

Analisis Gempabumi Lombok 2018 Berdasarkan Mekanisme Sumber, Distribusi Slip, *Asperity*, dan Perubahan Nilai (*Coulomb Stress*) Pada Bidang Sesar

Ramadhan Priadi^{1,*}, Yusuf Hadi Perdana², Angga Wijaya², dan Iman Suardi^{2,3}

¹Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Geofisika Gowa, Somba Opu, Makassar, 90552

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta Pusat, 10610

³Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang Selatan, Banten 15221

*Email: amadhanpriadi6@gmail.com

Submitted: 2020-09-13; Revised: 2021-01-30 ; Accepted: 2021-03-08

Abstrak: Gempabumi signifikan yang terjadi di Lombok pada bulan Juli hingga Agustus 2018 dengan magnitudo yang berkisar antara M 5,8 hingga 7,0. Pada periode tersebut terjadi kejadian gempabumi yang terjadi secara berurutan yaitu M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC), M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC), M_w 5,9 tanggal 9 Agustus 2018 (05:25:31 UTC), M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018 (04:10:22 UTC) dan M_w 6,9 tanggal 19 Agustus 2018 (14:56:28 UTC). Fenomena tersebut sangat jarang terjadi karena gempabumi memerlukan waktu yang relatif lama untuk mengakumulasi energi sebelum dilepaskan. Berdasarkan keunikan tersebut, pemodelan slip di bidang sesar untuk mengetahui sebaran zona akumulasi energi yang direpresentasikan oleh *asperity* dengan menginversi gelombang *body* dari stasiun teleseismik pada frekuensi rendah. Hasil pemodelan slip ini dikonfirmasi oleh sebaran perubahan nilai *Coulomb stress* setelah gempa. Hasilnya menunjukkan bahwa zona *asperity* gempabumi Lombok berada pada bagian *up-dip*. Distribusi slip dominan mengarah hampir tegak lurus ke arah utara. Pada gempabumi M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018, arah vektor slip mengarah ke gempabumi M_w 6,9 tanggal 19 Agustus 2018, hal tersebut mengindikasikan bahwa gempabumi Lombok sebenarnya saling memicu satu dengan lainnya. Hasil pemodelan juga menunjukkan bahwa gempabumi signifikan di Lombok tidak memiliki *asperity* tunggal, namun terdistribusi pada bidang sesar di dekat permukaan. Berdasarkan hasil penelitian ini, kami menduga bahwa wilayah utara pulau Lombok mengalami pelemahan batuan karena tidak mampu lagi menahan akumulasi energi sehingga gempabumi Lombok saling memicu. Berdasarkan perubahan nilai *Coulomb stress* dapat disimpulkan bahwa gempabumi M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 berada di zona peningkatan *stress* dari gempabumi M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018.

Kata kunci: *slip*, *asperity*, *Coulomb stress*, gempabumi

Abstract: Significant earthquakes with magnitudes ranging from M 5.8 to 7.0 occurred in Lombok in the time period from July to August 2018. The events occurred in a sequences, consist of M_w 6.5 on July 28, 2018 (22:47: 38 UTC), M_w 6.9 on 5 August 2018 (11:46:38 UTC), M_w 5.9 on 9 August 2018 (05:25:31 UTC), M_w 6.4 on 19 August

2018 (04:10: 22 UTC), and M_w 6.9 on 19 August 2018 (14:56:28 UTC). This phenomenon is very rare because earthquakes require a relatively long time to accumulate energy before being released. Based on the uniqueness, slip modeling is carried out in the fault plane to determine the distribution of energy accumulation zones represented by *asperity*. In this study, we used teleseismic body waves inversion at low frequencies and the *Coulomb stress* method to estimate of stress changes after the earthquakes. Our results show that the Lombok earthquake *asperity* zones are in the *up-dip* section. A dominant slip distribution almost perpendicularly to the north. The direction of the slip vector M_w 6.4 earthquake on 19 August 2018 was pointing to the M_w 6.9 earthquake on 19 August 2018, this indicates that the Lombok earthquakes actually triggered each another. The significant earthquakes in Lombok does not have a single *asperity*, but is distributed in the fault plane near the surface. Our results show that the northern region of the Lombok region weakens of rock zone because it is no longer able to withstand the accumulation of energy so that the earthquake in Lombok triggers each other. Based on *Coulomb stress* changes shows M_w 6,9 on 5 August 2018 earthquake is in the increased stress zone from M_w 6.5 on July 28, 2018.

