

PENERAPAN MODEL *EPIDEMIC TYPE AFTERSHOCK SEQUENCE (ETAS)* PADA DATA GEMPA BUMI SULAWESI DAN JAWA

Siti Mutiah¹⁾, Hasih Pratiwi²⁾, Sri Sulistijowati Handajani³⁾

^{1),2),3)} Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Sebelas Maret

mutiahsahi@gmail.com, hpratiwi@mipa.uns.ac.id, rr_ssh@staff.uns.ac.id

Abstrak

Gempa bumi merupakan suatu kejadian yang bersifat acak baik dalam waktu maupun lokasi. Suatu kejadian gempa bumi yang berkekuatan besar, biasanya diikuti oleh kejadian gempa susulan. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk meminimalkan dampak yang diakibatkan peristiwa gempa bumi, salah satunya menggunakan pendekatan probabilistik yaitu proses titik. Model yang dibahas pada penelitian ini adalah model epidemic type aftershock sequence (ETAS), dimana model ini merupakan fungsi intensitas bersyarat yang memberikan informasi tentang laju kejadian gempa bumi dengan mempertimbangkan variabel magnitudo dan waktu. Penelitian ini bertujuan untuk membahas model ETAS dengan magnitudo mengikuti distribusi gamma dan penerapannya pada gempa bumi yang terjadi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa dari tahun 2000 sampai 2018. Langkah yang dilakukan adalah mengestimasi parameter model ETAS dengan metode estimasi likelihood maksimum. Hasil estimasi parameter gempa bumi di Pulau Sulawesi menunjukkan bahwa laju kegempaan dasar, produktivitas gempa susulan, dan efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan lebih tinggi dari hasil estimasi di Pulau Jawa. Akan tetapi, pada laju peluruhan gempa susulan menurut waktu dan secara keseluruhan di Pulau Sulawesi lebih rendah dari Pulau Jawa.

Kata Kunci: *distribusi gamma, estimasi likelihood maksimum; gempa bumi; model ETAS*

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan peristiwa bergetarnya bumi yang diakibatkan oleh pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Peristiwa gempa bumi yang memiliki kekuatan besar sering kali mengakibatkan kerugian yang tidak sedikit baik bagi manusia, lingkungan, dan sumber daya di sekitarnya. Indonesia merupakan wilayah yang memiliki potensi kemunculan terjadinya gempa bumi dengan frekuensi yang cukup tinggi, diantaranya adalah Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa. Hal itu terjadi karena pada Pulau Sulawesi merupakan wilayah pertemuan tiga lempeng besar, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Filipina, sedangkan Pulau Jawa merupakan wilayah pertemuan dua lempeng besar, yaitu Indo-Australia dan Eurasia. Selain itu, kedua pulau tersebut juga merupakan wilayah yang masuk pada jalur utama Circum Pasifik penyebaran gunung api di dunia. Oleh karena itu, perlu adanya mitigasi bencana untuk meminimalkan dampak yang diakibatkan oleh

peristiwa gempa bumi. Salah satu bentuk mitigasi bencana adalah memperkirakan kemunculan terjadinya gempa bumi.

Gempa bumi merupakan kejadian yang bersifat acak baik dalam waktu dan lokasi sehingga mengakibatkan tantangan untuk memperkirakan kemunculan gempa bumi. Usaha untuk mengembangkan metodologi perkiraan gempa bumi masih terus dilakukan baik aspek seismologi maupun aspek statistik. Subjek utama dalam statistika seismologi adalah proses stokastik, dimana bidang kajian yang digunakan adalah proses titik. Pada proses titik, gempa bumi dipandang sebagai koleksi acak titik-titik dalam suatu ruang dimana masing-masing titik menyatakan waktu atau lokasi maupun keduanya dari suatu kejadian (Sunusi, dkk., 2013). Aktivitas gempa bumi pada proses titik dapat ditentukan dengan fungsi intensitas bersyarat yang berguna untuk mengetahui peluang kemunculan terjadinya gempa bumi pada suatu wilayah dengan syarat diketahui histori kejadian gempa bumi sebelumnya (Ogata, 1988). Oleh karena itu, dengan diketahui peluang kemunculan terjadinya gempa bumi dapat meminimalkan bencana yang diakibatkan oleh peristiwa tersebut.

