

# Analisis Pola Tegasan untuk Menentukan Tipe Sesar Grindulu di Pacitan, Jawa Timur

Arif Haryono<sup>1,\*</sup>

<sup>1)</sup> **Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Mulawarman, Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur**

Email: <sup>\*</sup> arif.haryono@fmipa.unmul.ac.id

## ABSTRAK

Sesar Grindulu merupakan salah satu sesar aktif di Kabupaten Pacitan yang aktivitasnya telah beberapa kali menyebabkan terjadinya gempa bumi. Posisinya yang memanjang dengan arah timur laut – barat daya seakan membelah Kabupaten Pacitan menjadi dua bagian, hal ini membuat Sesar Grindulu menjadi ancaman serius bagi masyarakat Pacitan. Salah satu langkah mitigasi bencana yang bisa dilakukan adalah dengan mengidentifikasi karakteristik Sesar Grindulu untuk mendapatkan informasi sebanyak mungkin. Dalam penelitian ini, tipe Sesar Grindulu ditentukan berdasarkan analisis pola tegasan menggunakan *software* Win-Tensor. Data masukan berupa *dip* dan *strike* adalah data sekunder hasil penelitian sebelumnya. Hasil analisis pola tegasan menunjukkan bahwa tegasan maksimum ( $\sigma_1$ ) merupakan gaya kompresi dan tegasan minimumnya ( $\sigma_3$ ) adalah gaya regangan, dimana keduanya berarah horisontal. Sedangkan tegasan menengahnya ( $\sigma_2$ ) berarah vertikal. Pola tegasan tersebut menunjukkan bahwa Sesar Grindulu termasuk dalam jenis sesar geser mengiri. Sementara itu, hasil proyeksi stereografi memperlihatkan bahwa tegasan utamanya ( $\sigma_1$ ) berarah N17°E, sedangkan bidang sesarnya memiliki arah N60°E. Berdasarkan sistem sesar geser menurut konsep Moody dan Hill, Sesar Grindulu digolongkan ke dalam sesar geser orde pertama karena gaya kompresi terbesarnya menggerus pada sudut 43°.

Kata Kunci: Sesar Grindulu, Pola Tegasan, Sistem Sesar Geser

## ABSTRACT

*The Grindulu fault is one of the active faults in Pacitan Regency whose activity has caused earthquakes several times. Its position that extends in the northeast-southwest direction seems to divide Pacitan Regency into two parts, this makes the Grindulu Fault a serious threat to the people of Pacitan. One of the disaster mitigation steps that can be done is to identify the characteristics of the Grindulu Fault to get as much information as possible. In this study, the type of Grindulu Fault was determined based on the analysis of stress patterns using Win-Tensor software. Input data in the form of dip and strike are secondary data from previous studies. The results of the stress pattern analysis show that the maximum stress ( $\sigma_1$ ) is the compression force and the minimum stress ( $\sigma_3$ ) is the strain force, where both are horizontally directed. While the intermediate stress ( $\sigma_2$ ) is vertically directional. The stress pattern suggests that the Grindulu Fault belongs to the type of strike-slip fault. Meanwhile, stereographic projection results show that its principal stress ( $\sigma_1$ ) is towards N17°E, while the fault plane has an N60°E direction. Based on the strike-slip fault system according to Moody and Hill concepts, the Grindulu Fault is classified as a first-order strike-slip fault because of its greatest compression force shearing at an angular of 43°.*

