

Analisis Sumber Gempa Bumi Lebak 23 Januari 2018***Analysis of the Lebak Earthquake Sources on January 23th, 2018***

Tio Azhar Prakoso Setiadi, Marlita Aulia Rahman, Yusuf Hadi Perdana,
Agustya Adi Martha, Nova Heryandoko, dan Supriyanto Rohadi

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

Jl. Angkasa 1 No. 2, Kemayoran, Jakarta Pusat 10720, Indonesia

Naskah diterima 15 November 2018, selesai direvisi 19 Oktober 2019, dan disetujui 25 November 2019

e-mail: tio.prakoso08@gmail.com

ABSTRAK

Gempa bumi tektonik 23 Januari 2018 berkekuatan M 6,1 telah mengguncang wilayah Lebak dan sekitarnya. Guncangan gempa bumi ini berdampak berisiko yang cukup serius. Menjadi perhatian dari peristiwa ini adalah pusat gempa bumi berada di laut pada zona sesar Cimandiri sebagai kelanjutan dari zona sesar yang berada di daratan. Penelitian ini berhasil melakukan relokasi episenter dan hiposenter gempa bumi bersumber dari BMKG dari tanggal 23 hingga 28 Januari 2018 sebanyak 62 kejadian gempa bumi, menentukan bidang sesarnya, dan perkiraan transfer tekanan Coulomb gempa bumi utama (*mainshock*). Relokasi hiposentrum gempa bumi menunjukkan adanya lineasi sumber gempa bumi yang mengarah baratdaya-timurlaut dan berasosiasi dengan terusan zona sesar Cimandiri ke arah daratan di Teluk Pelabuhan Ratu. Pengolahan HC-plot dapat menentukan bidang sesar sebenarnya pada gempa bumi Lebak yaitu bidang nodal 2 dengan nilai strike 41.79°, dip 81.4°, rake 43.9°. Selain itu analisis perubahan nilai tekanan Coulomb gempa bumi menunjukkan pengaruh gempa bumi utama yang menyebabkan terjadinya gempa bumi susulan di sekitar wilayah sumber.

Kata kunci: Gempa bumi, relokasi hiposentrum, HC-plot, tekanan Coulomb, Lebak, zona sesar Cimandiri.

ABSTRACT

The tectonic earthquake of January 23, 2018 with a magnitude of M 6.1 shaking the Lebak region and its surroundings has caused socio-economic losses to fatalities. One of the interesting things about this earthquake is the location of the epicenter of the earthquake in the ocean and near with the Cimandiri fault zone. The purpose of this study was to relocate the hypocenter of the earthquake, determine the initial fault field, and estimate the transfer of Coulomb tekanans from the mainshock. The data used to analyze from BMKG earthquake catalogue data from of January 23-28, 2018 and obtained 62 earthquakes. The results of the earthquake hypocenter relocation indicate the source of the earthquake that leads southwest-northeast and is closed with the Cimandiri fault zone to the direction of Pelabuhan Ratu Bay. In HC-processing, the actual fault field was taken in the Lebak earthquake, namely the nodal field 2 with a strike value of 41.79°, dipping 81.4°, rake 43.9°. Analysis of changes in the earthquake Coulomb tekanans value that caused an earthquake that caused aftershocks around the source area.

Keywords: earthquake, hypocenter relocation, HC-plot, Coulomb tekanans, Lebak, Cimandiri fault zone.

