

## Identifikasi Sumber Patahan Gempabumi Banggai 12 April 2019 Mw 6,9 Menggunakan Data Gempabumi Susulan

<sup>1</sup>Renhard Sipayung, <sup>2</sup>Erwan Susanto, <sup>3</sup>Haryanta

<sup>1,3</sup>Stasiun Geofisika Banjarnegara (BMKG), <sup>2</sup>Stasiun Geofisika Gowa (BMKG),  
Email: renhard.sipayung@bmkg.go.id

**Abstrak** – Tektonik Sulawesi merupakan salah satu tatanan tektonik yang paling kompleks. Banyaknya sumber patahan dan ambiguitas mekanisme sumber seringkali menimbulkan perdebatan dalam proses identifikasi sumber patahan gempabumi di wilayah ini. Pada 12 April 2019 terjadi gempabumi merusak di daerah Banggai, Sulawesi Tengah berkekuatan 6,9 Mw. Analisis mekanisme sumber dari *United States Geological Survey (USGS)* menunjukkan bahwa gempabumi ini bertipe penyesaran geser dengan kedalaman *centroid* 19,5 km; *Strike/Dip/Rake*: 46/70/-172 (Bidang Nodal 1) dan *Strike/Dip/Rake*: 313/83/-20 (Bidang Nodal 2). Sumber patahan gempabumi ini belum terpetakan jika mengacu pada Peta Gempa Nasional 2017. Meskipun Bidang Nodal 2 dapat diasosiasikan dengan Sesar Toili yang berarah BaratLaut-Tenggara, namun hasil relokasi terhadap 114 gempabumi susulan menunjukkan tren sebaran yang lebih presisi berarah Barat Daya-Timur Laut yang sesuai dengan orientasi Sesar Peleng (sesuai dengan solusi Nodal 1). Secara vertikal gempabumi susulan tersebar pada kedalaman 5-20 km. Jika diasumsikan Sesar Peleng memanjang hingga ke lokasi *mainshock* maka panjang sesar yang semula 44 km menjadi 87,1 km dan magnitudo maksimum tentunya menjadi > 6,9 Mw. Hal ini berimplikasi pada adanya underestimasi bahaya seismik di daerah sekitar Banggai. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu bahan pertimbangan kajian lanjutan untuk penilaian bahaya seismik yang lebih baik.

**Kata kunci:** gempabumi susulan, relokasi, Double Difference, gempabumi Banggai, Sesar Peleng

**Abstract** – Sulawesi tectonics is one of the most complicated in the world. The related faults and source mechanism ambiguity leads to earthquake source identification in debate frequently in this region. A devastating earthquake with Mw 6,9 occurred in Banggai, Central Sulawesi on 12 April 2019. The moment tensor analysis from United States Geological Survey (USGS) shows this earthquake has strike-slip mechanisms with 19.5 km depth; *Strike/Dip/Rake*: 46/70/-172 (Nodal Plane 1) and *Strike/Dip/Rake*: 313/83/-20 (Nodal Plane 2). Referring to Indonesian Seismic Sources and Seismic Hazard Maps 2017, this earthquake source still unmapped. Though the Nodal Plane 2 solution can be associated with Toili Fault which is trending in SouthEast-NorthWest direction, however, the relocation result of 114 aftershocks show the seismicity trend more precision in Southwest-Northeast direction that seemingly related to Peleng Fault (match with Nodal Plane 1). Aftershocks distribution spreads in 5 – 20 km depth vertically. If assuming Peleng Fault extends to the mainshock location, the fault length which was originally 44 km become 87.1 km and maximum magnitude increase > Mw 6.9 surely. This research is expected to be one of the considerations of further studies for better seismic hazard assessment.

