

Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempa Mikro Akibat Aktivitas Stimulasi Hidrolik pada Lapangan Panas Bumi Tipe *Hot Dry Rock* (HDR)

Nanda Hanyafa Maulida^{1*}, Muhamad Firdaus Al Hakim², Hesti³, Suharno⁴

^{1*,3,4}Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Indonesia, nandahanyfa@eng.unila.ac.id

²Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia

*Korespondensi email: nandahanyfa@eng.unila.ac.id

Abstract: A series of hydraulic simulations were conducted to enhance permeability and increase the production of hot fluid in a Hot Dry Rock (HDR) geothermal field. The stimulation involved injecting water into the hot rock, inducing hydraulic fracturing and resulting in over 2000 micro-earthquake events within the field. Utilizing existing microearthquake data, an analysis of the microearthquake distribution was performed, along with calculating the gradient of the frequency-magnitude distribution of microearthquakes (*b*-value) to assess the heterogeneity conditions induced by high pore pressure. The hypocenter distribution is centered around injection and production locations, displaying a trend that aligns with the main structure trending southwest to northeast. The mapping of *b*-values indicates elevated values in the hydraulic stimulation area, believed to be associated with increased pore pressure resulting from the higher fluid volume in that region. Moreover, high *b*-values were identified beneath the production area, suggesting the potential migration of injection fluid from the hydraulic stimulation process.

Keywords: Geothermal Exploration, Micro-Earthquake, Frequency-Magnitude Distribution, Hot Dry Rock, B-Value

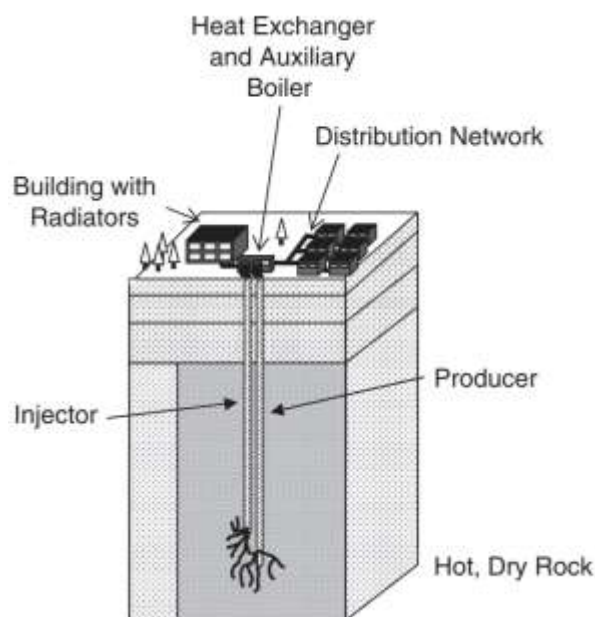
Abstrak: Serangkaian stimulasi hidrolik dilakukan untuk meningkatkan permeabilitas dan produksi fluida panas dari sebuah lapangan panas bumi bertipe *hot dry rock* (HDR). Stimulasi yang dilakukan dengan menginjeksikan air ke dalam batuan panas ini menyebabkan terjadinya rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*) pada batuan dan memicu lebih dari 2000 peristiwa gempa mikro di lapangan tersebut. Berdasarkan data gempa mikro yang ada, dilakukan analisis terhadap sebaran gempa mikro serta perhitungan gradien dari distribusi frekuensi-magnitudo dari gempa mikro (nilai-*b*) untuk melihat kondisi heterogenitas yang disebabkan oleh tekanan pori tinggi. Distribusi hiposenter terpusat pada lokasi injeksi dan produksi dengan tren persebaran yang bersesuaian dengan struktur utama berarah barat daya – timur laut. Hasil pemetaan nilai-*b* menunjukkan bahwa pada area stimulasi hidrolik terdapat nilai-*b* tinggi yang diduga berkaitan dengan besarnya tekanan pori akibat peningkatan jumlah fluida di area tersebut. Ditemukan pula nilai-*b* tinggi di bawah area produksi yang kemungkinan merupakan migrasi fluida injeksi dari stimulasi hidrolik.

Kata kunci: Eksplorasi Panas Bumi, Gempa Mikro, Distribusi Frekuensi-Magnitudo, *Hot Dry Rock*, Nilai-B

PENDAHULUAN

Lapangan panas bumi tipe *hot dry rock* (HDR) merupakan salah satu tipe sistem panas bumi yang mengandung sangat sedikit fluida atau bahkan tidak mengandung fluida di reservoirnya. Magma sebagai sumber panas hanya memanaskan lapisan batuan yang ada di atasnya (Soelaiman, 2016). Lapangan ini biasanya baru dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk menjadi pembangkit listrik atau kebutuhan lainnya setelah dilakukan proses stimulasi hidrolik untuk menginjeksikan air bertekanan tinggi ke dalam batuan panas dan meningkatkan porositas batuan akibat besarnya tekanan air. Air yang berhasil diinjeksikan dari proses stimulasi hidrolik ini akan mengalami pemanasan di dalam pori batuan hingga mencapai titik didihnya, kemudian menghasilkan uap panas yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik. Gambaran dari prinsip panas bumi tipe *hot dry rock* ini dapat dilihat pada

Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip Pemanfaatan Panas Bumi Tipe *Hot Dry Rock (HDR)* (Fanchi, 2010)

Lapangan panas bumi yang menjadi subjek penelitian ini adalah lapangan panas bumi DP yang berada di Nevada. Tiga sumur produksi telah dibor pada pertengahan tahun 1970-an dengan kedalaman 1.372 m. Dua dari sumur ini menghasilkan campuran uap dan air dari rekahan batuan vulkanik. Pembangkit listrik jenis *double flash* dibangun pada tahun 1985 setelah sumur eksplorasi tambahan dibor pada awal tahun 1980. Pembangkit listrik ini berhasil menghasilkan 9,9 MW dari sumber daya dengan suhu 205°C.

