

# Estimasi Parameter Model *Epidemic Type Aftershock Sequence* (ETAS) Spasial untuk Gempa Bumi di Pulau Jawa

Dody Chandra Priambodo<sup>1\*</sup>, Hasih Pratiwi<sup>2</sup>, dan Respatiwan<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret

<sup>2,3</sup>Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret

Email: dodychandra27@gmail.com

## Abstrak

### Keywords:

gempa bumi; gempa susulan; magnitudo; fungsi intensitas bersyarat; spasial; model ETAS

Aktivitas gempa bumi masih terus dikaji baik dari aspek seismologi maupun aspek stokastik. Salah satu proses stokastik yang dapat menjelaskan aktivitas gempa bumi adalah proses titik. Proses titik merupakan suatu proses stokastik yang dapat menjelaskan fenomena alam dimana sifatnya acak baik dalam ruang maupun waktu. Salah satu model dalam proses titik adalah model epidemic type aftershock sequence (ETAS). Model ETAS tidak optimal dalam menjelaskan aktivitas gempa bumi karena dianggap tidak memiliki komponen lokasi/spasial. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dibahas model ETAS dengan mempertimbangkan komponen waktu, lokasi, dan magnitudo. Model ini dinamakan model ETAS spasial. Model ETAS spasial dapat dinyatakan melalui fungsi intensitas bersyarat dengan tujuh parameter. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa untuk periode Januari 1973 sampai Desember 2016 dengan magnitudo  $\geq 5$  SR dan kedalaman  $\leq 70$  km. Nilai parameter model ETAS spasial dapat diestimasi menggunakan metode estimasi likelihood maksimum dan metode Davidon Fletcher Powell. Berdasarkan hasil estimasi diperoleh bahwa aktivitas gempa bumi wilayah Pulau Jawa sering terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa terutama di perairan selatan Jawa Barat dan di sekitar Selat Sunda. Hal ini menyebabkan daerah tersebut rawan mengalami bencana gempa bumi.

## 1. PENDAHULUAN

Letak geografis wilayah Indonesia berada diantara tiga lempeng tektonik utama yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Kondisi ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki potensi aktivitas seismik cukup tinggi dan rawan terhadap bahaya gempa bumi [1].

Gempa bumi merupakan suatu peristiwa alam dimana terjadi getaran pada permukaan bumi akibat adanya pelepasan energi secara tiba-tiba dari pusat gempa. Aktivitas gempa bumi masih terus dikaji baik dari aspek seismologi maupun aspek stokastik. Bagian dari statistik seismologi adalah proses

stokastik. Proses stokastik yaitu salah satu bidang kajian dalam matematika yang dapat digunakan untuk memprediksi atau menjelaskan fenomena dalam kehidupan sehari-hari [4]. Salah satu proses stokastik yang dapat menjelaskan fenomena gempa bumi adalah proses titik.

Pada proses stokastik, gempa bumi dipandang sebagai titik-titik dalam suatu ruang dimana masing-masing titik menyatakan waktu atau/dan lokasi dari suatu kejadian. Dalam penelitian seismologi, salah satu hukum empiris dasar yang terkenal yaitu hukum Omori. Hukum ini kemudian dimodifikasi oleh [6] menjadi hukum Omori-Utsu. Hukum

Omori-Utsu tidak selalu tepat untuk memodelkan pola gempa bumi dalam jangka waktu lama.

Menurut Zhuang *et al.* [8], model yang sesuai untuk menjelaskan deretan gempa bumi susulan yaitu model *epidemic type aftershock sequence (ETAS)*. Model *ETAS* menunjukkan adanya periode diantara deretan gempa susulan dan deretan gempa susulan berikutnya. Model *ETAS* tidak optimal dalam menjelaskan deretan gempa bumi susulan karena dianggap tidak memiliki komponen lokasi/spasial [7].

Oleh karena itu penelitian ini akan dibahas model *ETAS* dengan mempertimbangkan komponen waktu, lokasi, dan magnitudo. Model tersebut dinamakan model *ETAS* spasial. [2] menjelaskan bahwa fungsi intensitas bersyarat pada proses titik didefinisikan sebagai turunan dari probabilitas terjadinya gempa bumi. Pembahasan model proses titik khususnya model *ETAS* spasial melalui fungsi intensitas bersyarat, diharapkan dapat memberikan informasi mengenai laju kejadian gempa bumi berdasarkan historisnya. Berdasarkan uraian di atas permasalahan yang diteliti adalah penurunan ulang model *ETAS* spasial dan penerapannya pada data gempa bumi di Pulau Jawa.

