data memuat informasi mengenai waktu kejadian, magnitudo gempa bumi, pusat gempa bumi dalam koordinat lintang dan bujur, serta kedalaman gempa bumi dengan satuan kilometer seperti yang ditampilkan dalam Tabel 1. Dilakukan penyeragaman magnitudo dengan mengkonversi magnitudo dari *surface wave magnitude scale (Ms)* dan *moment magnitude (Mw)* menjadi *body wave magnitude (mb)*. Terjadi sebanyak 1.639 gempa bumi di wilayah Sumatera dan sekitarnya dalam rentang waktu Januari 2000-November 2022. Katalog kegempaan tersebut didominasi gempa bumi dengan magnitudo sekitar 5 *mb*.

Tabel 1. Katalog data gempa di wilayah Sumatera tahun 2000-2022

Event	Date	Time	Latitude	Longitude	Magnitudo
1	06/01/2000	0:56:18	2.01	98.041	5.1
2	21/01/2000	16:17:27	-1.227	98.877	5.0
3	10/03/2000	21:32:13	4.738	96.007	5.5
4	03/04/2000	19:02:30	2.489	97.221	5.0
5	08/05/2000	12:30:00	-0.846	97.996	5.7
6	09/05/2000	0:30:20	-0.909	98.068	5.0
7	03/06/2000	20:02:00	-4.319	102.137	5.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1639	24/11/2022	02:11:25	-4.3276	100.4039	5.1

2.3. Model *ETAS* spatio-temporal

Model *ETAS* menggunakan fungsi intensitas bersyarat untuk menghitung intensitas gempa bumi susulan yang disimbolkan dengan $\lambda(t|\mathcal{H}_t)$. Model *ETAS* pada persamaan (1) diaplikasikan dalam memperkirakan perilaku gempa susulan di suatu area tertentu yang mempertimbangkan variabel magnitudo serta waktu kejadian. Model *ETAS* ini mengasumsikan bahwa setiap kejadian gempa bumi dapat memicu terjadinya gempa bumi susulan.

$$\lambda(t|\mathcal{H}_t) = \mu + A \sum_{i=t_i < t} e^{\alpha(M_i - M_0)} \left(1 + \frac{t - t_i}{c}\right)^{-p} \quad (1)$$

dengan μ merepresentasikan kelajuan kejadian dasar seismisitas dalam satuan per hari, sedangkan A adalah produktivitas gempa susulan, M_i dan M_0 secara berturut-turut merupakan magnitudo kejadian gempa dan ambang batas magnitudo kejadian gempa. Koefisien α mengukur keefektifan gempa dengan magnitudo tertentu yang memicu terjadinya gempa susulan, c adalah skala waktu laju peluruhan gempa susulan, dan p merupakan laju peluruhan gempa susulan, sehingga tandanya negatif.

Model ETAS yang hanya menjelaskan variabel waktu dan magnitudo dikembangkan oleh Ogata [14] menjadi model ETAS spatio-temporal dengan tambahan variabel lokasi kejadian. Misalkan variabel lokasi (x, y) yang merupakan epicenter dari kejadian gempa bumi, maka fungsi intensitas bersyarat dari model ETAS spatio-temporal direpresentasikan dalam simbol $\lambda(t, x, y, M|H_t)$. Komponen spasial tersebut ditambahkan pada laju kegempaan dasar dan pada laju gempa bumi susulan. Fungsi intensitas bersyarat model ETAS spatio-temporal dikembangkan dari persamaan (1) dituliskan menjadi,

$$\lambda(t, x, y|H_t) = \mu v(x, y) + K \sum_{i=t_i < t} e^{\alpha(M_i - M_0)} \left(\frac{q - 1}{\pi D e^{\gamma(M_i - M_0)}} \right) \left(1 + \frac{t - t_i}{c} \right)^{-p} \left(1 + \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{D e^{\gamma(M_i - M_0)}} \right)^{-q} \quad (2)$$

dengan $K = A(p - 1)c^{-1}$, dengan D sebagai jarak episenter pada koordinat titik lokasi kejadian gempa, q sebagai ukuran jarak kelajuan luruhnya kegempaan susulan, serta γ sebagai keefisienan gempa yang bersifat independen dengan $k(M)$. Persamaan (2) merupakan fungsi intensitas bersyarat model ETAS spatio-temporal.

