

## ANALISIS RELASI MOMEN SEISMIK DAN MAGNITUDO MOMEN UNTUK VARIASI KEDALAMAN SUMBER GEMPA TEKTONIK (SHALLOW, INTERMEDIATE, AND DEEP SOURCES)

Qonitah Salsabillah, Tjipto Prastowo

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

Email: [qonitah.18068@mhs.unesa.ac.id](mailto:qonitah.18068@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Karakteristik gempa dapat dipelajari melalui relasi antara parameter-parameter sumber. Dua parameter sumber yang berfungsi sebagai ukuran kekuatan gempa adalah magnitudo momen  $M_w$  dan momen seismik  $M_o$ . Penelitian ini fokus pada analisis relasi empiris  $M_w - M_o$  untuk variasi kedalaman: *shallow* (0-100 km), *intermediate* (100-300 km), dan *deep* (> 300 km) *sources*. Data penelitian adalah 242 gempa tektonik yang diperoleh dari berbagai sumber reliabel (publikasi internasional) baik *intraplate* maupun *interplate events* yang terjadi di seluruh dunia, termasuk Indonesia antara 1905-2016 dengan magnitudo antara  $4,45 \leq M_w \leq 9,20$ . Hasil penelitian berupa persamaan empiris untuk setiap kedalaman sumber,  $M_w = 0,287 \ln M_o + 5,952$  (*shallow sources*),  $M_w = 0,290 \ln M_o + 6,047$  (*intermediate sources*) dan  $M_w = 0,285 \ln M_o + 5,816$  (*deep sources*). Ketiga persamaan tersebut bersifat *self-consistent* karena merepresentasikan relasi empiris  $M_w - M_o$  dengan bentuk grafik yang sama. Nilai koefisien  $\ln M_o$  untuk ketiga persamaan tidak berbeda sampai dengan desimal kedua sedangkan variasi kecil nilai konstanta tidak memberikan informasi yang jelas tentang perbedaan antara ketiga sumber gempa. Relasi empiris  $M_w - M_o$  yang diperoleh dari penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu, yaitu  $M_w$  merupakan fungsi logaritmik  $M_o$ . Selain temuan tersebut, penelitian ini juga menemukan distribusi mayor kedalaman sumber adalah kurang dari 20 km (*shallow sources*), antara 100-200 km (*intermediate sources*), dan 550-600 km (*deep sources*). Temuan ini konsisten dengan karakteristik seismisitas global. Hasil-hasil penelitian ini memberikan pemahaman tentang relasi  $M_w - M_o$  yang bersifat universal (tidak bergantung pada kedalaman sumber gempa) dan global (tidak bergantung pada lokasi kejadian gempa).

**Kata Kunci:** magnitudo momen, momen seismik, relasi empiris  $M_w - M_o$ , variasi kedalaman sumber

### Abstract

Characteristics of earthquakes can be examined using analysis of source parameters. Two source parameters used as a measure of earthquake strength are moment magnitude  $M_w$  and seismic moment  $M_o$ . This study focuses on analysis of a  $M_w - M_o$  empirical relation for varying depths: shallow (0-100 km), intermediate (100-300 km), dan deep (> 300 km). The data were 242 occurrences (intraplate and interplate events worldwide between 1905-2016) obtained from reliable published studies with varying magnitudes of  $4.45 \leq M_w \leq 9.20$ . The results were in the form of an empirical equation for each source depth,  $M_w = 0.287 \ln M_o + 5.952$  (shallow sources),  $M_w = 0.290 \ln M_o + 6.047$  (intermediate sources) dan  $M_w = 0.285 \ln M_o + 5.816$  (deep sources). These equations are self-consistent as they represent the  $M_w - M_o$  relation in the same form of graphs. Coefficients of  $\ln M_o$  are similar for all the three equations to two decimal places while small variations of constants give no clear information on differences in the source depth. The  $M_w - M_o$  relation obtained is consistent with previous work in the sense that  $M_w$  is a logarithmic function of  $M_o$ . In addition, the current study found major earthquakes were distributed at depths below 20 km for shallow sources, between 100-200 km for intermediate sources, 550-600 km for deep sources, in good agreement with characteristics of global seismicity. The results of this study provide a better understanding of the  $M_w - M_o$  relation, which is universal and global, independent of source depth and location.

**Keywords:** moment magnitude, seismic moment,  $M_w - M_o$  empirical relation, varying depths

### PENDAHULUAN

Gempa merupakan fenomena alam, di mana energi seismik diradiasikan dari sumber dalam perut Bumi pada kedalaman tertentu sampai ke dekat permukaan Bumi. Kekuatan gempa bisa diukur secara kuantitatif melalui dua parameter, yaitu energi seismik yang diasosiasikan dengan momen seismik  $M_o$  dan magnitudo (Lowrie, 2007; Yen and Ma, 2011; Okal, 2019). Skala magnitudo dalam penelitian ini adalah magnitudo momen  $M_w$  (Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1983; Das *et al.*, 2019). Hal ini karena  $M_w$  lebih akurat dan tidak mengalami saturasi, khususnya untuk gempa besar (McCalpin, 2010).

Dua sumber potensial pemicu gempa tektonik adalah *interplate earthquakes* (gempa yang dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik zona subduksi) dan *intraplate earthquakes* (gempa yang dipicu oleh aktivitas serupa sepanjang jalur zona patahan di daratan). Gempa sepanjang zona subduksi sering terjadi dengan magnitudo yang besar dan kedalaman relatif dangkal (Lay *et al.*, 2012; Murotani, *et al.*, 2013; Cummins, 2017; Bilek and Lay, 2018). Demikian pula, gempa sepanjang jalur zona patahan aktif di dunia bisa juga terjadi dengan kekuatan yang besar dan kedalaman relatif dangkal yang mengancam daerah dengan populasi padat (Murotani *et al.*, 2015; Koulali *et al.*, 2016; Koulali *et al.*, 2017; Konstantinou *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020).