## 2. METODE

Metode penelitian menggunakan kajian pustaka dengan mengumpulkan sumber pustaka serta mempelajari karya ilmiah dari hasil penelitian para pakar yang termuat dalam jurnal atau buku yang berkaitan dengan model *ETAS* spasial. Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut.

- a. Mendeskripsikan kejadian gempa bumi ke dalam proses titik.
- b. Mengkaji model tipe epidemik pada kejadian gempa bumi.
- c. Menentukan asumsi-asumsi yang berkaitan dengan kejadian gempa bumi.
- d. Menentukan hubungan model tipe epidemik pada kejadian gempa bumi

dengan asumsi-asumsi yang diperoleh pada langkah (3).

- e. Mengumpulkan data gempa bumi di wilayah Pulau Jawa yang bersumber dari *United States Geological Survey (USGS)* untuk rentang waktu bulan Januari 1973 sampai Desember 2016 dengan magnitudo  $\geq 5 SR$  dan kedalaman  $\leq 70 km$ .
- f. Membuat katalog gempa bumi berdasarkan data yang diperoleh dari langkah (5).
- g. Menentukan nilai parameter awal untuk mengestimasi parameter model *ETAS* spasial berdasarkan data gempa yang diperoleh dari langkah (5).
- h. Mengestimasi parameter model *ETAS* spasial berdasarkan data yang diperoleh dari langkah (5) dengan menggunakan metode estimasi *likelihood* maksimum dan metode Davidon Fletcher Powell pada *software R*.
- i. Menentukan intensitas terjadinya gempa bumi berdasarkan nilai parameter yang diperoleh dari langkah (8).
- j. Membuat grafik dari intensitas terjadinya gempa bumi berdasarkan nilai parameter yang diperoleh dari langkah (8)
- k. Menginterpretasikan grafik intensitas terjadinya gempa bumi yang diperoleh dari langkah (10).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, dijelaskan hasil penelitian mengenai model tipe epidemik, model *ETAS*, model *ETAS* spasial dan penerapannya pada data gempa bumi di Pulau Jawa untuk rentang waktu bulan Januari 1973 sampai Desember 2016.

### 3.1. Model Tipe Epidemik

Pada model tipe epidemik banyaknya individu yang hidup pada waktu  $t$  dikendalikan oleh laju imigrasi, laju kelahiran, dan laju kematian. Dalam gempa bumi, laju imigrasi mengacu pada kejadian gempa dasar sedangkan kelahiran berhubungan dengan pemicu kejadian gempa

susulan berdasarkan kejadian gempa sebelumnya. Proses kelahiran dan kematian dependen terhadap usia untuk setiap individu usia  $x$  dapat bertahan hidup pada waktu  $t$ . Untuk interval  $(t; t + dt)$  terdapat probabilitas kelahiran  $g(x) dt$  dan probabilitas kematian  $h(x) dt$  dimana saling independen untuk setiap individu. Proses *self-exciting* yaitu proses kelahiran yang mengikuti laju imigrasi  $\mu$  per satuan waktu dan proses kematian  $h(x) = 0$ . Menurut Ogata [2], proses tersebut memiliki fungsi intensitas bersyarat yang dinyatakan dalam bentuk

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t_i < t} g(t - t_i). \quad (3.1)$$

dengan  $N(t)$  adalah banyaknya kejadian  $\{t_i\}$  pada interval  $(0, T]$ .

Persamaan (3.1) diperluas ke proses titik multivariat,  $\{t_i^m\}$  sehingga diperoleh fungsi intensitas bersyarat untuk nilai magnitudo diskrit dari  $j$  dan  $m$  yang dinyatakan dalam bentuk

$$\lambda(t) = \mu_j + \sum_m \sum_{t_i < t}^m g(t - t_i).$$

Jika diasumsikan  $g_{jm}(t) = \kappa(m)g_j(t)$  dengan mempertimbangkan  $N(t) = \sum_m N_m(t)$  dari proses titik, maka diperoleh fungsi intensitas bersyarat yang dinyatakan dalam bentuk

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i)g(t - t_i) \quad (3.2)$$

dengan  $t_i$  adalah waktu kejadian gempa bumi dari  $N(t)$ ,  $m_i$  adalah magnitudo yang berkaitan dengan  $t_i$ , dan  $g(t) = \sum_j g_j(t)$ .