Gempa bumi yang besar biasanya diikuti oleh gempa susulan (Harte, 2010). Hal ini merupakan salah satu kejadian yang dapat diterapkan pada proses titik *self-exciting*. Hampir semua gempa bumi besar menghasilkan gempa susulan. Jumlah gempa susulan diamati meningkat secara eksponensial dari kekuatan besarnya guncangan utama (skala Utsu) dan laju susulan teramati menurun yang berbanding terbalik dengan waktu (skala Omori). Hubungan di atas dapat dikombinasikan ke dalam model *stochastic seismicity*, yang disebut model *Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)* dimana deretan gempa susulan yang dapat dipicu oleh gempa bumi yang besar (Jordan, dkk., 2011).

Fungsi intensitas bersyarat pada model *ETAS* bermanfaat untuk mengetahui peluang terjadinya kemunculan gempa bumi. Pembahasan model proses titik dengan fungsi intensitas bersyarat pada model *Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)* diharapkan dapat memberikan informasi mengenai rata-rata banyaknya kejadian gempa bumi berdasarkan historisnya. Berdasarkan uraian di atas, permasalahan yang diteliti adalah membahas model *Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)* dan menerapkannya untuk data gempa bumi yang di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada peristiwa gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa. Data sekunder gempa bumi yang diperoleh dari *United State Geological Survey* dari bulan Januari 2000 sampai bulan Desember 2018. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah kajian pustaka dengan mempelajari kajian-kajian yang berada dalam jurnal ilmiah ataupun buku-buku yang berkaitan dengan topik penelitian yaitu model *ETAS*. Adapun langkah-langkah yang dilakukan guna mencapai tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

- a. Mengidentifikasi peristiwa gempa bumi.
- b. Menentukan hubungan tipe epidemik dan asumsi-asumsi yang berkaitan dengan peristiwa gempa bumi.
- c. Menentukan fungsi intensitas bersyarat pada model *ETAS*.
- d. Menentukan fungsi *likelihood* model *ETAS*.
- e. Menentukan logaritma natural dari fungsi *likelihood*.
- f. Mengestimasi parameter model *ETAS* pada data gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa.
- g. Mengintepretasikan model *ETAS* dan grafik fungsi intensitas bersyarat berdasarkan nilai setiap parameter yang diperoleh.
- h. Membandingkan estimasi parameter pada gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang hasil penelitian tentang model *ETAS* dan penerapannya pada data gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa.

3.1. Model *ETAS*

Proses titik merupakan proses stokastik berupa kumpulan acak dari titik-titik yang terletak pada suatu ruangan tertentu. Terdapat dua jenis proses titik, salah satunya adalah proses titik temporal. Proses titik temporal berhubungan dengan kejadian-kejadian yang diobservasi dari waktu ke waktu sebagai deretan waktu (Schoenberg, 2010). Pada kasus ini, gempa bumi dipandang sebagai koleksi acak titik-titik dalam suatu ruang dimana masing-masing titik-titik menyatakan waktu atau lokasi maupun keduanya dari suatu kejadian (Sunusi, dkk., 2013).

Proses titik temporal adalah fungsi intensitas bersyarat yang bergantung terhadap waktu, dimana tidak dipengaruhi oleh waktu saat itu saja tetapi juga dipengaruhi oleh waktu kejadian-kejadian sebelumnya. Konsep ini menggambarkan probabilitas suatu kejadian yang akan datang yang bergantung pada informasi waktu sebelumnya hingga saat ini. Pada kasus seismologi, fungsi intensitas bersyarat dipandang sebagai aktivitas seismik di suatu daerah untuk periode waktu tertentu. Misalakan $N_\delta(t)$ menyatakan banyaknya kejadian pada interval waktu $[t, t + \delta]$, maka fungsi intensitas bersyarat dapat dinyatakan sebagai

$$\lambda(t, \theta_1, \dots, \theta_m | \mathcal{H}_t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} Pr(N_\delta(t) > 0 | \mathcal{H}_t)$$

dengan $N_\delta(t)$ menyatakan banyaknya kejadian pada interval waktu $[t, t + \delta]$ (Pratiwi, dkk., 2018).