Keywords: slip, *asperity*, *Coulomb stress*, earthquake

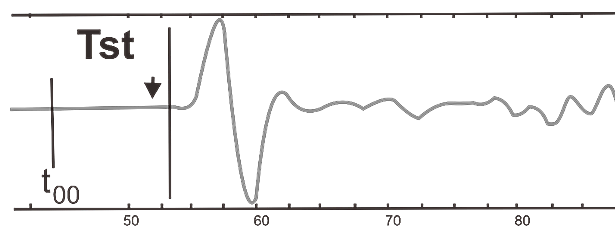
1 PENDAHULUAN

Pada periode bulan Juli-Agustus tahun 2018 telah terjadi 5 gempabumi signifikan di Lombok dengan rentang magnitudo antara M_w 6.0 hingga M_w 7.0 dalam waktu yang relatif berdekatan. Pulau Lombok didominasi oleh aktivitas seismik hasil dari penujaman lempeng Indo-Australia yang menyusup ke bawah terhadap lempeng Eurasia (Ibrahim, 2010). Kejadian gempabumi tersebut masih sulit untuk dijelaskan karena memiliki frekuensi gempa yang tinggi dalam satu rentetan waktu. Sehingga perlu dilakukan pengkajian sumber gempa melalui penggabungan beberapa metode untuk memperoleh hasil yang terkonfirmasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah inversi gelombang *body*

dari stasiun teleseismik dan metode *Coulomb stress*. Metode inversi gelombang *body* digunakan untuk memperoleh orientasi dan *source mechanism* mekanisme setiap gempa bumi (Kikuchi dan Kanamori, 1991), sedangkan *Coulomb stress* digunakan untuk mengetahui arah perubahan tekanan dan dilatasi setelah gempa bumi (King dkk., 1994). Penentuan mekanisme sumber menggunakan inversi gelombang *body* dari stasiun teleseismik bertujuan untuk mengurangi *noise* pada *waveform* dari pengaruh lokal yang sangat besar. Fase gelombang seismik yang digunakan adalah fase gelombang P, SH, SV, dan PP yang diinversi secara simultan (Lay dan Kanamori, 1981). Metode ini menginversi sinyal observasi pada seismogram menjadi fungsi waktu sumber sehingga diperoleh interpretasi terhadap *asperity*, distribusi slip, dan orientasi pada bidang sesar. Dari *source mechanism* mechanism dan *asperity* yang terbentuk selama gempa bumi maka dapat diketahui orientasi bidang sesar dan zona pelepasan energi terbesar selama gempa bumi. Zona *asperity* merupakan area pada bidang sesar yang saling mengunci akibat kekasaran permukaan pada dua bidang batuan dalam kontak yang rigid (Yamanaka dan Kikuchi, 2004). Wilayah kunci tersebut memiliki released momen seismik yang besar dan menghasilkan gempa bumi signifikan. Hal tersebut memiliki kaitan terhadap perubahan nilai *Coulomb stress* saat terjadi gempa bumi untuk mengidentifikasi gempa bumi signifikan selanjutnya (Sumy dkk., 2014). *Asperity* yang merupakan wilayah kunci adalah wilayah yang menyimpan energi cukup besar akibat sifat elastisitas batuan, ketika daerah tersebut mendapatkan akumulasi energi secara bertahap dan melampaui batas elastisitasnya maka sedikit perubahan saja dapat memicu energi tersebut lepas (Kilb dkk., 2002). Hal tersebut karena bahwa gempa bumi dapat merubah *shear stress* dan *normal stress* suatu patahan di dekatnya. Perubahan stress minimum (1 bar = 0.1 MPa, dalam tekanan atmosfer) yang tiba-tiba dapat mengakibatkan perubahan besar dalam tingkat seismisitas suatu wilayah (Stein dkk., 1994). Secara umum perubahan nilai *Coulomb stress* dibagi menjadi 2 bidang lobus, yaitu bidang lobus positif yang merepresentasikan wilayah peningkatan stress dan bidang lobus negatif yang merepresentasikan wilayah penurunan stress (Astra, 2011). Karena bidang sesar yang sangat dibatasi oleh luasan bidang sesar dan waktu rupture maka, diasumsikan jika *asperity* yang terbentuk saat gempa bumi memiliki keterkaitan terhadap perubahan *Coulomb stress* pada gempa bumi sebelumnya. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan source mechanism yang terjadi pada aktivitas gempa bumi Lombok Periode Juli-Agustus 2018. Keterkaitan antar masing-masing gempa bumi signifikan berdasarkan distribusi slip dan *asperity* yang terbentuk saat gempa bumi kemudian akan dikonfirmasi oleh perubahan nilai *Coulomb stress* dari gempa sebelumnya. Pada penelitian ini, kejadian gempa bumi di Lombok dapat dijelaskan dari hubungan antara masing-masing gempa bumi.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data *waveform* gempa bumi signifikan di Lombok selama periode bulan Juli-Agustus tahun 2018. Stasiun seismik yang digunakan merupakan stasiun seismik dengan jarak antara stasiun ke sumber gempa berkisar antara $30^\circ - 90^\circ$ sehingga diperoleh rekaman sinyal ge-