Estimasi kedelapan parameter dari fungsi intensitas bersyarat model ETAS spasial menggunakan metode *likelihood* maksimum serta ditentukan penyelesaiannya dengan algoritme Davidson-Fletcher-Powell [15]. Pada fungsi intensitas bersyarat ETAS spatio-temporal terdapat tiga variabel, yakni waktu kejadian t , magnitudo kejadian M , serta lokasi kejadian (x, y) , dan terdapat delapan parameter, yakni $\mu, A, \alpha, c, p, D, q$, dan γ .

Estimasi parameter dilakukan dengan bantuan *software* R versi 4.2.2. Jika pada model ETAS menganalisis menggunakan *package* PtProcess, sedangkan pada model ETAS spatio-temporal menggunakan *package* ETAS yang dikembangkan oleh Jalilian [16]. *Package* ETAS [17] tersedia dari *the Comprehensive R Archive Network (CRAN)* yang dapat diakses melalui laman <https://CRAN.R-project.org/package=ETAS> atau juga tersedia dari GitHub di <https://github.com/jalilian/ETAS>.

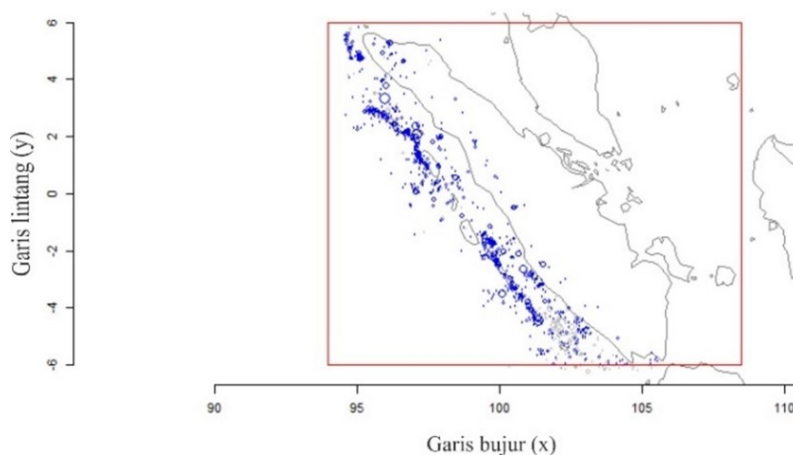
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Identifikasi Aktivitas Gempa Bumi di Wilayah Sumatera

Berikut ini disajikan pemetaan aktivitas kegempaan di Sumatera dari tahun 2000-2022 pada Gambar 1. Titik-titik pada Gambar 1 merepresentasikan pusat dari kejadian gempa bumi, sementara ukuran dari titik tersebut merepresentasikan besar magnitudo kejadian.

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera pada rentang waktu Januari 2000 sampai dengan November 2022 lebih sering terjadi pada

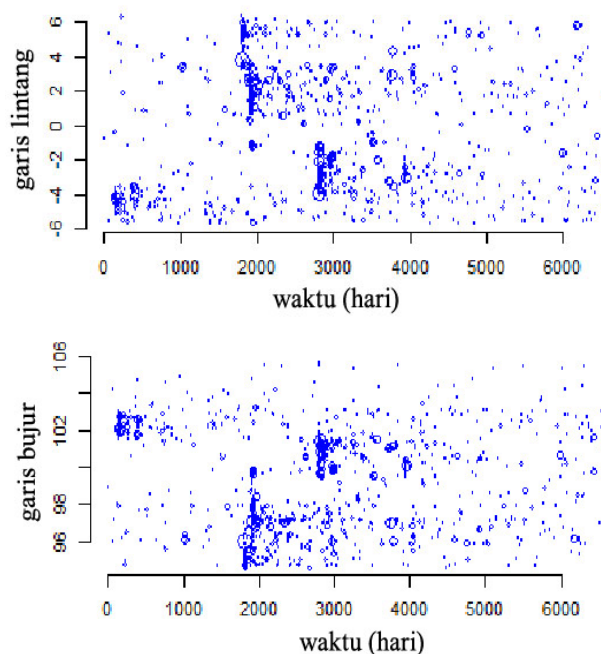
pesisir barat Pulau Sumatera. Menurut Natawidjaja dan Triyoso [18], salah satu sumber gempa di Pulau Sumatera adalah pada zona subduksi di area lepas pantai barat Sumatera, dikarenakan Lempeng Indo-Australia bergeser menunjam ke bawah di Lempeng Eurasia.