Model tipe epidemik digambarkan dengan banyaknya individu yang hidup pada waktu t dikendalikan oleh laju imigrasi, laju kelahiran, dan laju kematian. Pada kasus gempa bumi, yang dimaksud dengan individu adalah suatu kejadian gempa bumi. Laju imigrasi mengacu pada kejadian gempa bumi dasar, sedangkan laju kelahiran berhubungan dengan pemicu kejadian gempa susulan yang didasari pada kejadian gempa bumi sebelumnya. Proses

kelahiran dan kematian tergantung terhadap usia untuk setiap individu usia x yang hidup pada t . Pada interval $(t, t + dt)$ probabilitas terdapat satu kelahiran $g(x)dt$ dan probabilitas terdapat satu kematian $h(x)dt$ dimana untuk setiap individu bersifat independen.

Berdasarkan penjabaran di atas, proses *self-exciting* merupakan proses kelahiran yang mengikuti laju imigrasi μ per satuan waktu dan proses kematian $h(x) = 0$. Proses tersebut memiliki laju atau fungsi intensitas bersyarat yang dituliskan ke dalam bentuk

$$\begin{aligned} \lambda(t|\mathcal{H}_t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr\{N(t, t + \Delta t) > 1|\mathcal{H}_t\}}{\Delta t} \\ \lambda(t|\mathcal{H}_t) &= \mu + \sum_{t_i < t} g(t - t_i) \end{aligned} \tag{3.1}$$

dengan μ merupakan laju kejadian gempa dasar dan $g(t - t_i)$ merupakan fungsi densitas probabilitas dari waktu terjadinya gempa bumi pemicu. Persamaan (3.1) dibawa ke proses titik multivariat $\{t_i^m\}$, misalkan $N_m(t) = \sum_m N_m(t)$ didapatkan

$$\begin{aligned} \lambda_j(t|\mathcal{H}_t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr\{N_m(t, t + \Delta t) > 1|\mathcal{H}_t\}}{\Delta t} \\ \lambda_j(t|\mathcal{H}_t) &= \mu_j + \sum_m \sum_{t_i^m < t} g_{jm}(t - t_i). \end{aligned}$$

Jika diasumsikan $g_{jm} = k(m)g_j(t)$, maka didapatkan

$$\begin{aligned} \lambda(t|\mathcal{H}_t) &= \sum_i \lambda_j(t|\mathcal{H}_t) \\ &= \sum_j \left\{ \mu_j + \sum_m \sum_{t_i^m < t} g_{jm}(t - t_i) \right\} \\ &= \mu + \sum_{t_i < t} k(m_i)g(t - t_i) \end{aligned} \tag{3.2}$$

dengan m_i adalah magnitudo kejadian gempa bumi ke- i dan $g(t) = \sum_j g_j(t)$ (Ogata, 1988).

Menurut Guglielmi (2016) pada kasus gempa bumi, Omori menemukan bahwa laju gempa susulan menurun secara hiperbolik setelah gempa bumi yang berkekuatan besar terjadi. Hal ini dinyatakan dalam bentuk

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

Selanjutnya, dilakukan modifikasi oleh Utsu dengan penambahan pangkat p yang didapatkan dari guncangan utama, menjadi

$$n(t) = \frac{K}{(c + t)^p}. \tag{3.3}$$

Berdasarkan model tipe epidemik (3.2) dan hukum Omori-Utsu (3.3), didapatkan asumsi-asumsi yang mempengaruhi terjadinya gempa susulan.

- a. Laju kejadian gempa bumi dasar pada suatu wilayah adalah konstan dan acak yang dinyatakan dengan μ .

- b. Kejadian gempa bumi utama maupun kejadian gempa susulan, semuanya dapat memicu terjadinya gempa susulan berikutnya yang terjadi secara independen. Banyaknya kejadian gempa susulan berdasarkan kejadian gempa bumi utama (M) dituliskan dalam bentuk

$$k(M) = Ae^{\alpha(M-M_0)}; M - M_0 > 0, \quad (3.4)$$

dengan M_0 adalah batas magnitudo, sedangkan α dan A adalah parameter yang akan ditentukan. Parameter α adalah besarnya efisiensi kejadian gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan dan parameter A adalah produktivitas kejadian gempa bumi susulan.