### 3.2. Model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)

Salah satu model tipe epidemik pada bidang seismologi adalah hukum Omori. Hukum Omori menyatakan banyaknya kejadian gempa bumi susulan selama interval waktu tertentu. Menurut Utsu [6], hukum Omori dapat dinyatakan sebagai

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.1) dimodifikasi oleh Utsu [6] dengan penambahan parameter pangkat  $p$  sehingga diperoleh

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)} \quad (3.4)$$

dengan  $K, c, p$  adalah parameter,  $t$  adalah waktu sejak awal mula gempa utama, dan  $n(t)$  adalah frekuensi gempa susulan. Persamaan (3.2) dikenal sebagai hukum Omori dimodifikasi atau hukum Omori-Utsu. Berdasarkan hukum Omori-Utsu (3.4) dan model tipe epidemik (3.2) diberikan asumsi-asumsi sebagai berikut.

- Laju kegempaan dasar adalah konstan yang dinyatakan dengan  $\mu$ .
- Semua kejadian gempa bumi termasuk gempa susulan memicu terjadinya gempa susulan sekunder. Untuk setiap gempa susulan sekunder juga memicu terjadinya gempa susulan sekunder berikutnya secara independen. Probabilitas terjadinya gempa susulan dinyatakan sebagai

$$\kappa(m) = A e^{\alpha(m-m_0)}$$

dengan  $m_0$  adalah batas magnitudo,  $A$  dan  $\alpha$  adalah parameter.

- Fungsi kepadatan probabilitas dari waktu gempa utama hingga terjadinya gempa susulan dinyatakan sebagai

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

dengan  $c$  dan  $p$  adalah parameter.

- Distribusi magnitudo independen terhadap laju aktivitas gempa bumi. Bentuk eksplisit dari hubungan Guttenberg-Richter digunakan sebagai fungsi kepadatan probabilitas dari magnitudo yang dinyatakan dengan

$$f(m) = \beta e^{\beta(m-m_0)}$$

Berdasarkan persamaan (3.2) dan asumsi (1)-(4), maka dapat dibentuk fungsi intensitas bersyarat yang dinyatakan sebagai

$$\lambda(t|H_t) = \mu + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i)g(t - t_i) \quad (3.3)$$

Notasi  $\mu, A, c, \alpha$  dan  $p$  sebagai parameter. Persamaan (3.3) disebut sebagai model *epidemic type aftershock sequence (ETAS)*.

### 3.3. Model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) Spasial

Model ETAS tidak optimal untuk menjelaskan aktivitas gempa bumi. Model ETAS tidak memiliki komponen lokasi. Pada penelitian ini, model ETAS dikembangkan dengan mempertimbangkan komponen waktu, lokasi, dan magnitudo. Menurut Zhuang, et al. [8], model ETAS dikembangkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut.

- (1) Gempa utama diasumsikan sebagai “imigran” dalam proses percabangan kejadian gempa bumi. Laju kejadian gempa bumi diasumsikan sebagai fungsi dari lokasi dan magnitudo yang dinyatakan sebagai  $\mu(x, y)$ .
- (2) Setiap gempa susulan independen terhadap gempa susulan yang lain. Probabilitas terjadinya gempa susulan dinyatakan sebagai  $\kappa(m)$ .
- (3) Distribusi probabilitas dari waktu gempa utama hingga terjadinya gempa susulan diasumsikan sebagai fungsi lag waktu dari gempa utama yang dinyatakan dalam bentuk  $g(t|\tau) = g(t - \tau)$  dengan  $\tau$  adalah waktu antar kejadian gempa bumi.
- (4) Distribusi probabilitas lokasi  $(x, y)$  dan magnitudo  $m$  dari gempa susulan dependen terhadap lokasi  $(\xi, \eta)$  dan magnitudo  $m^*$  dari gempa utama. Fungsi probabilitas densitas dinyatakan dalam bentuk  $f(x - \xi, y - \eta|m^*)$  dengan  $\xi, \eta$ , dan  $m^*$  adalah lokasi dan magnitudo gempa utama.
- (5) Distribusi magnitudo gempa utama independen terhadap lokasi sehingga  $\mu(x, y, m) = \mu(x, y)j_\mu(m)$ . Distribusi magnitudo gempa susulan independen terhadap magnitudo gempa utama sehingga  $j(m|m^*) = j(m)$ . Distribusi magnitudo gempa utama dan magnitudo gempa susulan merupakan identik sehingga  $j_\mu(m) = j(m)$