Keywords: Grindulu Fault, Stress Pattern, Strike-slip Fault System

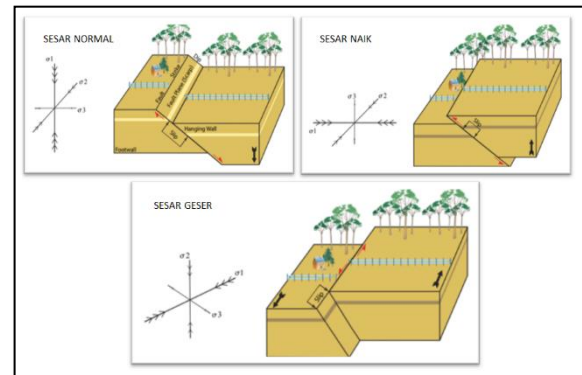
## 1. PENDAHULUAN

Kabupaten Pacitan merupakan salah satu kabupaten yang relatif rawan terhadap terjadinya bencana alam. Beberapa bencana yang pernah melanda Kabupaten Pacitan diantaranya adalah banjir, tanah longsor, dan gempa bumi. Terkait masalah gempa bumi, Sesar Grindulu dianggap sebagai salah satu penyebab utamanya. Meskipun demikian, Sesar Grindulu belum diperhitungkan dalam pembuatan peta sumber dan bahaya gempa bumi di Indonesia yang disusun oleh tim Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) tahun 2017 (Irsyam *et al.*, 2017).

Sesar dapat didefinisikan sebagai retakan batuan penyusun kerak bumi yang telah atau sedang mengalami pergerakan. Sebagian besar sesar yang ada di lapisan kerak bumi (*crust*) adalah hasil dari gaya-gaya yang bekerja pada tektonika lempeng. Berdasarkan gerak blok batuan, secara umum sesar dapat dibagi menjadi tiga tipe, yaitu sesar normal/turun (*normal fault*), sesar naik (*reverse fault*), dan sesar geser (*strike-slip fault*).

Pada sesar normal, tegangan maksimum ( $\sigma_1$ ) berarah vertikal dan posisi tegangan minimumnya ( $\sigma_3$ ) adalah horisontal. Hal ini menyebabkan *hanging wall* bergerak turun relatif terhadap *footwall*. Sebaliknya, pada sesar naik, arah horisontal mempunyai tegangan yang maksimum dan arah vertikal mempunyai tegangan minimum, sehingga *hanging wall* justru bergerak naik relatif terhadap *footwall*. Sedangkan pada sesar geser, baik tegangan maksimum maupun minimum keduanya berarah horisontal yang menyebabkan *hanging wall* bergerak secara mendatar relatif terhadap *footwall* (Bader, 2020). Gambar 1 memperlihatkan diagram blok batuan dan arah setiap tegangan ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , dan  $\sigma_3$ ) pada masing-masing tipe sesar. Ketiga jenis sesar tersebut kemudian berkembang menjadi beberapa jenis sesar yang lain seperti *thrust fault*, *oblique-slip fault*, *wrench fault*, dan lain-lain. *Thrust fault* adalah tipe sesar naik dimana sudut kemiringan bidang sesar (*dip*) kurang dari

atau sama dengan  $45^\circ$ , sedangkan *oblique-slip fault* yaitu sesar dimana patahan yang terjadi adalah kombinasi antara sesar naik/turun dengan sesar geser, sehingga selain ada pergerakan naik/turun juga ada pergerakan ke kiri atau ke kanan.



Gambar 1. Diagram blok batuan dan arah tegangan pada setiap tipe sesar (Bader, 2020)

Selanjutnya, jenis sesar lain yang juga populer dalam bidang ilmu geologi adalah *wrench fault*. Menurut Moody dan Hill (1956), *wrench fault* adalah istilah untuk menggambarkan keretakan di kerak bumi dimana pergerakan antara satu blok dengan blok yang lain terjadi secara horisontal dan bidang patahannya berbentuk vertikal. Dengan kata lain, *wrench fault* adalah tipe sesar geser dimana besarnya *dip* mendekati sudut  $90^\circ$ . Meskipun secara teori *wrench fault* seharusnya mempunyai bidang sesar yang vertikal, namun pada kenyataannya bidang sesar dengan kecuraman lebih dari  $70^\circ$  sering disebut *wrench fault* (Harding, 1990).

## 2. TEORI

### Klasifikasi Sesar Menurut Anderson

Zoback (2007) menyebutkan bahwa menurut klasifikasi Anderson (1951), jenis-jenis sesar dibagi berdasarkan besar dan arah tegangan utama (*principal stress*) yang bekerja pada bidang sesar. Terdapat tiga *principal stress* yaitu  $S_1$ ,  $S_2$ , dan  $S_3$ , dimana besarnya memenuhi aturan  $S_1 > S_2 > S_3$ . Ketiga komponen tersebut dipisahkan menjadi dua orientasi sumbu, yaitu sumbu horisontal ( $S_h$ ) dan sumbu vertikal ( $S_v$ ).