Gambar 1. Pemetaan aktivitas gempa bumi di Pulau Sumatera

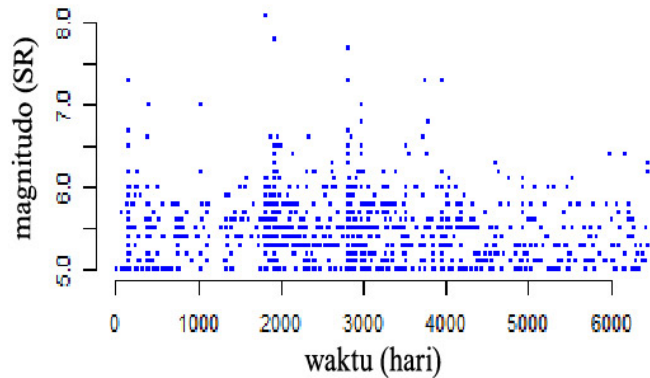
Batas tumbukan antara kedua lempeng tersebut dapat diamati berupa garis palung laut dalam di sebelah barat Sumatera hingga Kepulauan Andaman. Kelajuan penunjaman Lempeng Hindia di bawah wilayah Sumatera berkisar diantara 50-60 mm per tahun serta kemiringan terhadap zona penunjaman berkisar 12° .

Untuk melihat komponen spasial pada aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera pada tahun 2000-2022, berikut disajikan plot hubungan antara letak koordinat garis lintang dan garis bujur dari epicenter gempa terhadap waktu pada Gambar 2.



Gambar 2. Plot hubungan waktu terhadap lokasi kejadian gempa bumi

Berdasarkan Gambar 2 terdapat pengelompokan kejadian gempa bumi di Pulau Sumatera berdasarkan lokasi dan waktu kejadian. Pengelompokan kejadian gempa bumi tersebut terjadi pada koordinat $3^0 - 5^0$ LS dan $102^0 - 103^0$ BT pada kisaran waktu ke-200 sampai dengan waktu ke-300, pengelompokan pada koordinat $0^0 - 6^0$ LU dan $96^0 - 99^0$ BT pada kisaran waktu ke-2000, serta pada koordinat $2^0 - 4^0$ LS dan $100^0 - 102^0$ BT pada kisaran waktu ke-3000. Untuk melihat pengelompokan gempa bumi berdasarkan waktu kejadian, berikut merupakan plot hubungan antara waktu dengan magnitudo gempa yang terjadi di wilayah Sumatera pada Gambar 3.



Gambar 3. Plot hubungan antara waktu dengan magnitudo kejadian gempa bumi

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa terjadi pengelompokan gempa bumi pada rentang waktu kejadian ke-2000-4000 dengan magnitudo kejadian sekitar 5-6 *mb*. Terdapat aktivitas kegempaan yang terjadi di wilayah Sumatera periode 2000-2022 yang mempunyai magnitudo besar. Gempa bumi terjadi pada waktu ke-1821 (26 Desember 2004) dengan magnitudo sebesar 8.1 *mb* merupakan gempa bumi yang terjadi dengan magnitudo terbesar di wilayah Sumatera pada periode 2000-2022.

Kemudian terdapat gempa bumi dengan magnitudo besar berikutnya, yakni gempa bumi pada waktu ke-1914 dengan magnitudo 7.9 *mb*, gempa bumi pada waktu ke-2811 dengan magnitudo 7.7 *mb*, gempa bumi pada waktu ke-2812, ke-3749, dan ke-3951 dengan magnitudo 7.3 *mb*.