- c. Fungsi kepadatan probabilitas dari waktu terjadinya kejadian gempa bumi utama sampai gempa susulan dituliskan dalam bentuk

$$g(t) = \frac{p-1}{c} \left(1 + \frac{t}{c}\right)^p; t > 0, \quad (3.5)$$

dengan t adalah waktu terjadinya gempa bumi utama, sedangkan c dan p adalah parameter yang akan ditentukan. Parameter c adalah laju peluruhan gempa susulan berdasarkan waktu dan parameter p adalah laju peluruhan gempa susulan.

- d. Distribusi magnitudo independen dengan laju kejadian gempa bumi. Bentuk eksplisit dari hubungan Gutenberg-Richter merupakan fungsi kepadatan probabilitas dari magnitudo kejadian gempa bumi yang dituliskan dalam bentuk

$$f(M) = \beta e^{\beta(M-M_0)},$$

dengan β terkait dengan b , yaitu $\beta = 2.30b$, dimana b adalah konstanta yang bergantung pada kondisi geologi suatu wilayah.

Berlandaskan persamaan (3.2) dan asumsi-asumsi di atas, didapatkan fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* dengan mensubstitusikan persamaan (3.4) ke $k(m_i)$ dan persamaan (3.5) ke $g(t - t_i)$. Model *ETAS* dituliskan dalam bentuk

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

dimana $K = A(p-1)c^{(p-1)}$ dengan μ adalah laju kegempaan dasar, K adalah produktivitas gempa susulan, α adalah efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan, c adalah laju peluruhan gempa susulan menurut waktu, p adalah laju peluruhan gempa susulan secara keseluruhan, t_i adalah waktu kejadian ke- i dengan besar magnitudo M_i , dan M_0 adalah ambang batas magnitudo.

Model *ETAS* didefinisikan dalam fungsi intensitas bersyarat atau fungsi resiko gempa bumi berdasarkan waktu untuk memodelkan gempa susulan (Ogata, 1999). Penerapan fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* telah dilakukan oleh Harte (2010) pada gempa bumi yang terjadi Phuket pada tahun 2004 sampai 2009. Pada penelitian tersebut dilakukan estimasi parameter fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* berdasarkan gempa bumi

di Phuket beserta barisan gempa bumi susulannya. Selain itu, model ini juga diterapkan untuk mengestimasi parameter dari fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* pada gempa bumi yang terjadi Pulau Sumatra dan Pulau Jawa dari bulan Januari 1973 sampai bulan April 2017 (Hasih, dkk., 2018).

Hukum Omori-Utsu dan model *ETAS* diterapkan pada gempa bumi Gorkha, Nepal dengan tujuan untuk mendeteksi kemungkinan terjadinya gempa susulan yang bahkan lebih besar dari gempa utama (Ogata dan Tsurouka, 2016). Kejadian waktu gempa bumi dapat dianggap sebagai proses titik. Pemodelan yang sesuai dari fungsi intensitas bersyarat dari suatu proses titik berguna untuk mendapatkan peluang kemunculan terjadinya gempa bumi. Pada penelitian ini, fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* diterapkan pada data gempa bumi yang di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa dari bulan Januari 2000 sampai bulan Desember 2018.

3.2. Penerapan Kasus

Model *ETAS* diterapkan pada peristiwa gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa yang diperoleh dari *United State Geological Survey*. Ambang batas magnitudo yang digunakan pada kejadian gempa bumi minimal 5 *mb* dengan kedalaman berada dalam kisaran 0 sampai 70 km. Pada bulan Januari 2000 sampai bulan Desember 2018, sebanyak 280 gempa bumi terjadi di Pulau Sulawesi, sedangkan di Pulau Jawa terjadi sebanyak 140 gempa bumi. Berdasarkan data di atas, kemudian dilakukan estimasi parameter model *ETAS* dengan magnitudo mengikuti distribusi gamma menggunakan metode maksimum *likelihood*. Hasil estimasi parameter model *ETAS* pada gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil estimasi parameter Model *ETAS* pada gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa.