Pada tahun 2010 dilakukan proyek peningkatan sistem panas bumi atau *enhance geothermal system (EGS)* dengan stimulasi hidrolik yang dilakukan bertahap selama 3 tahun. Proyek ini bertujuan untuk meningkatkan permeabilitas batuan dan konektivitas hidrolik antara zona injeksi dan produksi dengan melibatkan injeksi larutan limbah dengan suhu yang bervariasi dan tekanan kepala sumur yang berbeda ke salah satu sumur injeksi (sumur 27-15) dalam rentang waktu yang berbeda (*US Department of Energy, 2013*).

Berbagai stimulasi yang dilakukan menyebabkan terjadinya gempa mikro yang berhasil direkam di Lapangan Panas Bumi DP (Chabora dkk., 2012). Beberapa peristiwa gempa mikro terlihat memiliki korelasi antara stimulasi hidrolik yang dilakukan di sumur 27-15 dengan deformasi yang terjadi dalam reservoir meskipun menurut Benato dkk. (2016) korelasi ini masih ambigu karena adanya proses injeksi dari sumur-sumur lainnya. Secara teori, stimulasi hidrolik meningkatkan tekanan pori batuan, peningkatan tekanan pori ini menurunkan tegangan normal pada volume batuan, sehingga menghasilkan tegangan efektif yang lebih rendah (Pearson, 1981). Hal ini menyebabkan adanya pelepasan tekanan tektonik yang telah tersimpan lama dalam batuan dan terjadi pergeseran *nucleation* secara tiba-tiba dengan kata lain, terjadilah gempa bumi mikro (Bachmann dkk., 2012).

Analisis gempa mikro yang terjadi akibat induksi oleh injeksi fluida di lokasi EGS telah banyak dilakukan sebelumnya. Jumlah gempa mikro yang diinduksi oleh stimulasi reservoir dapat memberikan informasi yang cukup dalam karakterisasi reservoir. Salah satu metode yang digunakan adalah menggunakan analisis distribusi frekuensi-

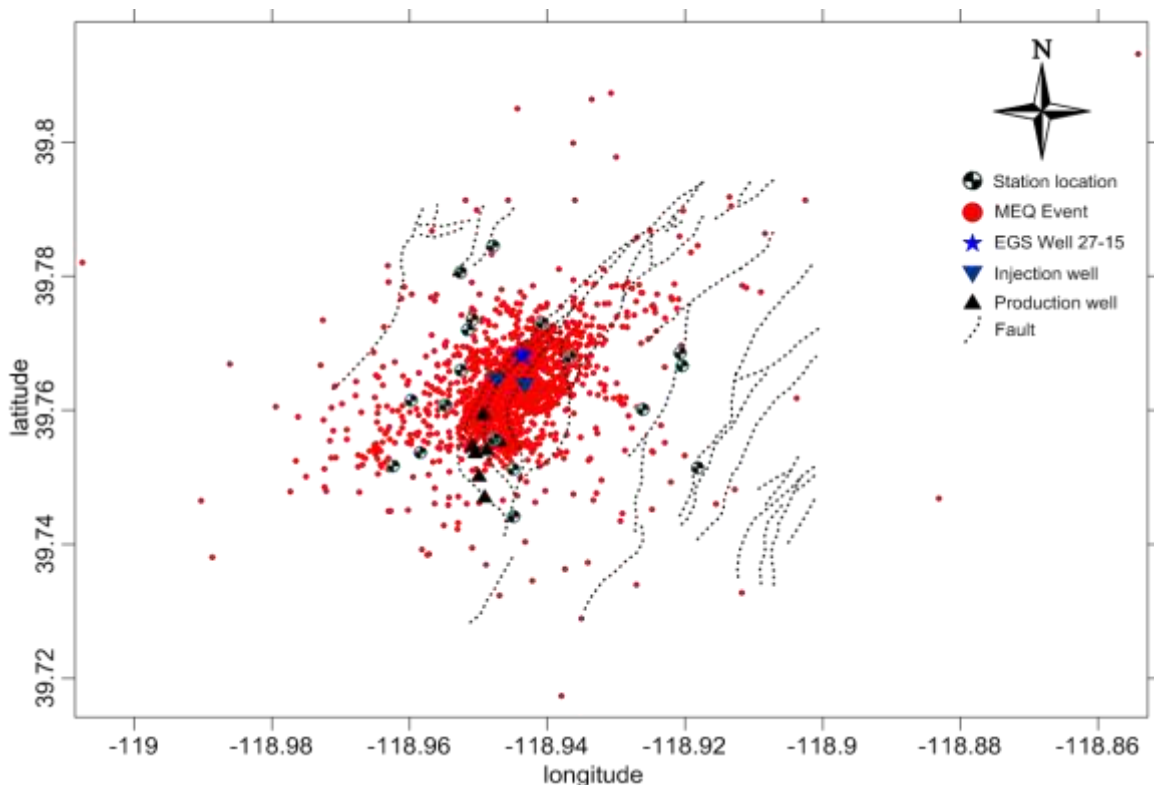
magnitudo untuk memprediksi perubahan tekanan pori dalam reservoir yang disebabkan oleh proses injeksi fluida bertekanan tinggi ke reservoir (Bachmann dkk., 2012; Cuenot dkk., 2008). Parameter yang digunakan adalah gradien yang terbentuk dari distribusi frekuensi-magnitudo gempa atau biasa disebut dengan nilai-b, dimana nilai-b ini dapat memberikan gambaran terkait keberadaan fluida pada daerah yang dipetakan (Murru dkk., 2007; Roberts dkk., 2015; Schuler dkk., 2016), adanya perubahan tekanan pori (Bachmann dkk., 2012), karakteristik tektonik yang menyebabkan terjadinya gempa (El-Isa & Eaton, 2014), dan lain sebagainya.

