

## ANALISIS RELASI ANTARA MAGNITUDO MOMEN GEMPA DAN LUAS BIDANG PATAHAN SUMBER GEMPA

Gandhis Putri Ayudia, Tjipto Prastowo

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: [gandhis.17030224010@mhs.unesa.ac.id](mailto:gandhis.17030224010@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Upaya mitigasi bencana geologi khususnya gempa tektonik di Indonesia dapat dilakukan dengan mempelajari relasi antara parameter gempa dan sumber gempa. Parameter ukuran kekuatan gempa adalah magnitudo sedangkan parameter sumber gempa adalah dimensi patahan yang meliputi luas dan kedalaman bidang patahan. Dalam hal ini, magnitudo gempa diukur dalam skala magnitudo momen  $M_w$  dan dimensi patahan direpresentasikan *rupture area*  $A$  (merupakan perkalian antara *rupture length*  $L$  dan *rupture width*  $W$ ) dan *rupture depth*  $D$ . Fokus penelitian ini adalah relasi antara  $M_w$  dan  $A$  serta mempelajari kemungkinan peran rasio  $L/W$  dan  $D$ . Data penelitian adalah 53 data gempa sebagai data utama dan data tambahan dari kasus gempa di luar negeri dan di Indonesia yang diakses bebas melalui laman <http://eida.gfz-potsdam.de/webdc3> atau <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Mayoritas data utama merupakan gempa tipe *strike-slip* atau *normal* dengan kekuatan  $4,5 \leq M \leq 7,6$  yang relevan dengan tektonik Indonesia. Hasil-hasil penelitian berupa persamaan empiris  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$  dan terapan persamaan empiris tersebut untuk estimasi magnitudo gempa di dalam dan luar Indonesia. Untuk seluruh kasus, penyimpangan estimasi magnitudo relatif terhadap magnitudo referensi adalah  $\Delta \leq 0,1$  dengan standar deviasi pengukuran 0,2 (dianggap tidak signifikan). Meskipun penelitian ini belum berhasil mengungkap korelasi antara  $M_w$  dan dua parameter patahan  $W$  dan  $D$ , namun persamaan empiris temuan penelitian menunjukkan ada korelasi kuat antara magnitudo momen dan luas bidang patahan berupa  $M_w$  sebagai fungsi logaritmik  $A$  yang konsisten dengan temuan penelitian terdahulu. Hasil-hasil penelitian ini diharapkan bisa meningkatkan pemahaman tentang karakteristik gempa tektonik di Indonesia.

**Kata Kunci:** magnitudo momen, luas bidang patahan, dimensi patahan

### Abstract

Efforts in mitigation study for geohazards risk reduction in particularly Indonesian earthquakes were examined using scaling relationship between source and earthquake parameters. Magnitude was a measure of earthquake size and fault dimensions was used as source parameter including rupture area and depth. In this context, earthquake size scaled with moment magnitude  $M_w$  and fault dimensions were represented by rupture area  $A$  (the product of rupture length  $L$  and width  $W$ ) and depth  $D$ . The focus of this study is to develop scaling relationship of  $M_w$  and  $A$  as well as to examine possible roles of ratio  $L/W$  and the depth  $D$ . The data were 53 earthquakes as the primary data and additional cases obtained from occurrences both in overseas and Indonesian territories, accessed at <http://eida.gfz-potsdam.de/webdc3> or <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. The majority of the main data was associated with normal or strike-slip events ranging  $4.5 \leq M \leq 7.5$ , relevant to Indonesian settings. The results are empirical equation  $M_w = 0.50 \ln A + 3.56$  and its application to estimate magnitudes for cases in and outside Indonesia. For all cases considered in this study, magnitude estimates were  $\Delta \leq 0.1$  relatively compared with references with standard deviation of the measurements of only 0.2, considered unimportant. Although this study has not unveiled correlation of  $M_w$  and parameters  $W$  and  $D$ , the equation shows that the magnitude and the area are strongly correlated, namely  $M_w$  is a logarithmic function of  $A$ , consistent with previous work. The results contribute better understanding of characteristics of Indonesian earthquakes.

**Keywords:** moment magnitude, rupture area, fault dimensions

### PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia dikenal sebagai wilayah dengan aktivitas seismo-tektonik yang tinggi (Koulali *et al.*, 2016; Cummins, 2017). Hal ini

karena sistem geologi kepulauan nusantara berada pada pertemuan lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik yang aktif bergerak relatif terhadap yang lain (van Gorsel, 2018). Potensi bahaya bencana gempa dan tsunami memicu kerentanan

wilayah terhadap bencana kebumian ditinjau dari indikator korban jiwa dan kerusakan properti (Irsyam *et al.*, 2017).

Oleh karena gempa adalah sumber pemicu tsunami, maka penelitian ini fokus pada masalah bencana gempa. Oleh karena itu, parameter fisis yang dipelajari adalah yang langsung berhubungan dengan masalah kegempaan. Dalam hal ini, masalah kegempaan yang akan dipelajari adalah relasi antara parameter gempa, yaitu magnitudo yang diukur dengan skala magnitudo momen  $M_w$  dan parameter sumber gempa, yaitu dimensi patahan yang diukur melalui luas bidang patahan  $A$ , panjang patahan  $L$ , lebar patahan  $W$ , dan kedalaman patahan  $D$ .

Magnitudo momen  $M_w$  dipilih karena lebih akurat untuk pengukuran magnitudo dalam semua jangkauan dari kecil sampai besar daripada skala Richter atau yang lain. Penelitian ini mengikuti penelitian terdahulu (Wells and Coppersmith, 1994; Hanks and Bakun, 2002; Shaw, 2009; Konstantinou, 2014) dengan fokus perhatian adalah relasi antara magnitudo momen  $M_w$  dan luas bidang patahan  $A$ .

