

## Analisis Respon Hidrogeologi terhadap *Stress* Saat Terjadi Gempabumi (Studi Kasus Semburan Lumpur Setelah Gempa Tasikmalaya 2009 dan Pidie Jaya 2016)

Dimas Salomo J. Sianipar<sup>1,3,4</sup>, R. Andy Erwin Wijaya<sup>2</sup>, T. Listyani R.A.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Magister Teknik Geologi, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

<sup>3</sup> Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)

<sup>4</sup> Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

<sup>5</sup> Program Studi Magister Teknik Geologi, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : dimas.salomo@bmgk.go.id

### ABSTRAK

Gempa bumi tektonik sering menyebabkan respon hidrogeologi seperti semburan lumpur tetapi mekanisme bagaimana *stress* saat terjadinya gempa memicu respon tersebut masih belum diketahui dengan jelas. Gempa Tasikmalaya tahun 2009 (M7,0) contohnya, memicu semburan lumpur di Desa Pasirgede, Kecamatan Sukahening, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat. Contoh lainnya yaitu gempa Pidie Jaya, Aceh tahun 2016 (M 6,5) juga memicu semburan lumpur di Desa Meunasah Balek, Kecamatan Meureudu, Kabupaten Pidie Jaya dan di Desa Benih Tamiang, Kecamatan Rantau, Kabupaten Aceh Tamiang. Dalam studi ini, dilakukan investigasi regangan volumetrik (*volumetric strain*), *normal stress*, dan perubahan *stress* dinamis dari gempa tektonik pada lokasi *site* yang mengalami respon hidrogeologi. Hasil menunjukkan bahwa respon hidrogeologi lebih disebabkan oleh perubahan *stress* dinamis oleh gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa tektonik tersebut. Penelitian ini bermanfaat untuk memahami respon hidrogeologi terhadap *stress* yang terjadi saat gempabumi terutama kaitannya untuk memitigasi kejadian bencana.

**Kata kunci:** gempabumi, respon hidrogeologi, *stress* dinamis, semburan lumpur

### ABSTRACT

*Tectonic earthquakes often cause hydrogeological responses such as mudflows, but the mechanism by which stress during an earthquake triggers such responses is still unclear. The 2009 Tasikmalaya earthquake (M7.0), for example, triggered a mudflow in Pasirgede Village, Sukahening District, Tasikmalaya Regency, West Java. Another example is the 2016 Pidie Jaya, Aceh earthquake (M 6.5), which also triggered a mudflow in Meunasah Balek Village, Meureudu District, Pidie Jaya Regency, and in Benih Tamiang Village, Rantau District, Aceh Tamiang Regency. In this study, an investigation was conducted on volumetric strain, normal stress, and dynamic stress changes from tectonic earthquakes at the site location experiencing hydrogeological responses. The results show that the hydrogeological response is more caused by dynamic stress changes by seismic waves generated by the tectonic earthquake. This study is useful for understanding the hydrogeological response to stress that occurs during earthquakes, especially in relation to mitigating disaster events..*

**Keyword :** earthquake, hydrogeological response, dynamic stress, mudflow

### PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian terutama meneliti efek gangguan tegangan tektonik (*stress*) akibat gempa bumi terhadap sistem hidrogeologi [1,2]. Hubungan antara gempa bumi dan hidrologi bukanlah hubungan satu arah karena beberapa bukti bahwa kegempaan juga disebabkan oleh difusi fluida. Gangguan akibat gempa bumi pada sistem hidrologi biasanya diamati pada erupsi gunung lumpur, pada debit aliran sungai, pada perubahan muka air tanah, pada letusan geysir, dan pada letusan gunung berapi (magmatik). Yamashita dan Tsutsumi [3] juga mengumpulkan banyak pengamatan fluida bertekanan tinggi yang memicu dan menggerakkan rangkaian gempa bumi di banyak tempat di seluruh dunia, dengan estimasi difusivitas hidrolik bervariasi dari  $\sim 0,1 - 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Pengamatan terbaru pada semburan gunung lumpur dari berbagai tempat di seluruh dunia menunjukkan sensitivitas gunung lumpur terhadap gempa bumi [1,4,5]. Semburan lumpur dapat dipicu oleh perpindahan