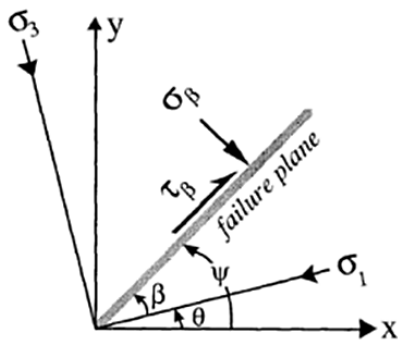
Gambar 1. Penentuan t_{00} dan T_{st} yang digunakan untuk menentukan slip pada titik (x_0, y_0) (Kikuchi, 2003)

lombang teleseismik. Penelitian yang dilakukan merupakan studi kasus yang membahas serta menganalisis mekanisme sumber, distribusi slip, *asperity*, dan perubahan nilai *Coulomb stress* gempa bumi signifikan di wilayah Lombok pada bulan Juli-Agustus tahun 2018. Penelitian ini menggunakan metode inversi gelombang *body* dari stasiun teleseismik oleh Kikuchi dan Kanamori (1991) untuk merepresentasikan source mechanism gempa bumi dan metode *Coulomb stress* untuk menghitung perubahan nilai *Coulomb stress* setelah terjadi gempa bumi.

Gelombang teleseismik merupakan gelombang seismik dengan frekuensi rendah akibat frekuensi tinggi yang telah teratenuasi selama proses propagasi gelombang (Yamanaka dan Kikuchi, 2003). Tahapan pengolahan data pada penelitian ini dimulai dari pengecekan terhadap fase gelombang P dan SH, lalu pada semua stasiun seismik yang digunakan dilakukan perhitungan *power spectral*. Bidang sesar diasumsikan memiliki distribusi slip yang temporal dan spasial di setiap arah pada masing-masing bidang sesar yang diperluas secara spasial (Ide, 2015). Pada penentuan hasil akhir distribusi slip digunakan dua unit vektor tegak lurus pada bidang sesar yaitu v^1 dan v^2 . Besaran sudut *rake* dinotasikan sebagai $\hat{\theta}^j$ yang diukur dari v^1 dan v^2 . Waktu ketika *rupture* dimulai pada pemilihan titik awal rupture (x_0, y_0) diukur dari awal data yang ditentukan yaitu t_{00} . Sehingga bentuk gelombang dimulai pada t_{00} yang ditambahkan T_{st} . Gambar 1 memperlihatkan data antara data t_{00} dan T_{st} yang digunakan untuk menentukan slip pada titik (x_0, y_0) . Karena jika T_{st} terlalu besar (seperti, $T_{st} = 30$ detik), maka bagian awal dari gelombang diabaikan. Sebaliknya, jika T_{st} terlalu kecil, tidak ada slip yang dapat ditempatkan pada (x_0, y_0) . Maka pemilihan titik awal rupture (x_0, y_0) menjadi hal yang sangat penting dalam menentukan distribusi slip (Kikuchi, 2003).