Luas bidang patahan dan magnitudo momen gempa adalah parameter sebab-akibat. Oleh karena itu, wajar bila penelitian terdahulu (Wu *et al.*, 2013; Konstantinou, 2014; Goda *et al.*, 2016; Thingbaijam *et al.*, 2017; Julius *et al.*, 2018) membahas topik *rupture area-moment magnitude scaling relationship* dalam bentuk persamaan empiris  $M_w$  sebagai fungsi logaritmik  $A$  yang bisa diperoleh dari data statistik gempa. Dimensi patahan ditentukan dari hasil pemodelan sumber, misalnya kasus gempa tektonik di luar Indonesia (Yen and Ma, 2011; Murotani *et al.*, 2015; Irikura *et al.*, 2017) dan yang terjadi di wilayah Indonesia (Ratnasari *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020).

Meskipun telah banyak publikasi penelitian tentang *earthquake scaling relationships*, namun masih sedikit yang melaksanakan penelitian dengan topik seperti ini di Indonesia, terutama yang memanfaatkan data gempa yang masif di seluruh dunia namun relevan dengan situasi dan kondisi geologi Indonesia, di mana banyak gempa dipicu *fault movement* (Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2017). Dalam konteks mitigasi bencana dan pengurangan risiko bencana geologi dalam koridor aspek hulu bencana, maka

penelitian ini mendiskusikan relasi fisis antara  $M_w$  dan  $A$ . Dua pertanyaan penelitian yang akan dijawab adalah bentuk eksplisit persamaan empiris  $M_w$  terhadap  $A$  dan tingkat akurasi prediksi persamaan empiris tersebut jika diterapkan untuk kasus gempa baik di luar negeri maupun di Indonesia.

Berikut ini adalah beberapa model matematis yang mendiskripsikan relasi fisis antara  $M_w$  dan  $A$ .

### Model Wells and Coppersmith

Dengan memanfaatkan 148 *earthquakes datasets*, Wells and Coppersmith (1994) mendiskripsikan relasi fisis antara momen magnitudo  $M_w$  dan luas bidang patahan  $A$  dalam bentuk persamaan empiris sebagai berikut,

$$M_w = 0,98 \log A + 4,07 \quad (1)$$

Persamaan (1) tersebut di atas berlaku tanpa dipengaruhi oleh distribusi lokasi episenter (variasi kondisi geologi dan lokasi geografis) dan tipe gempa (*normal*, *strike-slip*, atau *reverse faulting*) yang merefleksikan kondisi tektonik. Menurut Konstantinou (2014), persamaan tersebut valid untuk gempa  $4,7 \leq M_w \leq 8,6$  yang menunjukkan bahwa keberlakuannya menjangkau *moderate to large events*.

### Model Hanks and Bakun

Model ini fokus pada *strike-slip earthquakes* dan peran luas bidang patahan terhadap estimasi magnitudo. Ketidakesesuaian estimasi magnitudo yang relatif besar untuk gempa besar berkorelasi langsung dengan nilai  $A$  dan parameter *stress-drop*, yaitu ukuran seberapa besar pelepasan energi seismik saat gempa. Oleh karena itu, Hanks and Bakun (2002) kemudian mendiskripsikan relasi antara  $M_w$  dan  $A$  berdasarkan kedua parameter tersebut. Untuk gempa yang dipicu oleh dinamika patahan dengan  $A \leq 537 \text{ km}^2$  dan *stress-drop* konstan, persamaan empiris ditemukan berbentuk

$$M_w = \log A + 3,98 \quad (2)$$

Persamaan (2) tersebut akurat untuk *moderate events* dengan skala magnitudo  $\leq 6,71$  (Hanks and Bakun, 2002). Sedangkan untuk gempa besar dengan  $A > 537 \text{ km}^2$  dan *stress-drop* yang variabel, persamaan empiris berbentuk

$$M_w = 1,33 \log A + 3,07 \quad (3)$$

Data statistik gempa memberikan konfirmasi keberlakuan persamaan (3) tersebut akurat untuk *adequately large events* dengan magnitudo  $> 6,71$

(Hanks and Bakun, 2002).

### Model Shaw

Berbeda dengan model sebelumnya, Shaw (2009) berpendapat bahwa relasi  $M_w$  dan  $A$  untuk semua jangkauan magnitudo dan luas bidang patahan dapat didiskripsikan oleh rumusan tunggal. Dengan demikian, tidak diperlukan lagi pembagian persamaan empiris berdasarkan kisaran harga  $A$  dan *stress-drop* seperti pada persamaan (2) dan (3). Menurut Shaw (2009; 2013), persamaan empiris relasi  $M_w$  dan  $A$  adalah sebagai berikut,

$$M_w = \log A + f(A, W, \beta) + \text{konstanta} \quad (4)$$

dengan  $f$  adalah fungsi yang nilainya ditentukan oleh  $A$ ,  $W$ , dan  $\beta$  (*fitting parameter*) yang ditentukan berdasarkan data statistik gempa (Shaw, 2013).

Menurut Shaw (2013), persamaan empiris (4) bisa saja berubah menjadi persamaan model Hanks and Bakun, bergantung pada *data fitting*,  $\beta \rightarrow \infty$  dan nilai konstanta yang telah ditentukan. Sebagai contoh, bila persamaan (4) diberlakukan pada *small events* dengan magnitudo  $\leq 7,0$  maka konstanta pada persamaan (4) tersebut harus diganti dengan bilangan tetap 3,98. Poin penting yang dikandung oleh persamaan (4) adalah  $W$  menjadi parameter dinamik yang ikut menentukan  $M_w$ .

Variasi *stress-drop* yang relatif kecil atau konstan dari 53 data gempa Konstantinou (2014) adalah alasan mengapa model ini diklaim berbeda dengan model Hanks and Bakun. Gempa dengan variasi *stress-drop* yang besar biasa ditemui di wilayah daratan dengan kondisi geologi dan tektonik yang didominasi oleh *reverse fault* atau ditemui sepanjang zona subduksi.