**Keywords:** aftershocks, earthquake relocation, Double Difference, Banggai earthquake, Peleng Fault

### I. PENDAHULUAN

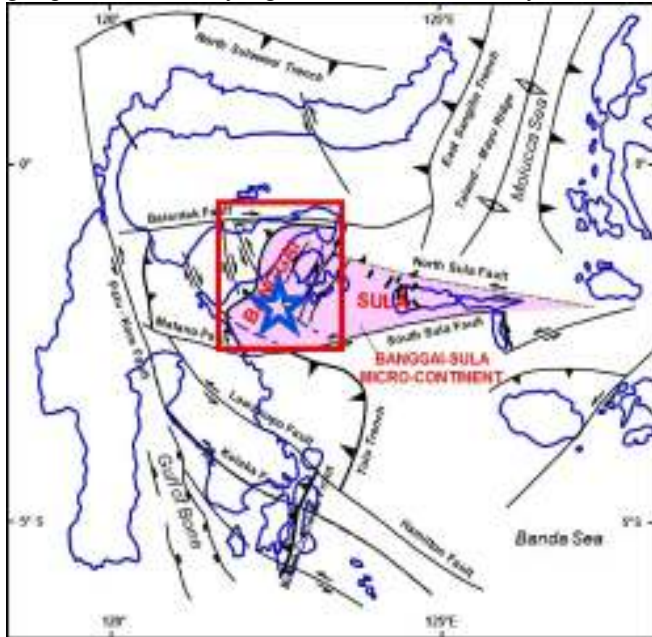
Kompleksitas tatanan tektonik Sulawesi merupakan akibat dari tunjaman tiga lempeng utama, yakni Pasifik, Eurasia dan Indo-Australia [1]. Mikrolempeng Banggai-Sula terbentuk dari lempeng Australia bagian utara yang terpotong dan menyusup masuk ke dalam lempeng Eurasia pada bagian tengah Sulawesi [2,3,4]. Mikrolempeng ini bergerak ke arah Barat dan menumbuk lengan timur Sulawesi, menyebabkan deformasi struktur geologi salah satunya yakni sesar-sesar di sekitar zona tumbukan [3,5]. Kerumitan zona patahan ini seringkali menimbulkan misinterpretasi sumber penyebab suatu gempabumi.

Gempabumi tektonik telah terjadi pada 12 April 2019 pukul 18:40:51 WIB berkekuatan Mw 6,9 yang mengguncang wilayah Kabupaten Morowali dan Kepulauan Banggai [6]. Posisi hiposenter berada pada koordinat 1,89 LS - 122,87 BT di Teluk Tolo (82 km Barat Daya Kepulauan Banggai) dengan kedalaman 17 km. Apabila

mengacu pada peta sesar aktif Indonesia 2017, sumber gempabumi ini belum terpetakan [7]. Hasil analisis mekanisme sumber dari *United States Geological Survey (USGS)* menunjukkan gempabumi ini memiliki mekanisme penyesaran geser dengan kedalaman *centroid* 19,5 km; *Strike/Dip/Rake*: 46/70/-172 (Bidang Nodal 1) dan *Strike/Dip/Rake*: 313/83/-20 (Bidang Nodal 2) [8]. Jika diasosiasikan dengan keberadaan sesar aktif di sekitarnya, solusi bidang Nodal 1 dapat dikaitkan dengan keberadaan Sesar Peleng di Pulau Peleng yang jalurnya berarah Barat Daya - Timur Laut. Namun solusi Nodal 2 sedikit sesuai dengan perpanjangan jalur Sesar Toili yang berarah Barat Laut - Tenggara.

Tren dan lineasi rentetan gempabumi gempabumi susulan dapat membantu proses identifikasi sumber patahan [9,10]. Relokasi gempabumi menghasilkan parameter lokasi yang lebih baik dan presisi [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumber patahan penyebab gempabumi

Banggai 12 April 2019 Mw 6,9 menggunakan lineasi gempabumi susulan yang telah direlokasi. Sebanyak 172.



**Gambar 1.** Tatanan tektonik Sulawesi. Mikro-kontinen Banggai-Sula bertumbukan dan menyusup masuk ke dalam lengan timur Sulawesi. Bintang biru menunjukkan lokasi gempabumi Banggai 12 April 2019 Mw 6,9 (modifikasi dari [4]).

gempabumi susulan akan direlokasi menggunakan algoritma *Double Difference*. Adanya faktor ambiguitas solusi bidang nodal momen tensor, hasil relokasi ini diharapkan mampu membantu proses interpretasi sumber patahan gempabumi Banggai.