tekanan statis ( $>0,01$  bar) dan perpindahan tekanan dinamis ( $>0,1$  bar) yang disebabkan oleh gempa bumi [1]. Gangguan gunung lumpur akibat energi gempa bumi dapat dilihat di medan dekat dan jauh dan juga dalam respon jangka pendek dan jangka panjang, sedangkan yang respon jangka panjang sulit untuk diinvestigasi. Di Italia, perubahan tegangan statis ( $-0,44$  hingga  $0$  bar) tidak mempengaruhi semburan gunung lumpur, sebaliknya, semburannya dipicu oleh tegangan dinamis transien hingga  $\sim 3,9$  bar [5]. Menurut Bonini dkk. [1], perubahan tegangan statis dapat memicu semburan melalui: (a) memperluas reservoir fluida, (b) mengompresi reservoir fluida, dan (c) dengan membuka jalur pendakian fluida. Perubahan tegangan dinamis dapat memicu semburan melalui: (a) mengubah permeabilitas [6,7], (b) nukleasi atau mobilisasi gelembung dan (c) dengan mobilisasi fluida. Di medan dekat, pemicu dapat dihasilkan dari kombinasi perubahan tegangan statis dan dinamis. Kesulitan dalam mengkaji pengaruh tegangan statis pada semburan lumpur adalah bagaimana menentukan tanggul pengumpulan (*feeder dyke*) sistem hidrologi (orientasinya/jurusnya, kemiringannya, dan kedalamannya masing-masing) yang menerima tegangan permanen dari gempa bumi lokal/regional [1].

Pada saat banyak penelitian membahas tentang interaksi antara gempa bumi dan sistem hidrogeologi, hanya satu contoh yang berasal dari wilayah Indonesia, yaitu gunung lumpur Lusi yang terkenal [4,8,9]. Padahal, Indonesia memiliki banyak gempa bumi yang bervariasi sumbernya dalam tatanan tektonik yang rumit, yaitu zona subduksi yang kompleks dan banyak sistem sesar daratan [10,11]. Kurangnya informasi tentang gempa bumi yang memicu fenomena hidrologi di negara ini terutama disebabkan oleh kurangnya pengamatan dan data hidrologi. Dalam studi ini, kami menginvestigasi kasus-kasus potensial yang jelas bahwa gempa bumi dapat memicu gangguan hidrogeologi, dalam hal ini semburan lumpur, dengan studi kasus gempa Tasikmalaya (Jawa Barat) tahun 2009 [12, 13] dan gempa bumi Pidie Jaya (Aceh) tahun 2016 (Gambar 1). Studi ini akan bermanfaat untuk menyelidiki pemicuan stress gempa bumi tektonik pada sistem rembesan fluida oleh tekanan dinamis dan statis [14].



**Gambar 1.** (a) Semburan lumpur di kampung Pasir Gede Desa/Kecamatan Sukahening, Kabupaten Tasikmalaya setelah gempa bumi 2009 (Sumber: *news.okezone.com*)

(b) Semburan lumpur di Dusun Benih Tamiang, Desa Perkebunan Rantau Kecamatan Rantau, Kabupaten Aceh Tamiang setelah gempa bumi 2016 (Sumber: *tribunnews.com*)

## METODE PENELITIAN

Perubahan stress statik dihitung pada potensi *feeder dike* sistem hidrogeologi yang dianalisis. Perubahan normal stress ( $\Delta\sigma_n$ ) dihitung terlebih dahulu. Jika bidang sesar *unclamped*, maka nilai normal stress positif. Dengan mengasumsikan *homogeneous elastic half-space*, fungsi *Coulomb Failure* dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P)$$

yang mana  $\Delta\tau$  adalah perubahan *stress* geser (shear stress) pada sesar, yaitu nilainya positif pada arah *slip* dari gempa,  $\Delta\sigma_n$  adalah perubahan *normal stress* (positif jika bidang sesar *unclamped*),  $\mu$  adalah koefisien friksi, dan  $\Delta P$  adalah perubahan tekanan pori (pore pressure) pada bidang sesar. Rumus tersebut dapat ditulis ulang menjadi:

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n$$

yang mana  $\mu'$  adalah koefisien friksi *apparent* yang memasukkan kontribusi dari perubahan tekanan fluida (*fluid pressure change*) dan sifat material pada zona sesar.