Mekanisme rincian perhitungan dimensi patahan (luas bidang, panjang, dan lebar) dan momen seismik dari 53 data gempa Konstantinou (2014) diambil dari beberapa sumber yang ditulis di dalam suplemen elektronik khusus, di mana peneliti tidak mendapatkan hak akses terhadap data tersebut. Konstantinou (2014) hanya menyebutkan bahwa hasil analisis spektral digunakan untuk menentukan standar deviasi dari variasi momen seismik, jika ada, untuk satu kejadian gempa yang sama. Hal ini dapat dipahami mengingat studi Konstantinou (2014) mengandalkan parameter gempa yang diperoleh

### Model Konstantinou

Konstantinou (2014) membahas aktivitas seismik di wilayah daratan Mediterania yang didominasi oleh gempa tipe *strike-slip* dan *normal* dengan kekuatan sekitar  $M_w$  6,5. Gempa seperti ini biasanya dipicu oleh dinamika patahan yang tersebar di wilayah daratan Indonesia dan dilaporkan oleh Irsyam *et al.* (2017) sebagai sumber potensial pemicu gempa tektonik sepanjang zona subduksi. Relevansi inilah yang menjadi alasan 53 data gempa Konstantinou (2014) digunakan sebagai data utama dalam penelitian ini.

Konstantinou (2014) mengambil pokok pikiran dasar model Hanks and Bakun yang menyatakan bahwa sampai batas tertentu magnitudo momen gempa bergantung pada luas bidang patahan. Oleh karena itu, Konstantinou (2014) mendiskripsikan relasi  $M_w$  dan  $A$  secara terpisah menjadi dua persamaan empiris, yaitu

$$M_w = \log A + 3,82 \quad \text{untuk } A \leq 251 \text{ km}^2 \quad (5)$$

dan

$$M_w = 1,33 \log A + 3,07 \quad \text{untuk } A > 251 \text{ km}^2 \quad (6)$$

dengan variasi *stress-drop* yang relatif kecil sehingga dapat diasumsikan relatif konstan.

langsung dari model *seismic faulting*.

Berbeda dengan model seismik tersebut di atas, model *tsunami faulting* menggunakan analisis *travel time* untuk memilih *P-wave arrival times* dengan bantuan filter frekuensi tinggi untuk mendapatkan parameter tsunami yang diinginkan, misalnya besaran periode dominan dan durasi *rupture*. Namun demikian, kedua parameter tersebut tidak dibahas secara rinci dalam penelitian ini karena tidak dibutuhkan untuk menurunkan persamaan empiris antara magnitudo momen  $M_w$  dan luas bidang patahan  $A$ .

### METODE

Rasionalitas 53 data gempa Konstantinou (2014) sebagai data utama penelitian ini adalah selain mewakili magnitudo dari skala menengah sampai besar, juga karena *strike-slip* dan *normal-faulting* adalah tipe gempa yang paling umum dijumpai di Indonesia (Irsyam *et al.*, 2017). Prediksi Irsyam *et al.* (2017) adalah aktivitas

patahan akan semakin sering terjadi di Indonesia yang bisa memicu gempa dengan magnitudo  $M_w \geq 7,5$ . Oleh karena itu, persamaan empiris temuan penelitian ini diterapkan untuk gempa di dalam dan luar Indonesia sampai  $M_w \approx 9,0$ .

Data tambahan diperoleh dari beberapa paper yang sebagian besar telah dipublikasikan di jurnal internasional terindeks Scopus dan Schimago yang berkategori Q1 dan Q2 (daftar lengkap referensi pada Daftar Pustaka). Sumber data lain juga diperoleh dari beberapa laman yang kredibel yang dapat diakses di <http://eida.gfz-potsdam.de/webdc3> dan <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah luas bidang patahan  $A$  atau  $\ln A$  sedangkan variabel respons adalah magnitudo momen  $M_w$ . Variabel kontrol adalah persamaan empiris yang diperoleh dari 53 data statistik gempa Konstantinou (2014) untuk estimasi magnitudo.

Dengan bantuan *spreadsheet*, analisis data dan plot dilakukan untuk membuat grafik dan persamaan empiris yang mendeskripsikan relasi antara magnitudo momen  $M_w$  dan luas bidang patahan  $A$  atau  $\ln A$  berbasis data utama. Data tambahan untuk kasus di dalam dan luar Indonesia akan dianalisis dengan meletakkan data tambahan tersebut pada plot  $M_w$  terhadap  $A$  atau  $\ln A$ . Analisis dilakukan dengan menghitung penyimpangan estimasi magnitudo (diberi simbol  $\Delta$  dalam teks ini) relatif terhadap magnitudo referensi. Selain itu, analisis dilakukan dengan menghitung standar deviasi pengukuran magnitudo (STD).

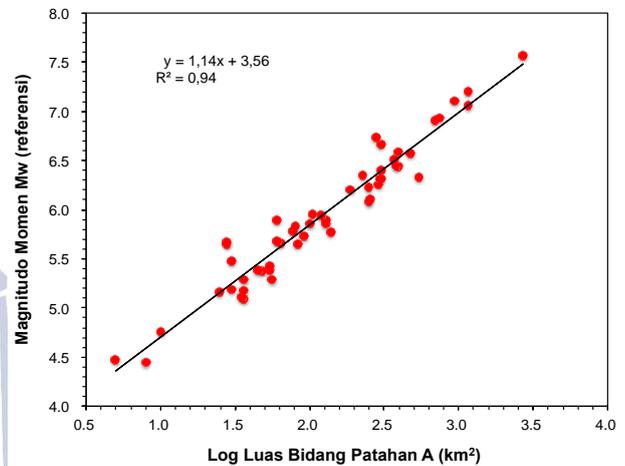
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian dikelompokkan menjadi dua, yaitu data utama (Konstantinou, 2014) dan data tambahan (gempa di luar negeri dan di Indonesia). Masing-masing dibahas terpisah sebelum dilakukan analisis menyeluruh.