**II. DATA DAN METODE PENELITIAN**

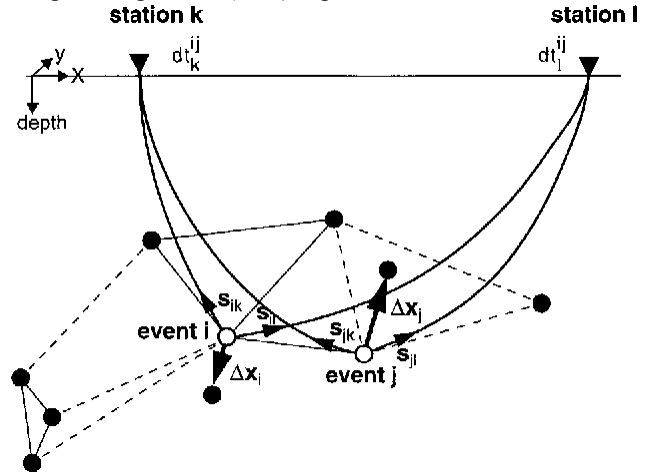
Penelitian ini menggunakan 172 gempabumi susulan katalog BMKG yang terekam hingga 19 April 2019 23:16:01 WIB. Stasiun pencatat sinyal seismik yaitu seismometer ShortPeriod jaringan InaTEWS sebanyak 10 sensor yakni BNSI, KCSI, KMSI, LUWI, MPSI, SANI, SPSI, SRSI, TOLI2, dan TMSI (< 500 km dari episenter) (segitiga biru pada Gambar 4(a)). Model kecepatan gelombang yang digunakan yaitu IASP91 [11].

*A. Relokasi Gempabumi Metode Double Difference*

Makna *Double Difference* merujuk kepada selisih waktu tiba gelombang hasil observasi dan kalkulasi pada suatu pasangan gempabumi (dua perbedaan). Metode ini berasumsi apabila dua gempabumi memiliki jarak hiposenter yang lebih kecil dibanding jarak hiposenter ke sensor pencatat, maka sinar gelombang kedua gempabumi ini dianggap melalui medium yang sama. Dengan demikian selisih waktu tempuh antara kedua event dapat dianggap sebagai fungsi jarak antar hiposenter (Gambar 2)[10,12]. Solusi didapatkan melalui perbaikan selisih vektor pasangan event secara iteratif dengan lokasi dan turunan parsialnya selalu diperbaharui pada setiap iterasi [10].

Program *HypoDD* digunakan untuk menerapkan relokasi gempabumi metode *Double Difference*[13]. Waktu tiba gelombang P dan S ditentukan secara manual dengan program *SAC (Seismic Analysis Code)*[14]. Sinyal difilter *band-pass* 0,7 – 8,0 Hz agar pengamatan onset gelombang menjadi lebih baik.

Perbedaan waktu tempuh antar pasangan event pada masing-masing sensor (*dt.ct*) diperoleh dari hasil konversi



**Gambar 2.** Ilustrasi algoritma *Double Difference*. Gempabumi/event i dan j terekam pada stasiun k dan l dengan selisih waktu tempuh  $dt_k^{ij}$  dan  $dt_l^{ij}$  serta vektor *slowness* *s*. Vektor relokasi ditunjukkan oleh  $\Delta x_i$  dan  $\Delta x_j$ [10,12].

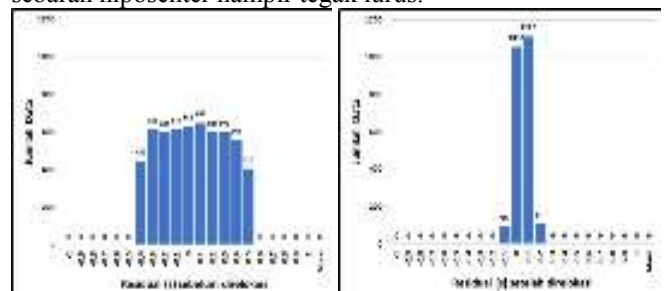
data fase dengan kriteria keterikatan sebagai berikut pada subprogram *ph2dt*, jarak maksimal antar event (*Maxsep*) = 30 km; antar event ke sensor (*Maxdist*) = 500 km; jumlah minimum pasangan event (*Minobs*) = 5. Total perbedaan waktu tempuh gelombang P dan S yang digunakan masing-masing sebesar 9.547 dan 7.761. Pemetaan dalam penelitian ini menggunakan GMT4[15].