Momen seismik  $M_0$  dan magnitudo momen  $M_w$  adalah dua parameter sumber penting yang memberikan informasi kekuatan gempa. Relasi empiris antara kedua parameter tersebut ditentukan dari data statistik gempa. Menurut Hanks and Kanamori (1979) dan Kanamori (1983), hubungan antara kedua parameter tersebut adalah sebagai berikut,

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_0 - 16,1) \quad (1)$$

Kedua penelitian terdahulu tersebut belum mendiskusikan secara komprehensif dan eksplisit relasi empiris  $M_w - M_0$  dan mengaitkannya dengan variasi magnitudo gempa dan kedalaman sumber.

Dalam konteks tersebut di atas, maka penelitian ini mempelajari relasi empiris  $M_w - M_0$  berdasarkan pada variabilitas data statistik gempa dengan variasi magnitudo dari kecil sampai besar (e.g., Murotani *et al.*, 2013; Konstantinou, 2014; Murotani *et al.*, 2015) dan variasi kedalaman sumber dari *shallow* (e.g., Klose *et al.*, 2007; Konstantinou, 2014; Ratnasari *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020), *intermediate* (e.g., Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011), sampai *deep sources* (e.g., Tocheport *et al.*, 2007; Houston, 2015). Oleh karena relasi empiris  $M_w - M_0$  sebagai variasi kedalaman sumber gempa merupakan bahasan utama dalam penelitian ini, maka berikut ini adalah definisi kedalaman sumber yang diterapkan untuk penelitian ini.

*Shallow sources* adalah gempa dengan kedalaman sumber yang relatif dangkal antara 0-100 km di bawah permukaan Bumi (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011). Definisi sumber dangkal dalam penelitian ini berbeda dengan beberapa studi terdahulu (Frohlich, 1989; Warren *et al.*, 2015; Hutchings and Mooney, 2021; Zang *et al.*, 2021) yang mengatakan bahwa *shallow events* adalah gempa dengan kedalaman antara 0-70 km. Gempa dangkal memicu kerusakan yang tinggi karena energi gempa masih relatif besar saat gelombang gempa tiba di permukaan Bumi. Hal ini dapat terjadi karena serapan energi gempa oleh lapisan batuan bawah permukaan tidak terlalu besar dibandingkan dengan jika pusat gempa terletak jauh pada kedalaman.

*Intermediate earthquakes* adalah gempa dengan kedalaman sumber antara 100-300 km (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011). Getaran gempa *intermediate* biasanya memicu tingkat kerusakan yang relatif rendah dibandingkan dengan gempa dangkal. Sedangkan *deep earthquakes* yaitu gempa dengan kedalaman sumber lebih dari 300 km (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2014; Shirey *et al.*, 2021).

Analisis relasi  $M_w - M_0$  bukan satu-satunya relasi antara parameter sumber. Studi prediksi magnitudo gempa juga telah berhasil menurunkan relasi  $M_w - A$  di mana  $A$  adalah luas bidang patahan (Prastowo *et al.*, 2022). Dengan memanfaatkan 90 data global di seluruh dunia, Prastowo *et*

*al.* (2022) membuktikan bahwa relasi  $M_w - A$  mengacu pada kesebandingan  $M_w \sim \ln A$  (untuk semua tipe gempa) serupa dengan kesebandingan  $M_w \sim \ln M_0$  (Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1983). Temuan Prastowo *et al.* (2022) tersebut konsisten dengan temuan penelitian terdahulu (Thingbaijam *et al.*, 2017). Hasil penting lain yang dilaporkan adalah magnitudo gempa *megathrust* pada zona subduksi bisa mencapai  $M_w \approx 9,3$  (Prastowo *et al.*, 2022). Hasil tersebut memberi konfirmasi pada penelitian terdahulu (Widiyantoro *et al.*, 2020) yang menyimpulkan bahwa mungkin terjadi gempa tektonik dengan  $M_w \sim 9,0$  jika terjadi keruntuhan segmen batuan bawah permukaan dekat Palung Jawa di wilayah pantai selatan Pulau Jawa.

## METODE

Dalam penelitian ini, data statistik gempa tektonik yang digunakan adalah 242 kejadian meliputi *intraplate* dan *interplate* events yang terjadi di seluruh dunia termasuk Indonesia antara tahun 1905–2016 dengan magnitudo antara  $4,45 \leq M_w \leq 9,20$  yang diperoleh dari beberapa publikasi internasional terindeks Scopus, Web of Science (WoS), dan Schimago berkategori Q1-Q2 (e.g., Murotani *et al.*, 2013; Konstantinou, 2014; Murotani *et al.*, 2015; Irikura *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2017; Tanioka *et al.*, 2017).

Oleh karena relasi  $M_w - M_0$  (Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1983) tidak merinci kedalaman sumber, maka data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data global menurut kedalaman, yaitu: *shallow* (0-100 km), *intermediate* (100-300 km), dan *deep* (> 300 km) *sources* (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011). Rasionalitas pemanfaatan data global adalah agar temuan penelitian bisa berlaku untuk uji karakteristik gempa di Indonesia, di mana mayoritas gempa adalah gempa dangkal dengan jangkauan magnitudo terukur adalah dari *small to large magnitudes* ( $M_w < 8,0$ ).

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Dalam hal ini, variabel manipulasi adalah momen seismik  $M_0$  sedangkan variabel respons adalah magnitudo momen  $M_w$ . Variabel kontrol adalah kelompok kedalaman sumber (*shallow*, *intermediate*, dan *deep sources*) yang menjadi faktor diskriminan relasi empiris  $M_w - M_0$ .

Dengan bantuan *spreadsheet*, statistik gempa tektonik diurutkan berdasarkan kedalaman sumber gempa dari yang paling dangkal sampai paling dalam untuk kemudahan pengolahan data. Analisis data statistik gempa tektonik dan plot grafik dilakukan untuk kemudahan visual relasi empiris  $M_w - M_0$  atau  $M_w - \ln M_0$ . Hal yang sama dilakukan untuk plot grafik  $M_w$  dan  $M_0$  terhadap variasi kedalaman  $D$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemaparan hasil-hasil penelitian disajikan menurut urutan produk gambar yang akan dibahas pada bagian ini,