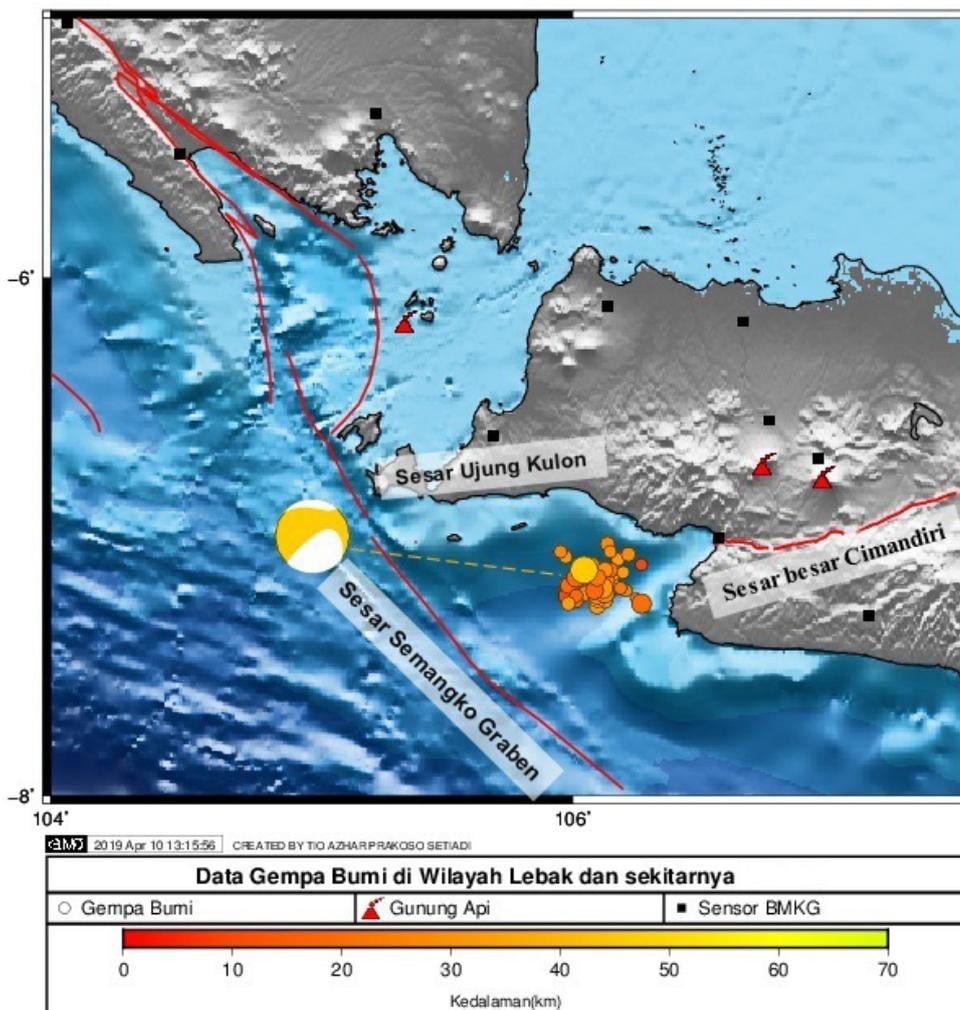
PENDAHULUAN

Jawa bagian barat merupakan salah satu wilayah di Indonesia dengan dinamika kegempaan yang cukup tinggi. Kondisi seismotektonik di wilayah ini terbagi menjadi dua, yaitu sumber gempa bumi bagian selatan yang dipengaruhi oleh aktifitas tumbukan antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia yang berarah barat-timur, dan sumber gempa bumi di daratan Jawa bagian barat yang dipengaruhi oleh aktifitas sesar lokal, seperti sesar Cimandiri, sesar Lembang, dan sesar Baribis.

Gempa bumi kuat dan merusak yang pernah terjadi di wilayah Jawa bagian barat diantaranya gempa bumi dan tsunami Pangandaran 2006 dengan kekuatan gempa bumi M 7,7 dan kedalaman 49 km, gempa bumi Tasikmalaya 2009 dengan kekuatan gempa bumi M 7,3 dan kedalaman 49 km, gempa

bumi di selatan Kabupaten Lebak yang terjadi pada tanggal 23 Januari 2018 dengan kekuatan gempa bumi M 6,1 dan kedalaman 46 km. Gempa bumi Lebak ini mengakibatkan kerusakan bangunan hingga 8.467 unit yang tersebar di 73 kecamatan pada 9 kabupaten/kota di 3 provinsi yaitu Jawa Barat, Banten, DKI Jakarta. Kerusakan rumah paling banyak terjadi di Kabupaten Lebak dan Kabupaten Sukabumi (BNPB, 2018).

Penelitian ini bertujuan mengkaji dinamika kejadian gempa bumi Lebak 23 Januari 2018. Tahapan pertama penelitian ini adalah proses relokasi hiposentrum gempa bumi utama dan susulannya untuk mendapatkan kedudukan hiposentrum gempa bumi yang lebih akurat menggunakan metode *hypocenter Double-Difference* (hypoDD), dilanjutkan dengan identifikasi bidang sesar



Gambar 1. Peta aktifitas gempa bumi Lebak 23 - 28 Januari 2018 dan data mekanisme sumber dari BMKG. Simbol lingkaran menggambarkan gempa bumi, simbol segitiga merah menggambarkan gunung api, simbol kotak hitam menggambarkan sebaran sensor BMKG dan garis merah menggambarkan sesar aktif berdasarkan penelitian Pusat Gempa Nasional 2017.

sebenarnya untuk menyelesaikan permasalahan ambiguitas pada mekanisme sumber dengan metode geometri *Hipocenter-Centroid* (H-C), dan menganalisis hubungan antara distribusi perubahan tekanan Coulomb statis gempa bumi utama terhadap kejadian gempa bumi susulannya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data waktu tiba gelombang gempa bumi dan data mekanisme sumber gempa bumi dari katalog BMKG (BMKG, 2018), dengan batasan wilayah penelitian 6,5° LS – 7,5° LS dan 105,5° BT – 106,5° BT. Rentang waktu yang digunakan dari tanggal 23 hingga 28 Januari 2018. Jumlah data yang diperoleh adalah 62 kejadian gempa bumi. Pemetaan dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools* (GMT 5) dapat dilihat pada Gambar 1 (Wessel drr., 2013).

Untuk mendapatkan data hiposentrum yang baik dengan residual yang kecil, maka tahap pertama yang dilakukan di penelitian ini adalah merelokasi hiposentrum gempa bumi yang telah diambil dari katalog BMKG. Salah satu metode relokasi hiposentrum yang digunakan pada penelitian ini adalah hypoDD. Metode ini lebih akurat karena meminimalkan perbedaan waktu tempuh residual untuk pasangan gempa bumi pada stasiun yang sama. Residual relatif waktu tempuh kalkulasi dan observasi antara dua hiposentrum yang saling berdekatan dalam suatu kelompok dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$d_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{kal} \dots\dots\dots(1)$$

Persamaan di atas adalah persamaan *Double-Difference*, dimana adalah waktu tempuh gelombang i ke stasiun k dan adalah waktu tempuh gelombang j ke stasiun k (Waldhauser dan Ellsworth, 2000). Hasil penyelesaiannya akan bebas dari kesalahan waktu tempuh yang berkaitan dengan heterogenitas kecepatan dan menghasilkan posisi hiposentrum gempa bumi yang lebih akurat (Sahara drr., 2009). Penelitian ini menggunakan model kecepatan gelombang P hasil interpolasi Wagner dan AK 135 (Koulakov drr., 2007) dan telah digunakan pada penelitian Sunardi drr. (2012) untuk merelokasi gempa bumi Wilayah Jawa dari tahun 2009 hingga 2010.