3.2. Estimasi Parameter Model ETAS Spatio-Temporal

Setelah menganalisis aktivitas kegempaan yang terjadi di wilayah Sumatera, berikutnya estimasi parameter fungsi intensitas bersyarat model ETAS spatio-temporal (2) dilakukan pada data gempa bumi di wilayah Sumatera untuk melihat intensitas gempa bumi di wilayah tersebut.

Estimasi parameter model ETAS spatio-temporal pada persamaan (2) dilakukan pada aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera menggunakan metode *likelihood* maksimum serta ditentukan penyelesaiannya dengan algoritme Davidson-Fletcher-Powell [14]. Terdapat tiga variabel, yakni waktu t , magnitudo M dan lokasi (x, y) , serta terdapat delapan parameter, yakni $\mu, A, \alpha, c, p, D, q$, dan γ pada fungsi intensitas bersyarat ETAS spatio-temporal. Hasil estimasi parameter model ETAS spatio-temporal pada data gempa bumi yang terjadi di wilayah Sumatera pada tahun 2000-2022 dituliskan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil estimasi parameter model *ETAS* spatio-temporal

Parameter	Nilai estimasi parameter
M	1.00379
A	0.25956
α	1.71258
D	1.00396
c	0.01059
p	1.07859
q	2.64042
γ	2.03558
$\ln L$	-4097.84070

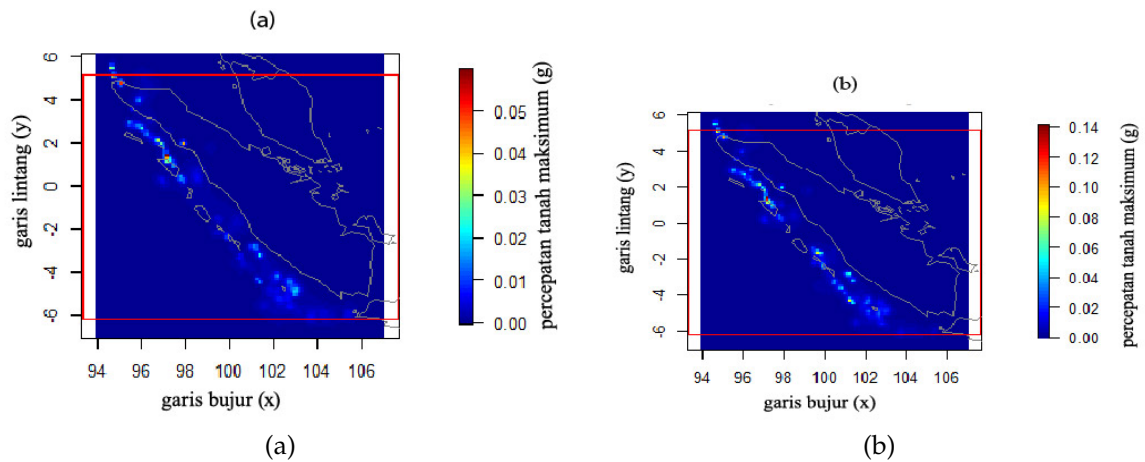
Berdasarkan hasil estimasi parameter pada Tabel 2, dapat dituliskan fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* spatio-temporal pada persamaan (2) untuk aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera periode 2000-2022 sebagai fungsi berikut,

$$\lambda(t, x, y | \mathcal{H}_t) = 1.00379v(x, y) + 1.15781 \times 10^{-9} \sum_{t_i < t} \left(\frac{e^{1.71258(M_i - M_0)}}{(t - t_i + 0.01059)^{1.07859}} \right) \left(\frac{2.64039 - 1}{\pi 0.00384 e^{2.03554} (M_i - M_0)} \right) \left(\frac{e^{2.03554 \times 2.64042 (M_i - M_0)}}{\left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + 1.00396 e^{2.03558 (M_i - M_0)} \right) 2.64039} \right) \quad (3)$$