### Data Utama

Dalam penelitian ini, data utama adalah 53 gempa Konstantinou (2014) yang merupakan representasi dari gempa tektonik dengan mayoritas bertipe *strike-slip* atau *normal* dengan berkekuatan  $4,5 \leq M_w \leq 7,6$ . Gempa yang dipicu aktivitas patahan aktif dengan mekanisme seperti

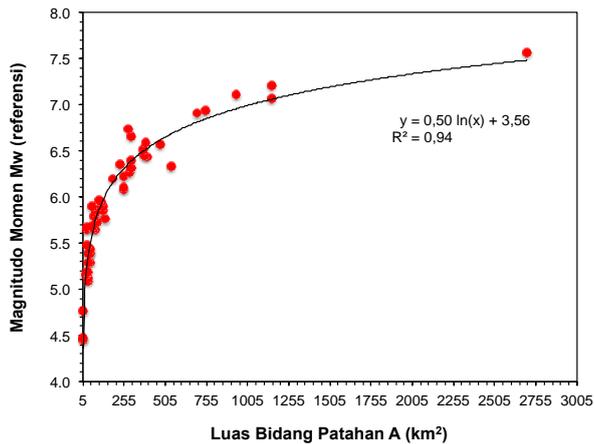
ini sering terjadi di Indonesia. Plot magnitudo referensi  $M_w$  terhadap logaritma luas bidang patahan  $\log A$  dapat dilihat pada Gambar 1. Fokus perhatian pada Gambar 1 adalah melihat apakah grafik  $M_w$  terhadap  $\log A$  memberikan penjelasan yang masuk akal secara fisis.



**Gambar 1.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap logaritma luas bidang patahan  $\log A$  untuk 53 data utama.

Gambar 1 di atas jelas menggambarkan linieritas magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap nilai logaritma luas bidang patahan  $\log A$ . Meskipun tidak ada yang salah dengan gambar tersebut, namun visualisasi 53 data gempa jelas tidaklah mungkin secara fisis. Regresi linier grafik pada Gambar 1 memungkinkan magnitudo momen berharga berapa saja. Menurut sejarah kegempaan, tidak pernah ada gempa dengan kekuatan magnitudo momen  $M_w \geq 9,5$ . Oleh karena itu, grafik yang cocok dengan batasan fisis seperti itu haruslah grafik dengan nilai saturasi untuk  $M_w$  meskipun  $A$  terus meningkat. Dengan demikian, alih-alih  $\log A$ , maka luas bidang patahan  $A$  lebih baik berfungsi sebagai sumbu horisontal. Plot  $M_w$  terhadap  $A$  dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.

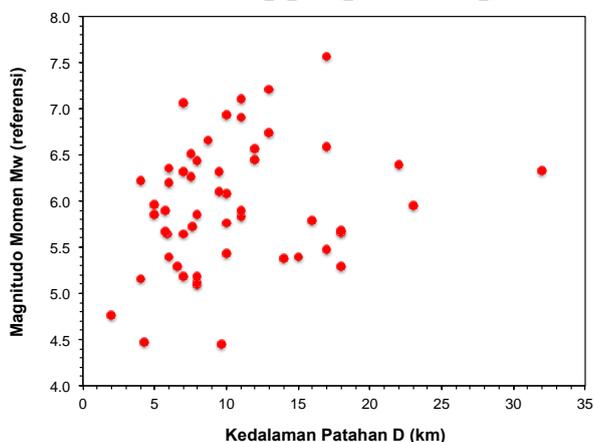
## Analisis Relasi Antara Magnitudo Momen Gempa dan Luas Bidang Patahan Sumber Gempa



**Gambar 2.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap luas bidang patahan  $A$  untuk 53 data utama.

Gambar 2 menunjukkan  $M_w$  adalah fungsi logaritma dari  $A$  yang sesuai dengan temuan terdahulu (Wells and Coppersmith, 1994; Hanks and Bakun, 2002; Shaw, 2009). Bentuk grafik tersebut jelas menunjukkan saturasi nilai  $M_w$  untuk  $A$  yang semakin besar dan sesuai dengan sensibilitas dan intuisi fisis. Oleh karena itu, acuan bentuk grafik yang reliabel untuk mendiskripsikan relasi antara  $M_w$  dan  $A$  adalah Gambar 2. Berdasarkan hal ini, maka persamaan regresi yang diperoleh dari *data fitting* pada grafik tersebut disebut dengan persamaan empiris,  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ . Persamaan empiris tersebut menjadi basis perhitungan magnitudo momen gempa dalam penelitian ini.

Sebelum pembahasan dilanjutkan menuju paparan data tambahan dalam penelitian ini, berikut ini adalah beberapa grafik yang mendiskripsikan relasi antara  $M_w$  dan  $D$  (Gambar 3), relasi antara  $M_w$  dan  $W$  (Gambar 4), dan relasi antara  $M_w$  dan  $L$  (Gambar 5).

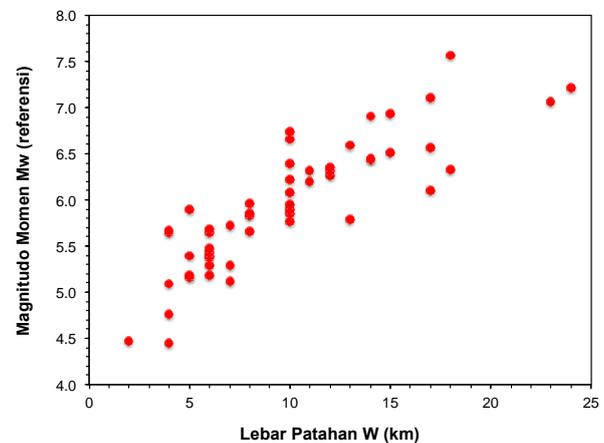


**Gambar 3.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$

terhadap kedalaman patahan  $D$  untuk 53 data utama.