Misalkan terdapat kejadian gempa bumi yang memuat  $\{t_i, x_i, y_i, m_i\}$  dengan  $t_i$  adalah waktu terjadinya gempa bumi ke- $i$ ,  $(x_i, y_i)$  adalah lokasi terjadinya gempa bumi ke- $i$ , dan  $m_i$  adalah magnitudo gempa bumi ke- $i$ . Berdasarkan asumsi (1)-(5), maka dapat dibentuk fungsi intensitas bersyarat yang dinyatakan sebagai

$$\lambda(t, x, y, m|H_t) = j(m)\lambda(t, x, y|H_t)$$

dimana

$$\lambda(t, x, y|H_t) = \mu(x, y) + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i)g(t - t_i)f(x - x_i, y - y_i|m_i) \quad (3.4)$$

dengan

- a)  $H_t = (t_i, m_i); t_i < t$  adalah kejadian gempa bumi sampai dengan waktu sebelum  $t$ .
- b)  $\mu(x, y)$  adalah laju kegempaan dasar dengan fungsi lokasi  $(x, y)$ .
- c)  $\kappa(m)$  adalah probabilitas terjadinya gempa susulan dengan magnitudo  $m$  yang dinyatakan sebagai

$$\kappa(m) = A e^{\alpha(m-m_0)} ; \\ A, \alpha, (m - m_0) > 0$$

- d)  $g(t)$  adalah fungsi kepadatan probabilitas dari waktu terjadinya gempa pemicu yang dinyatakan dalam bentuk

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

- e)  $f(x, y|m)$  adalah distribusi lokasi dari gempa pemicu yang dinyatakan dalam bentuk

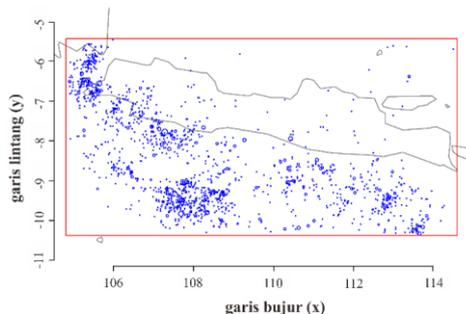
$$f(x, y|m) = \frac{q-1}{\pi D^2 e^{\gamma(m-m_0)}} \times \left(1 + \frac{x^2+y^2}{D^2 e^{\gamma(m-m_0)}}\right)^{-q}$$

Notasi  $\mu, A, c, \alpha, p, D, q$  dan  $\gamma$  sebagai parameter. Persamaan (3.4) disebut sebagai model epidemic type aftershock sequence (ETAS) spasial.

### 3.4. Penerapan Model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) Spasial

Pada bagian ini diberikan penerapan model ETAS spasial pada data gempa bumi di Pulau Jawa. Data gempa bumi tersebut merupakan data sekunder yang bersumber dari *United States Geological Survey (USGS)*. Data gempa bumi ini memuat  $\{t_i, x_i, y_i, m_i\}$  dengan  $t_i$  adalah waktu terjadinya gempa bumi ke- $i$ ,  $(x_i, y_i)$  adalah lokasi terjadinya gempa bumi ke- $i$ , serta  $m_i$  adalah magnitudo gempa bumi ke- $i$ . Periode terjadinya gempa bumi ini dari bulan Januari 1973 sampai Desember 2016 dengan magnitudo  $\geq 5 SR$  dan kedalaman  $\leq 70 km$ .

