

# Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang Menggunakan Pendekatan Probabilistik

Pambayun Purbandini<sup>1</sup>, Bagus Jaya Santosa<sup>1</sup>, dan Bambang Sunardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

<sup>2</sup>Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta Pusat  
e-mail: bjs@physics.its.ac.id

**Abstrak**—Studi mengenai bahaya kegempaan dilakukan untuk meminimalisasi dampak dari bencana gempa bumi di wilayah rawan bencana gempa. Penelitian ini mempresentasikan analisis bahaya kegempaan dengan menggunakan pendekatan probabilistik untuk wilayah Malang, Jawa Timur. Analisis PSHA yang dilakukan yaitu pada  $T=0$  detik (PGA),  $T=0.2$  detik (periode pendek), dan  $T=1$  detik (periode panjang). Digunakan model sumber gempa regional dan persamaan atenuasi standar terpublikasi untuk menghitung percepatan puncak tanah dengan probabilitas 2% dalam 50 tahun di batuan dasar. Software yang digunakan pada analisis ini adalah Crisis 2007. Data gempa bumi yang digunakan untuk analisis ini adalah historis gempa bumi dari tahun 1900 hingga 2017 dengan kedalaman 0-300 km, magnitudo  $\geq 5$  Mw, dan batas koordinat  $3,6^\circ - 12,65^\circ$  LS dan  $108,2^\circ - 117,2^\circ$  BT dari katalog gempa bumi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan Katalog United States Geological Survey (USGS). Hasil menunjukkan rentang nilai percepatan 0.31 – 0.43 g untuk PGA, 0.62 – 0.88 g untuk periode pendek ( $T = 0.2$  detik), dan 0.22 – 0.28 g untuk periode panjang ( $T = 1$  detik). Rentang bahaya wilayah Malang bagian selatan didominasi oleh sumber gempa megathrust dan untuk wilayah Malang bagian utara didominasi oleh sumber gempa fault. Hal ini menunjukkan perbedaan dengan SNI 1726:2012.

**Kata Kunci**—Atenuasi, PGA, Seismic Hazard, Sesar Kendeng.

## I. PENDAHULUAN

MALANG merupakan salah satu wilayah yang sering merasakan dampak ketika terjadi gempa bumi. Hal ini disebabkan karena dinamika tektonik di bagian selatan wilayah Malang yang didominasi oleh gerakan lempeng India-Australia yang bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam. Ketika sebuah gempa bumi terjadi, Lembaga Seismologi di Negara setempat segera mengumumkan letak hiposenter dan kekuatan gempa tersebut, misal BMKG [1]. Berdasarkan data gempa signifikan dan merusak dari BMKG, wilayah Malang sering dilanda gempa signifikan. Diantaranya yaitu gempa pada 20 Oktober 1958 ( $M=6,7$  SR) dan 19 Februari 1967 ( $M=6,2$  SR) yang menimbulkan kerusakan dan korban jiwa [2].

Aktivitas seismik di wilayah Malang tidak hanya disebabkan oleh zona subduksi yang terletak di selatan Pulau Jawa, namun juga disebabkan oleh aktivitas patahan, baik lokal maupun regional [3]. Penelitian terbaru mengungkapkan adanya keberadaan sumber gempa baru yang melintang sejauh 300

kilometer dari selatan Semarang, Jawa Tengah, hingga Jawa Timur. Sumber Gempa terbaru tersebut berasal dari Sesar Kendeng [4].

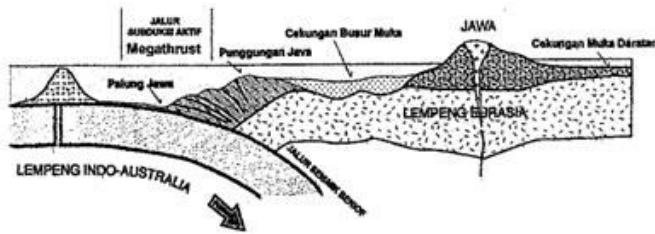
Dari data tingkat seismisitas wilayah Malang yang tinggi tersebut, mitigasi bencana gempa bumi sangat diperlukan untuk mengurangi bahaya yang diakibatkan oleh kejadian gempa bumi. Ada beberapa upaya untuk mitigasi gempa bumi, salah satunya adalah dengan membuat perencanaan tata wilayah yang telah sesuai dengan kajian gempa bumi seperti menggunakan analisis bahaya gempa [5]-[6].