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

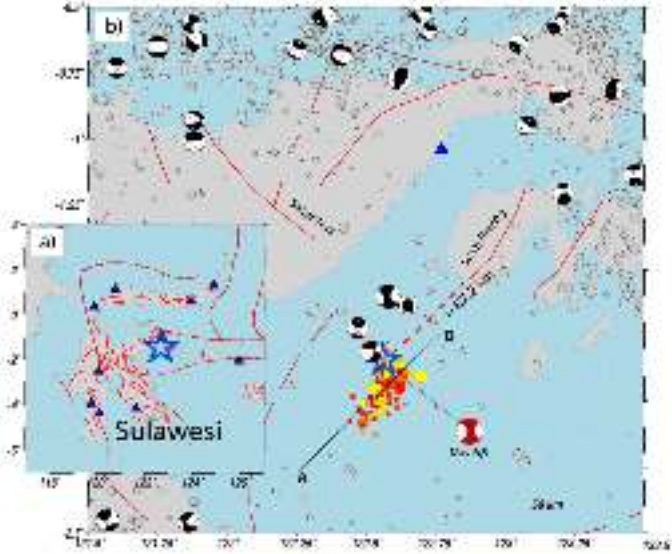
Dari 172 gempabumi susulan yang diproses, sebanyak 114 berhasil terelokasi dengan baik (< 0,2 s). Histogram residual waktu tempuh setelah direlokasi menunjukkan nilai yang mendekati nol lebih banyak dibandingkan sebelum direlokasi. Sebanyak 58 event lain tidak terelokasi diakibatkan tidak memenuhi syarat keterkaitan antar-event maupun berada di outlier dari batasan yang telah ditentukan.

Distribusi gempabumi susulan setelah direlokasi tampak lebih presisi dengan tren berarah Barat Daya – Timur Laut (Gambar 4(a)). Perubahan sebaran hiposenter sebelum dan setelah direlokasi cukup signifikan, bandingkan dengan sebaran hiposenter gempabumi susulan sebelum direlokasi yang lebih acak (Gambar 5(a)). Sebelum direlokasi, sebaran gempabumi berada pada kedalaman 10-30 km dan hampir 80% memiliki kedalaman 10 km (*fix depth*)(Gambar 5(b)). Hal ini dilakukan agar proses inversi dalam penentuan hiposenter secara horizontal menjadi stabil.

Distribusi gempabumi susulan setelah direlokasi tersebar pada kedalaman 3-40 km, namun pusat kluster berada pada kedalaman 5-20 km (Gambar 5(c)) dan secara vertikal sebaran hiposenter hampir tegak lurus.



**Gambar 3.** Histogram residual waktu tempuh gelombang P dan S sebelum direlokasi (kiri) dan setelah direlokasi (kanan).



**Gambar 4.** (a) Peta sesar aktif di Sulawesi. Segitiga biru menandakan sensor seismik yang digunakan dalam penelitian. (b) Peta seismisitas di sekitar lengan timur Sulawesi (Kotak merah pada Gambar 1). Lingkaran bergradasi warna menunjukkan sebaran gempabumi susulan terelokasi. Lingkaran abu-abu merupakan seismisitas sejak 1973 – Februari 2019. Bola fokal dari katalog globalCMT [17,18]. Garis merah merupakan sesar aktif yang terangkum dalam Peta Gempa Nasional 2017 [7].

Tren horizontal dan vertikal gempabumi susulan sesuai dengan solusi bidang Nodal 1 (*Strike/Dip/Rake*: 46/70/-172).