Berdasarkan model *ETAS* spatio-temporal pada persamaan (3) dapat dibentuk plot laju kejadian dasar gempa bumi di Wilayah Sumatera pada periode 2000- 2022, serta plot koefisien *clustering* dan plot fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* spatio-temporal pada data gempa bumi di wilayah Sumatera periode 2000-2022 yang disajikan pada Gambar 4. Pada kedua plot tersebut juga memuat informasi mengenai *peak ground acceleration* (*PGA*) atau percepatan tanah maksimum yang memetakan tingkat kerawanan gempa yang dinyatakan dalam fraksi g (percepatan gravitasi bumi, $1 g = 9.81 m/s^2$).

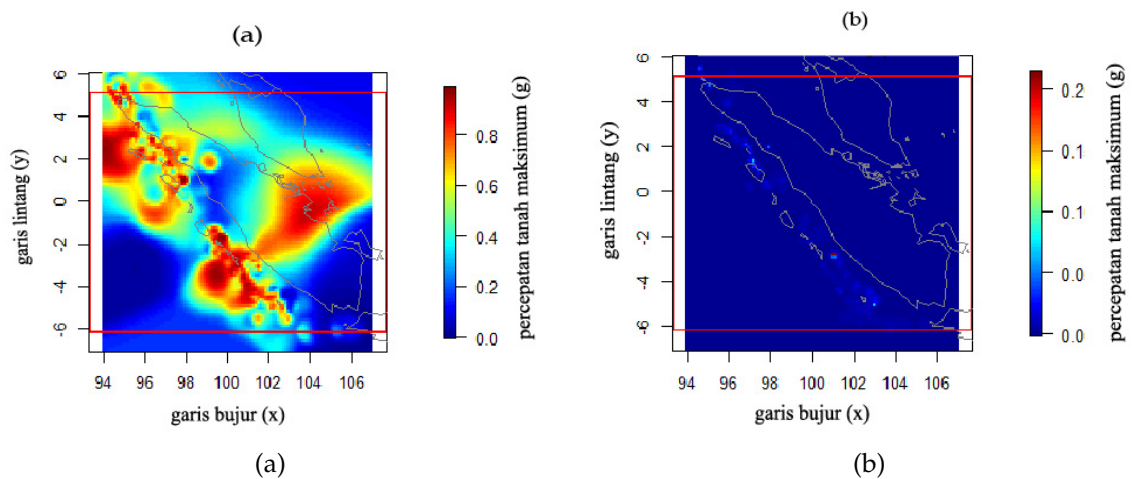
3.3. Analisis Peak Ground Accelerations (*PGA*)

Menurut Massinai, dkk. [19] untuk mendekteksi besar tingkat rawan kegempaan suatu wilayah dapat diketahui melalui nilai *PGA*. Nilai *PGA* didefinisikan sebagai nilai percepatan tanah tertinggi di suatu area yang pernah terjadi akibat dari aktivitas kegempaan. Nilai *PGA* diperoleh dari besarnya intensitas gempa bumi yang dinyatakan dalam bentuk skala *modified Mercally intensity* [20]. Nilai fungsi intensitas bersyarat pada persamaan (2) digunakan untuk menentukan nilai *PGA* pada aktivitas kegempaan di Pulau Sumatera pada selang waktu tahun 2000-2022. Semakin tinggi nilai *PGA*, maka sebanding juga dengan semakin tinggi resiko kejadian gempa di wilayah tersebut. Titik atau kontur di gambar yang berwarna kuning kemerah-merahan menandakan daerah yang memiliki *PGA* besar, sedangkan warna biru menandakan daerah dengan *PGA* yang kecil.