Hingga saat ini metode yang terus dikembangkan dalam perhitungan bahaya kegempaan salah satunya dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Metode PSHA menghitung tingkat guncangan tanah di lokasi tertentu secara probabilistik, artinya dilakukan perhitungan mengenai faktor ketidakpastian dalam analisis seperti ukuran, lokasi, dan frekuensi kejadian gempa bumi [7]. Pada penelitian ini dilakukan analisa bahaya kegempaan dengan menggunakan *software* Crisis 2007 untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 2.475 tahun.

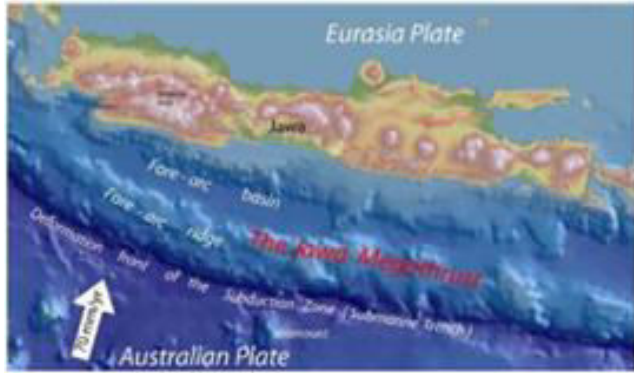
Model dan konsep dari analisis menggunakan metode probabilitas ini tetap digunakan hingga sekarang, namun dengan analisis dan teknik perhitungan yang terus dikembangkan. Metode ini memiliki empat tahapan, yaitu a) identifikasi sumber gempa, b) karakterisasi sumber gempa, c) pemilihan fungsi atenuasi, dan d) perhitungan *hazard* gempa [8].

## II. TATANAN TEKTONIK PULAU JAWA

Berdasarkan kondisi tektoniknya, tektonik wilayah Jawa dikontrol oleh penunjaman (subduksi) Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia yang membentuk sistem Busur Sunda di daerah *offshore* yang terdiri dari palung Jawa, cekungan busur muka, dan punggung Jawa. Selain dipengaruhi oleh subduksi Sunda, kondisi tektonik pulau Jawa juga dipengaruhi oleh seismisitas regional Jawa yang berupa sesar-sesar dan *normal faulting* di Laut Jawa. Dari kondisi tektonik tersebut, mengakibatkan daerah-daerah di sepanjang Busur Sunda seperti Pulau Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat (NTB) menjadi daerah yang memiliki tingkat kerawanan gempa yang cukup tinggi. Kurang dari 30 tahun terakhir, wilayah Jawa Bali, NTB, dan sekitarnya pernah diguncang 39



Gambar 1. Penampang melintang kondisi tektonik Pulau Jawa [9].



Gambar 2. Zona subduksi Busur Jawa-Sumba [10].

kejadian gempa dengan magnitudo di atas 6 Skala richter (SR) [6]-[9]. Aktivitas lempeng yang dimaksud ditunjukkan pada gambar 1.

Aktivitas seismik di wilayah Jawa Timur tidak hanya dipengaruhi oleh zona subduksi yang berada di selatan Pulau Jawa, tapi juga dipengaruhi oleh aktivitas patahan, baik patahan lokal maupun patahan regional. Untuk patahan di wilayah Jawa Timur, masih banyak yang belum diidentifikasi dan penelitian masih dilakukan oleh *Geological Agency*. Berdasarkan peta patahan dari *Geological Agency* ada beberapa patahan yang telah diteliti di wilayah Jawa Timur, seperti patahan Tulungagung, Lumajang, dan patahan Banyu Putih. Ketiga patahan tersebut termasuk dalam kelas B, dengan magnitudo maksimum  $\geq 6.5 - 7 M_w$  dengan *slip rate*  $< 2$  hingga  $< 5$  mm/tahun [3].