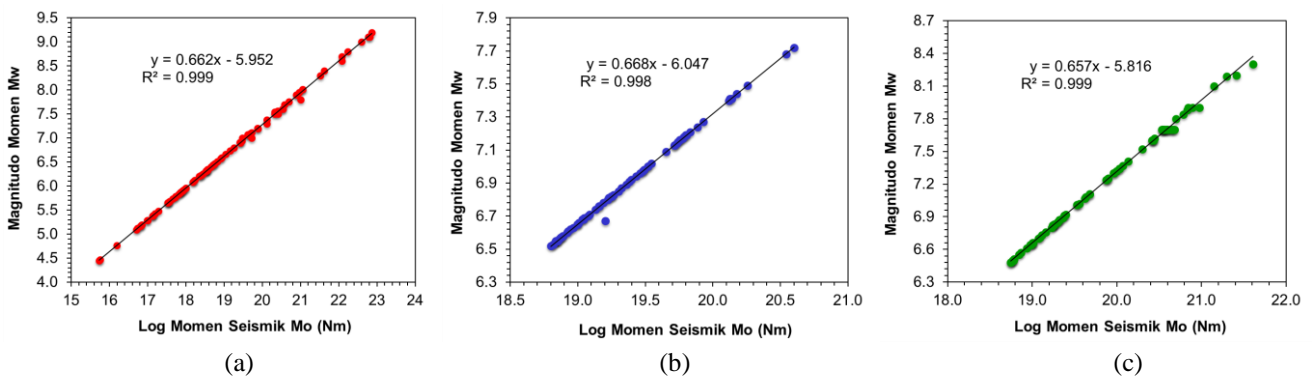
yaitu (1) grafik  $M_w$  terhadap  $\log M_0$ , (2) grafik  $M_w$  terhadap  $M_0$ , (3) grafik  $M_w$  terhadap kedalaman sumber  $D$ , (4) grafik  $M_0$  terhadap kedalaman sumber  $D$ . Dalam proses penyajian, masing-masing produk gambar dibedakan berdasarkan klasifikasi kedalaman sumber, yaitu *shallow*, *intermediate*

dan *deep sources*. Analisis produk gambar diberikan untuk tiap kedalaman sumber. Dengan demikian, karakteristik gempa global dipelajari melalui relasi antara parameter-parameter sumber  $M_w$ ,  $M_0$  dan  $D$ .

### Grafik $M_w$ terhadap $\log M_0$

Sebagai parameter sumber,  $M_w$  dan  $M_0$  adalah dua besaran fisika yang mendeskripsikan kekuatan gempa dan pada tataran tertentu dapat dikorelasikan dengan energi gempa (Lay *et al.*, 2012; Bilek and Lay, 2018; Okal, 2019; Ji and Yoshioka, 2021). Oleh karena itu, bentuk eksplisit relasi empiris kedua besaran fisika tersebut perlu dicari. Konteks yang diuji adalah apakah relasi empiris  $M_w - M_0$  yang diperoleh oleh penelitian terdahulu dan dianggap sebagai temuan seismik dasar (Hanks and Kanamori, 1979;

Kanamori, 1983) masih berlaku untuk data global yang dikumpulkan pada penelitian ini. Parameter kendala yang digunakan adalah variasi magnitudo:  $4,45 \leq M_w \leq 9,20$  dan variasi kedalaman sumber gempa: *shallow* for  $D < 100$  km, *intermediate* antara 100-300 km, *deep* for  $D > 300$  km yang mengacu pada klasifikasi kedalaman menurut penelitian terdahulu (*e.g.*, Kiser *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2014; Shirey *et al.*, 2021). Klasifikasi ini berbeda dengan yang biasa digunakan, yaitu *shallow sources* for  $D < 70$  km.



**Gambar 1.** Plot  $M_w$  terhadap  $\log M_0$  untuk masing-masing kedalaman sumber: (a) *shallow*, (b) *intermediate*, dan (c) *deep*.

Gambar 1 menunjukkan secara visual relasi empiris  $M_w - \log M_0$  di mana seluruh grafik menunjukkan bahwa ada hubungan linieritas antara variabel  $M_w$  sebagai sumbu vertikal dan variabel  $\log M_0$  sebagai sumbu horisontal. Alasan utama mengapa menguji relasi empiris  $M_w - \log M_0$  adalah karena  $M_0$  merupakan besaran fisika yang bernilai sangat besar ( $>10^{15}$  Nm) dari sekumpulan data gempa yang secara statistik mengikuti hukum distribusi eksponensial (Luen and Stark, 2012; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Taroni and Akinci, 2021). Hukum distribusi ini memenuhi Hukum Gutenberg-Richter (Nava *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Ray *et al.*, 2019; Amaro-Mellado and Bui, 2020; Yamagishi *et al.*, 2021) yang biasa digunakan untuk mempelajari level seismisitas wilayah dan potensi bahaya bencana seismik terkait.

Fokus perhatian pada Gambar 1(a), (b), (c) adalah melihat apakah grafik  $M_w$  terhadap  $\log M_0$  memberikan penjelasan relasi yang benar secara fisis. Ketiga grafik pada Gambar 1 di atas jelas menggambarkan  $M_w$  terhadap  $\log M_0$

untuk ketiga kedalaman sumber gempa. Secara matematis, ketiga grafik memberikan tafsiran prediksi yang sama, yaitu magnitudo gempa boleh berharga berapa saja, misalnya  $M_w \sim 10$ . Prediksi matematis ini bertentangan dengan fakta bahwa belum pernah ada gempa dengan magnitudo sebesar itu atau lebih yang tercatat dalam katalog gempa manapun di dunia. Meskipun gempa yang pernah terjadi memiliki energi seismik yang besar tetapi sejauh ini tidak ada gempa dengan magnitudo momen  $M_w > 9,2$  yang dihasilkan oleh gempa Chili 1960 (Fujii and Satake, 2012; Murotani *et al.*, 2013) atau  $M_w > 9,5$  untuk gempa yang sama namun metode hitung yang berbeda (*e.g.*, Bilek and Lay, 2018).

Untuk mengatasi masalah di atas, maka relasi empiris  $M_w - \log M_0$  secara visual harus ditinggalkan. Grafik yang cocok dengan batasan nilai  $M_w \sim 9$  haruslah grafik dengan bentuk sedemikian sehingga  $M_w$  akan mengalami saturasi meskipun  $M_0$  terus meningkat. Argumen ini menjadi dasar mengapa relasi empiris  $M_w - \log M_0$  diganti menjadi relasi empiris  $M_w - M_0$ .