Gambar 4. (a) Kelajuan kejadian dasar serta (b) Kelajuan kejadian total aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera

Gambar 4 (a) memperlihatkan bahwa besarnya laju kejadian dasar gempa bumi di Pulau Sumatera tahun 2000-2022 yang direpresentasikan dalam nilai *PGA* berkisar antara 0.01 g - 0.05 g. Nilai *PGA* yang besar, yakni sebesar 0.05 g, berada di wilayah sebelah barat Sumatera Barat, tepatnya pada koordinat $(97^0 - 1^0)$. Gambar 4 (b) memperlihatkan bahwa besarnya laju kejadian total gempa bumi di wilayah Sumatera tahun 2000-2022 yang direpresentasikan dalam nilai *PGA* berkisar antara 0.02 g - 0.14 g. Laju kejadian dasar dan kejadian total aktivitas kegempaan yang didominasi oleh nilai *PGA* yang kecil tersebar di sepanjang pesisir barat dan utara Pulau Sumatera.



Gambar 5. (a) koefisien klustering dan (b) pemetaan fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* spatio-temporal pada akhir periode gempa

Gambar 5 (a) memperlihatkan secara keseluruhan besarnya pengelompokan gempa bumi di Pulau Sumatera tahun 2000-2022 yang direpresentasikan dalam nilai *PGA* berkisar antara 0.2 g - 0.9 g. Pengelompokan aktivitas gempa bumi di Pulau Sumatera memiliki resiko tinggi dengan didominasi oleh nilai *PGA* dengan besar sekitar 0.5 g - 0.9 g pada sepanjang area pesisir utara serta barat Pulau Sumatra dan terkonsentrasi pada sepanjang pesisir utara dan barat wilayah Aceh sampai ke barat Sumatera Barat, pesisir barat Bengkulu, dan pesisir timur Riau.

Gambar 5 (b) memperlihatkan pemetaan besarnya fungsi intensitas bersyarat model ETAS spatio-temporal periode akhir tahun 2022 di Pulau Sumatera yang direpresentasikan dalam nilai PGA berkisar antara 0.00 - 0.20 g. Kondisi ini memiliki pola yang sama dengan Gambar 5 (a) dan (b) dengan peta rawan kegempaan yang didominasi nilai PGA yang kecil tersebar di sepanjang pesisir barat dan utara Pulau Sumatera.

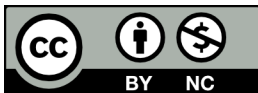
4. Kesimpulan

Hasil estimasi parameter fungsi intensitas bersyarat model ETAS spatio-temporal pada data gempa bumi di wilayah Sumatera memperlihatkan bahwa gempa bumi dengan magnitudo besar, cenderung mempunyai fungsi intensitas bersyarat yang besar. Sementara itu hasil penerapan analisis secara spasial atau berbasis lokasi kejadian gempa memperlihatkan bahwa aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera banyak terjadi di sepanjang pesisir utara dan barat wilayah Sumatera yang berdasarkan pemetaan nilai *peak ground accelerations* (PGA) atau percepatan tanah maksimum, dengan besar nilai PGA berkisar antara 0.2 g sampai dengan 0.9 g. Semakin besar nilai PGA menandakan sebanding dengan semakin tingginya risiko kejadian gempa di wilayah tersebut yang ditandai dengan titik atau kontur yang berwarna kuning kemerah-merahan.