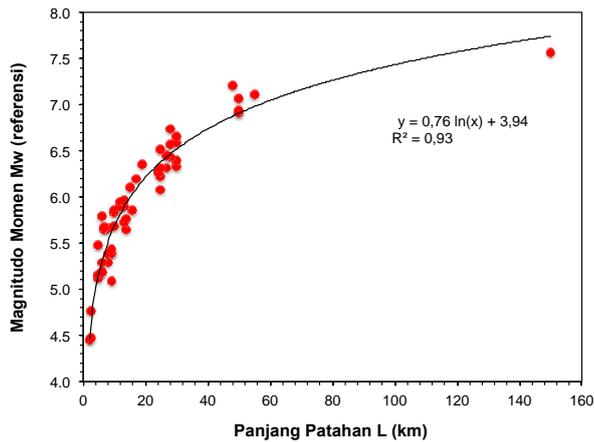
Gambar 3 jelas menceritakan pola sebaran data yang tidak beraturan dan diinterpretasikan sebagai tidak ada relasi fisis yang cocok antara momen magnitudo  $M_w$  dan kedalaman patahan  $D$ . Oleh karena itu, besaran  $D$  tidak bisa digunakan sebagai parameter *scaling* terhadap  $M_w$ .

Gambar 4 di bawah menceritakan pola sebaran data yang ambigu (keraguan antara pola linier dan logaritmik). Pola ambigu diinterpretasikan sebagai tidak ada relasi fisis yang pasti dan cocok antara momen magnitudo  $M_w$  dan lebar patahan  $W$ . Oleh karena itu, seperti halnya dengan kedalaman  $D$ , maka  $W$  tidak bisa digunakan sebagai parameter *scaling* terhadap  $M_w$ .



**Gambar 4.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap lebar patahan  $W$  untuk 53 data utama.

Gambar 5 di bawah menceritakan pola sebaran data yang tidak lagi ambigu karena titik terjauh pada gambar menunjukkan pola logaritmik antara magnitudo momen  $M_w$  dan panjang patahan  $L$ . Nilai koefisien korelasi sebesar 0,93 yang tergolong sangat baik karena menunjukkan korelasi yang sangat kuat memberi tambahan dukungan. Hal ini diinterpretasikan sebagai ada relasi fisis yang cocok antara  $M_w$  dan  $L$ . Oleh karena itu, besaran  $L$  bisa berfungsi dan bisa digunakan sebagai parameter *scaling* terhadap  $M_w$  (Wu *et al.*, 2013; Thingbaijam *et al.*, 2017).



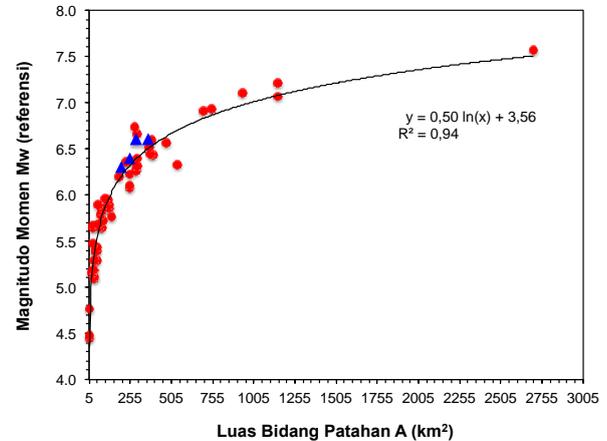
**Gambar 5.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap panjang patahan  $L$  untuk 53 data utama.

Berdasarkan keteraturan pola sebaran data gempa pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5, maka pilihan luas bidang patahan  $A$  menjadi parameter *scaling* terhadap  $M_w$  di mana  $A$  didefinisikan sebagai perkalian antara  $L$  dan  $W$  adalah masuk akal. Argumen yang digunakan sebagai pendukung pernyataan ini adalah temuan terdahulu yang disarikan pada Table 1, Thingbaijam *et al.* (2017), di mana koefisien korelasi terbesar selalu diperoleh bila  $A$  diambil sebagai parameter *scaling* terhadap  $M_w$ . Argumen kedua merupakan alasan praktis karena penelitian ini mengikuti penelitian terdahulu (Wells and Coppersmith, 1994; Hanks and Bakun, 2002; Shaw, 2009; 2013; Konstantinou, 2014). Dengan kedua argumen tersebut, maka acuan penelitian ini adalah perhitungan magnitudo berbasis persamaan empiris  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$  yang diturunkan dari 53 data utama (Konstantinou 2014) seperti terlihat pada Gambar 2.

**Data Tambahan**

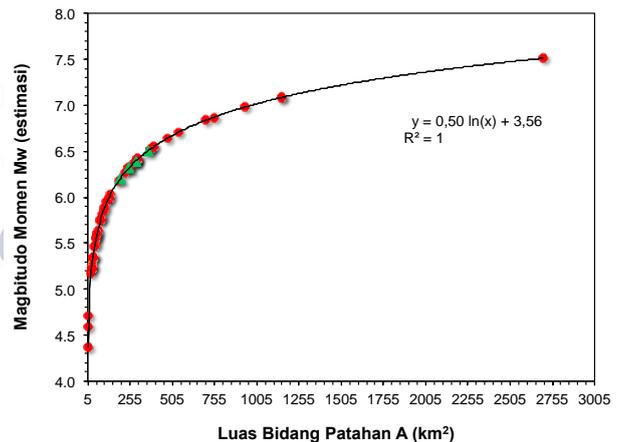
Sejumlah 51 data tambahan (7 gempa di Indonesia dan 44 kejadian di luar negeri) dengan variasi lokasi, magnitudo dan tipe gempa telah dikumpulkan untuk menguji akurasi estimasi magnitudo berbasis persamaan empiris temuan penelitian ini,  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ . Untuk kemudahan pengamatan visual, maka data tambahan gempa Indonesia akan dibahas terlebih dahulu daripada gempa di luar negeri. Dari 7 data gempa di Indonesia, hanya 4 kasus yang ditambahkan pada plot Gambar 2 agar bentuk grafik relatif tetap tidak berubah untuk kemudahan pembelajaran. Keempat kasus tersebut adalah gempa tipe *strike-slip* berpusat di

wilayah utara Sumatera tahun 2007, 2009, dan 2016 dengan kekuatan berturut-turut  $M_w$  6,30,  $M_w$  6,40,  $M_w$  6,60 dan  $M_w$  6,60 (Salman *et al.*, 2020) yang dapat dilihat sebagai segitiga biru pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap luas bidang patahan  $A$  untuk 53 data utama dan 4 kasus gempa *strike-slip* di Indonesia (segitiga biru).