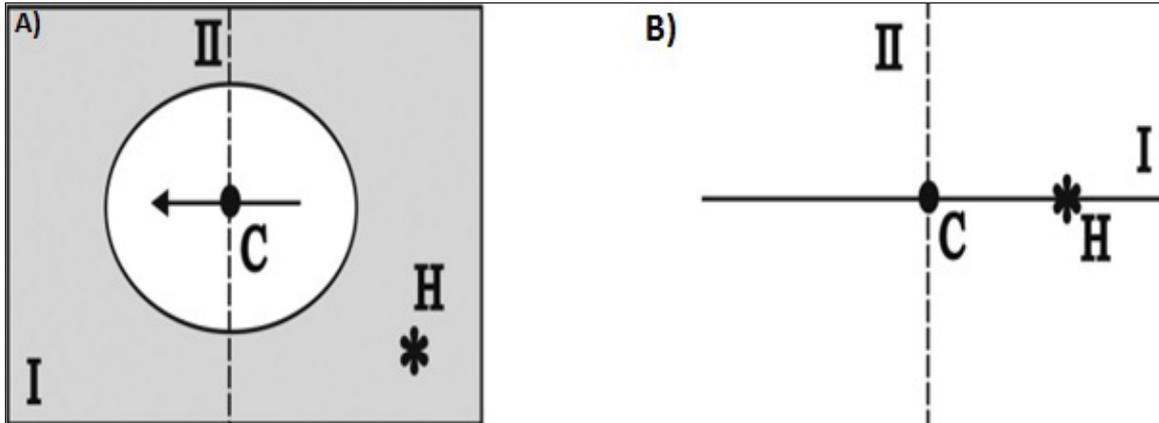
Metode Geometri H-C menggunakan konsep posisi

Tabel 1. Model referensi kecepatan gelombang P Interpolasi Wagner dan AK 135 (Koulakov drr., 2007).

Kedalaman (km)	Kecepatan gelombang P (km/s)
5	5
10	6
15	6,75
25	7,11
35	7,24
45	7,37
60	7,6
100	7,95

hiposentrum dan centroid dalam mengidentifikasi bidang sesar sebenarnya. Metode ini tergolong inovatif jika informasi parameter gempa bumi utama berupa hiposentrum dan mekanisme sumber gempa bumi telah diketahui. Posisi hiposentrum adalah posisi dimana penyebaran retakan baru dimulai, dan merupakan titik dimana energi gempa bumi untuk pertama kali dilepaskan dan menyebar ke daerah lain. Mekanisme sumber merupakan representasi dari perpotongan bidang nodal I dan II yang salah satu bidang nodal tersebut adalah bidang sesar sebenarnya dan bidang lainnya merupakan bidang bantu. Asumsi bidang sesar yang sebenarnya diambil dari identifikasi bidang nodal I dan II yang menjangkau posisi hiposentrum dan lebih dekat dengan salah satu bidang sesarnya dapat dilihat pada Gambar 3. Pembuktian dengan metode ini telah diuji untuk gempa bumi Parkfield, gempa bumi di Andeanof Islands, gempa bumi Athens, gempa bumi Leonidio, dan hasil bidang sesar yang sebenarnya yang didapatkan sesuai dengan yang terjadi di kenyataannya (Zahradnik drr, 2008).

Salah satu kriteria untuk memahami interaksi terjadinya gempa bumi adalah dengan melihat distribusi gaya tekanan gempa bumi, baik yang sudah terlepas atau yang masih tersimpan pada suatu lempengan atau sesar dengan metode tekanan Coulomb . Metode ini juga dapat menentukan arah pergerakan gaya tekanan yang dapat membantu dalam memperkirakan distribusi gempa bumi susulan dan menentukan bidang sesar yang sebenarnya dari sebuah solusi bidang sesar dengan



Gambar 3. Penjelasan skema metode H-C. (A) H* = Hiposentrum, C = Centroid, I dan II adalah bidang nodal, oval menunjukkan area gempa bumi yang mengalami patahan, dan (B) H = mengidentifikasi bidang nodal I sebagai bidang gesar sebenarnya (Zahradnik dr, 2008).

analisis propagasi gempa bumi susulan (Hurukawa dr, 2003; Setiadi dr., 2017). Formula sederhana pada *coulomb failure stress*, (King dr., 1994) dinyatakan dengan persamaan berikut :

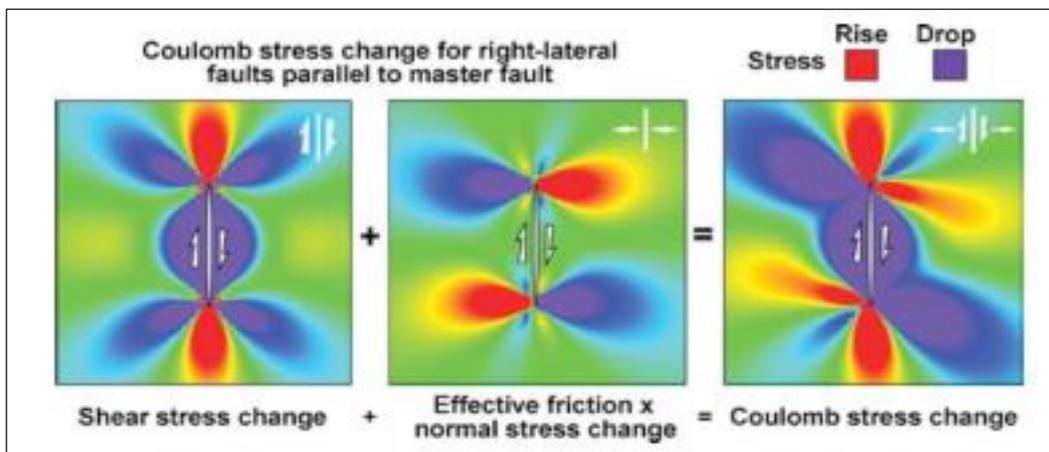
$$C_f = \tau_\beta - \mu(\sigma_\beta - \rho) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana adalah perubahan tekanan geser (*shear stress*) dari patahan (diperhitungkan positif dalam arah dari *fault slip*) dan adalah perubahan normal tarikan (*tension stress*) (positif jika patahan tidak dijepit). ρ adalah perubahan tekanan pori di zona patahan (positif β dalam kompresi), dan μ adalah kofisien friksi (dengan rentang 0 – 1). Pada penelitian ini menggunakan asumsi dengan nilai