Setelah orientasi bidang sesar, distribusi slip, dan *asperity* telah diperoleh, maka luasan bidang sesar dapat dijadikan input luasan bidang untuk estimasi perubahan nilai *Coulomb stress*. Faktor geometri bidang sesar, magnitude, dan nilai koefisien gesekan (μ) sangat mempengaruhi perubahan nilai *Coulomb stress* (Cocco dan Rice, 2002). Pada perubahan *Coulomb stress* dalam optimally oriented plane dapat dihitung sebagai hasil dari slip sesar utama, sehingga dianggap jika gempa bumi susulan diperkirakan terjadi pada bidang sesar tersebut. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi sistem koordinat pada perhitungan *Coulomb stress* dari satu bidang sesar.

Dari kedua metode tersebut akan saling mengkonfirmasi hasil yang diperoleh dari pengolahan. Asumsi jika daerah tekanan pada perubahan nilai *Coulomb stress* dapat memicu pelepasan energi dari zona *asperity* dengan kunci yang



Gambar 2. Sistem koordinat sumbu yang digunakan untuk perhitungan *Coulomb stress* pada bidang sesar orientasi spesifik (*specified orientation*) dan optimal (*optimally oriented plane*) (King dkk., 1994)

besar. Hal ini didasarkan jika *stress* setelah gempabumi akan terdistribusi pada satu orientasi bidang sesar.

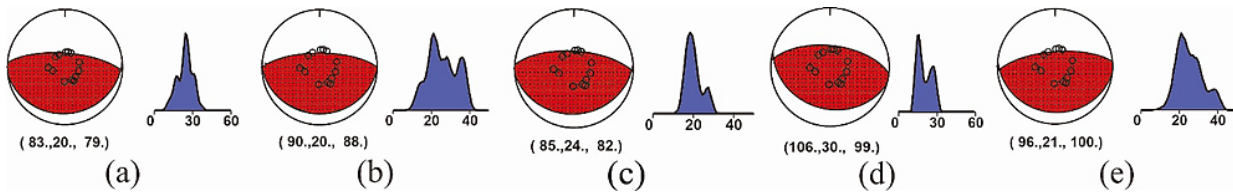
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi slip pada bidang sesar diperoleh dari hasil inversi dengan asumsi jika bidang sesar sebagai grid. Setiap satu kotak grid dianggap sebagai satu buah *subfault* yang memiliki panjang pada arah strike dan lebar pada arah dip. Setiap *subfaults* akan memiliki nilai dan arah slip yang berbeda (Murotani dkk., 2013). Slip yang diperoleh merupakan slip dalam spasial. Distribusi slip yang dihasilkan sangat bergantung terhadap pemilihan *source time function* dan *initial data* yang akan digunakan. Pemilihan *source time function* akan mempengaruhi *Green's function* yang terbentuk untuk menghasilkan sinyal sintesis. Proses inversi menggunakan frekuensi *band-pass filter* 0,064 – 0,12 Hz berdasarkan hasil *trial* dan *error* dengan nilai varian terkecil. Terdapat 5 gempabumi signifikan yang terjadi di Lombok selama bulan Juli sampai Agustus 2018. Inversi gelombang *body* dari stasiun telesesimik akan memperbaiki parameter orientasi bidang sesar dari point source menjadi *finite fault*. Gambar 3 memperlihatkan bola fokal 5 gempa signifikan di Lombok dari hasil pengolahan dengan varian berkisar antara 0,1-0,5. Pada Tabel 2 diperlihatkan parameter mekanisme sumber yang diperoleh dari hasil inversi. Dari proses inversi ini magnitudo akan diperbaharui berdasarkan momen seismik. Rata-rata mekanisme sumber yang dihasilkan dari proses inversi menunjukkan bahwa gempabumi Lombok memiliki dip yang landai. Hal ini diduga jika aktivitas pada periode bulan juli hingga agustus memiliki kaitan erat terhadap *back arc thrust* yang berada di sebelah utara pulau Lombok. Karena data yang digunakan merupakan data telesesimik sehingga hasil inversi dapat merepresentasikan distribusi slip dan *asperity* yang terbentuk saat terjadi gempabumi. Hal ini diperoleh dari asumsi dari hasil inversi dengan bidang sesar dianggap sebagai sebuah grid. Distribusi slip ditentukan berdasarkan T_0 (*start-time*) dan T_{st} (*rupture start time*), T_0 menentukan awal data yang akan digunakan untuk inversi sedangkan T_{st} menentukan awal mulai terjadinya *rupture* (Ide, 2015).