### Grafik $M_w$ terhadap $M_0$

Relasi empiris  $M_w - M_0$  pada awalnya dimaksudkan untuk mencari skala magnitudo yang seragam dan berlaku untuk semua katalog gempa. Namun, variasi metode dan instrumen ukur di lapangan serta distribusi spasial stasiun pemantau gempa di seluruh dunia tidaklah memungkinkan

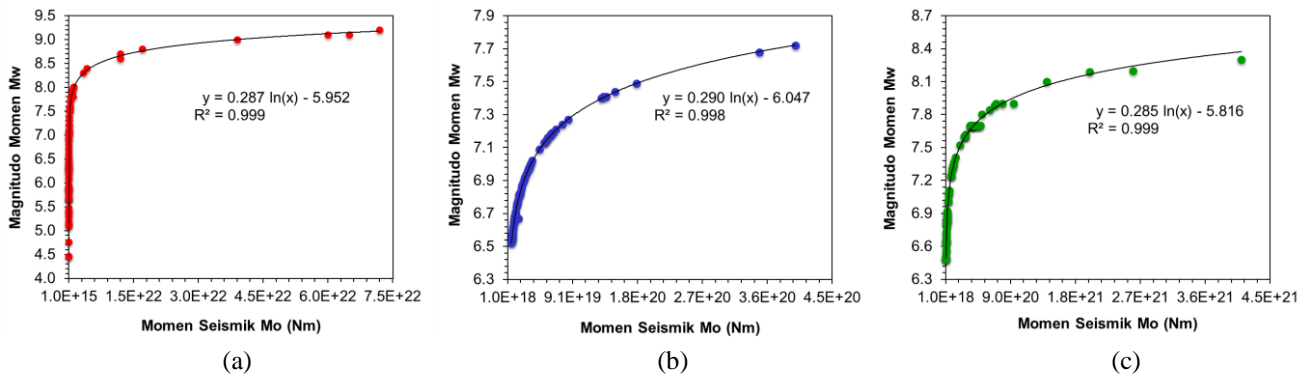
untuk menggunakan *a single scale* untuk magnitudo gempa. Sejak saat itu, penggunaan variasi skala magnitudo menjadi tidak terhindarkan. Skala  $M_w$  tetap relatif unggul daripada skala magnitudo yang lain karena tidak mengalami saturasi untuk gempa besar (McCalpin, 2010; Das *et al.*, 2019).

Dalam perspektif sejarah seismik, skala  $M_w$  memberikan konsep magnitudo yang berlaku dan bisa diterima di seluruh dunia (Okal, 2019) karena berkorelasi dengan radiasi energi seismik melalui parameter sumber  $M_0$ .

Meskipun persamaan (1) merujuk pada relasi empiris  $M_w - M_0$  yang awalnya berlaku untuk *shallow and deep sources only* (Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1983), namun tidak disebutkan secara eksplisit batasan klasifikasi *shallow* dan *deep sources* itu bagaimana. Selain itu, kedua

paper tersebut tidak membatasi data statistik gempa yang digunakan adalah gempa tektonik dengan magnitudo kecil atau besar.

Dalam penelitian ini, statistik gempa berasal dari data global yang mencakup seluruh jangkauan magnitudo dan jangkauan kedalaman sumber. Hal ini agar temuan yang diperoleh baik berupa bentuk grafik relasi empiris  $M_w - M_0$  maupun persamaan empiris terkait bisa berlaku universal (e.g., Ali and Shieh, 2013).



**Gambar 2.** Plot  $M_w$  terhadap  $M_0$  untuk masing-masing kedalaman sumber: (a) *shallow*, (b) *intermediate*, dan (c) *deep*.

Ketiga grafik relasi empiris  $M_w - M_0$  (Gambar 2) jelas menunjukkan  $M_w$  sebagai fungsi logaritmik dari  $M_0$  yang konsisten dengan temuan penelitian terdahulu (Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1983; Ali and Shieh, 2013; Wu *et al.*, 2013; Bora, 2016; Konstantinou and Melis, 2017; Wang, 2018; Das *et al.*, 2019; Demuth *et al.*, 2019; Ji and Yoshioka, 2021). Ketiga bentuk grafik tersebut jelas menunjukkan  $M_w$  yang mengalami saturasi untuk  $M_0$  yang semakin besar. Oleh karena itu, bentuk grafik yang benar untuk relasi  $M_w - M_0$  adalah Gambar 2 yang berlaku pada berbagai kedalaman sumber (*shallow*, *intermediate*, *deep*). Bentuk grafik fungsi logaritmik tersebut sesuai dengan yang dilaporkan oleh Prastowo *et al.* (2022) untuk *magnitude-area scaling* gempa *megathrust* pada zona subduksi dengan magnitudo maksimum bisa mencapai  $M_w \approx 9,3$ . Prediksi tersebut tidak berbeda signifikan (dalam batas ketakpastian  $\pm 0,2$ ) dengan magnitudo terbesar yang dicatat untuk gempa Chili 1960 (Fujii and Satake, 2012; Murotani *et al.*, 2013; Bilek and Lay, 2018). Khususnya grafik relasi  $M_w - M_0$  pada Gambar 2(a) yang berlaku untuk sumber gempa yang dangkal ( $< 100$  km) memberikan konfirmasi pada temuan penelitian terdahulu (Widiyantoro *et al.*, 2020), di mana gempa tektonik dengan  $M_w \sim 9,0$  mungkin terjadi di dekat

Palung Jawa di wilayah pantai selatan Pulau Jawa.