Lempeng Samudera yang lebih padat dan lebih tua sepanjang Segmen Jawa menambah komponen vertikal dari gerakan subduksi sehingga mengurangi besarnya *seismic coupling* dan kemungkinan terjadinya gempa sangat besar. Perbesaran *dip* dan kedalaman penetrasi dari zona seismik *benioff* sepanjang segmen Jawa kemungkinan juga merupakan akibat penunjaman lempeng yang lebih padat dan lebih tua. Sistem tektonik Jawa dan sekitarnya dikontrol oleh tektonik yang menunjam (subduksi) busur Sunda bagian barat dan subduksi Jawa-Sumba. Akibat adanya penunjaman tersebut terbentuklah struktur-struktur geologi regional di wilayah daratan yang dapat diamati mulai Jawa bagian timur [11]. Gambar 2 menunjukkan zona subduksi Busur Jawa-Sumba.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Daerah dan Waktu Penelitian

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari hingga Maret 2017 bertempat di Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Badan Meteorologi

Tabel 1.  
Korelasi konversi beberapa skala magnitudo untuk wilayah Indonesia [12]

Korelasi Konversi	Jml Data (Events)	Range Data	Kesesuaian ( $R^2$ )
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051M_s + 7.285$	3.173	$4.5 \leq M_s \leq 8.6$	93.9%
$M_w = 0.114m_b^2 - 0.556m_b + 5.560$	978	$4.9 \leq m_b \leq 8.2$	72.0%
$M_w = 0.787M_E + 1.537$	154	$5.2 \leq M_E \leq 7.3$	71.2%
$m_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$	722	$3.0 \leq M_L \leq 6.2$	56.1%
$M_L = 0.717M_D + 1.003$	384	$3.0 \leq M_D \leq 5.8$	29.1%

Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta di bidang Geofisika dan selanjutnya dilakukan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam penelitian ini dilakukan analisis bahaya (*hazard*) gempa untuk wilayah Malang dengan batas koordinat  $3,6^\circ - 12,65^\circ$  LS dan  $108,2^\circ - 117,2^\circ$  BT.

#### B. Pengumpulan Data

Dalam penelitian bahaya gempa di wilayah Malang digunakan data gempa tahun 1900 hingga 2017. Data gempa diambil dari katalog lembaga yang melakukan pengamatan kegempaan baik nasional maupun internasional yaitu Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan Katalog *United States Geological Survey* (USGS) yang terdiri dari NEIC, NOAA, PDQ, dan gabungan katalog ANSS (*The Advanced National Seismic System*). Data katalog BMKG yang digunakan memiliki batas koordinat  $3,6^\circ - 12,65^\circ$  LS dan  $108,2^\circ - 117,2^\circ$  BT dan data katalog USGS memiliki pusat koordinat  $-8,152^\circ$  LS dan  $112,691^\circ$  BT dengan radius 500 km dan batas kedalaman maksimum hingga 300 km.

#### C. Penyeragaman Skala Magnitudo

Data gempa bumi yang dikumpulkan dari berbagai sumber menggunakan skala magnitudo yang berbeda-beda, seperti magnitudo lokal (mL), magnitudo *body* (mb), magnitudo *surface* (ms), dan magnitudo momen (Mw). Skala magnitudo tersebut dikonversi terlebih dahulu menjadi satu skala magnitudo yang sama. Pada penelitian ini digunakan skala magnitudo momen (Mw). Konversi skala magnitudo yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada korelasi beberapa magnitudo untuk wilayah Indonesia sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

#### D. Declustering

*Declustering* merupakan proses pemisahan antara gempa utama (*foreshock*) dan gempa susulan (*aftershock*) dengan menggunakan kriteria rentang waktu dan jarak. Setelah dilakukan pengumpulan data dan penyeragaman skala magnitudo, selanjutnya dilakukan pemisahan gempa utama dan gempa susulan. Analisis bahaya gempa probabilistik dilakukan berdasarkan kejadian gempa independen atau gempa utama. Kejadian-kejadian gempa dependen atau gempa susulan, seperti *foreshock* dan *aftershock* yang terjadi dalam suatu rangkaian gempa harus diidentifikasi sebelum melakukan analisis. Memasukkan kejadian gempa dependen dalam analisis akan mengakibatkan sedikit peningkatan pada hasil