Pengamatan di wilayah tektonik menunjukkan bahwa ketika sampel diambil dalam volume besar, nilai-b mendekati nilai konstanta 1,0 (Kagan, 1999). Namun, pada skala lokal dan regional, nilai b dapat bervariasi antara 0,8–1,2 (Schorlemmer dkk., 2005; Kamer & Hiemer, 2015) dan bisa mencapai 3,0 (Wiemer & Wyss, 1997; McNutt, 2005) untuk gempa *swarm*. Pada kasus induksi seismik, nilai-b yang didapatkan lebih tinggi dibandingkan dengan kejadian tektonik (Vermeylen & Zoback, 2011; Zhou dkk., 2013) dengan sebaran nilai berkisar antara 0,5 hingga 2,8 (Mousavi dkk., 2017).

METODE PENELITIAN

1. Data

Data yang digunakan untuk penelitian ini diambil dari *Northern California Earthquake Data Center* (2014). Data yang digunakan merupakan *event* gempa mikro yang terekam dari tahun 2010 hingga 2013 dimana pada tahun ini dilakukan proyek *Enhance Geothermal System* (EGS) untuk meningkatkan permeabilitas batuan dan konektivitas hidrolik pada reservoir. Tercatat 2.206 peristiwa gempa mikro yang direkam menggunakan 14 stasiun seismometer yang dikelola bersama oleh tim dari *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) dan *US Geological Survey* (USGS). Magnitudo yang terekam pada seluruh kejadian gempa bervariasi dari -0,73 hingga 2,4. Sebaran kejadian gempa mikro pada lapangan ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sebaran Kejadian Gempa Mikro Akibat Stimulasi Hidrolik

2. Pengolahan Data

2.1. Relokasi Sebaran Hiposenter

Relokasi sebaran hiposenter dilakukan dengan menggunakan metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD) menggunakan aplikasi VELEST (Kissling, 1995). JHD menggunakan banyak event gempa yang diinversi sekaligus (simultan) untuk mendapatkan posisi hiposenter yang sebenarnya. Relokasi dilakukan untuk memperbaiki sebaran hiposenter agar lebih akurat sehingga pemetaan distribusi seismisitas diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

2.2. Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempa Mikro

Hubungan dari distribusi frekuensi gempa kumulatif (N) terhadap magnitudo gempa (M) mengikuti distribusi hukum pangkat dan biasa dituliskan sebagai hubungan Guttenberg–Richter:

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

dimana a dan b masing-masing secara berurutan adalah konstanta yang berhubungan dengan aktivitas dan distribusi ukuran relatif gempa. Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa nilai-b merupakan gradien yang terbentuk dari kurva distribusi frekuensi-magnitudo gempa.

Pada tahap ini dilakukan perhitungan nilai *magnitude of completeness* (M_c) sebagai batas nilai minimum magnitudo yang digunakan untuk penentuan kemiringan kurva frekuensi-magnitudo. Pada penelitian ini nilai M_c dihitung menggunakan metode *maximum curvature* dimana nilai M_c diambil saat nilai log frekuensi-magnitudo mulai berbelok dari trend linier awalnya. Tahapan ini sangat krusial untuk mengoptimalkan jumlah kejadian gempa yang dapat digunakan (Wiemer & Wyss, 2000).

2.3. Perhitungan dan Pemetaan Nilai-b

Nilai-b dihitung dan dipetakan dengan menggunakan aplikasi ZMAPS (Wiemer, 2001). Perhitungan nilai-b dilakukan dengan metode *maximum likelihood* (Aki, 1965; Utsu, 1965; Bender, 1983; Nava dkk., 2017; Bilim, 2019) dengan persamaan:

$$b = \frac{\log e}{\left(\sum_i^N \frac{M_i}{N}\right) - M_c} \quad (2)$$

dimana e adalah konstanta logaritma natural ($e = 2,1718$), N adalah jumlah gempa, dan M adalah magnitudo yang bernilai lebih besar dari M_c (*magnitude of completeness*).

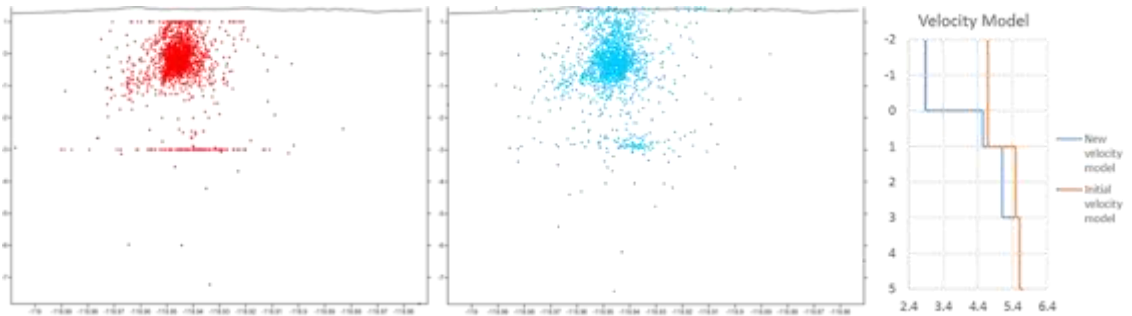
Distribusi nilai-b juga dipetakan pada beberapa penampang horizontal maupun vertikal. Pemetaan nilai-b ini menggunakan sistem grid, dimana setiap titik pada grid menggunakan sampel volume dengan besar $N=50$ kejadian gempa terdekat. Setiap sampel volume dilakukan perhitungan nilai-b dengan ketentuan jumlah minimum peristiwa yang lebih besar dari M_c sebanyak 10 peristiwa. Artinya, program akan menghitung 50 kejadian pada setiap titik grid dan membuat kurva frekuensi-magnitudo menggunakan kejadian tersebut. Nilai-b hanya dapat dihitung jika jumlah kejadian yang lebih besar dari M_c lebih besar dari 10 kejadian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