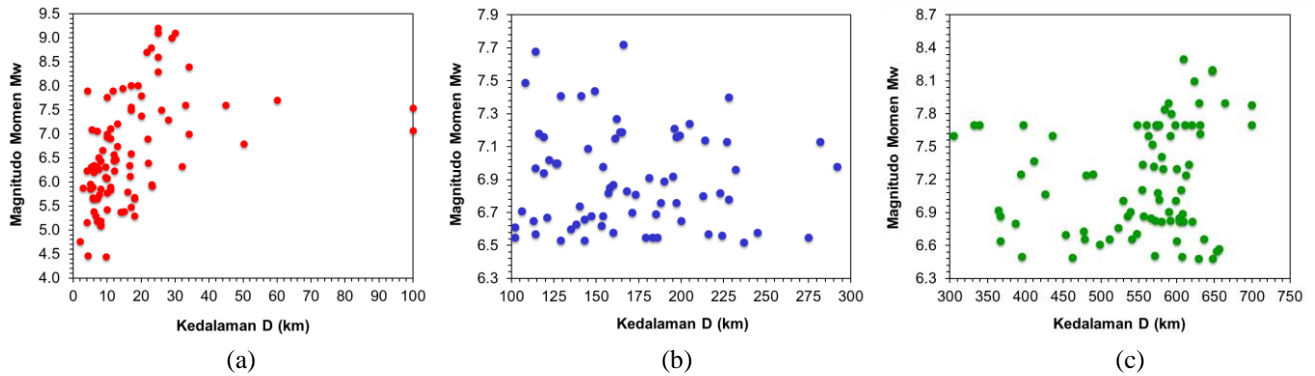
Persamaan regresi yang diperoleh dari *data fitting* dengan bantuan aplikasi *spreadsheet* untuk masing-masing kedalaman sumber gempa adalah,  $M_w = 0,287 \ln M_0 + 5,952$  (*shallow sources*),  $M_w = 0,290 \ln M_0 + 6,047$  (*intermediate sources*) dan  $M_w = 0,285 \ln M_0 + 5,816$  (*deep sources*). Seluruh persamaan empiris temuan penelitian ini memiliki koefisien  $\ln M_0$  yang sama dalam 2 desimal, yaitu 0,29 yang tepat berkorelasi dengan 0,67 sebagai koefisien  $\log M_0$  pada persamaan (1). Perbedaan antara ketiga bilangan konstanta pada ketiga persamaan empiris temuan penelitian ini dan konstanta pada beberapa penelitian terdahulu merefleksikan perbedaan jumlah dan distribusi spasial statistik gempa. Ketiga persamaan empiris tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai magnitudo momen  $M_w$  suatu gempa jika momen seismik  $M_0$  telah diketahui. Untuk data sampling, perbedaan antara  $M_w$  hasil perhitungan ketiga persamaan empiris temuan penelitian ini dan nilai referensi  $M_w$  dari *United States Geological Survey* (USGS) tidak melebihi 0,2 sebagai batas atas ketakpastian. Hasil ini konsisten dengan temuan terdahulu yang membandingkan antara skala  $M_w$  dan skala magnitudo lokal (Bora, 2016; Konstantinou and Melis, 2017).

**Grafik  $M_w$  terhadap  $D$**

Sebagai parameter sumber,  $M_w$  dan  $M_0$  berkaitan dengan parameter sumber gempa lain yaitu kedalaman. Relasi empiris  $M_w$  dan  $M_0$  sebagai fungsi kedalaman  $D$  juga dipelajari dalam penelitian ini. Grafik relasi  $M_w$  terhadap variasi kedalaman sumber (Gambar 3) dibuat untuk melihat pola gempa dengan magnitudo sebagai fungsi kedalaman.

Klasifikasi kedalaman yang digunakan untuk membuat plot  $M_w - D$  mengikuti klasifikasi penelitian terdahulu tentang *intermediate and deep earthquakes* (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011), di mana sumber dangkal adalah gempa dengan hiposenter berada di antara 0-100 km (Gambar 3a), *intermediate events* untuk gempa dengan hiposenter berada

di antara 100-300 km (Gambar 3b) dan gempa dalam adalah gempa dengan kedalaman 300-700 km (Gambar 3c).



**Gambar 3.** Plot  $M_w$  terhadap  $D$  untuk masing-masing kedalaman sumber (a) *shallow*, (b) *intermediate*, dan (c) *deep*.

Gambar 3 menunjukkan secara visual pola distribusi data magnitudo  $M_w$  terhadap kedalaman sumber  $D$ , di mana seluruh grafik menunjukkan distribusi yang tidak beraturan antara variabel  $M_w$  sebagai sumbu vertikal dan variabel  $D$  sebagai sumbu horisontal. Namun, terdapat kecenderungan populasi sampel mengumpul pada kedalaman  $\leq 30$  km (sumber dangkal pada Gambar 3a), kedalaman 100-225 km (sumber *intermediate* pada Gambar 3b) dan kedalaman 550-650 km pada Gambar 3c). Konsentrasi lokasi hiposenter untuk sumber gempa dangkal pada penelitian ini konsisten dengan substansi *Figure 1* dari Bilek and Lay (2018) yang mendeskripsikan area di bawah permukaan yang cenderung menghasilkan gempa tektonik (*shallow seismogenic areas*). Area ini membentang vertikal mulai dari dekat permukaan (*crustal upper layer*) sampai dekat perbatasan antara *crust* dan *upper mantle* (Klose and Seeber, 2007; Widiyantoro *et al.*, 2011; Bilek and Lay, 2018). Gempa sumber dangkal mendominasi (~80%) frekuensi kejadian gempa tektonik di Indonesia (Hutchings and Mooney, 2021). Konsentrasi hiposenter untuk gempa dengan kedalaman *intermediate* konsisten dengan temuan penelitian terdahulu (Frohlich, 1989; Houston, 2015; Shirey *et al.*, 2021).

Untuk sumber dangkal (Gambar 3a), kejadian gempa dengan magnitudo  $\geq 7,5$  (bahkan pada beberapa kasus bisa