Selanjutnya, dihitung regangan volumetrik (*volumetric strain*) yang nilainya positif menunjukkan efek ekspansi. Dalam studi ini kami menggunakan beberapa parameter global seperti koefisien friksi  $\mu' = 0.4$ , yang adalah nilai rata-rata dari rentang  $0.0-0.8$ , *Poisson ratio*  $\nu = 0.25$  dan Young's modulus  $8 \times 10^5$  bar (80 GPa), dan shear modulus  $G = 3.2 \times 10^5$  bar ( $\sim 32$  GPa). Nilai  $G$  berada pada rentang antara 20 dan 50 GPa pada lapisan kerak bumi.

Perhitungan perubahan *normal stress* (positif jika *unclamping*) dilakukan dengan pertama kali mengasumsikan sebuah *vertical feeder dyke* (dip=90°) atau *oblique feeder dyke* (dip=45°) sebagai pendekatan awal. Karena kurangnya informasi terkait dengan orientasi dari sistem hidrogeologi, dilakukan uji pada semua rentang orientasi *feeder dyke*. Pada tahap ini dihitung *unclamping stress* untuk potensi arah strike *feeder dyke* tiap 30° dari arah Utara. Perlu dicatat bahwa sudut *rake* dari penerima (*receiver*) stress tidak mempengaruhi besarnya amplitudo *unclamping stress*.

Perubahan stress dinamis (*dynamic stress changes*) pada lokasi *site* dihitung berdasarkan prosedur umum yang dideskripsikan oleh Bansal dkk. [15]. Perubahan stress dinamis  $\sigma_d$  pada suatu poin di permukaan dihitung dengan mengasumsikan kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) 3.2 km/s dan 32 GPa *shear modulus* (G) menggunakan rumus:

$$\sigma_d \approx G \cdot \frac{PGV}{v_s}$$

yang mana PGV adalah *peak ground velocity* yang diestimasi menggunakan rumus hubungan magnitudo gelombang permukaan [16].

### HASIL DAN ANALISIS

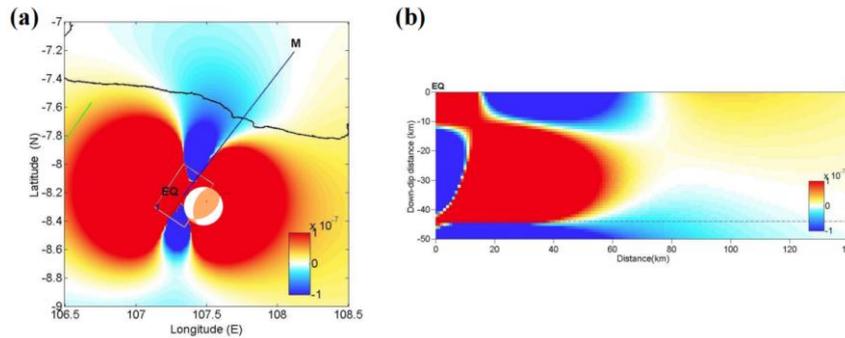
Semburan lumpur terjadi sesaat setelah terjadinya gempa bumi Tasikmalaya tahun 2009 dengan magnitudo M 7,0. Semburan lumpur terjadi di desa Pasirgede, Kecamatan Sukahening, Kabupaten Tasikmalaya. Semburan lumpur juga terjadi sesaat setelah gempa bumi Pidie Jaya, Aceh, tahun 2016 dengan magnitudo M 6,5. Dalam studi ini, dihitung regangan volumetrik, perubahan tegangan normal (*unclamping*) dan perubahan tegangan dinamis untuk setiap lokasi *site* respons terhadap gempa bumi yang sesuai.