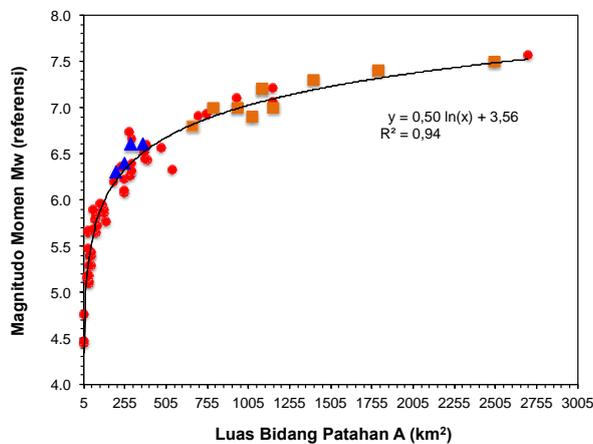
Untuk melihat level akurasi estimasi magnitudo berbasis persamaan empiris temuan penelitian ini, maka semua kejadian gempa pada Gambar 6 tersebut di atas dihitung magnitudo momennya dengan persamaan empiris  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ . Kemudian, hasil-hasil perhitungan magnitudo momen tersebut dibuatkan plot pada Gambar 7. Dengan membandingkan plot Gambar 6 dan Gambar 7, prakiraan level akurasi estimasi magnitudo bisa diperoleh.



**Gambar 7.** Plot magnitudo momen estimasi  $M_w$  terhadap luas bidang patahan  $A$  untuk 53 data utama dan 4 kasus gempa *strike-slip* di Indonesia (segitiga hijau).

Gambar 7 di atas memberi penjelasan

seluruh data gempa dengan magnitudo estimasi baik 53 data utama (Konstantinou, 2014) maupun 4 kasus gempa Indonesia jatuh persis pada lengkung grafik  $y = 0,50 \ln x + 3,56$  yang merepresentasikan persamaan empiris penelitian ini, yaitu  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ . Persamaan lengkung grafik yang sama terlihat pada Gambar 6. Analisis sederhana melibatkan kedua gambar tersebut memberikan tafsiran sebagai berikut: segitiga hijau (magnitudo estimasi  $M_{est}$ ) gempa Indonesia berada pada posisi yang tidak jauh dari segitiga biru (magnitudo referensi  $M_{ref}$ ). Secara implisit, hal ini berarti tidak ada perbedaan yang signifikan antara  $M_{est}$  dan  $M_{ref}$  untuk kasus gempa di Indonesia. Langkah yang sama dilakukan untuk gempa di luar Indonesia.

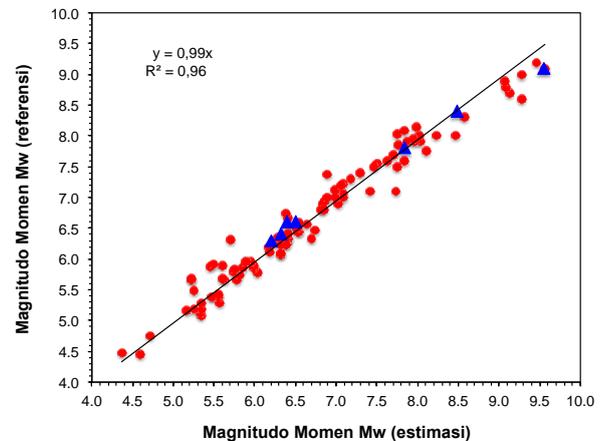


**Gambar 8.** Plot magnitudo momen referensi  $M_w$  terhadap luas bidang patahan  $A$  untuk 53 data utama, 4 kasus gempa *strike-slip* di Indonesia (segitiga biru), dan 9 kasus gempa di luar negeri (kotak coklat).

Dengan alasan yang sama seperti pada kasus gempa di Indonesia, tidak seluruh gempa di luar negeri dibuat plot agar bentuk grafik fungsi logaritmik tetap dipertahankan. Dari 44 data gempa luar negeri, 9 kasus gempa dipilih untuk ditambahkan pada Gambar 6. Hasil penambahan ini dapat dilihat pada Gambar 8 di atas, di mana beberapa estimasi magnitudo  $M_{est}$  ternyata sama persis dengan nilai magnitudo referensi  $M_{ref}$ . Hal ini ditunjukkan langsung oleh beberapa simbol kotak coklat yang berada persis pada lengkung grafik  $y = 0,50 \ln x + 3,56$ .

Untuk membuktikan level akurasi yang relatif tinggi dari perhitungan magnitudo momen berbasis persamaan empiris  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ , maka dibuat plot antara  $M_{ref}$  terhadap  $M_{est}$

seperti terlihat pada Gambar 9 untuk total 104 data gempa dalam penelitian ini. Fokus perhatian adalah relasi matematis antara magnitudo referensi  $M_{ref}$  terhadap magnitudo estimasi  $M_{est}$ .



**Gambar 9.** Plot magnitudo momen referensi  $M_{ref}$  terhadap magnitudo momen estimasi  $M_{est}$  untuk total 97 data gempa di luar negeri yang terdiri dari 53 data utama penelitian dan 44 kasus gempa tambahan (lingkaran merah) serta 7 kasus gempa di Indonesia (segitiga biru).