koefisien friksi efektif 0,4. Perhitungan *tekanans off-fault* jarang meningkat melebihi beberapa bar (1 bar = 0,1 Mpa), atau hanya beberapa persen dari penurunan *tekanans* gempa bumi utama dan model patahan diasumsikan sebagai bidang persegi panjang yang homogen dan isotropik (Stein, 1999).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menguji hasil relokasi hypoDD, pada penelitian ini dilakukan pengujian distribusi frekuensi *residual* waktu tempuh untuk sebelum relokasi dan sesudah relokasi menggunakan grafik histogram. Hasil relokasi dikatakan baik apabila selisih waktu tempuh dari masing – masing pasangan event (menunjukkan frekuensi yang tinggi mendekati angka nol (0).

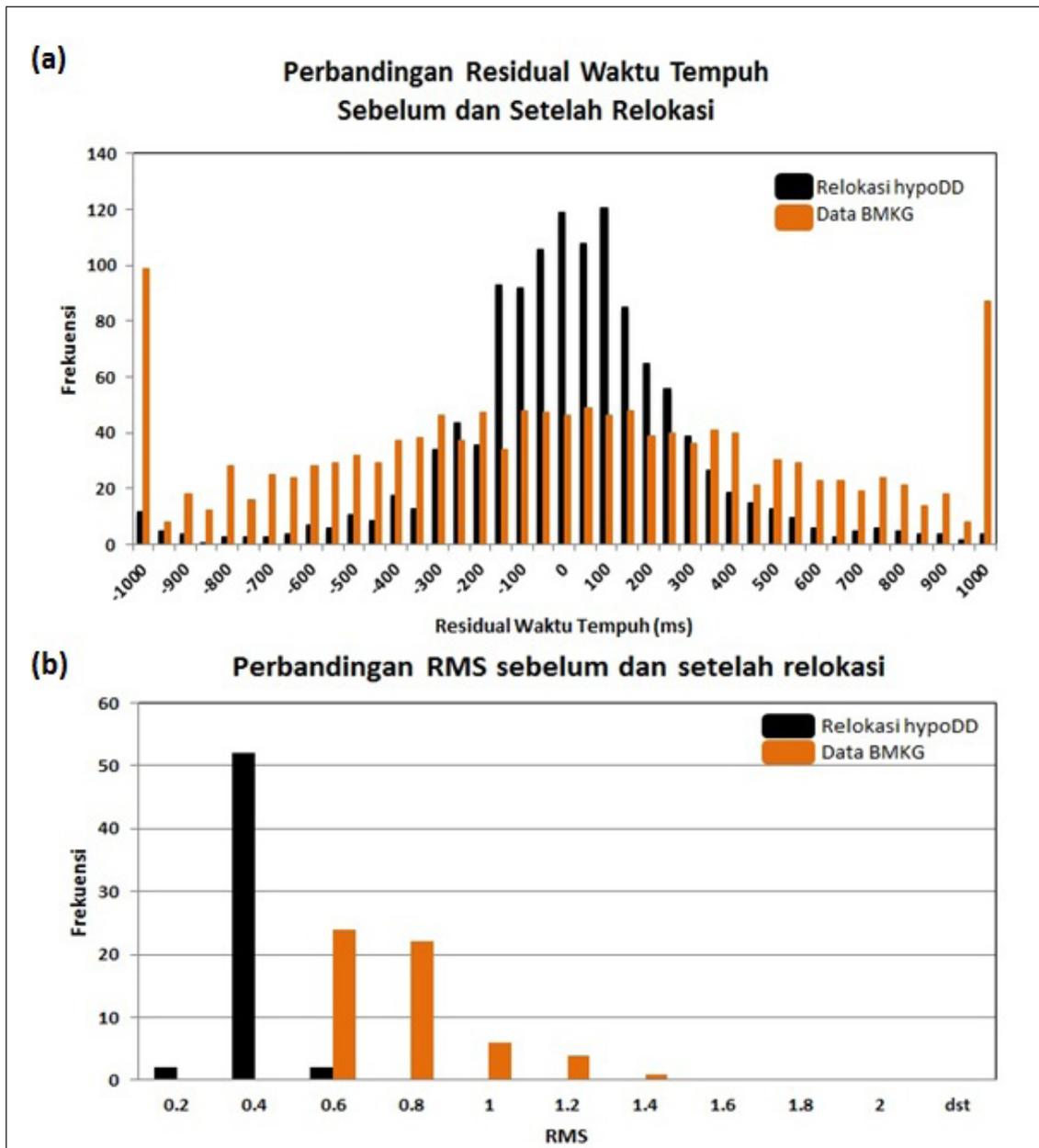


Gambar 4. Ilustrasi perubahan tekanan Coulomb . Warna merah menunjukkan perubahan tekanan Coulomb positif (meningkat), warna biru perubahan negatif (menurun) dan putih tidak ada perubahan nilai tekanan Coulomb (King dr., 1994).