Hasil inversi gelombang *body* telesesimik dapat memberikan estimasi luasan bidang sesar yang didasarkan pada hasil *fitting* gelombang observasi terhadap gelombang sintesis.

Distribusi slip dan *asperity* yang diperoleh dari hasil inversi merupakan sebaran dan distribusi pada bidang sesar sehingga perlu dilakukan proyeksi orthogonal untuk menampilkan hasil tersebut ke permukaan. Proyeksi orthogonal dilakukan untuk dapat memetakan secara pasti zona *asperity* di wilayah Lombok. Hasil yang diperoleh berupa panjang dan lebar sesar dalam satuan kilometer (km), sehingga perlu dikonversi menjadi derajat, kemudian panjang dan lebar yang sudah dikonversi akan diproyeksikan ke permukaan menggunakan proyeksi orthogonal (Yagi, 2004). Proyeksi ini dilakukan agar dapat memastikan sebaran distribusi slip yang dilihat dari permukaan. Gambar 4 memperlihatkan peta distribusi slip dan zona *asperity* dari hasil proyeksi orthogonal gempabumi Lombok. Panjang dan lebar sesar yang diestimasi berbeda-beda setiap gempabumi karena dipengaruhi oleh besarnya energi yang lepas. Misalnya pada gempabumi Lombok M_w 6,5 dari hasil pengolahan slip maksimum yang terjadi sebesar 0,89 m dengan distribusi dominan mengarah ke atas bidang sesar yang mengindikasikan ada gerakan keatas seperti jenis sesar *thrust fault*. Luasan bidang sesar dari hasil inversi diestimasi dengan panjang 32 km pada arah *strike* dan lebar 40 km pada arah *dip*. Luasan bidang sesar tersebut dibagi menjadi 8 × 7 *subfaults* dengan dimensi 4 km × 5 km untuk setiap kotak *grid subfaults* pada arah *strike* dan *dip*. Zona *asperity* terbesar berada di panjang -8 km pada arah *strike* dan lebar -5 km pada arah *dip*. Kemudian gempa Lombok M_w 6,9 (14:56:28 UTC) memiliki slip maksimum sebesar 0,96 m dengan Luasan bidang sesar dari hasil inversi diestimasi panjang 54 km pada arah *strike* dan 56 km pada arah *dip*. Luasan bidang sesar tersebut dibagi menjadi 8 × 7 *subfaults* dengan dimensi 6 km × 7 km untuk setiap kotak *grid subfaults* pada arah *strike* dan *dip*. Zona *asperity* terbesar berada di -12 km pada arah *strike* dan 0 km pada arah *dip*.

Jika dibandingkan dengan gempabumi yang memiliki magnitudo relatif kecil maka akan memiliki estimasi luasan bidang sesar yang lebih kecil dibandingkan gempa lainnya. Seperti pada gempa Lombok M_w 5,9 yang memiliki panjang 14 km pada arah *strike* dan 14 km pada arah *dip*. Luasan bidang sesar tersebut dibagi menjadi 7 × 7 *subfaults* dengan dimensi 2 km × 2 km untuk setiap kotak *grid subfaults* pada arah *strike* dan *dip*. Slip maksimum yang terjadi sebesar 0,76 m dengan zona *asperity* terbesar berada di -8 km pada arah *strike* dan -2 km pada arah *dip*. Hal ini membuktikan jika memang terdapat hubungan yang erat antara luasan bidang sesar dan magnitudo gempabumi yang akan terjadi. Zona *asperity* dan distribusi slip gempa bumi dapat memperlihatkan hubungan antara gempabumi. Pada gempa bumi Lombok rata-rata gempabumi memiliki zona *asperity* yang berada di bagian *up-dip* meskipun gempa M_w 6,4 memiliki zona *asperity* di bagian *down-dip*. Distribusi slip yang terjadi dominan ke atas dengan slip minor mengarah ke Barat. Zona *asperity* yang dominan berada di bagian *up-dip* mengindikasikan jika zona kunci pada gempa bumi signifikan di Lombok berada dekat dengan permukaan yang kemungkinan disebabkan oleh *back arc thrust*. Dari hasil penelitian Zubaidah dkk. (2014) menunjukkan bahwa wilayah Lombok mengalami peningkatan aktivitas seismik sejak tahun 2005 di zona *back arc thrust* dibandingkan zona subduksi. Peningkatan aktivitas seismik di wilayah utara Lombok mengindikasikan subduksi bertahap dari *back arc thrust*. Hasil inversi menunjukkan bahwa gempabumi Lom-