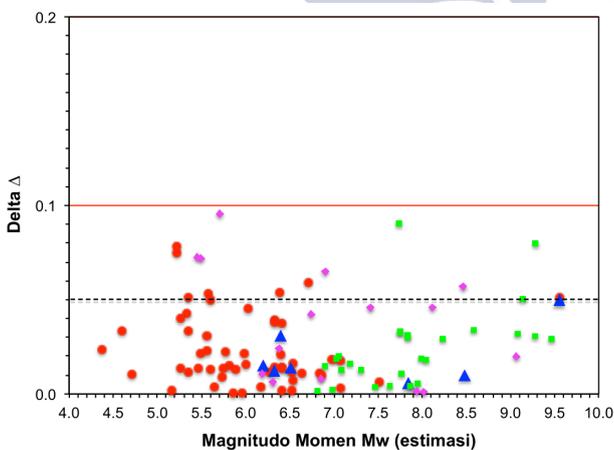
Gambar 9 menunjukkan secara jelas ada hubungan linieritas antara  $M_{ref}$  dan  $M_{est}$ . Dengan persamaan regresi linier  $y = 0,99 x$  dan koefisien korelasi sebesar 0,96 yang tergolong bagus atau berkorelasi sangat kuat, maka secara eksplisit persamaan itu membuktikan bahwa  $M_{est}$  yang diperoleh dari persamaan empiris  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$  tidak berbeda signifikan dengan  $M_{ref}$  sebagai referensi magnitudo gempa yang diberikan oleh lembaga kredibel (USGS, NOAA, Global CMT Catalog).

Sampai dengan tahap ini, khususnya Gambar 9 telah mampu menjawab salah satu pertanyaan penelitian yaitu  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$  adalah bentuk eksplisit persamaan empiris relasi antara  $M_w$  dan  $A$ . Fitur utama yang bisa dipelajari dari Gambar 9 adalah mayoritas data berada pada jangkauan magnitudo  $5,0 \leq M \leq 8,0$ . Hal ini berarti keberlakuan persamaan empiris tersebut adalah efektif untuk gempa berskala menengah (*moderate earthquakes*) sampai *adequately large events* apapun mekanisme gempa apakah *strike-slip* ataukah *dip-slip* (*normal* atau *reverse*).

Untuk *data points* dengan kekuatan  $M \geq 8,0$  (biasa dipenuhi oleh *interplate earthquakes*) jelas menunjukkan bahwa  $M_{est} \geq M_{ref}$  yang disebut dengan *overestimate*. Bagaimanapun, persamaan

$M_w = 0,50 \ln A + 3,56$  dapat digunakan untuk estimasi magnitudo gempa Indonesia dengan skala dari *moderate to adequately large events*. Persamaan empiris temuan penelitian ini juga menegaskan temuan penelitian terdahulu, yaitu  $M_w$  merupakan fungsi logaritmik  $A$  (Wells and Coppersmith, 1994; Hanks and Bakun, 2002; Shaw, 2009; 2013; Konstantinou, 2014). Meskipun penelitian terkini (Das *et al.*, 2019) mengajukan klaim metode penentuan magnitudo momen gempa yang lebih teliti dan berlaku universal untuk gempa kecil sampai gempa besar, namun sampai sekarang skala  $M_w$  masih dipandang sebagai skala magnitudo yang paling akurat. Oleh karena itu, temuan penelitian ini masih relevan.

Bagian akhir diskusi pada artikel ini fokus untuk menjawab pertanyaan penelitian tentang akurasi prediksi persamaan empiris tersebut jika diterapkan untuk kasus gempa baik di luar negeri maupun di Indonesia. Untuk itu, besaran tak bersatuan  $\Delta$  didefinisikan dalam penelitian ini sebagai perbedaan relatif antara magnitudo momen hasil estimasi berbasis persamaan empiris temuan penelitian ini  $M_{est}$  dan magnitudo referensi  $M_{ref}$ . Besaran  $\Delta$  merupakan parameter penyimpangan hasil estimasi.



**Gambar 10.** Plot besaran tak bersatuan  $\Delta$  (didefinisikan dalam teks) terhadap magnitudo momen estimasi  $M_{est}$  yang menunjukkan mayoritas  $M_{est}$  memiliki kesalahan relatif rata-rata  $< 5\%$  dari nilai magnitudo referensi.

Gambar 10 di atas memberikan plot  $\Delta$  terhadap  $M_{est}$  di mana lingkaran merah menunjukkan 53 data utama, segitiga biru adalah 7 kasus gempa Indonesia, dan simbol berwarna lain adalah 44 data tambahan di luar negeri. Garis

horizontal merah menunjukkan batas maksimum kesalahan hitung  $M_{est}$  terhadap  $M_{ref}$ . Dengan kata lain, untuk 104 data gempa berlaku  $\Delta \leq 0,1$ . Garis horizontal hitam putus-putus adalah  $\Delta = 0,05$ . Karena mayoritas data berada di bawah garis hitam ini, maka kesalahan relatif rata-rata hasil hitung  $M_{est}$  adalah kurang dari 0,05 atau 5%. Kesalahan relatif rata-rata sebesar ini dianggap kecil dan bisa diterima sebagai sebuah ketakpastian pengukuran.