Seperti disebutkan di atas, sesaat setelah gempa Tasikmalaya Mw 7,0 (2 September 2009), terjadi semburan lumpur di Desa Pasirgede, Kecamatan Sukahening, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat. Jarak episentrum gempa dengan lokasi semburan lumpur sekitar 144,5 km. Warga sekitar mengungkapkan bahwa daerah ini pernah mengalami semburan lumpur beberapa kali di masa lalu, yaitu pada tahun 1952 (selama sekitar 100 hari dengan tinggi 3-4 m) dan tahun 1982 (selama beberapa bulan dan bersamaan dengan letusan Gunung Galunggung).

Berdasarkan peta geologi Kabupaten Tasikmalaya [17], daerah respons tersebut tersusun oleh lapisan sedimen gunung api yang lebih muda yang meliputi breksi gunung api, lahar, dan tuf andesit hingga basaltik dari Gunung Galunggung (Qvg), Gunung Talagabodas (Qvt), dan Gunung Cereme (Qvu). Kondisi aliran lumpur juga dilaporkan oleh Wardani dan Muntohar [13].

Kami menghitung regangan volumetrik dan perubahan tegangan normal yang disebabkan oleh gempa bumi Mw 7,0 dengan menggunakan dua dimensi patahan yang berbeda dan hasil mekanisme fokus yang diperoleh oleh USGS dan Suardi dkk. [12]. Hasil menunjukkan bahwa gempa bumi menyebabkan efek kompresi dengan nilai dilatasi di lokasi respons sekitar  $-7,441 \times 10^{-8}$ , menggunakan model mekanisme fokus USGS. Dengan menggunakan model ini, perubahan tegangan normal di lokasi tersebut sekitar -0,094 bar (efek penjepitan) jika orientasi *feeder dyke* adalah N150°E atau N330°E atau berarah barat laut-tenggara dan *feeder dyke* vertikal (kemiringan = 90°). Dengan menggunakan model yang dibangun berdasarkan hasil Suardi dkk. [12], yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, kami memperoleh hasil yang berlawanan, yaitu dilatasi positif  $1,8124 \times 10^{-8}$  dan tegangan *unclamping* positif 0,049 bar jika orientasi *feeder dyke* adalah N120°E atau N300°E atau berarah barat laut-tenggara dan *feeder dyke* vertikal (kemiringan = 90°) (Tabel 1). Hasil yang berlawanan antara model USGS tersebut disebabkan oleh parameter yang berbeda yang diperoleh oleh GCMT dan Suardi dkk. [12]. Pada tahap ini, kami mempertimbangkan hasil dari model Suardi dkk. [12] yang dibangun dengan menggunakan data seismik medan dekat dan inversi model sesar yang lebih detail.

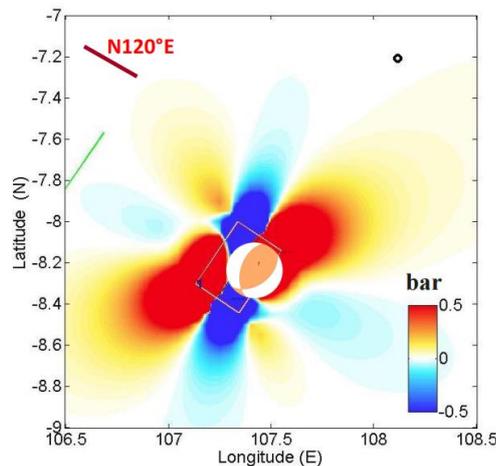
Bonini dkk. [1] menunjukkan bahwa gunung lumpur di beberapa tempat dapat dipicu oleh perubahan tegangan *unclamping* yang relatif besar yang melebihi 1 bar. Mempertimbangkan perubahan tegangan statis dalam kasus ini relatif kecil (hanya ~0,05 bar) dan dekat dengan kisaran nilai pasang surut Bumi, maka kami menyimpulkan bahwa kontribusi perubahan stress statik dapat diabaikan dan responsnya mungkin lebih terkait dengan tegangan dinamis seperti yang juga ditemukan oleh Bonini dkk. [1] dan Maestrelli dkk. [5]. Tegangan dinamis yang diprediksi dari gempa bumi Tasikmalaya Mw 7,0 ke lokasi respon cukup besar, yaitu sekitar 0,19 MPa untuk menghasilkan respon gangguan lumpur di bawah Kecamatan Sukahening. Sebagai perbandingan, kami berhasil menganalisis seismogram dari dua stasiun terdekat, BJI (~277 km dari episentrum) dan stasiun UGM (~352 km dari episentrum), yang terletak di Jawa Tengah, lebih jauh dari lokasi gempa. Perkiraan perubahan tegangan dinamis puncak di stasiun seismik masing-masing adalah 0,053 dan 0,047 MPa.