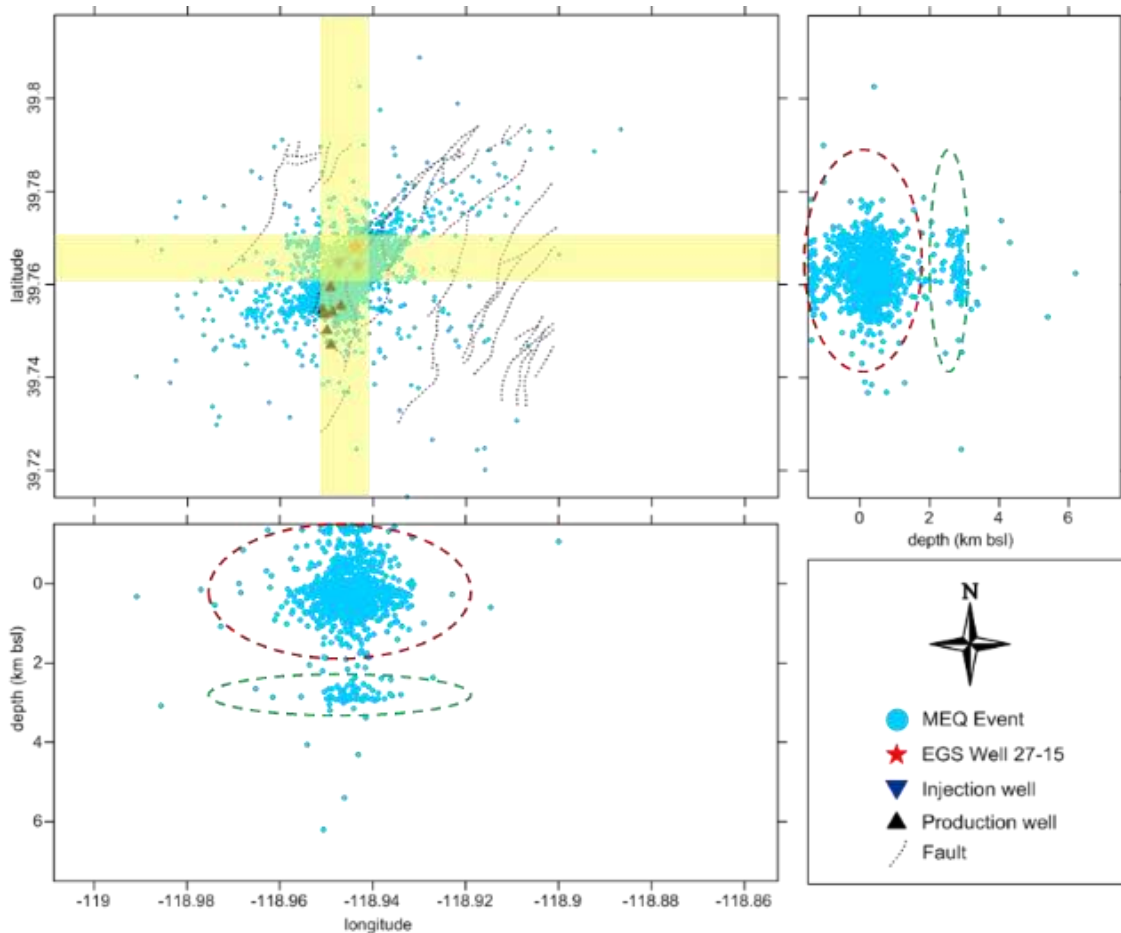
1. Sebaran Seismisitas

Sebaran seismisitas awal yang didapatkan dari data katalog memiliki beberapa

keterbatasan. Untuk itu dilakukan perbaharuan model kecepatan dan relokasi hiposenter dengan menerapkan metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD) menggunakan VELEST. Hasilnya, didapatkan distribusi hiposenter baru seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi Hiposenter Sebelum (Kiri, Titik Merah) dan Sesudah Relokasi (Kanan, Titik Biru) Menggunakan VELEST



Gambar 4. Distribusi Spasial Episenter *Event* Gempa (A), Sebaran Kejadian di Kedalaman di Bagian Bujur (B), Sebaran Kejadian di Kedalaman di Bagian Lintang (C). Lingkaran Putus-Putus Merah dan Hijau Menunjukkan Kelompok *Event*