Tabel 2.  
Data dan parameter sumber gempa subduksi [12]

Megathrust	Mmax History	Nilai b	Nilai a	Mmax (Desain)
Jawa Tengah	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1
Jawa Timur	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1
Sumba	7.8 (11-087)-193	1.200	6.81	7.8

Tabel 3.  
Data dan parameter sumber gempa *fault* [12]

Fault Name	Slip rate (mm/year)	Slip rate weight	Sense Mech anism	Dip	T o p	Botto m	L (k m)	Mmax (Desain)
Opak	2.4	1	Strike-slip	90	3	18	31.6	6.8
Kending	5	1	Strike-slip	90	3	20	300	7.5
Back Arc 1	28	1	Reverse slip	45	3	20	268	7.8

analisis resiko gempa [13]. Pada penelitian ini, kriteria yang digunakan untuk *declustering* adalah kriteria dari Reasenberg untuk mengeliminasi *beforeshock* dan *aftershock* dari katalog gempa.

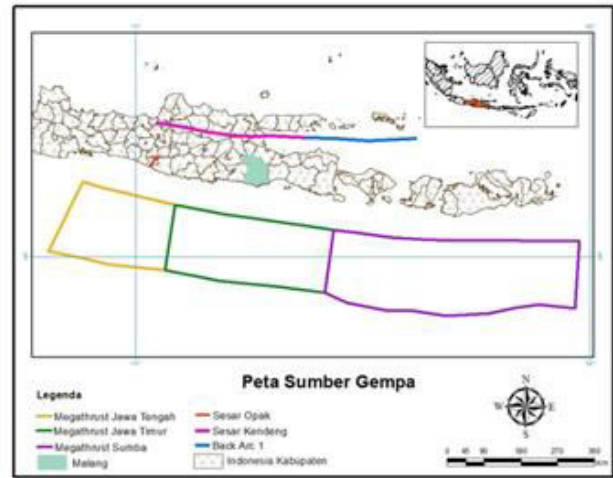
E. *Pemodelan dan Karakterisasi Sumber Gempa*

Pemodelan zona sumber gempa dilakukan dengan menginterpretasi kondisi geologi, geofisika, dan seismotektonik berdasarkan katalog kejadian gempa. Model sumber gempa tersebut akan memberikan gambaran distribusi episenter kejadian gempa historik, frekuensi kejadian gempa, dan pergeseran relatif lempeng (*slip rate*) suatu sumber gempa. Model sumber gempa diperlukan sebagai hubungan antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa [12]. Zona sumber gempa yang digunakan pada penelitian ini diklasifikasikan dalam tiga jenis model sumber gempa, antara lain sumber gempa *fault*, sumber gempa subduksi, dan sumber gempa *background* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

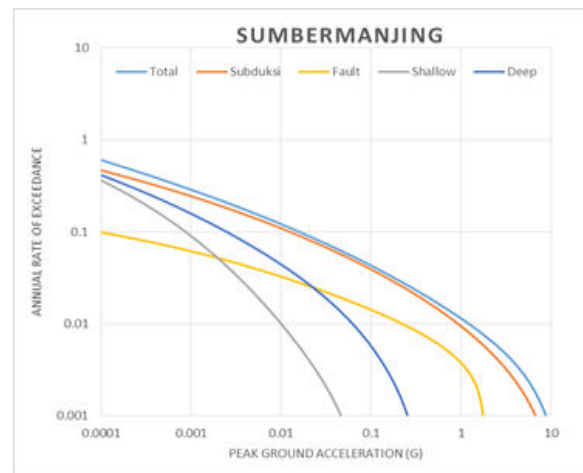
Pada penelitian ini, daerah pengaruh yang diambil adalah radius 500 km dari pusat koordinat wilayah Malang dengan batasan pemodelan zona sumber gempa yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dibatasi dengan radius hingga 500 km.
2. Kedalaman sumber gempa yang digunakan dibatasi hingga 300 km.
3. Digunakan fungsi atenuasi untuk tiap-tiap model sumber gempa yang dianggap sesuai dengan karakteristik kegempaan dan model sumber gempa di wilayah Indonesia.