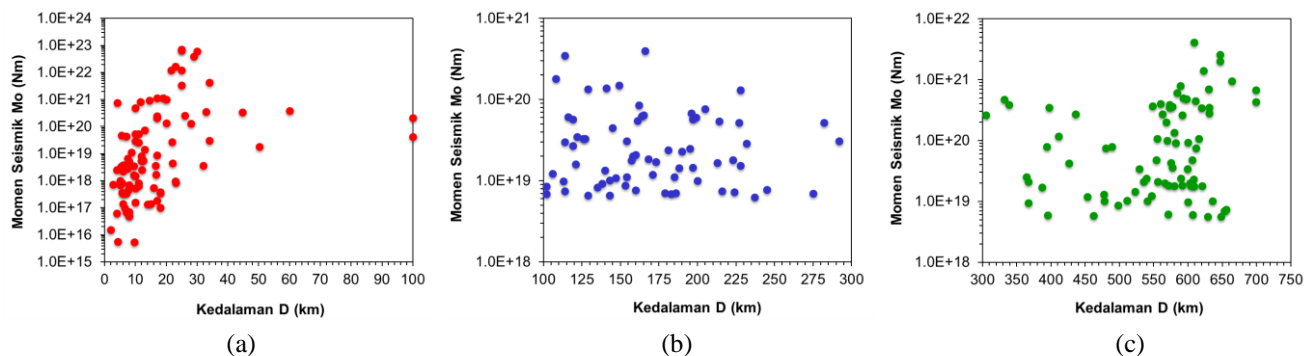
mencapai sekitar  $M_w$  9,0) seringkali terjadi dibandingkan dengan sumber *intermediate* dan dalam. Hal ini karena aktivitas tektonik dekat zona subduksi yang berujung pada gempa *megathrust* sering terjadi pada kedalaman dangkal. Gempa *intermediate* (Gambar 3b) seringkali terjadi dengan hiposenter berada di zona Wadati-Benioff untuk seismisitas global (Frohlich, 1989) dan dekat Palung Jawa untuk gempa regional (Špičák *et al.*, 2007). Meskipun jarang, gempa *intermediate* ini bisa juga bermagnitudo  $M_w$  7,7-7,8. Untuk gempa dalam (Gambar 3c), gempa besar dengan  $M_w \geq 7,8$  dan kedalaman sumber  $550 \text{ km} \leq D \leq 650 \text{ km}$  bisa terjadi (Houston, 2015). Rentang kedalaman tersebut adalah lokasi berkumpulnya hiposenter gempa dalam.

Visualisasi yang menarik adalah apabila ketiga grafik dilihat secara utuh dari sumber gempa dekat permukaan sampai gempa dengan kedalaman maksimum 700 km untuk seismisitas global (Houston, 2015; Hutchings and Mooney, 2021; Shirey *et al.*, 2021). Beberapa ‘area kosong’ adalah rentang kedalaman di mana gempa dangkal, *intermediate*, dan dalam jarang terjadi, yaitu 30-100 km (Gambar 3a), 225-300 km (Gambar 3b), dan 300-550 km (Gambar 3c). Fakta ini merupakan sifat alamiah statistik gempa global yang telah dilaporkan oleh beberapa penelitian terdahulu (Frohlich, 1989; Houston, 2015; Shirey *et al.*, 2021).

### Grafik $M_0$ terhadap $D$

Radiasi energi gempa dapat diukur melalui besaran momen seismik  $M_0$ . Dalam penelitian ini, grafik relasi  $M_0$  terhadap variasi kedalaman sumber (Gambar 4) dibuat

untuk melihat pola gempa dengan momen seismik sebagai fungsi kedalaman. Klasifikasi kedalaman yang digunakan untuk membuat plot  $M_0 - D$  tetap seperti sebelumnya.



**Gambar 4.** Plot  $M_0$  terhadap  $D$  untuk masing-masing kedalaman sumber gempa (a) *shallow*, (b) *intermediate*, dan (c) *deep*.

Serupa dengan kasus relasi  $M_w - D$  pada Gambar 3, ketiga grafik pada Gambar 4 juga menunjukkan pola yang tidak beraturan untuk distribusi data momen seismik  $M_0$  terhadap kedalaman sumber  $D$ . Pengamatan detil pola distribusi gempa pada Gambar 4 memberikan temuan yang serupa seperti pada Gambar 3. Pelepasan energi gempa yang terukur sebagai momen seismik yang paling sering terjadi adalah pada kedalaman  $\leq 30$  km (*shallow sources*) dengan rentang momen seismik  $M_0 \sim 10^{15}-10^{23}$  Nm (Gambar 4a), kedalaman  $100 \text{ km} \leq D \leq 225$  km (*intermediate sources*) dengan rentang nilai  $M_0 \sim 10^{18}-10^{21}$  Nm (Gambar 4b), dan kedalaman  $550 \text{ km} \leq D \leq 650$  km (*deep sources*) dengan rentang  $M_0 \sim 10^{18}-10^{22}$  Nm (Gambar 4c). Meskipun relatif jarang terjadi apabila dibandingkan dengan gempa dangkal yang terjadi di seluruh belahan dunia (Bilek and Lay, 2018) dan yang terjadi Indonesia (Hutchings and Mooney, 2021), gempa dalam lebih dari 550 km bisa berbahaya karena gempa dalam dengan kekuatan  $M_w \geq 7,8$  (Gambar 3c) yang mencapai  $M_0 \sim 10^{21}$  Nm (Gambar 4c) bisa saja terjadi.

Untuk gempa dengan sumber dangkal (Gambar 4a) pada rentang kedalaman  $20 \text{ km} \leq D \leq 30$  km, beberapa kali terjadi gempa besar dengan  $M_0 \sim 10^{23}$  Nm (setara dengan  $M_w \sim 9,0$  (Gambar 3a). Hal tersebut karena gempa besar biasanya dipicu oleh aktivitas zona subduksi yang terjadi pada kedalaman yang relatif dangkal (Hayes *et al.*, 2017; Bilek and Lay 2018). Beberapa kasus gempa besar dengan sumber dangkal antara lain gempa Sumatra-Andaman yang terjadi tahun 2004 dengan  $M_w$  9,1 dan  $M_0 = 6,0 \times 10^{22}$  Nm, gempa Maule di Chili yang terjadi pada tahun 2010 dengan  $M_w$  8,8 dan  $M_0 = 1,7 \times 10^{22}$  Nm, dan gempa Tohoku di Jepang yang terjadi pada tahun 2011 dengan  $M_w$  9,1 dan  $M_0 = 3,9 \times 10^{22}$  Nm (Murotani *et al.*, 2013). Temuan terkait proporsionalitas antara  $M_w$  dan  $\log M_0$  ini sesuai dengan teori (Hanks dan Kanamori, 1979; Kanamori, 1983) dan pengamatan empiris (Frohlich, 1989; Bilek and Lay, 2018; Das *et al.*, 2019).