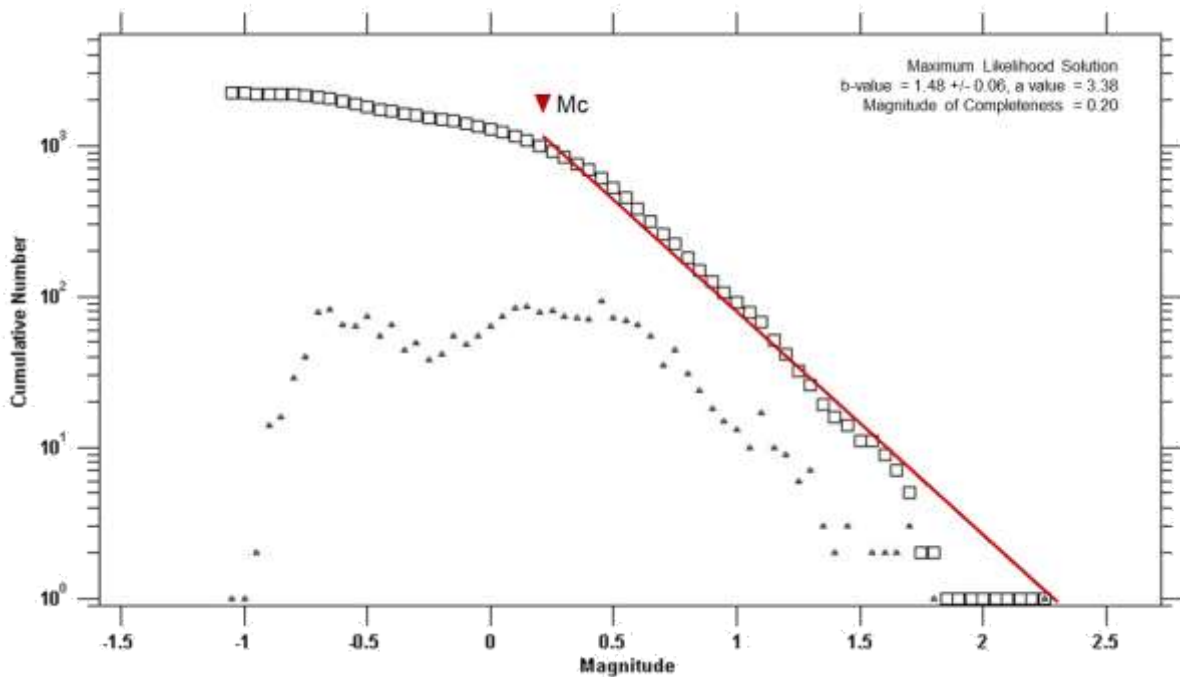
Distribusi *event* yang lebih baik diperoleh setelah relokasi dan efek horizon yang terjadi pada distribusi awal dapat dihilangkan. Pada Gambar 4 dapat dilihat distribusi gempa dari peristiwa gempa yang direlokasi. Terdapat dua kluster kejadian gempa mikro yang dapat diidentifikasi. Kluster lingkaran putus-putus merah diindikasikan terjadi sebagai akibat aktivitas produksi-injeksi serta EGS, sementara kluster hijau

kemungkinan disebabkan oleh aktivitas sesar normal.

Peta lokasi hiposenter (Gambar 4) menunjukkan bahwa tren persebaran gempa mikro mengikuti arah patahan utama yaitu barat daya-timur laut. Distribusi kegempaan ini memiliki konektivitas dengan aktivitas stimulasi hidrolik yang dilakukan di sumur 27-15. Distribusi kejadian seismik secara lateral menunjukkan pola radial dan konsentrasi kejadian tertinggi berada di sekitar EGS dan sumur injeksi. Distribusi kejadian secara vertikal berkisar dari 1,2 km di atas permukaan laut hingga 7,5 km di bawah permukaan laut. Aktivitas seismik yang paling intensif terkonsentrasi pada selang 0 hingga 1 km dibawah permukaan laut. Pola sebaran seismik ini konsisten dengan kedalaman sumur 27-15 yaitu sekitar 1,7 km dari permukaan.

2. *Distribusi Frekuensi-Magnitudo*

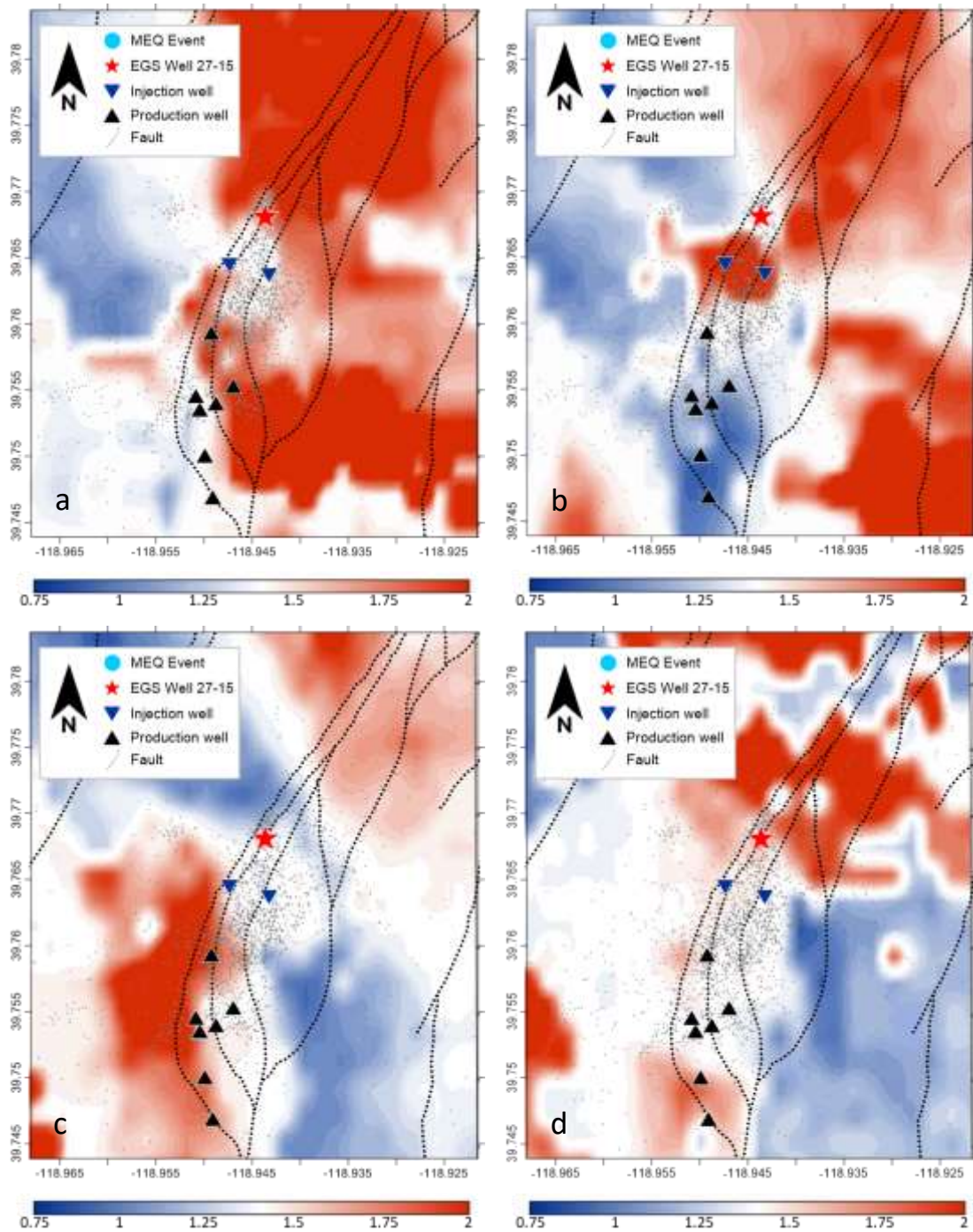
Distribusi frekuensi-magnitudo menggambarkan hubungan magnitudo dan jumlah gempa yang terjadi pada jangka waktu tertentu atau pada zona tertentu. Data frekuensi terjadinya gempa mikro dan magnitudo gempa mikro yang terjadi selama fase EGS diploting secara menyeluruh dan menghasilkan distribusi frekuensi-magnitudo yang dapat dilihat pada Gambar 5. Dapat dilihat bahwa tren distribusi pada nilai magnitudo rendah masih sangat landai dan mulai menukik di magnitudo 0,2 sehingga berdasarkan metode *maximum curvature* ditetapkan nilai M_c sebesar 0,2.