Parameter penyimpangan hasil ukur yang lain adalah standar deviasi pengukuran (STD). Nilai STD bisa dihitung dengan mempertimbangkan bahwa 104 data gempa dalam penelitian ini merupakan data tunggal. Estimasi STD dilakukan dengan metode ‘uji berpasangan’  $M_{est}$  dan  $M_{ref}$ , yaitu dengan menerapkan rumusan berikut,

$$STD = \sqrt{(x^2)_{ave} - (x_{ave})^2} \quad (7)$$

di mana parameter  $x$  adalah selisih nilai  $M_{est}$  dan  $M_{ref}$  yang bisa berharga positif atau negatif atau 0. Berdasarkan total 104 data gempa, maka diperoleh STD sebesar 0,2 (dibulatkan sampai 1 desimal). Besaran STD inilah yang sering dilaporkan dalam laporan pengukuran, khususnya bila melakukan estimasi besaran fisis tertentu dengan hasil yang akan dibandingkan dengan referensi. Perlu diketahui juga di sini bahwa STD merupakan nilai tunggal hasil perhitungan statistik untuk sekumpulan data numerik. Berbeda dengan STD,  $\Delta$  bukan merupakan nilai tunggal hasil perhitungan statistik (bisa dilihat dari sebaran simbol berwarna pada Gambar 10).

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini menganalisis relasi matematis antara luas bidang patahan sumber gempa dan magnitudo gempa. Acuan yang digunakan adalah hasil penelitian terdahulu yang relevan, di mana  $M_w$  merupakan fungsi logaritmik  $A$  (Wells and Coppersmith, 1994; Hanks and Bakun, 2002; Shaw, 2009). Dengan 53 data gempa (Konstantinou, 2014), sebagai data utama penelitian, di mana sebagian besar adalah gempa tipe *normal* dan *strike-slip* dengan kekuatan  $4,5 \leq M \leq 7,6$  yang relevan dengan tektonik Indonesia, peneliti memperoleh relasi berikut  $M_w = 0,50 \ln A + 3,56$ . Persamaan empiris tersebut

menceritakan  $M_w$  merupakan fungsi logaritmik  $A$  yang digunakan untuk menghitung magnitudo gempa di dalam dan luar wilayah Indonesia. Untuk total 104 kasus yang dipelajari dalam penelitian ini, estimasi magnitudo berbasis persamaan empiris tersebut menunjukkan penyimpangan  $\Delta \leq 0,1$  dibandingkan dengan magnitudo referensi dan STD sebesar 0,2 (diasumsikan tidak signifikan). Hal ini berarti bahwa persamaan empiris tersebut di atas bisa digunakan untuk penentuan magnitudo momen gempa di Indonesia secara akurat, terutama untuk gempa dengan kekuatan skala menengah. Dalam praktek kegempaan, di mana magnitudo momen gempa biasanya ditetapkan secara cepat pasca kejadian gempa (kemudian diperbaharui untuk meningkatkan level akurasi laporan), maka persamaan empiris tersebut di atas dapat digunakan untuk membatasi dimensi *rupture area* bagi para pemodel yang bergerak dalam bidang *source parameter modeling*.

#### Saran

Penelitian ini belum mampu mengungkap peran  $L/W$  dan  $D$  pada penentuan akurasi estimasi magnitudo. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya bisa fokus pada uji parameter  $L$  atau  $W$  atau  $D$  yang lebih potensial memicu gempa skala besar. Selain itu, penelitian selanjutnya bisa juga mempelajari relasi antara parameter  $L$  atau  $W$  atau  $D$  dan momen seismik  $M_0$  dengan fokus pada pertanyaan bentuk eksplisit *scaling relationship*.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Tim Penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak atas ketersediaan data sekunder dalam penelitian ini. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada *reviewers* yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction—introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 1-7.

Das, R., Sharma, M. L., Wason, H. R., Choudhury, D. and Gonzalez, G. 2019. A seismic moment magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 4, pp. 1542-1555.

Goda, K., Yasuda, T., Mori, N. and Maruyama, T. 2016. New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulation. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 58, No. 3, 1650010(1-40).

Hanks, T. C. and Bakun, W. H. 2002. A bilinear source-scaling model for M-log A observations of continental earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 1841-1846.

Irikura, K., Miyakoshi, K., Kamae, K., Yoshida, K., Somei, K., Kurahashi, S. and Miyake, H. 2017. Applicability of source scaling relations for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets, and Space*, Vol. 69, No. 10, pp. 1-13.

Irsyam, M. I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D. dan Faizal, L. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. pp. 1-376. Bandung: Penerbit Pusat Studi Gempa Nasional dan Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR.

Julius, A. M., Pribadi, S. and Muzli, M. 2018. Correlation equation of fault size, moment magnitude, and height of tsunami case study: historical tsunami database in Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 132, No. 012012.

Konstantinou, K. I. 2014. Moment magnitude-rupture area scaling and stress-drop variations for earthquakes in the Mediterranean region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 5, pp. 2378-2386.

Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J. and Syafi'I, M. A. 2016. Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 1943-1949.

Murotani, S., Matsushima, S., Azuma, T., Irikura, K. and Kitagawa, S. 2015. Scaling relations of source

- parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault systems. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 1371-1381.
- Ratnasari, R. N., Tanioka, Y. and Gusman, A. R. 2020. Determination of source models appropriate for tsunami forecasting: application to tsunami earthquakes in central Sumatra, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 2551-2562.
- Salman, R., Lindsey, E. O., Feng, L., Bradley, K., Wei, S., Wang, T., Daryono, M. R. and Hill, E. M. 2020. Structural controls on rupture extent of recent Sumatran Fault Zone earthquakes, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 125, Issue 2, pp. 1-19.
- Shaw, B. E. 2009. Constant stress drop from small to great earthquakes in magnitude-area scaling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 2A, pp. 871-875.
- Shaw, B. E. 2013. Earthquake surface slip-length data is fit by constant stress drop and is useful for seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2A, pp. 876-893.
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M. and Goda, K. 2017. Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2225-2246.
- van Gorsel, J. T. 2018. *Bibliography of the geology of Indonesia and surrounding areas: Java, Madura, Java Sea*, Ed. 7.0. pp. 1-297.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.
- Wu, W. N., Zhao, L. and Wu, Y. M. 2013. Empirical relationships between aftershock zone dimensions and moment magnitude for plate boundary earthquakes in Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 1, pp. 424-436.
- Yen, Y-T. and Ma, K-F. 2011. Source-scaling relationship for  $M$  4.6-8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 464-481.