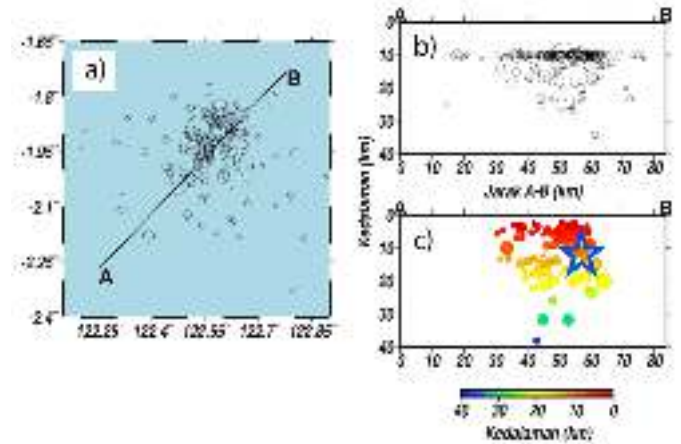
Ada tiga hal yang menjadi pertimbangan bahwa Sesar Peleng merupakan sumber patahan gempabumi Banggai, yakni sesar Peleng merupakan penyesaran geser dan gempabumi Banggai memiliki mekanisme geser. Kemudian tren gempabumi susulan yang telah direlokasi hampir searah dengan jurus/ arah *strike* sesar Peleng. Terakhir, apabila ditarik suatu perpanjangan atau kemenerusan garis patahan ke arah laut menuju Teluk Tolo, maka lokasi *mainshock* akan berhimpit dengan Sesar Peleng.

Zona patahan di daerah Kepulauan Banggai cukup rumit, keterbatasan data membuat kuantifikasi deformasi dan identifikasi parameter patahan aktif masih belum lengkap dan cukup akurat [7]. Kemungkinan gempabumi ini diakibatkan oleh patahan yang belum teridentifikasi masih ada.

Peta Gempa Nasional 2017 merangkum bahwa Sesar Peleng memiliki laju sesar sebesar 1,0 mm/tahun dengan pergerakan mendatar, panjang patahan 44 km dengan magnitudo maksimum 6,9 Mw [7]. Jika diasumsikan Sesar Peleng memanjang hingga ke titik hiposenter maka panjangnya menjadi ~87,2 km (garis merah putus-putus pada Gambar 4(b)). Hasil kalkulasi menggunakan rumusan Wells-Coppersmith dengan asumsi sesar geser menunjukkan geometri sebesar itu mampu menghasilkan gempa dengan magnitudo 7,20 Mw (panjang x lebar = 84,37 x 20,55 km) [16]. Setidaknya hal ini menyebabkan bahaya seismik yang lebih tinggi dibandingkan yang terangkum dalam Peta Gempa Nasional 2017 [7].

Identifikasi struktur geologi daerah utara Kepulauan Banggai-Sula secara detail telah dilakukan melalui pemetaan batimetri resolusi tinggi dan data seismik [3].

Penelitian ini mungkin dilakukan karena didasari oleh aktifnya seismisitas di daerah tersebut.



**Gambar 5.** (a) Distribusi gempabumi susulan sebelum direlokasi. (b) Penampang melintang garis A-B terhadap gempabumi susulan sebelum direlokasi. (c) Setelah direlokasi.

Sebaliknya, meskipun daerah sekitar Teluk Tolo memiliki seismisitas yang tidak terlalu aktif, namun data katalog globalCMT menunjukkan setidaknya empat gempabumi signifikan sebelum gempabumi Banggai 12 April 2019 6,9 Mw dengan mekanisme penyesaran geser tiga event dan satu event penyesaran naik [17,18].

Sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait geometri sesar di sekitar Kepulauan Banggai khususnya Teluk Tolo (daerah Selatan), seperti monitoring GPS [19], penginderaan jauh, pemetaan geologi dan geomorfologi, paleoseismologi serta analisis kegempaan [20].