Gambar 5. Kurva Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempa Mikro yang Dihasilkan dari 2206 Data Gempa Mikro. Titik Segitiga Merupakan Plot Besarnya Magnitudo Terhadap Jumlah Gempa, Titik Persegi Merupakan Plot Besarnya Magnitudo terhadap Jumlah Kumulatif Gempa (Dihitung dari Magnitudo Tertinggi), Titik Merah Segitiga Terbalik Adalah Nilai *Magnitude of Completeness* (M_c) dan Garis Merah Merupakan *Trendline* yang Terbentuk dari Data dengan Batas $M_c = 0,2$

Kurva linier yang terbentuk dari sebaran data menghasilkan nilai-b sebesar $1,48 \pm 0,06$. Nilai-b pada wilayah ini secara kualitatif dapat dikatakan tinggi dimana menurut Mousavi dkk. (2017) nilai-b yang tinggi ini menjadi ciri khas gempa yang diakibatkan aktivitas EGS maupun aktivitas perekahan hidrolik. Nilai-b yang tinggi ini juga memiliki beberapa indikasi lain, yaitu tingkat heterogenitas lapangan yang tinggi

(El-Isa & Eaton, 2014), indikasi terdapatnya fluida dan tekanan pori yang tinggi (Bachmann dkk., 2012). Kondisi ini bersesuaian dengan kondisi lapangan dimana aktivitas injeksi fluida ke dalam reservoir meningkatkan volume fluida dalam pori sehingga tekanan pori menjadi lebih tinggi.



Gambar 6. Peta Distribusi Nilai-B pada Elevasi A) 0,5 Km , B) 0 Km, C) -1 Km, D) -2 Km dari Permukaan Air Laut. Lambang Bintang Merah Merupakan Lokasi Sumur EGS 27-15, Segitiga Terbalik Biru Merupakan Sumur-Sumur Injeksi dan Segitiga Hitam Merupakan Sumur Produksi.

3. Peta Distribusi Nilai-b

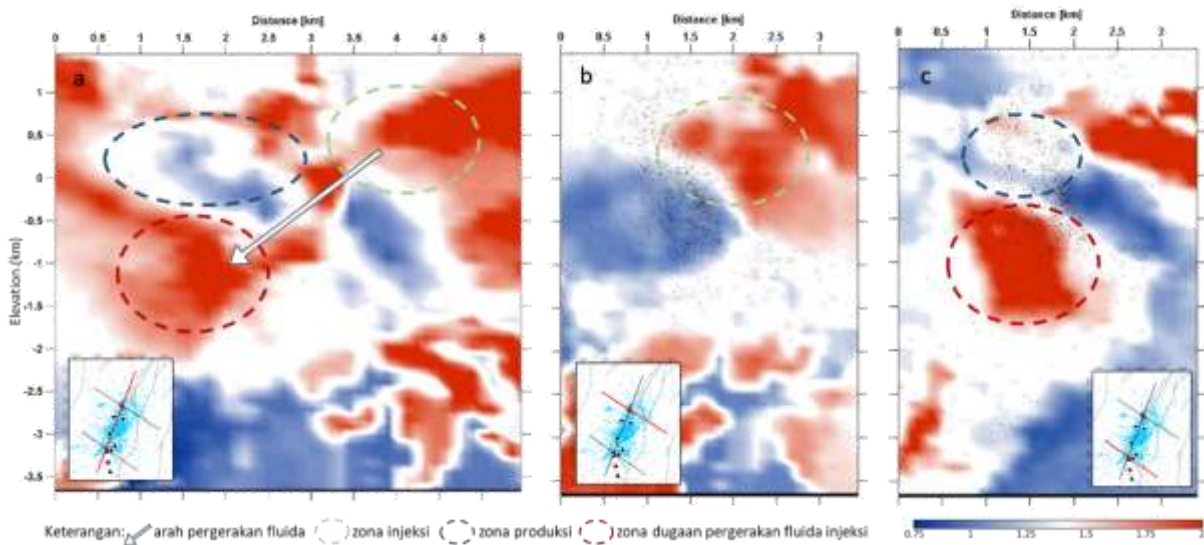
Distribusi nilai-b pada lapangan ini dipetakan secara lateral pada elevasi 0,5 km, 0 km, -1 km dan -2 km yang dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil sebaran nilai-b