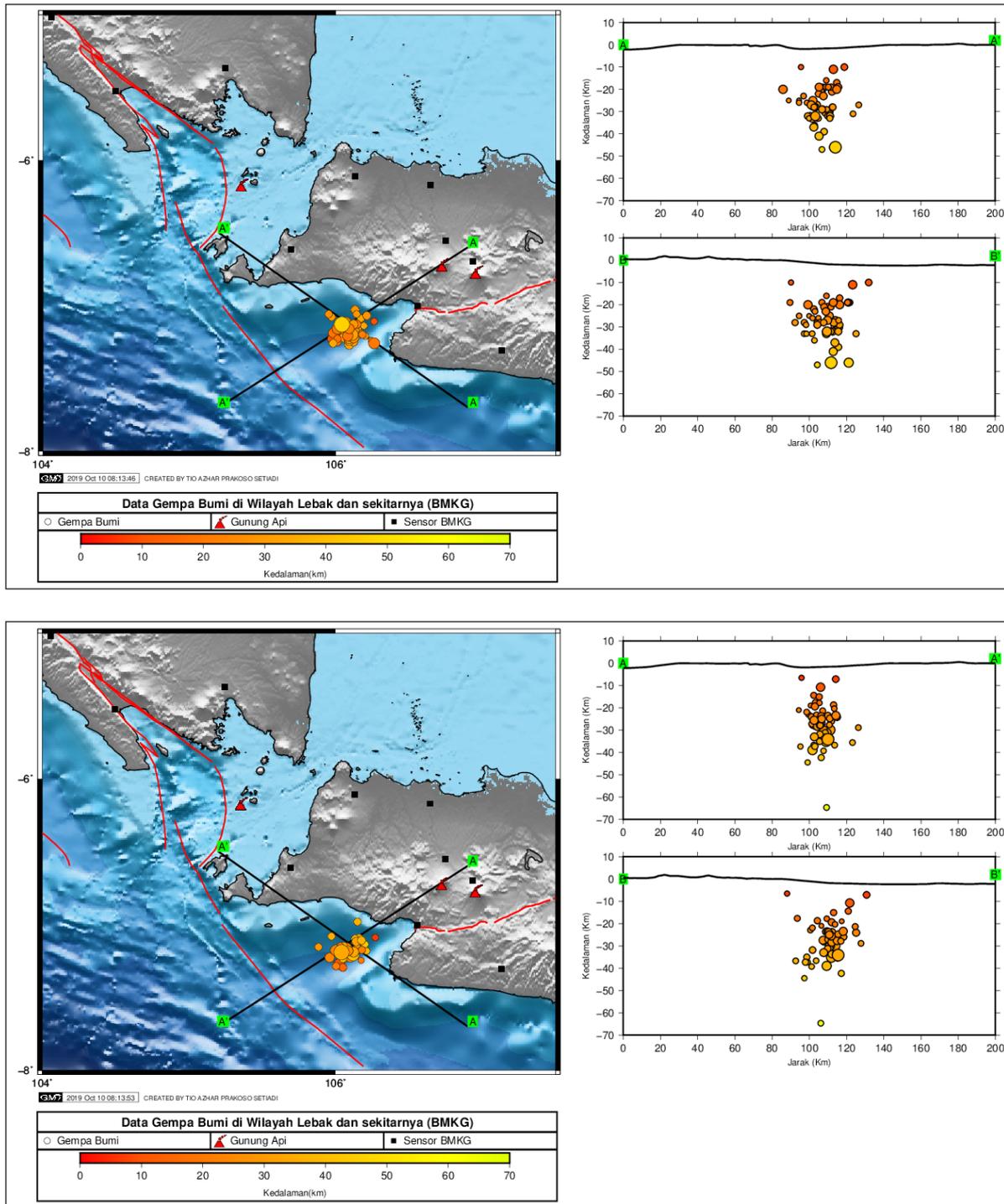
Distribusi frekuensi residual waktu tempuh pada saat sebelum dan sesudah relokasi menunjukkan perbedaan sangat signifikan. Hal ini mengindikasikan setelah dilakukan relokasi hypoDD distribusi frekuensi waktu tempuh yang mendekati nol lebih dominan dapat dilihat pada gambar 5.a. Selain itu validasi hasil relokasi hypoDD juga dapat dilakukan dengan membandingkan nilai *Root Mean Square* (RMS) sebelum dan setelah relokasi. Dari distribusi frekuensi nilai RMS hasil pengolahan data menggunakan hypoDD menunjukkan hasil yang lebih baik ditunjukkan

dengan nilai RMS yang mengecil setelah direlokasi dapat dilihat pada gambar 5.b.

Untuk mengetahui pola distribusi hiposentrum gempa bumi utama dan gempa bumi susulan di wilayah Lebak, maka dilakukan analisis irisan penampang vertikal yang tegak lurus dengan bidang patahan. Dari hasil relokasi hypoDD didapatkan sebanyak 57 kejadian gempa bumi. Sebaran episentrum gempa bumi di wilayah Lebak sebelum dan setelah relokasi dapat dilihat pada Gambar 6a dan 6b. Jika dilihat secara horizontal, seismisitas



Gambar 5. (a) Perbandingan residual waktu tempuh sebelum dan setelah relokasi dan (b) perbandingan RMS sebelum dan setelah relokasi.