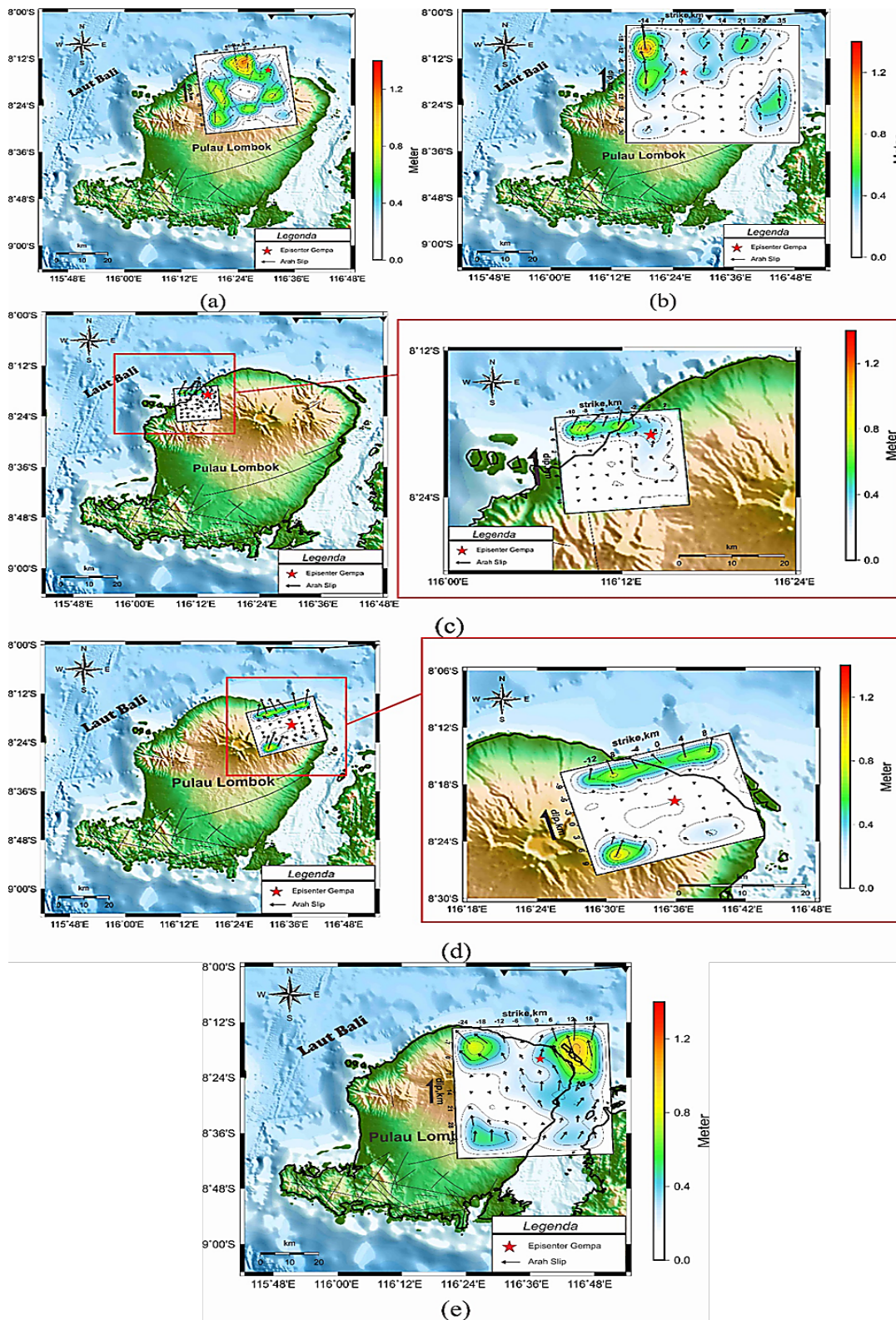
Gambar 3. Hasil bola fokal gempa signifikan gempa Lombok a). M_w 6,5 (22:47:38 UTC), b). M_w 6,9 (11:46:38 UTC), c). M_w 5,9 (05:25:31 UTC), d). M_w 6,4 (04:10:22 UTC), dan e). M_w 6,9 (14:56:28 UTC)

Tabel 1. Parameter mekanisme sumber gempabumi hasil inversi.