menunjukkan kesesuaian dengan distribusi kegempaan dan lokasi sumur 27-15 dan sumur injeksi. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa variasi spasial nilai-b di lapangan ini berkisar antara 0,5 hingga lebih dari 2,0 namun pada peta hanya ditampilkan nilai-b minimum 0,75 dan maksimum 2,0 untuk kemudahan visualisasi dan interpretasi.

Pada gambar 6 kita dapat melihat bagaimana persebaran nilai-b pada keseluruhan lapangan. Pada elevasi 0,5 km di atas permukaan air laut dapat dilihat bahwa secara spasial area tengah hingga barat lapangan memiliki nilai-b yang tinggi (mencapai 2). Hampir seluruh zona injeksi dan sumur EGS serta sebagian kecil zona produksi memiliki nilai-b tinggi. Pada kedalaman ini terdapat bukaan dangkal sumur EGS untuk menginjeksikan fluida, sehingga tingginya nilai-b di area EGS sangat mungkin berkaitan dengan tingginya tekanan pori akibat injeksi fluida yang dimulai pada kedalaman ini. Nilai-b yang relatif lebih rendah pada sebagian besar area produksi bagian selatan, kemungkinan disebabkan oleh rendahnya tekanan pori akibat aktivitas ekstraksi fluida panas untuk keperluan pembangkit listrik.

Di elevasi 0 km sebaran nilai-b yang tinggi masih terlihat di zona injeksi namun mulai berkurang di sumur EGS. Jika dikaitkan dengan keberadaan fluida maka kondisi ini kemungkinan terjadi akibat mulai bergesernya fluida yang diinjeksikan oleh sumur EGS ke bagian selatan lapangan. Pada sumur produksi terlihat nilai-b yang semakin rendah yang menandakan berkurangnya fluida akibat proses produksi.

Pada penampang 6c (elevasi -1 km), anomali tinggi di zona produksi dan sumur EGS semakin rendah. Semakin rendahnya nilai-b ini jika dikaitkan dengan keberadaan fluida maka mungkin terjadi akibat volume fluida di pori yang juga semakin berkurang. Hal ini selaras dengan kedalaman sumur EGS yang hanya mencapai 1,7 km dari permukaan sehingga tidak mencapai lapisan ini. Artinya dilapisan -1 km ini tidak ada injeksi fluida langsung dari sumur. Sementara di zona produksi nilai-b semakin meningkat yang artinya meningkat pula volume fluida dalam batuan. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pergerakan fluida dari injeksi dan sumur EGS telah mencapai area produksi. Pergerakan fluida yang digambarkan dengan nilai-b ini dapat dilihat pula pada penampang melintang di Gambar 7.



Gambar 7. Peta Penampang Melintang Distribusi Nilai-b

Ketinggian permukaan tanah pada area penelitian adalah sekitar 1 km di atas permukaan laut. Penampang melintang 7a berarah barat daya – timur laut, penampang melintang 7b berarah barat daya – tenggara memotong sumur EGS dan penampang

melintang 7c berarah barat daya – tenggara memotong salah satu sumur di zona produksi. Tanda panah pada penampang 7a menunjukkan arah pergerakan fluida, garis melingkar biru putus-putus menunjukkan lokasi zona produksi, garis melingkar hijau putus-putus menunjukkan zona injeksi dan garis melingkar merah putus-putus menunjukkan zona yang diduga lokasi pergerakan fluida injeksi.

Terdapat kontinuitas nilai- b yang tinggi dari kedalaman dangkal di area EGS dan injeksi hingga bagian lebih dalam di area produksi. Perluasan nilai- b tinggi ini jika dikaitkan dengan keberadaan fluida dapat diartikan sebagai migrasi fluida dari EGS dan sumur injeksi ke bagian bawah sumur produksi dan dapat juga dikaitkan dengan keberadaan fluida pada reservoir. Pola migrasi tersebut didukung oleh studi geomekanikal (Benato et al, 2012; Benato & Taron, 2016) dan analisis *tracer test* (Benato et al, 2015) yang juga menunjukkan adanya pergerakan fluida dari sumur EGS ke zona produksi di selatan lapangan.

KESIMPULAN

Distribusi seismisitas menunjukkan tren timur laut – barat daya dengan konsentrasi kejadian tertinggi berada di sekitar sumur EGS dan Sumur Injeksi. Distribusi seismisitas disebabkan oleh stimulasi hidrolik dan aktivitas injeksi. Bagian yang lebih dalam dari klaster gempa mungkin disebabkan oleh sesar aktif di lapangan ini.