Dalam penelitian ini, karakteristik sumber gempa ditentukan dengan menggunakan model *recurrence* Gutenberg-Richter dengan memberikan pembobotan untuk masing-masing model. Model keberulangan (*recurrence model*) yang paling banyak digunakan adalah model eksponensial yang diekspresikan dengan garis b [14]. Untuk perhitungan nilai a dan b dalam model distribusi magnitudo Gutenberg-Richter dilakukan dengan cara mengambil data-data gempa historis yang ada di



Gambar 3. Pemodelan Sumber Gempa



Gambar 4. Hazard Curve untuk wilayah Kecamatan Sumbermanjing.

daerah sumber gempa tersebut, lalu dilakukan analisis statistika dengan model *maximum likelihood*. Untuk penentuan nilai a dan b dari masing-masing model sumber gempa diestimasi dengan bantuan program ZMAP [15]. Karakterisasi sumber gempa yang digunakan untuk analisis bahaya gempa di wilayah Malang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

F. *Penentuan Fungsi Atenuasi dan Logic-tree*

Dalam menurunkan fungsi atenuasi diperlukan data percepatan tanah yang banyak supaya didapatkan suatu fungsi atenuasi yang sesuai untuk daerah penelitian. Di wilayah Indonesia, ketersediaan data percepatan tanah masih belum cukup untuk menghasilkan suatu fungsi atenuasi yang baik. Oleh karena itu, untuk analisis bahaya dapat menggunakan fungsi atenuasi yang diturunkan dari wilayah lain yang memiliki kemiripan kondisi tektonik dan geologi di Indonesia. Pada penelitian ini, fungsi atenuasi yang digunakan telah dikelompokkan berdasarkan mekanisme sumber gempa yang secara umum dibagi ke dalam beberapa klasifikasi. Klasifikasi yang digunakan yaitu zona sumber gempa subduksi, zona sumber gempa *fault*, dan zona sumber gempa *background* yang terdiri atas *shallow background* dan *deep background*.

Pendekatan *logic-tree* dilakukan dengan tujuan untuk menentukan pembobotan pada masing-masing parameter yang digunakan pada analisis bahaya gempa dan menggambarkan sistem penentuan tingkat kepercayaan parameter yang digunakan. Selain itu, *logic-tree* juga memasukkan faktor ketidakpastian pada analisis bahaya gempa. Dalam penelitian ini, sumber gempa subduksi dan *fault*, pembobotan dilakukan dengan menggunakan fungsi atenuasi yang berbeda. Pemakaian *logic-tree* dalam PSHA sangat diperlukan akibat adanya faktor ketidakpastian dalam pengelolaan data untuk analisis *seismic hazard*. Dengan menggunakan model *treatment* ini, data, parameter, serta model atenuasi yang digunakan bisa diakomodir dengan bobot sesuai dengan ketidakpastiannya [12][16].

#### G. Analisis Bahaya Gempa

Berdasarkan [16], analisis bahaya gempa dilakukan dengan menggunakan teori probabilitas total. Teori PSHA mengasumsikan magnitudo gempa bumi  $M$  dan jarak  $R$  adalah variabel acak kontinu dan independen [3]. Dalam bentuk umum, teorema probabilitas total dapat dinyatakan dalam persamaan 1.