Referensi

- [1] A. M. Haifani, "Manajemen Resiko Bencana Gempa Bumi Yogyakarta 27 Mei 2006," in *Prosiding Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir*, 2008, pp. 285–294.
- [2] R. Metrikasari and A. Choiruddin, "Pemodelan Risiko Gempa Bumi di Pulau Sumatera Menggunakan Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 102–107, feb 2021, doi: 10.12962/j23373520.v9i2.52318.
- [3] D. Siska, "Pentingnya Analisa Rupture/Rekahan Gempa Bumi sebagai Pedoman dalam Perencanaan Perumahan dan Pemukiman," *Jurnal Arsitekno*, vol. 3, no. 3, pp. 39–46, feb 2019, doi: 10.29103/arj.v3i3.1221.
- [4] N. B. Wibowo and J. N. Sembri, "Analysis of Seismicity and Earthquake Energy at Opak Oyo Fault - Yogyakarta," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 7, no. 2, pp. 82–90, oct 2017, doi: 10.13057/ijap.v7i2.13702.
- [5] Y. M. Kartikasari and A. Choiruddin, "Analisis Risiko Gempabumi di Sumatera dengan Cauchy Cluster Process," *Inferensi*, vol. 5, no. 2, pp. 123–134, sep 2022, doi: 10.12962/j27213862.v5i2.12307.
- [6] R. Indri, H. Taunaumang, and F. R. Tumimomor, "Analisis Bahaya Gempa Bumi Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis di Wilayah Likupang, Minahasa Utara," *Jurnal Fista Fisika dan Terapannya*, vol. 3, no. 1, pp. 34–38, 2022.
- [7] A. R. Wijaya and H. Pratiwi, "Model Proses Titik Bertanda Terindeks Waktu Pada Data Gempa Bumi Di Pantai Selatan Jawa," in *Prosiding Seminar Nasional Matematika dan Aplikasinya*, 2017, pp. 203–209.
- [8] Y. Ogata, "Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 83, no. 401, pp. 9–27, mar 1988, doi: 10.2307/2288914.
- [9] F. P. Schoenberg, "Introduction to Point Processes," in *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., feb 2011, doi: 10.1002/9780470400531.eorms0425.
- [10] D. Harte, "PtProcess : An R Package for Modelling Marked Point Processes Indexed by Time," *Journal of Statistical Software*, vol. 35, no. 8, pp. 119–114, 2010, doi: 10.18637/jss.v035.i08.
- [11] N. Davoudi, H. R. Tavakoli, M. Zare, and A. Jalilian, "Declustering of Iran earthquake

- catalog (1983–2017) using the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model,” *Acta Geophysica*, vol. 66, no. 6, pp. 1359–1373, dec 2018, doi: 10.1007/s11600-018-0211-5.
- [12] L. S. Rini, H. Pratiwi, and S. B. Wiyono, “Penerapan Model epidemic type aftershock sequence (ETAS) pada Data Gempa Bumi di Sumatra,” in *Proceeding 6th University Research Colloquium 2017: Seri MIPA dan Kesehatan*, 2017, pp. 281–286.
- [13] USGS (United States Geological Survei), *Sumatera Earthquakes Catalog*. [Online]. Available: www.usgs.gov, 2022.
- [14] Y. Ogata, “Space-Time Point-Process Models for Earthquake Occurrences,” *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. 50, no. 2, pp. 379–402, jun 1998, doi: 10.1023/A:1003403601725.
- [15] M. A. Rahman and D. R. T. Basarudin, “Algoritme Paralel Quasi Newton untuk Menyelesaikan Permasalahan Optimasi Nonlinear tak Berkendala Skala Besar,” in *Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklit VI*, 1987, pp. 71–82.
- [16] A. Jalilian, “ETAS : An R Package for Fitting the Space-Time ETAS Model to Earthquake Data,” *Journal of Statistical Software*, vol. 88, no. Code Snippet 1, pp. 1–39, 2019, doi: 10.18637/jss.v088.c01.
- [17] A. Jalilian and J. Zhuang, *ETAS: Modeling Earthquake Data Using ETAS Model*. [Online]. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=ETAS>, 2019.
- [18] D. H. Natawidjaja and W. Triyoso, “The Sumatran Fault Zone-from Source to Hazard,” *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 01, no. 01, pp. 21–47, mar 2007, doi: 10.1142/S1793431107000031.
- [19] M. A. Massinai, K. R. Amaliah, L. Lantu, V. Virman, and M. F. I. M, “Analisis Percepatan Tanah Maksimum, Percepatan Tanah Maksimum, dan MMI di Wilayah Sulawesi Utara,” in *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 UNJ*. Pendidikan Fisika dan Fisika FMIPA UNJ, 2016, pp. SNF2016–EPA–33–SNF2016–EPA–36, doi: 10.21009/0305020407.
- [20] S. Pailoplee, “Relationship between Modified Mercalli Intensity and peak ground acceleration in Myanmar,” *Natural Science*, vol. 04, no. 08, pp. 624–630, 2012, doi: 10.4236/ns.2012.428082.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Editorial of JJoM: Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo, Jln. Prof. Dr. Ing. B.J. Habibie, Moutong, Tilongkabila, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo 96554, Indonesia.