**Gambar 2.** Model regangan volumetrik dari gempa Tasikmalaya 2009. **EQ** menunjukkan lokasi pusat gempa dan **M** menunjukkan lokasi semburan lumpur. Warna merah menunjukkan nilai dilatasi positif.

**Tabel 1.** Hasil tegangan normal (*unclamping*) di Kecamatan Sukahening, Tasikmalaya akibat gempa Tasikmalaya Mw 7,0 tahun 2009

Feeder dyke	normal stress $\Delta\sigma_n$ (bar), positive, unclamping			
	Model: Suardi <i>et al.</i> (2014)		Model: USGS	
	Dip=90°	Dip=45°	Dip=90°	Dip=45°
0°	-0.011	-0.006	-0.089	-0.043
30°	-0.020	-0.010	-0.054	-0.027
60°	0.005	0.003	-0.025	-0.013
90°	0.040	0.020	-0.030	-0.017
120°	0.049	0.025	-0.065	-0.035
150°	0.023	0.012	-0.094	-0.049
180°	-0.011	-0.005	-0.089	-0.046
210°	-0.020	-0.010	-0.054	-0.027
240°	0.005	0.002	-0.025	-0.012
270°	0.040	0.019	-0.030	-0.014
300°	0.049	0.024	-0.065	-0.031
330°	0.023	0.011	-0.094	-0.045
360°	-0.011	-0.006	-0.089	-0.043

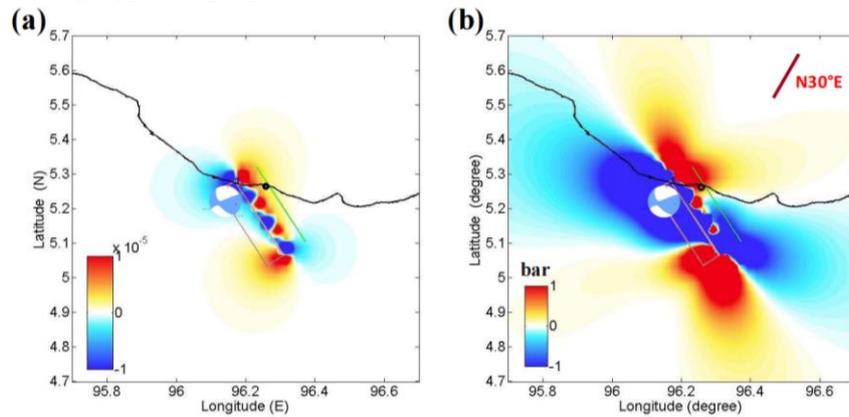


**Gambar 3** Model *normal stress* (*unclamping*) dari gempa Tasikmalaya 2009. *Focal mechanism* menunjukkan lokasi pusat gempa dan **lingkaran hitam** menunjukkan lokasi semburan lumpur. Warna merah menunjukkan tegangan pelepasan positif.

Gempa bumi Pidie Jaya 2016 Mw 6,5 mengakibatkan dua respon hidrologi yang dilaporkan. Yang pertama adalah semburan lumpur yang terletak di medan dekat pada jarak sekitar 4,6 km. Lokasi respon ini berada di Kecamatan Meureudeu, Kabupaten Pidie Jaya, Aceh. Fenomena ini juga didokumentasikan oleh laporan Universitas Syiah Kuala (USK). Regangan volumetrik yang dihitung menggunakan data mekanisme fokus GCMT menunjukkan efek kompresi (bukan dilatasi) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai regangan di lokasi respon sekitar  $-3,28 \times 10^{-7}$ . Tegangan *unclamping* yang sesuai menunjukkan bahwa nilainya dapat positif jika orientasi *feeder dyke* memiliki jurus N30°E atau N210°E. Kombinasi ini dapat menghasilkan