Gempa *intermediate* (Gambar 4b) juga bisa memicu gempa besar dengan  $M_0 \sim 10^{20}$  Nm tetapi masih lebih kecil jika dibandingkan dengan gempa besar yang terjadi pada kedalaman relatif dangkal (Gambar 4a) dan relatif dalam (Gambar 4c). Gempa besar pada kedalaman sumber antara 600-650 km (Gambar 4c) beberapa kali terjadi, misalnya kasus gempa pada tahun 1994 di Bolivia dengan  $M_w$  8,2 dan  $M_0 = 2,6 \times 10^{21}$  Nm serta gempa pada tahun 2013 di Sea of Okhotsk, Rusia dengan  $M_w$  8,3 dan  $M_0 = 4,1 \times 10^{21}$  Nm (Houston, 2015). Secara umum, gempa tektonik bersumber pada kedalaman kategori *shallow*, *intermediate* dan *deep* dengan  $M_0 > 10^{23}$  Nm (setara dengan magnitudo  $M_w > 9,5$ ) belum pernah terjadi.

Visualisasi yang menarik kembali diperoleh apabila ketiga grafik pada Gambar 4 dilihat secara utuh dari sumber

gempa dekat permukaan sampai gempa dengan kedalaman mencapai 700 km untuk seismisitas global (Houston, 2015; Hutchings and Mooney, 2021; Shirey *et al.*, 2021). Beberapa rentang kedalaman di mana gempa dangkal, *intermediate*, dan dalam jarang terjadi adalah 30-100 km (Gambar 4a), 225-300 km (Gambar 4b), dan 300-550 km (Gambar 4c). Fakta ini merupakan sifat alamiah statistik gempa global (Frohlich, 1989; Tocheport *et al.*, 2007; Houston, 2015; Shirey *et al.*, 2021). Gambar 4 memberi konfirmasi bahwa momen seismik  $M_0$  merupakan fungsi kedalaman sumber  $D$  seperti temuan terkini untuk wilayah regional Jepang (Ji and Yoshioka, 2021).

## KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis relasi empiris  $M_w - M_0$  untuk variasi kedalaman: *shallow* (0-100 km), *intermediate* (100-300 km), dan *deep* (> 300 km). Data penelitian adalah 242 gempa global *intraplate* dan *interplate* di seluruh dunia, termasuk Indonesia antara tahun 1905-2016 dengan rentang magnitude antara  $4,45 \leq M_w \leq 9,20$ . Hasil-hasil penelitian berupa persamaan empiris untuk setiap kedalaman sumber:  $M_w = 0,287 \ln M_0 + 5,952$  (*shallow sources*),  $M_w = 0,290 \ln M_0 + 6,047$  (*intermediate sources*) dan  $M_w = 0,285 \ln M_0 + 5,816$  (*deep sources*). Ketiga persamaan empiris bersifat *self-consistent* karena mengilustrasikan relasi  $M_w - M_0$  dengan bentuk grafik yang sama. Nilai koefisien  $\ln M_0$  sama sampai dengan desimal kedua sedangkan variasi kecil nilai konstanta tidak memberikan informasi yang jelas tentang perbedaan ketiga kedalaman sumber. Relasi  $M_w - M_0$  yang diperoleh dari penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu, yaitu  $M_w$  adalah fungsi logaritmik  $M_0$ . Selain itu, penelitian ini juga menemukan distribusi mayor sumber adalah < 20 km (*shallow sources*), 100-200 km (*intermediate sources*), dan 550-600 km (*deep sources*), sesuai dengan karakteristik seismisitas global. Hasil-hasil penelitian ini memberikan pemahaman relasi  $M_w - M_0$  bersifat universal (independen terhadap kedalaman sumber) dan global (independen terhadap lokasi kejadian gempa). Sehubungan dengan dua pendapat pakar kegempaan tentang klasifikasi sumber, di mana sumber dangkal didefinisikan sebagai gempa dengan kedalaman 0-100 km (seperti dalam penelitian ini) dan gempa dengan kedalaman 0-70 km, maka penelitian selanjutnya yang menarik untuk dilakukan adalah mengulangi seluruh prosedur analisis parameter sumber dengan menerapkannya pada kedalaman 0-70 km (*shallow*), 70-300 km (*intermediate*), dan lebih dari 300 km (*deep*).

## UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada beberapa peneliti terdahulu dengan topik penelitian yang relevan dengan penelitian ini dan telah muncul baik dalam

sitasi artikel ini (Murotani *et al.*, 2013; Konstantinou, 2014; Murotani *et al.*, 2015; Irikura *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2017; Tanioka *et al.*, 2017) maupun referensi yang tersusun dalam Daftar Pustaka artikel ini. Data statistik gempa tektonik yang digunakan dalam penelitian ini bersumber pada beberapa publikasi terdahulu tersebut. Terimakasih juga ditujukan kepada dua reviewers yang telah memberikan penilaian terhadap artikel ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ali, W. and Shieh, S. 2013. Earthquake repeat time, stress drop, type of slip and earthquake magnitude. *Journal of Geology and Geosciences*, Vol. 2, Issue 2, pp. 1-8.
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G. and Martínez-Álvarez, F. 2017. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, Vol. 717, pp. 449-472.
- Amaro-Mellado, J. L. and Bui, D. T. 2020. GIS-based mapping of seismic parameters for the Pyreness. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9(7), No. 452, pp. 1-21.
- Bilek, S. L. and Lay, T. 2018. Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, Vol. 14, No. 4, pp. 1488-1500.
- Bora, D. K. 2016. Scaling relations of moment magnitude, local magnitude, and duration magnitude for earthquakes originated in northeast India. *Earthquake Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 153-164.
- 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.
- Demuth, A., Tjåland, N. and Ottemöller, L. 2019. Earthquake source parameters in Norway determined with empirical Green's functions. *Journal of Seismology*, Vol. 23, pp. 715-724.
- Frohlich, C. 1989. The nature of deep-focus earthquakes. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, Vol. 17, pp. 227-254.
- Fujii, Y. and Satake, K. 2012. Slip distribution and seismic moment of the 2010 and 1960 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms and coastal geodetic data. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170, No. 9, pp. 1493-1509.
- Hanks, T. C. and Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B5, pp. 2348-2350.
- Hayes, G. P., Myers, E. K., Dewey, J. W., Briggs, R. W., Earle, P. S., Benz, H. M., Smoczyk, G. M., Flamme, H. E., Barnhart, W. D., Gold, R. D. and Furlong, K. P. 2017. *Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1192. pp. 1-148.
- Houston, H. 2015. Deep Earthquakes, in *Treatise on Geophysics* 2nd Ed., Editor-in-chief G. Schubert, Oxford: Elsevier Publ., Vol. 4, pp. 329-354.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9, pp. 1-42.
- 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.
- Ji, Y. and Yoshioka, S. 2021. Depth variation of seismic moment and recurrence interval in Japan. *Geoscience Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 1-16.
- Kanamori, H. 1983. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, Vol. 93, pp. 185-199.
- Kiser, E., Ishii, M., Langmuir, C. H., Shearer, P. M. and Hirose, H. 2011. Insights into the mechanism of intermediate-depth earthquakes from source properties as imaged by back projection of multiple seismic phases. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 116, B06310.
- Klose, C. D. and Seeber, Leonardo. 2007. Shallow seismicity in stable continental regions. *Seismological Research Letters*, Vol. 78, No. 5, pp. 554-562.
- 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.
- Konstantinou, K. I. and Melis, N. S. 2017. The relationship between local and moment magnitude in Greece during the period 2008-2016. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 175, pp. 731-740.
- Konstantinou, K. I., Mouslopoulou, V. and Saltogianni, V. 2020. Seismicity and active faulting around the metropolitan area of Athens, Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 110, No. 4, pp. 1-18.
- 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.
- Koulali, A., McClusky S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning P., Meilano, I., Efendi, J. and Wijanarto, A. B. 2017. The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 458, pp. 69-79.

- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye L., Yue, H. and Rushing, T. 2012. Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B04311.
- Lowrie, W. 2007. *Fundamental of Geophysics*. Cambridge University Press: New York, US. pp. 1-381.
- Luen, B and Stark, P.B. 2012. Poisson tests of declustered catalogues. *Geophysical Journal International*, Vol. 189, pp. 691-700.
- McCalpin, J. P. 2010. *Earthquake Magnitude Scale*. GEOHAZ Consulting Inc., Crestone, Colorado 81131, USA. Appendix 1.
- Meng, L., Ampuero, J. P. and Bürgmann R. 2014. The 2013 Okhotsk deep-focus earthquake: rupture beyond the metastable olivine wedge and thermally controlled rise time near the edge of a slab. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, pp. 3779–3785.
- Murotani, S., Satake, K. and Fuji, Y. 2013. Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~9 subduction-zone earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp. 5070-5074.
- 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.
- Nava, F. A., Márquez-Ramírez, V. H., Zúñiga, F. R., Ávila-Barrientos, L. and Quintero, C. B. 2017. Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, Vol. 21, pp. 127-135.
- Okal, E. A. 2019. Energy and magnitude: a historical perspective. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, pp. 3815-3849.
- Prastowo, T., Ayudia, G. P. and Risanti, H. 2022. Magnitude-rupture area scaling for intraplate and subduction-zone earthquakes of moderate to large sizes. *Bulletin of The Geological Society of Malaysia*. Vol. 73, pp. ...accepted.
- 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.
- Ray, S., Alam, Md. J. B., Haque, M., Das, S. K., Tanmoy, B. B. and Hasan, Md. N. 2019. A study on b-value and investigation of seismic hazard in Sylhet seismic region, Bangladesh using Gumbel's extreme value distribution method. *SN Applied Sciences: A Springer Nature Journal*, Vol. 1, No. 435.
- Ren, Z., Yuan, Y., Wang, P., Fan, T., Wang, J. and Hou J. 2017. The September 16, 2015  $M_w$  8.3 Illapel, Chile earthquake: characteristics of tsunami wave from near-field to far-field. *Acta Oceanologica. Sinica*, Vol. 36, No. 5, pp. 73–82.
- Rigo, A., Souriau, A. and Sylvander, M. 2018. Spatial variations of b-value and crustal stress in the Pyrenees. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 337- 352.
- 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.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b-value. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, pp. 1399-1402.
- Shirey, S. B., Wagner, L. S., Walter, M. J., Pearson, D. G. and van Keken, P. E. 2021. Slab transport of fluids to deep focus earthquake depths—thermal modeling constraints and evidence from diamonds. *American Geophysical Union Advances*, Vol. 2, Issue 2, No. e00304, pp. 1-28.
- Špičák, A., Hanuš, V. and Vaněk, J. 2007. Earthquake occurrence along the Java trench in front of the onset of the Wadati-Benioff zone: Beginning of a new subduction cycle?. *Tectonics*, Vol. 26, pp. 1- 16
- Tanioka, Y., Miranda, G. J. A., Gusman, A. R. and Fujii, Y. 2017. Method to determine appropriate source models of large earthquakes including tsunami earthquake for tsunami early warning in Central America. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 174, pp. 3237-3248.
- Taroni, M. and Akinci, A. 2021. Good practices in PSHA: declustering, b-value estimation, foreshocks and aftershocks inclusion; a case study in Italy. *Geophysical Journal International*, Vol. 224, pp. 1174-1187.
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M. and Goda, K. 2017. New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2225-2246.
- Tocheport, A., Rivera, L. and Chevrot, S. 2007. A systematic study of source time functions and moment tensors of intermediate and deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B07311.
- Wang, J. H. 2018. A review on scaling of earthquake faults. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 29, No. 6, pp. 589-610.
- Warren, L. M., Baluyut, E. C., Osburg, T., Lisac, K. and Kokkinen S. 2015. Fault plane orientations of intermediate-depth and deep-focus earthquakes in the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, Issue 12, pp. 8366–8382.
- Widiyantoro, S., Pesicek, D. J. and Thurber, C. 2011. Subducting slab structure below the eastern Sunda arc inferred from non-linear seismic tomographic imaging. *The Geological Society London, Special Publications*, Vol. 355, pp. 139-155.



- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D. and Putra, H. E. 2020. Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 15274.
- 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.
- Yamagishi, Y., Saito, K., Hirahara, K. and Ueda, N. 2021. Spatio-temporal clustering of earthquakes based on distribution of magnitudes. *Applied Network Science*, Vol. 6, No. 71.
- 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.
- Zhang H, van der Lee, S., Bina, C. R. and Ge, Z. 2021. Deep dehydration as a plausible mechanism of the 2013 Mw 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, No. 521220, pp. 1-13.