Parameter	Pulau Sulawesi	Pulau Jawa
μ	0,02556	0,01629
K	0,70504	0,55756
α	2,68218	1,38918
c	0,00408	0,09187
p	1,10560	1,84199
$Ln L$	-1116,897	-690,4274

Berdasarkan hasil estimasi parameter model *ETAS* untuk gempa bumi di Pulau Sulawesi pada Tabel 1, dapat dituliskan sebagai

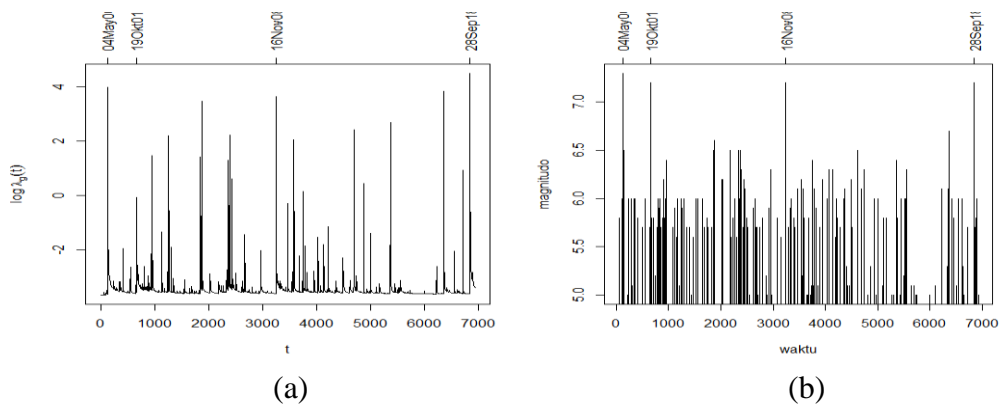
$$\lambda(t|\mathcal{H}_t) = 0,02556 + 0,70504 \sum_{t_i < t} e^{2,68218(M_i - M_0)} \left(1 + \frac{t - t_i}{0,00408}\right)^{-1,10560}$$

sedangkan model *ETAS* pada gempa bumi di Pulau Jawa adalah

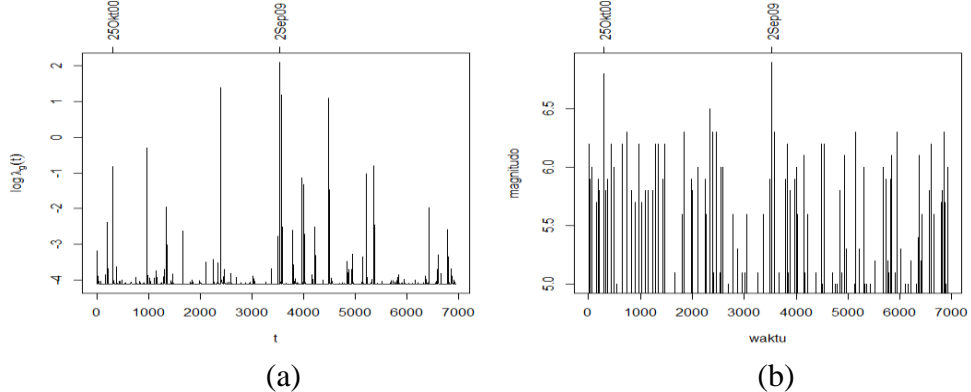
$$\lambda(t|\mathcal{H}_t) = 0,01629 + 0,55756 \sum_{t_i < t} e^{1,38918(M_i - M_0)} \left(1 + \frac{t - t_i}{0,09187}\right)^{-1,84199}.$$

Hasil estimasi parameter tersebut menunjukkan bahwa gempa bumi yang terjadi dari bulan Januari 2000 sampai bulan Desember 2018 di Pulau Sulawesi memiliki laju kegempaan dasar sebesar 1,57 kali lebih tinggi dibandingkan Pulau Jawa. Pada estimasi parameter produktivitas gempa susulan dan efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan di Pulau Sulawesi berturut-turut 1,26 dan 1,93 kali lebih tinggi dari hasil estimasi di Pulau Jawa. Akan tetapi, estimasi parameter laju peluruhan gempa susulan menurut waktu dan secara keseluruhan di Pulau Sulawesi masing-masing 22,52 dan 1,67 kali lebih rendah dibandingkan dengan peristiwa gempa bumi di Pulau Jawa.