Sumbu horisontal dibagi menjadi menjadi dua sumbu yaitu sumbu horisontal maksimum ( $S_{Hmax}$ ) dan sumbu horisontal minimum ( $S_{Hmin}$ ), sedangkan sumbu vertikal hanya memiliki satu sumbu saja. Sumbu-sumbu inilah yang mengontrol terbentuknya macam-macam rezim sesar, seperti sesar turun (*normal fault*), sesar geser (*strike-slip fault*), dan sesar naik (*reverse fault*). Hubungan antara besarnya tegasan dengan jenis sesar menurut Anderson diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis sesar berdasarkan besar dan arah tegasan menurut Anderson (Zoback, 2007)

Jenis Sesar	Tegasan		
	$S_1$	$S_2$	$S_3$
Turun	$S_v$	$S_{Hmax}$	$S_{Hmin}$
Geser	$S_{Hmax}$	$S_v$	$S_{Hmin}$
Naik	$S_{Hmax}$	$S_{Hmin}$	$S_v$

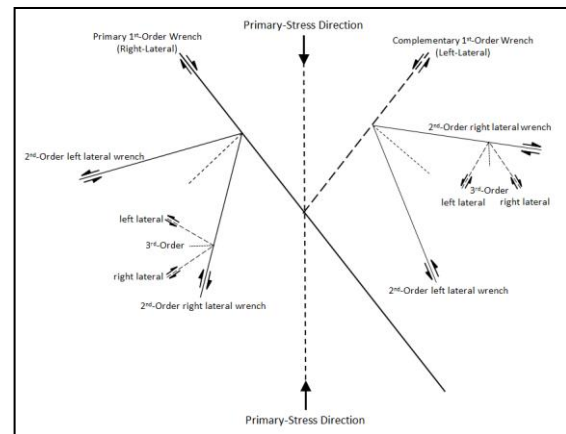
### Sistem Sesar Geser Berdasarkan Konsep Moody dan Hill

Sesar geser (*strike-slip fault*), atau dalam konsep Moody dan Hill (1956) sering disebut sebagai *wrench fault*, adalah sebuah sesar dimana bidang kemiringannya (*dip*) mempunyai kecuraman lebih dari  $70^\circ$  dan proses pembentukannya sangat dipengaruhi oleh adanya *principal stress*. Berdasarkan klasifikasi Anderson, tegasan maksimum ( $\sigma_1$ ) dan minimum ( $\sigma_3$ ) pada sesar geser berarah horisontal. Sedangkan tegasan menengahnya ( $\sigma_2$ ) berarah vertikal.

Pada umumnya bidang sesar geser digambarkan sebagai bidang vertikal, sehingga istilah *hanging wall* dan *footwall* tidak lazim digunakan di dalam sistem sesar ini. Berdasarkan gerak relatifnya, sesar geser dibedakan menjadi *sinistral* dan *dekstral*. Istilah *sinistral* dan *dekstral* ini mengacu pada komponen horisontal dari arah gerakan kedua bidang sesar. Gerakan dikategorikan *sinistral* ketika blok batuan bergerak ke kiri atau ketika blok di sebelah kiri bergerak menuju ke pengamat. Sebaliknya, sesar geser dinamakan *dekstral* ketika blok batuan bergerak ke kanan atau

blok di sebelah kanan bergerak menuju pengamat.

Model pembentukan sesar geser berdasarkan konsep Moody dan Hill (1956) ini sangat berkaitan dengan arah tegasan utamanya seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem Sesar Geser Berdasarkan Konsep Moody dan Hill

Berdasarkan hubungan tegasan utama dengan unsur-unsur struktur yang terbentuk, Moody dan Hill (1956) mengungkapkan konsep tentang sistem sesar geser sebagai berikut:

1. Suatu materi homogen isotropik yang dikenai oleh suatu gaya kompresi akan menggerus pada sudut sekitar  $30^\circ$  terhadap arah tegasan utama yang mengenainya. Jika sudut maksimum yang dihasilkan oleh bidang gerus dengan tegasan utama sekitar  $45^\circ$ , maka sesar geser yang terbentuk dikategorikan ke dalam sesar orde pertama.
2. Sesar orde kedua dalam sistem ini muncul akibat adanya tegasan orde kedua (sekunder) yang berarah tegak lurus terhadap bidang gerus orde pertama. Pola pembentukan sesar orde kedua ini sama dengan pola pembentukan pada sesar orde pertama.
3. Sesar orde ketiga akan mempunyai arah yang mirip dengan sesar orde pertama, sehingga akan sangat sulit untuk membedakan orde ke-empat dan seterusnya. Dalam kenyataannya, kita

dapat menentukan orde pertama dan kedua dengan relatif mudah, namun orde ketiga dan seterusnya akan sulit untuk ditentukan.

### 3. METODE PENELITIAN

Proses proyeksi stereografi untuk menentukan pola tegasan memerlukan data berupa *strike* dan *dip*. Data *dip* yang digunakan adalah data yang diperoleh dari metode *Self-Potential* (Haryono *et al.*, 2020), sedangkan data *strike* menggunakan data hasil dari penelitian Cholifah *et al.* (2020). Hasil dari proses ini berupa arah tegasan utama ( $\sigma_1$ ), tegasan menengah ( $\sigma_2$ ), dan tegasan minimum ( $\sigma_3$ ) yang dapat digunakan untuk menentukan sistem sesar geser berdasarkan konsep Moody dan Hill (1956). *Software* yang digunakan dalam proses ini adalah Win-Tensor dengan metode *Right Dihedron* yang dikembangkan oleh Delvaux dan Sperner (2003).

Selain menghasilkan pola tegasan, pengolahan data menggunakan Win-Tensor juga memberi informasi nilai rasio tegasan (*stress ratio R*) dan indeks tegasan (*stress index R'*). Nilai *R* dan *R'* ini dapat digunakan untuk menentukan tipe rezim tegasan. Menurut Delvaux *et al.* (1997), rezim tegasan dikelompokkan menjadi tiga tipe, yaitu *extensive* ( $\sigma_1$  berarah vertikal), *strike-slip* ( $\sigma_2$  berarah vertikal), dan *compressive* ( $\sigma_3$  berarah vertikal). Berdasarkan ketiga tipe tersebut, rezim tegasan dapat dibagi lagi sebagai berikut:

- *Radial Extensive*, jika  $\sigma_1$  vertikal dan  $0 < R < 0,25$
- *Pure Extensive*, jika  $\sigma_1$  vertikal dan  $0,25 < R < 0,75$

- *Transtensive*, jika  $\sigma_1$  atau  $\sigma_2$  vertikal dan  $0,75 < R < 1$
- *Pure Strike-Slip*, jika  $\sigma_2$  vertikal dan  $0,25 < R < 0,75$
- *Transpressive*, jika  $\sigma_2$  atau  $\sigma_3$  vertikal dan  $0 < R < 0,25$
- *Pure Compressive*, jika  $\sigma_3$  vertikal dan  $0,25 < R < 0,75$
- *Radial Compressive*, jika  $\sigma_3$  vertikal dan  $0,75 < R < 1$

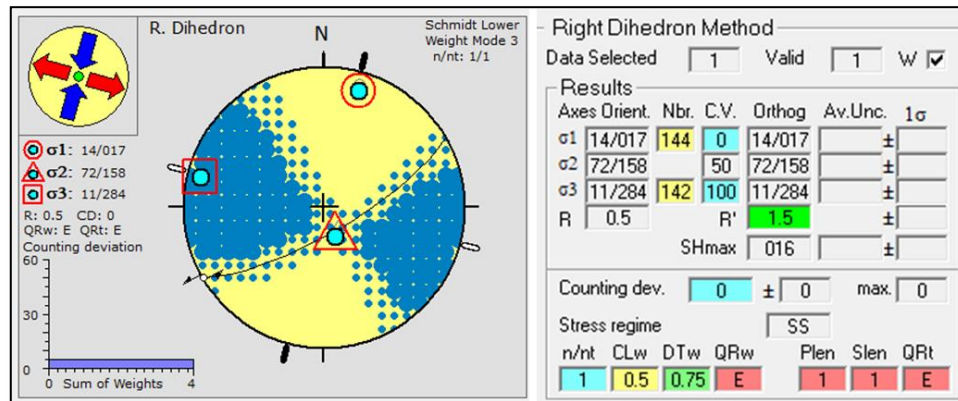
Sedangkan pengelompokkan rezim tegasan berdasarkan nilai *R'* adalah sebagai berikut:

- *Extensive*, jika  $R' = R$  dan  $\sigma_1$  vertikal
- *Strike-Slip*, jika  $R' = 2 - R$  dan  $\sigma_2$  vertikal
- *Compressive*, jika  $R' = 2 + R$  dan  $\sigma_3$  vertikal

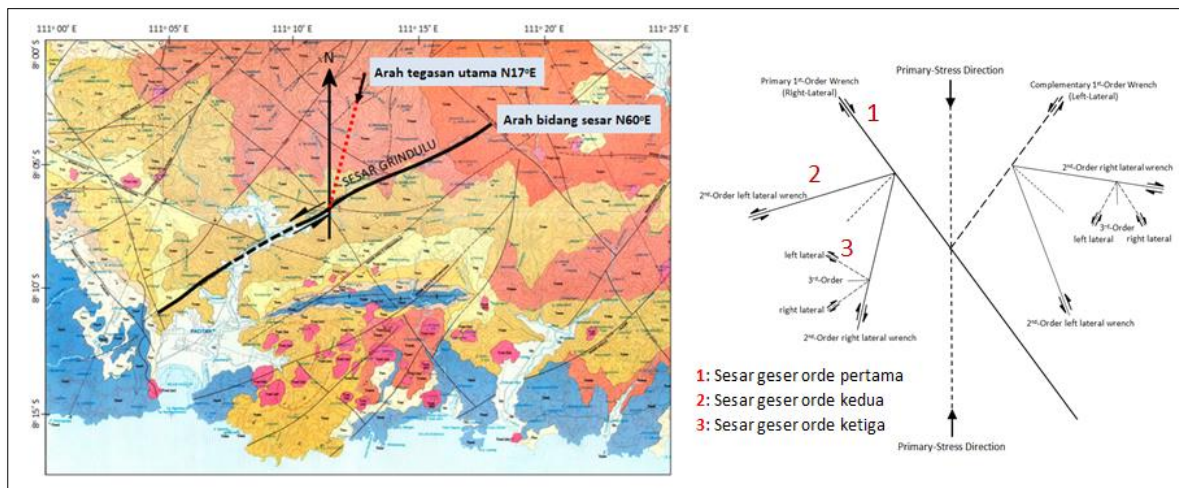
Selanjutnya, berdasarkan arah tegasan utama dan bidang sesarnya dapat ditentukan orde dari sistem sesar geser berdasarkan konsep Moody dan Hill.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola tegasan yang dihasilkan dari proses proyeksi stereografi menggunakan *software* Win-Tensor dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa tegasan maksimumnya ( $\sigma_1$ ) berupa gaya kompresi yang menekan dari atas dan bawah (tanda panah warna biru), sedangkan tegasan minimumnya ( $\sigma_3$ ) berupa gaya regangan ke kiri dan ke kanan (tanda panah warna merah). Tegasan maksimum dan minimum ini keduanya berarah horisontal, sedangkan tegasan menengahnya ( $\sigma_2$ ) berarah vertikal. Berdasarkan klasifikasi Anderson, pola tersebut menunjukkan bahwa Sesar Grindulu termasuk sesar geser mengiri (*sinistral*).



Gambar 3. Pola Tegasan pada Sesar Grindulu



Gambar 4. Pola Tegasan Sesar Grindulu Berdasarkan Konsep Moody dan Hill

Selanjutnya, menurut Delvaux *et al.*, (1997), dengan mempertimbangkan arah tegasan menengah ( $\sigma_2$ ) adalah vertikal serta nilai  $R = 0,5$  dan  $R' = 1,5$  ( $R' = 2 - R$ ); maka rezim tegasan Sesar Grindulu dikategorikan bertipe *pure strike-slip*. Hasil ini sesuai dengan peta geologi lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992) serta hasil dari beberapa penelitian lainnya (Abdullah *et al.*, 2003; Fahrudin *et al.*, 2019; Gultaf *et al.*, 2015).