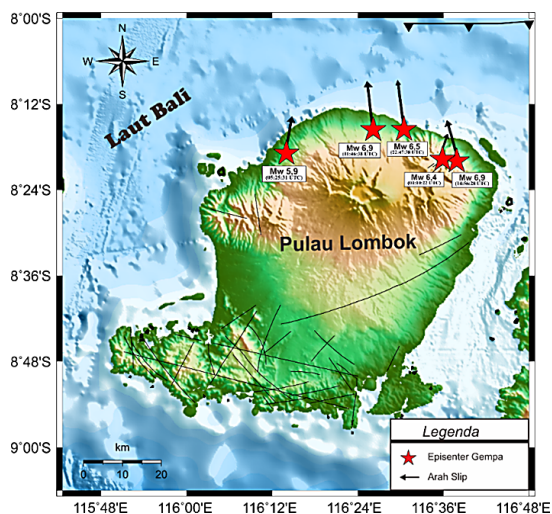
Event Gempabumi	Strike	Dip	Rake	Momen Seismik	Konversi Magnitudo
M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC)	83°	20°	79°	M_0 0,233×10 ²⁰ Nm	M_w 6,54
M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC)	90°	20°	88°	M_0 0,430×10 ²⁰ Nm	M_w 7,02
M_w 5,9 tanggal 9 Agustus 2018 (05:25:31 UTC)	85°	24°	82°	M_0 0,174×10 ¹⁹ Nm	M_w 6,09
M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018 (04:10:22 UTC)	106°	30°	99°	M_0 0,547×10 ¹⁹ Nm	M_w 6,43
M_w 6,9 tanggal 19 Agustus 2018 (14:56:28 UTC)	96°	21°	100°	M_0 0,438×10 ²⁰ Nm	M_w 7,03

bok tidak memiliki *asperity* tunggal melainkan terdistribusi disekitar bidang sesar. Diduga jika formasi batuan di wilayah Lombok mengalami pelemahan sehingga menghasilkan gempabumi dengan *asperity* yang terpecah-pecah. Berdasarkan peta geologi lembar Lombok yang dibuat oleh Mangga dkk. (1994) wilayah utara Lombok didominasi oleh jenis batuan *Qvu* (batuan gunung api tak terpisahkan) dan batuan *Tmi* (batuan terobosan Tersier). Kedua jenis batuan tersebut merupakan jenis batuan beku dari hasil magmatik. Formasi batuan beku yang berada di sebelah utara pulau Lombok mengalami pelemahan karena tidak mampu menahan akumulasi energi terus menerus dan akhirnya pecah secara bertahap. Gambar 5 memperlihatkan peta arah slip dominan pada gempabumi Lombok tahun 2018. Arah slip dominan diperoleh dari hasil rata-rata nilai slip dalam satu bidang sesar untuk setiap gempabumi. Pada peta arah slip tersebut terlihat jika vektor slip masing-masing gempabumi Lombok memiliki arah yang hampir sama yaitu mengarah ke utara. Namun pada peta arah slip dominan diperoleh jika gempabumi M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018 (04:10:22 UTC) memiliki arah slip dominan yang mengarah ke gempabumi M_w 6,9 (14:56:28 UTC). Hal tersebut mengindikasikan jika gempabumi Lombok sebenarnya saling mentrigger satu dengan lainnya. Dari kelima gempabumi tersebut distribusi slip akan mengarah ke gempabumi terakhir. Sehingga distribusi slip pada gempabumi di pulau Lombok memiliki hubungan yang saling berkaitan. Selain peninjauan terhadap distribusi slip perlu ditinjau pula *asperity* yang terbentuk pada gempabumi Lombok. Ukuran dan distribusi *asperity* tidak hanya bergantung pada pola seismisitas seperti *foreshock*, *mainshock*, dan *aftershock* (Sokos dkk., 2016). Gempabumi Lombok tidak memiliki *asperity* tunggal, sehingga gempa bumi ini memiliki ukuran maksimum magnitudo akan tetap pada kelas M 7 (Kikuchi dkk., 2003). Hal tersebut terlihat pada gempabumi M_w 6,9 (11:46:38 UTC) dan gempabumi M_w 6,9 (14:56:28 UTC) yang tidak membentuk *asperity* tunggal melainkan *asperity* lebih dari satu yang terdistribusi pada bidang sesar. Selain ditinjau dari hasil distribusi slip dan *asperity* yang terbentuk, maka dilakukan konfirmasi ulang menggunakan metode *Coulomb stress* untuk mengetahui distribusi perubahan daerah tekanan dan dilatasi setelah gempabumi. Pada Gambar 6 diperlihatkan hasil