Gambar 6. Posisi episentrum dan hiposentrum gempa bumi Lebak (a) sebelum relokasi dan (b) setelah relokasi hypoDD

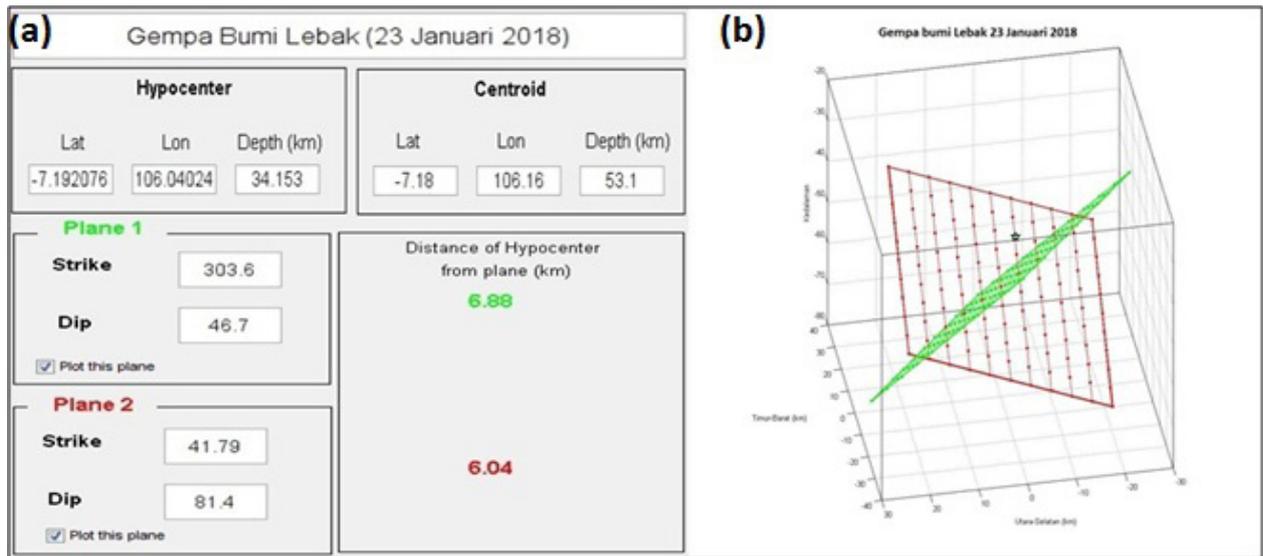
sebelum dan setelah relokasi tidak menunjukkan perubahan posisi episentrum yang signifikan. Karena itu, dilakukan analisis irisan penampang tegak untuk melihat pola penunjaman dan sebaran posisi hiposentrum di wilayah penelitian. Hasil kejadian gempa bumi sebelum dan setelah relokasi menunjukkan perbedaan posisi hiposentrum

gempa bumi utama dan susulannya. Posisi hiposentrum pada gempa bumi utama hasil BMKG adalah 46 km (gambar 6a) dan setelah direlokasi menjadi lebih dangkal dengan kedalaman 34.1 km (gambar 6b). Episentrum gempa bumi utama dan gempa bumi susulan setelah relokasi mengumpul menjadi satu kluster dan menunjukkan adanya

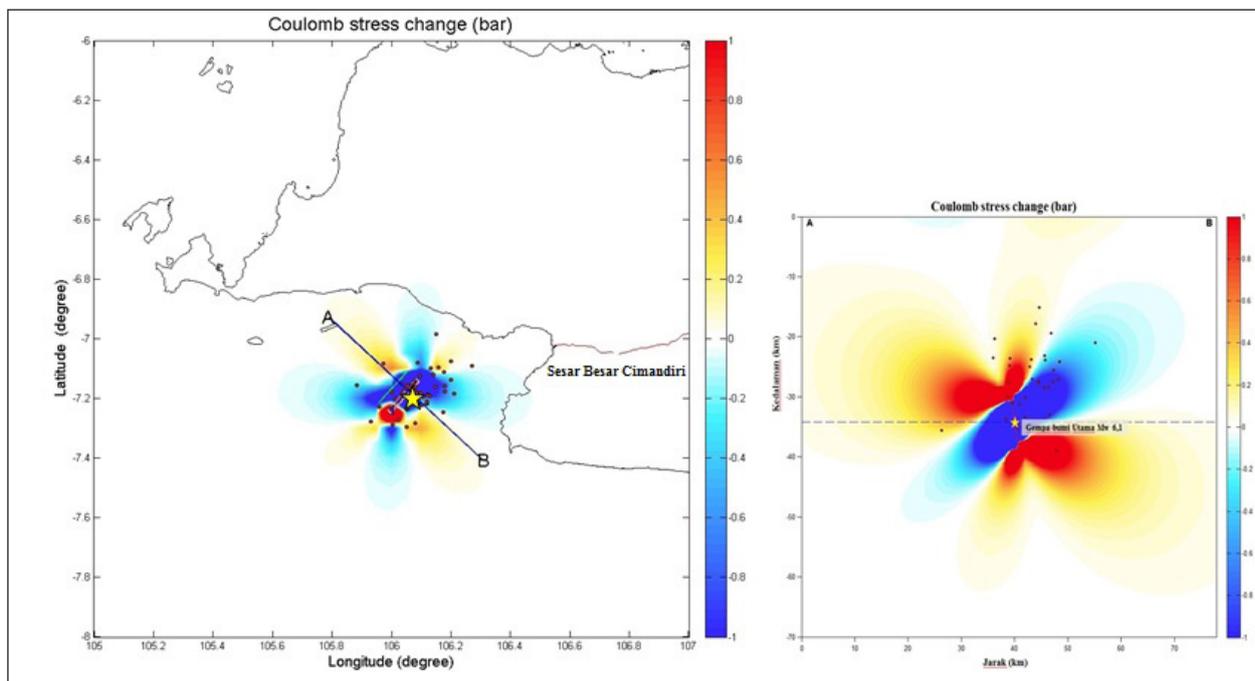
lineasi sumber gempa bumi yang mengarah baratdaya-timurlaut dan berasosiasi dengan terusan sesar Cimandiri pada wilayah Teluk Pelabuhan Ratu (gambar 6.b).