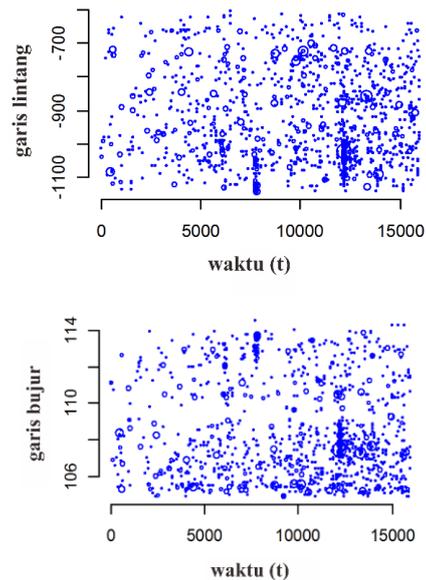
Pulau Jawa terletak diantara  $6^\circ LS - 11^\circ LS$  dan  $105^\circ BT - 114^\circ BT$ . Aktivitas tektonik wilayah Pulau Jawa didominasi oleh pergerakan lempeng Indo-Australia yang relatif bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia. Penunjaman lempeng Indo-Australia berkisar 100 km sampai 200 km di selatan Pulau Jawa dan 600 km di utara Pulau Jawa. Tunjaman lempeng tersebut mengakibatkan pergerakan unsur batuan [5]. Kondisi ini menjadikan wilayah Pulau Jawa sebagai daerah tektonik aktif dengan laju kegempaan yang tinggi. Berikut ini merupakan plot aktivitas gempa bumi di wilayah Pulau Jawa yang disajikan pada Gambar 3.1.



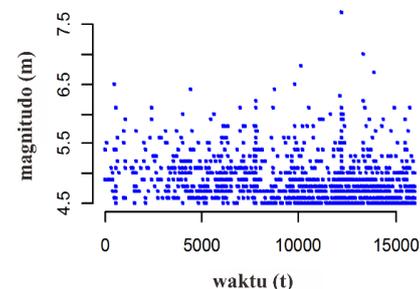
**Gambar 3.1.** Aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa pada Jan 1973 sampai Des 2016

Berdasarkan Gambar 3.1 terlihat bahwa aktivitas gempa bumi di wilayah Pulau Jawa cenderung banyak terjadi di sepanjang laut

selatan Pulau Jawa dan di sekitar Selat Sunda. Selat Sunda yang berada di dekat jalur subduksi sekaligus pada jalur patahan antara Pulau Sumatera dan Pulau Jawa sehingga menyebabkan di sekitar daerah tersebut sering terjadi gempa bumi dengan magnitudo kecil [5]. Berikut ini merupakan hubungan waktu terhadap lokasi dan hubungan waktu terhadap magnitudo untuk aktivitas gempa bumi di wilayah Pulau Jawa yang disajikan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



**Gambar 3.2.** Hubungan waktu terhadap lokasi untuk aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa pada Jan 1973 sampai Des 2016



**Gambar 3.3.** Hubungan waktu terhadap magnitudo untuk aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa pada Jan 1973 sampai Des 2016

Berdasarkan Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 terdapat beberapa gempa bumi di wilayah Pulau Jawa yang memiliki magnitudo besar yaitu gempa bumi di daerah Banyuwangi pada tanggal 2 Juni 1994 dengan magnitudo

7.2 SR, gempa bumi di Daerah Istimewa Yogyakarta pada tanggal 27 Mei 2006 dengan magnitudo 6.3 SR, gempa bumi di lepas pantai Pangandaran pada tanggal 17 Juli 2006 dengan magnitudo 7.7 SR, gempa bumi di daerah Tasikmalaya pada tanggal 2 September 2009 dengan magnitudo 7.0 SR, dan gempa bumi di daerah Cilacap pada tanggal 4 April 2011 dengan magnitudo 6.7 SR.