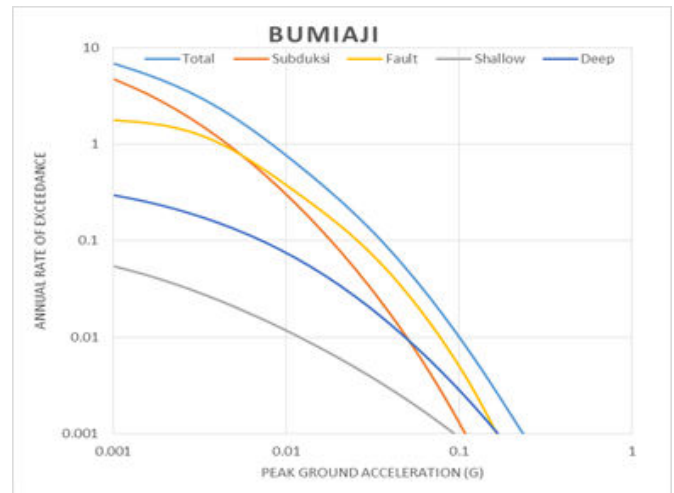
$$P_X(x) = \int \int_{M R} P(X > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (1)$$

Hasil akhir dari analisis bahaya gempa pada penelitian ini adalah percepatan gempa maksimum di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2.475 tahun) dan kurva bahaya gempa (*seismic hazard curve*).

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian berupa nilai percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan respon spektra percepatan pada periode pendek ( $T = 0,2$  detik) dan periode panjang ( $T = 1$  detik) di batuan dasar. Analisis bahaya (*hazard*) gempa dengan pendekatan probabilistik dibatasi untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 2.475 tahun, di mana peraturan-peraturan gempa modern saat ini telah menggunakan ketentuan tersebut [15]. Analisis pada penelitian ini difokuskan pada enam titik, yaitu Kota Malang, Kecamatan Kepanjen, Kecamatan Sumbermanjing, Kota Batu, Kecamatan Bumiaji, dan Kecamatan Singosari. Satuan yang digunakan pada PGA dan spektra percepatan adalah satuan "g" (gravitasi).

Nilai percepatan getaran tanah merepresentasikan tingkat besarnya percepatan tanah di batuan dasar. Hasil analisis menunjukkan nilai *Peak Ground Acceleration* di batuan dasar untuk wilayah Malang memiliki nilai antara 0.311 g hingga 0.433 g. Untuk spektra percepatan periode pendek ( $T=0.2$  detik) didapatkan rentang nilai berkisar antara 0.629 g hingga 0.884 g berkisar antara 0.629 g hingga 0.884 g. Dan untuk spektra percepatan periode panjang ( $T=1$  detik) didapatkan rentang nilai antara 0.23 – 0.28 g.



Gambar 5. Hazard Curve untuk wilayah Kecamatan Bumiaji.

Kelebihan pada penelitian ini adalah telah memperhitungkan keberadaan Sesar Kendeng sementara dalam SNI 1726:2012 belum memperhitungkan keberadaan sesar tersebut. Oleh karena itu terdapat adanya perbedaan hasil di bagian utara wilayah Malang. Perbedaan ini disebabkan karena penggunaan model sumber gempa *fault*, yaitu keberadaan Sesar Kendeng, sehingga dihasilkan pola wilayah Malang bagian utara memiliki nilai percepatan yang meninggi. Selain itu, keberadaan sesar-sesar lokal di Jawa Timur yang dapat mempengaruhi nilai percepatan di wilayah Malang dilakukan dengan penggunaan model *background*.

Pada penelitian ini didapatkan kurva bahaya gempa untuk beberapa daerah penelitian sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4 dan gambar 5. Daerah penelitian tersebut meliputi Kecamatan Sumbermanjing dan Kecamatan Bumiaji. Kurva *hazard* ini menggambarkan laju terlampauinya parameter terhadap intensitas. Kontribusi dari setiap sumber gempa yang digunakan dapat dijumlahkan satu dengan yang lainnya sebagai hasil akhir untuk mendapatkan kurva bahaya dari parameter yang dipilih. Kurva bahaya gempa pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui kontribusi dari masing-masing sumber gempa yang dominan terjadi.