tegangan *unclamping* sebesar 0,441 bar (lihat Tabel 2). Perubahan tegangan dinamis yang diprediksi ke lokasi respon sangat besar (~4,89 MPa). Kejadian semburan lumpur ini harus dikaitkan dengan perubahan tegangan dinamis karena tegangan tersebut jauh lebih tinggi daripada ambang batas pemicu yang diusulkan oleh Bonini dkk. [1] dan Maestrelli dkk. [5]. Berdasarkan beberapa laporan dan dokumentasi, respon ini juga masih mungkin disebabkan oleh likuifaksi yang terkait dengan guncangan seismik [2]. Guncangan seismik mengganggu kontak butiran ke butiran sehingga menyebabkan sedimen terkonsolidasi; tegangan vertikal menurun, tekanan pori meningkat, tegangan efektif menghilang; sedimen menjadi seperti cairan (kasus likuifaksi).

*Site* respon kedua terletak pada jarak sekitar 234,1 km di Desa Benih Tamiang, Kecamatan Rantau, Kabupaten Aceh Tamiang. Karena jaraknya yang jauh dari pusat gempa; pertama-tama dibuat hipotesis bahwa kejadian ini harus dikaitkan dengan perpindahan tegangan dinamis sebesar 0,04 MPa, yang masih lebih tinggi dari ambang batas yang diusulkan, yang dinyatakan di atas. Pertimbangan lain adalah bahwa kejadian ini mungkin lebih terkait dengan pengeboran lokal daripada gempa bumi Pidie Jaya Mw 6,5. Lokasi respon dekat dengan beberapa kegiatan eksplorasi minyak. Dalam kasus ini, kami melakukan konfirmasi berdasarkan pengamatan seismogram. Rekaman kecepatan tanah puncak di stasiun LASI, yang dekat dengan lokasi respon (berjarak ~21 km dari lokasi respon ke stasiun LASI), menunjukkan nilai yang lebih tinggi daripada yang diprediksi oleh rumus empiris. Tegangan dinamis puncak yang diamati di stasiun LASI adalah sekitar 0,072 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ada amplifikasi guncangan tanah di sekitar lokasi respon sehingga memungkinkan efek gangguan tegangan pada lokasi respon.



**Gambar 4.** (a) Model regangan volumetrik akibat gempa bumi Pidie Jaya, Aceh, Mw 6,5. Model ini dibangun menggunakan model sumber dari USGS. Warna merah menunjukkan nilai dilatasi positif. (b) Model perubahan tegangan normal (pelepasan) untuk model sumber yang sama. Skala warna dapat dilihat di sebelah kiri bawah gambar masing-masing. Lingkaran hitam pada kedua gambar adalah lokasi semburan lumpur yang dilaporkan.

**Tabel 2.** Hasil tegangan normal (*unclamping*) di Meureudeu, Pidie Jaya, Aceh, akibat gempa bumi Pidie Jaya 6,5 Mw 2016.

Feeder dyke	normal stress $\Delta\sigma_n$ (bar), positive, unclamping	
	Model: USGS	
	Dip=90°	Dip=45°
0°	0.209	-0.001
30°	0.441	0.119
60°	-0.038	-0.086
90°	-0.749	-0.384
120°	-0.980	-0.437
150°	-0.502	-0.146
180°	0.209	0.238
210°	0.441	0.350
240°	-0.038	0.075
270°	-0.749	-0.336
300°	-0.980	-0.515
330°	-0.502	-0.328
360°	0.209	-0.001