Pusat gempa bumi Lebak 23 Januari hasil relokasi hypoDD berada pada koordinat $7,192076^\circ$ LS – $106,04024^\circ$ BT, dengan magnitudo 6,1 Mw pada kedalaman 34,153 km. Mekanisme sumber gempa bumi ini adalah *oblique* dengan dominan mendarat.

Pada pengolahan HC-plot diperlukan data data parameter gempa bumi hasil relokasi hypoDD (lintang, bujur, kedalaman), lokasi *centroid* (lintang, bujur, kedalaman), dan data mekanisme sumber gempa bumi (jurus, kemiringan) (tabel 2). *Plane 1* yang berwarna hijau menandakan bidang *nodal 1*, *plane 2* yang berwarna merah menandakan bidang *nodal 2*, dan tanda bintang merupakan lokasi hiposentrum gempa bumi (Gambar 7). Hasil



Gambar 7. (a) Inputan dalam program HC-plot dan (b) Visualisasi hasil “bidang sesar sebenarnya”.



Gambar 8. Distribusi perubahan tekanan Coulomb gempa bumi Lebak. Simbol () merupakan lokasi hiposentrum gempa bumi utama dan simbol (●) merupakan distribusi hiposentrum gempa bumi susulannya berdasarkan hasil relokasi hypoDD.

visualisasi yang ditampilkan dan jarak hiposenter terdekat dari bidang sesar menjadi acuan solusi orientasi bidang sesar yang dicari (Zahradnik dr, 2008).

Hasil pada penelitian ini didapatkan bidang *nodal* yang jaraknya paling dekat dengan lokasi hiposentrum atau sebagai bidang sesar sebenarnya yaitu bidang *nodal* 2 (warna merah) dengan jarak 6.04 km sedangkan jarak lokasi hiposentrum ke bidang *nodal* 1 (warna hijau) yaitu 6,88 km. Berdasarkan metode Geometri H-C, di antara kedua *nodal plane* tersebut hanya ada satu *nodal plane* yang merepresentasikan bidang patahan yang sebenarnya dari kedua bidang *nodal* yaitu bidang *nodal* 2 (warna merah) dengan jurus N 41.79° E, kemiringan 81.4°, *rake* 43.9° berarah baratdaya-timurlaut. Bidang sesar sebenarnya pada penelitian ini, dihubungkan dengan kondisi tektonik dimana wilayah sesar Cimandiri didominasi oleh aktivitas gempa bumi dengan mekanisme sumber sesar naik (*thrust fault*) dan sesar mendatar (*strike slip*) dengan arah orientasi barat-timur dan baratdaya-timurlaut (PUSGEN, 2017). Didapatkan adanya kemungkinan sumber gempa bumi akibat terusan zona sesar Cimandiri di daratan Jawa bagian barat (Gambar 6b). Patahan ini belum diidentifikasi secara pasti pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 yang sudah diterbitkan oleh PUSGEN 2017 dan perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

ratio 0,25 dan young modulus 8×10^5 bar (King dr., 1994). Bidang lobus berwarna merah menandakan bahwa di daerah tersebut masih menyimpan tekanan yang belum dilepaskan ketika gempa bumi terjadi sehingga memiliki risiko akan terjadi gempa bumi berikutnya, sedangkan daerah berwarna biru menandakan bahwa di daerah tersebut telah terjadi penurunan tekanan atau relaksasi sehingga kemungkinan terjadi gempa bumi selanjutnya sangat kecil (Gambar 8).

Sebaran tekanan Coulomb yang diakibatkan oleh gempa bumi Lebak 23 Januari 2018 dengan magnitudo M 6,1 menggunakan hasil analisis bidang sesar sebenarnya yang telah dilakukan dengan nilai jurus N 41.79° E, kemiringan 81.4°, *rake* 43.9°. Untuk melihat lebih detail arah *tekanans* gempa bumi tersebut di distribusikan maka dilakukan irisan penampang tegak yang tegak lurus dengan bidang patahan sebenarnya. Hasil yang didapatkan sebanyak 73% (41 kejadian) sebaran gempa bumi susulan berada pada daerah peningkatan tekanan dan sisanya 28% (14 kejadian) pada penurunan tekanan. Hasil ini menunjukkan korelasi positif antara daerah peningkatan tekanan dan sebaran gempa bumi susulan (King dr, 1994; Stein, 1999). Dominasi kejadian gempa bumi susulan pada daerah peningkatan tekanan cukup mengonfirmasi perubahan tekanan statis akibat kejadian gempa bumi utama Lebak (Toda dr, 2011; Setiadi dr 2017). Tujuan utama pada penelitian

Tabel 2. Parameter gempa bumi hasil relokasi hypoDD dan data Mekanisme sumber gempa bumi (BMKG, 2018)

No	Hiposentrum		Centroid			Mekanisme Sumber				
	Latitude	Longitude	Nodal Plane 1		Nodal Plane 2		Strike	Dip	Strike	Dip
			Kedalaman	Latitude	Longitude	Kedalaman				
1	-7,192076	106,0424	34,153	-7,18	106,16	53,1	303.6	46.7	41.79	81.4