Setelah itu dilakukan estimasi parameter model ETAS spasial (3.4) pada data gempa bumi di Pulau Jawa dengan menggunakan metode *likelihood* maksimum dan metode Davidon Fletcher Powell. Hasil estimasi parameter model ETAS spasial pada data gempa bumi di Pulau Jawa ditunjukkan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1.** Estimasi parameter model ETAS spasial untuk data gempa bumi Pulau Jawa bulan Januari 1973 sampai Desember 2016

Iterasi	1	2	3	4	5
Log L	-2163.28	-2163.85	-2163.86	-2163.86	-2163.86
$\mu$	0.986	0.910	0.914	0.914	0.914
A	0.136	0.137	0.138	0.138	0.138
c	0.016	0.015	0.015	0.015	0.015
$\alpha$	1.861	1.862	1.862	1.862	1.862
p	1.226	1.218	1.217	1.217	1.217
D	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
q	2.196	2.270	2.270	2.270	2.270
$\gamma$	1.303	1.298	1.297	1.297	1.297
AIC	4348.561	4343.710	4343.719	4343.720	4343.720

dengan

- $\mu$  adalah laju kegempaan dasar,
- A adalah produktivitas gempa susulan,
- c adalah skala waktu laju peluruhan gempa susulan,
- $\alpha$  adalah efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan,
- p adalah skala waktu laju peluruhan gempa susulan,
- D adalah jarak episenter ke koordinat titik kejadian gempa bumi,

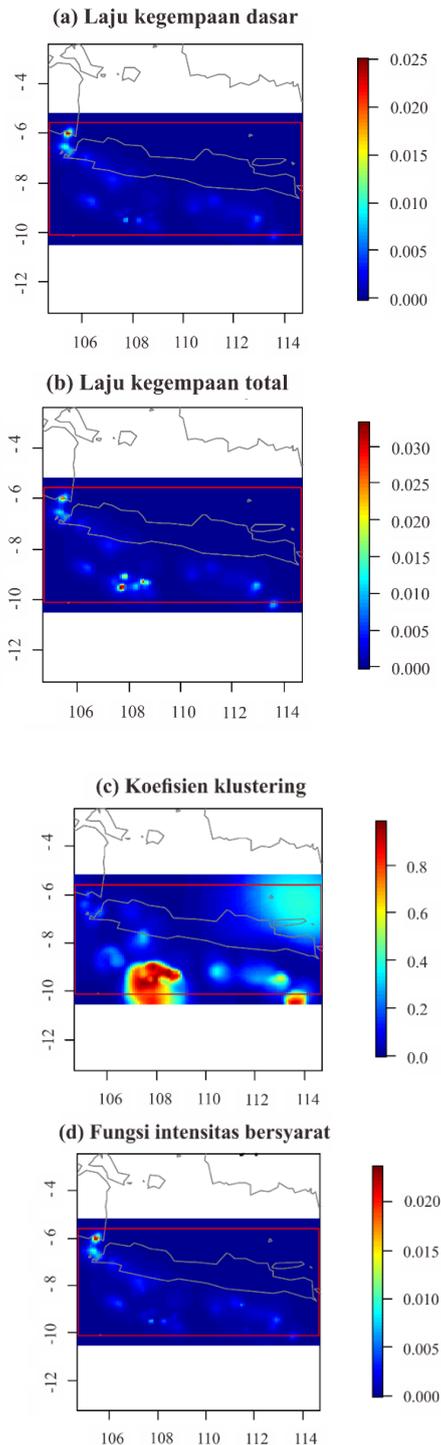
g) q adalah skala jarak laju peluruhan gempa susulan,

h)  $\gamma$  adalah efisiensi gempa bumi yang independen terhadap  $\kappa(m)$ .

Berdasarkan model ETAS spasial (3.4) dan estimasi parameter pada Tabel 3.1 diperoleh model ETAS spasial pada data gempa bumi di Pulau Jawa yang dapat ditulis sebagai

$$\begin{aligned} \lambda(t, x, y|H_t) &= \mu(x, y) + \\ &\sum_{t_i < t} A e^{\alpha(m-m_0)} \times \frac{(p-1)c^{p-1}}{(t-t_i+c)^p} \\ &\times \frac{q-1}{\pi D^2 e^{\gamma(m-m_0)}} \\ &\times \frac{(D^2 e^{\gamma(m-m_0)})^q}{((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + D^2 e^{\gamma(m-m_0)})^q} \\ &= 0.914 + \sum_{t_i < t} 0.138 e^{1.862(m-m_0)} \\ &\times \frac{0.217 e^{0.217}}{(t-t_i+c)^{1.217}} \times \frac{1.270}{(0.006)^2 \pi e^{1.297(m-m_0)}} \\ &\times \frac{((0.006)^2 e^{1.297(m-m_0)})^{2.270}}{((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (0.006)^2 e^{1.297(m-m_0)})^{2.270}} \end{aligned}$$