Plot fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* dan plot magnitudo kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi dan Pulau Jawa masing-masing disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. (a) plot logaritma fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* dan (b) plot magnitudo kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi.



Gambar 2. (a) plot logaritma fungsi intensitas bersyarat model *ETAS* dan (b) plot magnitudo kejadian gempa bumi di Pulau Jawa.

Pada Gambar 1 (b) menunjukkan bahwa terdapat empat peristiwa gempa bumi di Pulau Sulawesi memiliki magnitudo yang cukup besar yaitu 7,3 mb

(4 Januari 2000), 7,2 *mb* (19 Oktober 2001), 7,2 *mb* (16 November 2008), dan 7,2 *mb* (28 September 2018). Selanjutnya pada Gambar 2 (b) menunjukkan bahwa terdapat dua peristiwa gempa bumi di Pulau Jawa memiliki magnitudo yang cukup besar yaitu 6,8 *mb* (25 Oktober 2000) dan 7,2 *mb* (2 September 2009). Berdasarkan Gambar 1 (a) dan Gambar 2 (a) dapat disimpulkan bahwa gempa bumi yang memiliki kekuatan (magnitudo) yang besar, umumnya mempunyai fungsi intensitas bersyarat yang besar.

4. SIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- a. Model *epidemic type aftershock sequence (ETAS)* dinyatakan dengan fungsi intensitas bersyarat

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

dengan μ adalah laju kegempaan dasar, K adalah produktivitas gempa susulan, α adalah efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan, c adalah laju peluruhan gempa susulan menurut waktu, a adalah laju peluruhan gempa susulan secara keseluruhan, t_i adalah waktu kejadian ke- i dengan besar magnitudo M_i , dan M_0 adalah ambang batas magnitudo.

- b. Berdasarkan estimasi parameter fungsi intensitas bersyarat model *ETAS*, Pulau Sulawesi memiliki laju kegempaan dasar, produktivitas gempa susulan dan efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu yang menghasilkan gempa susulan lebih tinggi dari Pulau Jawa. Akan tetapi, laju peluruhan gempa susulan menurut waktu dan secara keseluruhan di Pulau Sulawesi lebih rendah dibandingkan dengan peristiwa gempa bumi di Pulau Jawa.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Guglielmi, A. V. (2016). Interpretation of the Omori Law. *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya 10, Moscow, 123995 Russia.*
- Harte, D. (2010). PtProcess: An R Package for Modelling Marked Point Processes Indexed by Time. *Journal of Statistical Software* 35, 119-144.
- Jordan, T. H., Chen, Y., Gasparini, P., Madariaga, R., Main, I., Marzocchi, W., Papadopoulos, G., Sobolev, G., Yamaoka, K., and Zschau, J. (2011). *Operational Earthquake Forecasting, State of Knowledge and Guidelines for Utilization.* Italy: Departement of Civil Protection.
- Ogata, Y. (1988). Statistical Model for Earthquake Occurances and Residual Analysis for Point process. *Journal of the Statistical Assosiation* 83, Issue 401, 9-27.

- Ogata, Y. (1999). Seismicity Analysis through Point-process Modelling: A Review. *Pure appl. Geophys.* **155**, 471-507.
- Ogata, Y. and Tsurouka, H. 2016. Statistical Monitoring of Aftershock Sequence: A Case Study of The 2015 Mw7.8 Gorkha, Nepal, Earthquake. *Earth, Planets and Space* 68:44.
- Schoenberg, F.P. 2010. Introduction to Point Processes. *UCLA Department of Statistics, Los Angeles*.
- Sunusi, N., Jaya, A.K., Islamiyati, A., dan Roupong. (2013). *Studi Temporal Point Process pada Analisa Prakiraan Peluang Waktu Kemunculan Gempa*. Laporan Hasil Penelitian, Program Statistika, FMIPA Universitas Hassanudin, Makassar.
- Pratiwi, H., Rini, L. S., and Mangku I. W. (2018). Marked point process for modelling seismic activity (case study in Sumatran and Java). *Journal of the Physics: Conf. Series* 1022, doi :10.1088/1742-6596/1022/1/012004.