## KESIMPULAN

Dalam studi ini dilakukan investigasi terhadap dua kasus respon hidrogeologi terhadap stress yang berasal dari gempabumi tektonik, yaitu dengan studi kasus gempa Tasikmalaya tahun 2009 dan gempa Pidie Jaya tahun 2016. Untuk setiap kasus dalam studi ini, dihitung regangan volumetrik, perubahan tegangan normal (*unclamping*) dan perubahan tegangan dinamis untuk setiap lokasi *site* respon terhadap gempa bumi tektonik yang terjadi. Hasil menunjukkan bahwa respon hidrogeologi lebih disebabkan oleh perubahan *stress* dinamis oleh gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa tektonik tersebut. Penelitian ini berimplikasi terhadap pemahaman respon hidrogeologi terhadap *stress* yang terjadi saat gempabumi terutama kaitannya untuk memitigasi kejadian bencana yang terkait.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atas data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Bonini, M. L. Rudolph, dan M. Manga, "Long-and Short-Term Triggering and Modulation of Mud Volcano Eruptions by Earthquakes," *Tectonophysics*, vol. 672-673, pp. 190-211, Maret 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.037>
- [2] C. Y. Wang dan M. Manga, "Earthquakes and Water, In Encyclopedia of Complexity and Systems Science," New York: Springer, 2014.
- [3] T. Yamashita dan A. Tsutsumi, "Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures," New York: Springer, 2018.
- [4] M. Lupi, E. H. Saenger, F. Fuchs, dan S. A. Miller, "Lusi Mud Eruption Triggered by Geometric Focusing of Seismic Waves," *Nature Geoscience*, vol. 6, no. 8, p. 642, 2013.
- [5] D. Maestrelli, M. Bonini, D. D. Delle, M. Manga, L. Piccardi, dan F. Sani, "Dynamic Triggering of Mud Volcano Eruptions During the 2016–2017 Central Italy Seismic Sequence," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, pp. 9149-9165, 2017. doi: <https://doi.org/10.1002/2017JB014777>
- [6] M. Manga, I. Beresnev, E. E. Brodsky, J. E. Elkhoury, D. Elsworth, S. E. Ingebritsen, dan C. Y. Wang, "Changes in Permeability Caused by Transient Stresses: Field Observations, Experiments, And Mechanisms," *Reviews of Geophysics*, vol. 50, no. 2, pp. Article RG2004, 2012. doi: <https://doi.org/10.1029/2011RG000382>
- [7] C. Y. Wang, X. Liao, L. P. Wang, C. H. Wang, dan M. Manga, "Large Earthquakes Create Vertical Permeability by Breaching Aquitards," *Water Resources Research*, vol. 52, no. 8, pp. 5923-5937, 2016.
- [8] M. Manga, M. Brumm, dan M. L. Rudolph, "Earthquake Triggering of Mud Volcanoes," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 26, no. 9, pp. 1785-1798, 2009.
- [9] M. L. Rudolph, M. Manga, M. Tingay, dan R. J. Davies, "Influence of Seismicity on the Lusi Mud Eruption," *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 18, pp. 7436-7443, 2015.
- [10] R. Hall, "Southeast Asia: New Views of the Geology of the Malay Archipelago," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 45, pp. 331-358, 2017.
- [11] S. J. Hutchings dan W. D. Mooney, "The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 22, no. 9, p. e2021GC009812, 2021.
- [12] I. Suardi, Y. Yagi, S. Widiyantoro, dan I. Meilano, "Analysis of Source Rupture Process of the September 2, 2009 Tasikmalaya Earthquake by Using the Joint Inversion Method of Near Field and Teleseismic Data," *International Journal of Tomography & Simulation™*, vol. 27, no. 3, pp. 1-22, 2014.
- [13] S. P. R. Wardani dan A. S. Muntohar, "Lessons Learned from the Recent Natural Disasters in Indonesia, In Geotechnical Predictions and Practice in Dealing with Geohazards," Springer Netherlands, 2013, pp. 47-59.
- [14] M. Bonini, "Investigating Earthquake Triggering of Fluid Seepage Systems by Dynamic and Static Stresses," *Earth-Science Reviews*, vol. 210, p. 103343, 2020.
- [15] A. R. Bansal, D. Yao, Z. Peng, dan D. Sianipar, "Isolated Regions of Remote Triggering in South/Southeast Asia following the 2012 Mw 8.6 Indian Ocean Earthquake," *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 20, pp. 10.654-10.662, 2016.
- [16] N. J. V. D. Elst dan E. E. Brodsky, "Connecting Near-Field and Far-Field Earthquake Triggering to Dynamic Strain," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 115, no. B07311, pp. 1-21, 2010.
- [17] T. Budhitrana, "Geological Map of the Tasikmalaya Quadrangle, Jawa, scale 1: 100.000," Geological Research and Development Centre, Bandung, 1986.