Dari hasil estimasi parameter model ETAS spasial dapat diperoleh plot laju kegempaan dasar, plot laju kegempaan total, plot koefisien klustering, dan plot fungsi intensitas dasar model ETAS spasial yang disajikan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** (a) laju kegempaan dasar, (b) laju kegempaan total, (c) koefisien klustering, dan (d) fungsi intensitas dasar model *ETAS* spasial untuk aktivitas gempa bumi di wilayah Pulau Jawa pada bulan Januari 1973 sampai Desember 2016

Berdasarkan Gambar 3.4 (a) terlihat bahwa laju kegempaan dasar di Pulau Jawa cukup tinggi di sekitar Selat Sunda dan di sepanjang pesisir selatan Pulau Jawa. Gambar 3.4 (b) dan Gambar 3.4 (c) menunjukkan bahwa pengelompokan aktivitas gempa bumi wilayah Pulau Jawa sering terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa terutama di perairan selatan Jawa Barat dengan intensitas gempa bumi sangat tinggi. Selain itu, Gambar 3.4 (d) menunjukkan bahwa fungsi intensitas bersyarat untuk kondisi gempa bumi sampai saat ini cukup tinggi terjadi di sekitar Selat Sunda dan di sepanjang pesisir selatan Pulau Jawa. Oleh sebab itu, daerah-daerah tersebut rawan mengalami bencana gempa bumi.

#### 4. KESIMPULAN

Model *epidemic type aftershock sequence* (*ETAS*) spasial merupakan pengembangan dari model *ETAS* yang memiliki tujuh parameter dengan mempertimbangkan komponen waktu, lokasi, dan magnitudo. Model *ETAS* spasial dapat dinyatakan melalui fungsi intensitas bersyarat yang ditulis sebagai

$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{t_i < t} A e^{\alpha(m - m_0)} \times \frac{(p-1)c^{p-1}}{(t-t_i+c)^p} \times \frac{q-1}{\pi D^2 e^{\gamma(m-m_0)}} \times \frac{(D^2 e^{\gamma(m-m_0)})^q}{((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + D^2 e^{\gamma(m-m_0)})^q}$$

dengan  $H_t = (t_i, m_i)$ ;  $t_i < t$  adalah kejadian gempa bumi sampai dengan waktu sebelum  $t$ ,  $(x, y)$  adalah lokasi kejadian gempa, dan  $m_0$  adalah batas magnitudo.

Dengan menggunakan metode estimasi *likelihood* maksimum dan metode Davidon Fletcher Powell diperoleh estimasi model *ETAS* spasial pada data gempa bumi di Pulau Jawa. Berdasarkan hasil estimasi tersebut diperoleh bahwa aktivitas gempa bumi wilayah Pulau Jawa sering terjadi di pesisir selatan Pulau Jawa terutama di perairan selatan Jawa Barat dan di sekitar Selat Sunda. Hal ini

menyebabkan daerah tersebut rawan mengalami bencana gempa bumi.

#### REFERENSI

- [1] Katili JA. *Plate Tectonics of Indonesia with Special Reference to the Sundaland Area*. 1972.
- [2] Ogata Y. *Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Process*. 83; 1988.
- [3] Ogata Y, Zhuang J. *Space-time ETAS Models and an Improved Extension*. 413; 2006.
- [4] Ross SM. *Stochastic Processes Second Edition*. John Willey and Son Inc; USA; 1996.
- [5] Soehaimi A. *Seismotektonik dan Potensi Kegempaan Wilayah Jawa*. Pusat Survei Geologi; Bandung; 227-240; 2008.
- [6] Utsu T. *Aftershock and Earthquake Statistics (i)*. 3; 1969.
- [7] Veen A, Schoenberg FP. *Estimation of Space-time Branching Process Model in Seismology using an EM-Type Algorithm*. 2007.
- [8] Zhuang J, Ogata Y, Vere-Jones D. *Stochastic Declustering of Space-Time Earthquake Occurrences*. 2012