Secara umum, nilai- b di Lapangan Panas Bumi bertipe HDR ini lebih tinggi dari 1, menunjukkan adanya heterogenitas dan salah satu ciri kegempaan akibat aktivitas stimulasi hidrolik. Nilai- b yang tinggi di sekitar sumur EGS dan Injeksi disebabkan oleh peningkatan tekanan dalam pori dan keberadaan fluida. Nilai- b yang rendah di sekitar zona produksi mungkin terkait dengan ekstraksi fluida yang menyebabkan penurunan tekanan pori. Adanya nilai- b yang lebih tinggi pada kedalaman 1 km di zona produksi mungkin terkait dengan migrasi fluida dari sumur injeksi dan sumur EGS ke sumur produksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Data *waveform*, metadata, atau data produk untuk penelitian ini diakses melalui *Northern California Earthquake Data Center* (NCEDC), doi:10.7932/NCEDC.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43, 237–239.
- Bachmann, C. E., Wiemer, S., Goertz-Allmann, B. P., & Woessner, J. (2012). Influence of pore-pressure on the event-size distribution of induced earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2012GL051480>
- Benato, S., Hickman, S., Davatzes, N. C., Taron, J., Spielman, P., Elsworth, D., Majer, E. L., & Boyle, K. (2016). Conceptual model and numerical analysis of the Desert Peak EGS project: Reservoir response to the shallow medium flow-rate hydraulic stimulation phase. *Geothermics*, 63, 139–156. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.06.008>
- Bender, B. (1983). Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), 831–851.
- Bilim, F. (2019). The correlation of b -value in the earthquake frequency-magnitude distribution, heat flow and gravity data in the Sivas Basin, central eastern Turkey. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 9(1), 11–15. <https://doi.org/10.17678/beuscitech.467269>

- Chabora, E., Zemach, E., Spielman, P., Drakos, P., Hickman, S., Lutz, S., Boyle, K., Falconer, A., Tait, A., Davatzes, N., Rose, P., Majer, E., & Jarpe, S. (2012). *Hydraulic Stimulation of Well 27-15, Desert Peak Geothermal Field, Nevada, USA*.
- Cuenot, N., Dorbath, C., & Dorbath, L. (2008). Analysis of the Microseismicity Induced by Fluid Injections at the EGS Site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): Implications for the Characterization of the Geothermal Reservoir Properties. *Pure and Applied Geophysics*, 165, 797–828. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0335-7>
- El-Isa, Z. H., & Eaton, D. W. (2014). Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes. *Tectonophysics*, 615, 1–11.
- Fanchi, J. R. (2010). 16—Modern Reservoir Management Applications. Dalam J. R. Fanchi (Ed.), *Integrated Reservoir Asset Management* (hlm. 279–293). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382088-4.00016-5>
- Kagan, Y. Y. (1999). Is Earthquake Seismology a Hard, Quantitative Science? Dalam M. Wyss, K. Shimazaki, & A. Ito (Ed.), *Seismicity Patterns, their Statistical Significance and Physical Meaning* (hlm. 233–258). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8677-2_3
- Kamer, Y., & Hiemer, S. (2015). Data-driven spatial B value estimation with applications to California seismicity: To B or not to B . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7), 5191–5214. <https://doi.org/10.1002/2014JB011510>
- Kissling, E. (1995). Velest User's Guide. *Int. Inst. Geophys.*, 1–26.
- McNutt, S. R. (2005). VOLCANIC SEISMOLOGY. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 461–491. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122459>
- Mousavi, S. M., Ogwari, P. O., Horton, S. P., & Langston, C. A. (2017). Spatio-temporal evolution of frequency-magnitude distribution and seismogenic index during initiation of induced seismicity at Guy-Greenbrier, Arkansas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 267, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.04.005>
- Murru, M., Console, R., Falcone, G., Montuori, C., & Sgroi, T. (2007). Spatial mapping of the b value at Mount Etna, Italy, using earthquake data recorded from 1999 to 2005. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12), 2006JB004791. <https://doi.org/10.1029/2006JB004791>
- Nava, F., Márquez-Ramírez, V., Zúñiga, F., Ávila-Barrientos, L., & Quinteros Cartaya, C. (2017). Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9589-1>
- Northern California Earthquake Data Center. (2014). *Northern California Earthquake Data Center* [dataset]. Northern California Earthquake Data Center. <https://doi.org/10.7932/NCEDC>
- Pearson, C. (1981). The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B9), 7855–7864. <https://doi.org/10.1029/JB086iB09p07855>
- Roberts, N. S., Bell, A. F., & Main, I. G. (2015). Are volcanic seismic b-values high, and if so when? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 308, 127–141.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, 437(7058), 539–542.
- Schuler, J., Pugh, D. J., Hauksson, E., White, R. S., Stock, J. M., & Brandsdóttir, B. (2016). Focal mechanisms and size distribution of earthquakes beneath the Krafla central volcano, NE Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(7), 5152–

5168. <https://doi.org/10.1002/2016JB013213>
- Soelaiman, T. A. F. (2016). 7—Geothermal energy. Dalam M. H. Rashid (Ed.), *Electric Renewable Energy Systems* (hlm. 114–139). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804448-3.00007-4>
- US Department of Energy. (2013). *Desert Peak EGS Project*.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude frequency relation for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99–103.
- Vermilyen, J. P., & Zoback, M. D. (2011). Hydraulic fracturing, microseismic magnitudes, and stress evolution in the Barnett Shale, Texas, USA. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings/11HFTC/SPE-140507-MS/150022>
- Wiemer, S. (2001). A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Wiemer, S., & Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7), 15115–15128. <https://doi.org/10.1029/97JB00726>
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 859–869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>
- Zhou, R., Huang, G. D., Snelling, P., Thornton, M. P., & Mueller, M. (2013). Magnitude calibration for microseismic events from hydraulic fracture monitoring. *SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG-2013*. <https://onepetro.org/SEGAM/proceedings-abstract/SEG13/All-SEG13/SEG-2013-0648/100058>