**IV. KESIMPULAN**

Penelitian ini berhasil merelokasi dengan baik 114 gempabumi susulan gempabumi Luwuk 12 April 2019 Mw 6,9 menggunakan algoritma *Double Difference*. Sebaran gempabumi susulan lebih baik dan presisi berarah Barat Daya – Timur Laut dengan pusat kluster pada kedalaman 5-20 km. Tren ini sesuai dengan bidang Nodal 1 (*Strike/Dip/Rake*: 46/70/-172). Ditinjau dari jenis penyesaran, arah tren/ lineasi gempabumi susulan serta perpanjangan garis patahan menuju *mainshock*, maka Sesar Peleng dapat diasosiasikan sebagai sumber patahan penyebab gempabumi Banggai.

Magnitudo maksimum dari Sesar Peleng menjadi > 6,9 Mw apabila diasumsikan memanjang hingga ke *mainshock* (panjang patahan ~87,2 km), berakibat pada bahaya seismik yang lebih tinggi. Data katalog globalCMT menunjukkan empat gempabumi besar yang terjadi di Teluk Tolo sebelum gempabumi Luwuk 12 April 2019 Mw 6,9. Hal ini mestinya mampu menjadi dasar penelitian komprehensif lanjutan terkait deformasi dan sesar aktif di wilayah ini.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Kami berterima kasih kepada BMKG yang telah menyediakan data katalog dan sinyal seismik gempabumi susulan gempabumi Banggai 12 April 2019 Mw 6,9.

**PUSTAKA**

[1] Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (No. 1078). US Govt. Print. Off.

- [2] Garrard, R. A., & JB Supandjono, S. (1988). The geology of the Banggai-Sula microcontinent, eastern Indonesia.
- [3] Watkinson, I. M., Hall, R., & Ferdian, F. (2011). Tectonic re-interpretation of the Banggai-Sula–Molucca Sea margin, Indonesia. *Geological Society, London, Special Publications*, 355(1), 203-224.
- [4] Satyana, A. H., & Zaitun, S. (2016). Origins of Oils Aand Gases at Banggai–Sula Microcontinent, Eastern Sulawesi–North Moluccas: Constraints from Biomarkers and Isotope Geochemistry–Implications for Further Exploration of Cenozoic and Pre-Cenozoic Objectives.
- [5] Simandjuntak, T. O., & Barber, A. J. (1996). Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. *Geological Society, London, Special Publications*, 106(1), 185-201.
- [6] BMKG, Press Release, 2019. Website:<https://www.bmkg.go.id/press-release/?p=gempabumi-tektonik-m-69-mengguncang-kabupaten-morowali-dan-kepulauan-banggai-berpotensi-tsunami&tag=press-release&lang=ID>, diakses tanggal 6 Oktober 2019.
- [7] Nasional, P. S. G. (2017). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum.
- [8] USGS, Earthquake, 2019. Website:<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us700034xq/moment-tensor>, diakses tanggal 6 Oktober 2019.
- [9] Valoroso, L., Chiaraluce, L., Piccinini, D., Di Stefano, R., Schaff, D., & Waldhauser, F. (2013). Radiography of a normal fault system by 64,000 high-precision earthquake locations: The 2009 L'Aquila (central Italy) case study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(3), 1156-1176.
- [10] Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353-1368.
- [11] Kennett, B. L., Engdahl, E. R., & Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122(1), 108-124.
- [12] Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono, M., Widiyantoro, S., Sulastri, S., Susilanto, P., ... & Setyonegoro, W. (2012). Relokasi Hiposenter Gempabumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik Double Difference. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(3).
- [13] Waldhauser, F. (2001). hypoDD--A program to compute double-difference hypocenter locations.
- [14] Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., Minner, L., Lee, W. H. K., Kanamori, H., ... & Kisslinger, C. (2003). SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. *The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 81, 1613-1620.
- [15] Wessel, P., & Smith, W. H. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47), 579-579.
- [16] Wells, D. L., & 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*, 84(4), 974-1002.
- [17] Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825-2852.
- [18] Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1-9.
- [19] Meilano, I., Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sarsito, D., Rahma Hanifa, R., ... & Fukuda, Y. (2012). Slip rate estimation of the Lembang Fault West Java from geodetic observation. *Journal of Disaster Research*, 7(1), 12-18.
- [20] Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate of an orthogonal subduction system. *Arizona State University*.