Kecamatan Sumbermanjing merupakan kecamatan yang berada di wilayah Malang bagian selatan. Kurva bahaya gempa kecamatan ini menunjukkan bahwa nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa subduksi. Daerah ini merupakan daerah yang berada di Malang bagian selatan, di mana sumber gempa yang mendominasi berasal dari sumber gempa subduksi (*megathrust*) yang berada di wilayah selatan Malang. Berbeda dengan Kecamatan Bumiaji yang berada di wilayah Malang bagian utara. Kurva bahaya wilayah Kecamatan Bumiaji menunjukkan nilai *hazard* terbesar adalah dari sumber gempa *fault*. Daerah ini merupakan daerah yang berada di Malang bagian utara, di mana terjadi kenaikan *hazard* gempa di wilayah Malang bagian utara dikarenakan keberadaan sumber gempa *fault*. Sumber gempa *fault* ini paling dominan berasal dari keberadaan Sesar Kendeng.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang dengan Menggunakan Pendekatan Probabilistik dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai percepatan tanah (PGA) dan spektra percepatan di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) untuk wilayah Malang diperoleh rentang nilai percepatan 0.31 – 0.43 g untuk PGA, 0.62 – 0.88 g untuk periode pendek ( $T = 0.2$  detik), dan 0.22 – 0.28 g untuk periode panjang ( $T = 1$  detik)
2. Wilayah Malang bagian selatan dominan dipengaruhi oleh sumber gempa subduksi/megathrust sedangkan untuk wilayah Malang bagian utara terdapat pengaruh dari sumber gempa *fault*
3. Sumber gempa *fault* memberi pengaruh *hazard* untuk wilayah Malang bagian utara, di mana nilai *hazard* ini akibat keberadaan Sesar Kendeng

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. J. Santosa, "Petunjuk Sistem Pelapisan Bumi Dangkal melalui Analisis Seismogram," *J. Fis.*, vol. 7, no. 2, 2011.
- [2] BMKG, "Sejarah Gempa Merusak," 2009.
- [3] A. Susilo, "Probabilistic Seismic Hazard Analysis of East Java Region, Indonesia," *Comput. Electr.*, vol. 5, no. 728, pp. 341–344, 2013.
- [4] A. Koulali *et al.*, "Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc: Crustal strain in the Sunda-Banda Arc. Geophys," *Res. Lett.*, vol. 43, pp. 1943–1949, 2016.
- [5] S. A. Kumala and Wahyudi, "Analisis Nilai PGA (Peak Ground Acceleration) untuk Seluruh Wilayah Kabupaten dan Kota di Jawa Timur," *INERSIA*, vol. 12, pp. 37–43, 2016.
- [6] J. Nugraha, "Analisis Hazard Gempa dan Isoleismal untuk Wilayah Jawa-Bali-NTB," *J. Meteorol. Dan Geofis.*, vol. 15, 2014.
- [7] U. J. Fauzi, "Peta Deagregasi Indonesia Berdasarkan Analisis Probabilitas dengan Sumber Gempa Tiga Dimensi," Bandung, 2011.
- [8] EERI, "The Basic of Seismic Risk Analysis," *Earthq. Spectra*, vol. 5, no. 4, 1989.
- [9] J. A. Katili, "Geotectonic of Indonesia: a Modernview," Bandung.
- [10] D. H. Natawidjaja, "Gempa bumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup yang Aman Dari Bencana Alam," in *Symposium. ITB*, 2007.
- [11] K. R. Newcomb and W. R. McCann, "Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 92, pp. 421–439, 1987.
- [12] M. Irsyam, W. Sengara, F. Aldiamar, S. Widiyantoro, and W. Triyoso, "Ringkasan Hasil Sudi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010," Bandung.
- [13] J. F. Pacheco and L. R. Sykes, "Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989," *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 82, pp. 185–188, 1992.
- [14] B. Gutenberg and C. F. Richter, "Frequency of Earthquakes in California," *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 34, pp. 185–188, 1944.
- [15] B. Sunardi, "Peta Deagregasi Hazard Gempa Wilayah Jawa dan Rekomendasi Ground Motion di Empat Daerah," Yogyakarta, 2013.
- [16] C. A. Cornell, "Engineering Seismic Risk Analysis," *Bull. Seism. Soc. Am.*, pp. 1583–1606, 1968.