Sementara itu, hasil proyeksi stereografi memperlihatkan bahwa tegasan utamanya ( $\sigma_1$ ) berarah N17°E, sedangkan bidang sesarnya memiliki arah N60°E. Berdasarkan sistem sesar geser menurut konsep Moody dan Hill (1956), Sesar Grindulu digolongkan ke dalam sesar geser orde pertama karena gaya kompresi terbesarnya menggerus (*shearing*) pada

sudut 43°. Pola tegasan Sesar Grindulu berdasarkan konsep sesar geser Moody dan Hill tersebut diperlihatkan pada Gambar 4, dimana arah tegasan utama ditunjukkan oleh garis putus-putus warna merah sedangkan arah bidang sesarnya sesuai dengan arah Sesar Grindulu.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis pola tegasan dapat diketahui bahwa tipe Sesar Grindulu adalah sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan rezim tegasannya dikategorikan bertipe *pure strike-slip*. Sedangkan jika ditinjau dari konsep Moody dan Hill, Sesar Grindulu dikategorikan ke dalam sesar geser orde pertama.



## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Rasa terima kasih dan penghargaan saya sampaikan kepada Dr. Damien Delvaux yang telah menyediakan *software* Win-Tensor untuk proses pengolahan data sebagai langkah untuk menganalisis pola tegasan pada sesar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, C.I., Magetsari, N.A., Purwanto, H.S., 2003. Analisis Dinamik Tegasan Purba pada Satuan Batuan Paleogen – Neogen di Daerah Pacitan dan Sekitarnya, Provinsi Jawa Timur Ditinjau dari Studi Sesar Minor dan Kekar Tektonik. Proceeding ITB Sains dan Teknologi. Vol. 35, pp. 111–127.
- Bader, J.W., 2020. Wrench Fault Tectonics.
- Cholifah, L., Mufidah, N., Lazuardi, E., Santosa, B.J., Sungkono, S., Haryono, A., 2020. Identification of the Grindulu Fault in Pacitan, East Java using Magnetic Method. Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya. JPFA, Vol. 10, pp. 22-33.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., San'kov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. Tectonophysics Vol. 282, pp. 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2)
- Delvaux, D., Sperner, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. Geological Society, London, Special Publication. Vol. 212, pp. 75–100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Fahrudin, Hidayatillah, A.S., Maulana, M.J., 2019. Tectonic Relationships and Structural Development between Arjosari, Pacitan, East Java and Tawangmangu, Karanganyar, Central Java, in: GEODETA 2019. Presented at The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration, pp. 47–56. <https://doi.org/10.18502/keg.v4i3.5822>
- Gultaf, H., Sapiie, B., Syaiful, M., Bachtiar, A., Fauzan, A.P., 2015. Paleostress Analysis of the Grindulu Fault in Pacitan and Surrounding Area and its Implication to the Regional Tectonic of East Java, in: Proc. Indonesian Petroleum Association. Presented at the Thirty-Ninth Annual Convention & Exhibition, Indonesian Petroleum Association. <https://doi.org/10.29118/IPA.0.15.G.059>
- Harding, T.P., 1990. Identification of Wrench Faults using Subsurface Structural Data: Criteria and Pitfalls. AAPG Bulletin. Vol. 74(10), pp. 1590–1609. <https://doi.org/10.1306/0C9B2533-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Haryono, A., Sungkono, Agustin, R., Santosa, B.J., Widodo, A., Ramadhany, B., 2020. Model parameter estimation and its uncertainty for 2-D inclined sheet structure in self-potential data using crow search algorithm. Acta Geodaetica et Geophysica. Vol. 55, pp. 691–715. <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00321-5>
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D.H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N.R., Djarwadi, D., Faizal, L., Sunarjito (Eds.), 2017. Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017, Cetakan pertama. ed. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum, Bandung.

Moody, J.D., Hill, M.J., 1956. Wrench-fault Tectonics. *Bulletin Geological Society America*. Vol. 67, pp. 1207–1246.

Samodra, H., Gafoer, S., Tjokrosoepetro, S., 1992. *Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa*.

Zoback, M.D., 2007. *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.