Perhitungan perubahan tekanan Coulomb gempa bumi Lebak membutuhkan beberapa parameter gempa bumi, dan bidang sesar (jurus, kemiringan, *rake*) suatu gempa bumi. Bidang sesar tersebut diasumsikan sebagai sebuah bidang persegi panjang homogen dan isotropik (Okada, 1992). Panjang dan lebar sesar didapatkan dari konversi nilai magnitudo momen dan tipe mekanisme sesar gempa bumi (Wells dan Coppersmith, 1994). Penelitian ini menggunakan nilai koefisien friksi efektif 0,4 (Lin dan Stein, 2004), nilai poisson's

analisis tekanan Coulomb ini adalah untuk mitigasi kebencanaan gempa bumi yang lebih baik. Daerah yang mengalami peningkatan tekanan Coulomb ditandai dengan kotak garis - garis berwarna merah pada gambar 8, patut lebih diwaspadai karena dapat memicu peningkatan seismisitas dalam kurun waktu singkat setelah gempa bumi utama terjadi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menentukan sumber gempa

bumi baru pada kejadian gempa bumi Lebak 23 Januari 2018 yakni sesar aktif dengan jurus N 41.79° E, kemiringan 81.4°, *rake* 43.9° pada zona sesar Cimandiri ke arah Teluk Pelabuhan Ratu. Perubahan tekanan Coulomb didapatkan akumulasi *tekanans* gempa bumi Lebak memicu gempa bumi berikutnya di wilayah perubahan tekanan Coulomb positif dalam kurun waktu 6 hari dibuktikan dengan 41 kejadian gempa bumi susulan tersebar pada bidang peningkatan *tekanans*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Puslitbang BMKG dan PGN BMKG yang telah membantu dan menyediakan data gempa bumi, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abercrombie, R.E., Antolik, M., Felzer, K. dan Ekström, G., 2001. The 1994 *Java tsunami earthquake: Slip over a subducting seamount*. *Journal Geophys. Res.* Vol. 106 (B4) Hal. 6595–6607.
- BNPB., 2018. Info Kebencanaan Bulanan Teraktual Edisi Januari 2018.
- BMKG., 2018. *Earthquake repository, Data Repository*. <http://repogempa.bmkg.go.id/query.php>. diakses 5 Juli 2018.
- Hurukawa, N., Tsuji, Y., dan Waluyo, B., 2003, The 1998 Papua New Guinea Earthquake and its Fault Plane Estimated from Relocated Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, Hal. 1829-1841.
- King, G.C.P., Stein, R.S., dan Lin, J. 1994. Static *tekanans* changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 3, Hal. 935-953.
- Koulakov, I., Bohm, M., Asch, G., Lühr, B.G., Manzanares, A., Brotopuspito, K. S., Fauzi., Purbawinata, M. A., Puspito N. T., Ratdomopurbo, A., Kopp, H., Rabbel, W., Shevkunova, E., 2007. *P- and S-velocity structure of the crust and the upper mantle beneath Central Java from local tomography inversion*. *J. Geophys. Res.*, 112 B08310, doi:10.1029/2006JB004712.
- Lin, J., dan Stein, R.S., 2004. *Tekanans* Triggering in Thrust and Subduction Earthquakes and *Tekanans* Interaction between the Southern San Andreas and Nearby Thrust and Strike Slip Faults. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109. doi:10.1029/2003JB002607.
- Nguyen, N., Griffin, J., Cipta, A. and Cummins, P. R., 2015. Indonesia's Historical Earthquakes: Modelled examples for improving the national hazard map. Record 2015/23. Geoscience Australia, Canberra. <http://dx.doi.org/10.11636/Record.2015.023>.
- Okada, Y., 1992. Internal Deformation Due To Shear And Tensile Faults In A HalfSpace, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 82, Hal. 1018-1040.
- Pusat Gempa Nasional., 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017, Bandung.
- Sahara, D.P., Kusumo, A. W, Widiyantoro, S., dan Sule, R., 2009. Aplikasi Metode Double Difference Untuk Relokasi Hiposentrum Gempa Vulkanik Gunung Kelud Secara Akurat. *JTM* Vol. XVI No. 1.
- Stein, R.S., 1999. The Role of *Tekanans* Transfer in Earthquake Occurrence : *Nature*, v. 402 : 605–609.
- Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono, Widiyantoro, S., Sulastri, Susilanto, P., Hardy, T., Setyonegoro, W., 2012. Relokasi Hiposenter Gempabumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik Double Difference. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol. 13 No.3, Hal. 179-188.
- Setiadi, T.A.P., Perdana, Y.H., dan Rohadi, S., 2017. Analisis Tekanan Coulomb Gempa Bumi Deli Serdang 16 Januari 2017. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2017*, Jakarta.
- Toda, S., Lin, J., dan Stein, R.S., 2011. Using the 2011 M w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb *tekanans* triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure. *Earth, planets and space*, 63.7, 39, DOI: 10.5047/eps.2011.05.010.
- Waldhauser, F. dan Ellsworth, W.L., 2000. *A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault*. *California. Bull. Seism. Soc. Am.*, 90(6), 1353–1368.
- Wells, D.L., dan Coppersmith, K.J. 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of*

Seismological Society of America, Vol. 84,
9741002.

Wessel, P, Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J., dan
Wobbe F., 2013. Generic Mapping Tools:
Improved Version Released. *EOS*. [https://doi.
org/10.1002/2013EO450001](https://doi.org/10.1002/2013EO450001).

Zahradnik, J., Gallovic F., Sokos, E., Serpetsidaki,
A. dan Tselentis, G. A., 2008. Quick Fault-
Plane Identification by A Geometrical
Method: Application To The Mw 6.2
Leonidio Earthquake, 6 January 2008,
Seismological Research Letters, Volume 79,
Number 5, September/October 2008, 653-
662, Greece.