perhitungan perubahan *Coulomb stress* gempabumi Lombok periode Juli-Agustus 2018 dengan perbandingan gempabumi signifikan dengan waktu kejadian yang berdekatan. Rata-rata gempabumi Lombok memiliki empat buah lobus dengan skala -0,1 sampai 0,1 bar. Bidang lobus positif yang merepresentasikan daerah peningkatan *coulomb stress* yang digambarkan dengan warna merah. Kemudian bidang lobus negatif yang merepresentasikan daerah penurunan *Coulomb stress* digambarkan dengan warna biru. Pada pengolahan belum dilakukan pemetaan distribusi *aftershock* karena interpretasi yang akan dilakukan adalah untuk melihat hubungan dan keterkaitan masing-masing gempabumi signifikan. Gempabumi sebelumnya dianggap sebagai *source fault* dan gempabumi selanjutnya dianggap sebagai *receiver fault* (Woessner dkk., 2012). Koefisien friksi yang digunakan dalam perhitungan sebesar 0,4 dengan model jenis sesar *thrust fault* (Krantz, 1991). Hasil pengolahan *Coulomb stress* menunjukkan bahwa zona peningkatan *stress* pada setiap gempabumi signifikan di Lombok terdistribusi dengan arah Barat-Timur, sedangkan zona penurunan *stress* terdistribusi dengan arah Utara-Selatan. Pola distribusi tersebut diakibatkan oleh adanya aktivitas *back-arc thrust*. Pada gempa pertama M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC) sebagai *source fault* dan M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC) sebagai *receiver fault* diperoleh hasil nilai perubahan *Coulomb stress* terbesar yaitu sebesar 0.984363 dan nilai perubahan terkecil sebesar -0.17571. Terlihat pada Gambar 6 (a) dan (b) bahwa kedua gempabumi berada di daerah peningkatan pola stress yang lebih besar di sebelah Barat. Jika melihat bentuk *asperity* gempabumi selanjutnya yaitu M_w 6,9 terdapat kemiripan karena zona *asperity* terbesar berada di bagian *up-dip* di sebelah Barat Laut dari hiposenter gempabumi. Terdapat kecocokan antara pola *Coulomb stress* gempabumi M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC) terhadap *asperity* yang terbentuk pada gempabumi M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC). Kasus selanjutnya pada gempa signifikan keempat dengan gempa M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018 (04:10:22 UTC) sebagai *source fault* dan M_w 6,9 tanggal 19 Agustus 2018 (14:56:28 UTC) sebagai *receiver fault* yang dapat dilihat pada Gambar 6 (c) dan (d). Terlihat jika kedua gempa berada pada lobus biru yaitu zona penurunan *Coulomb*



Gambar 4. Hasil distribusi slip dan *asperity* gempabumi Lombok dari hasil proyeksi yang bersesuaian dengan arah strike a). M_w 6,5 (22:47:38 UTC), b). M_w 6,9 (11:46:38 UTC), c). M_w 5,9 (05:25:31 UTC), d). M_w 6,4 (04:10:22 UTC), e). M_w 6,9 (14:56:28 UTC).



Gambar 5. Peta arah slip dominan gempa bumi Lombok 2018.

stress. Namun terdapat pola disebelah Timur distribusi *Coulomb stress* yang sama dengan *asperity* pada gempa M_w 6,9. Skenario ini ditentukan jika M_w 6,4 sebagai *source fault* dan M_w 6,9 sebagai *receiver fault*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perubahan *Coulomb stress* terbesar yaitu sebesar 0.623153 dan nilai perubahan terkecil sebesar -0.953159. *Asperity* pada gempa M_w 6,9 tanggal 19 Agustus 2018 (14:56:28 UTC) terbentuk pada bagian up-dip dari bidang sesar di sebelah Timur dari *initial break*. Hal ini beresesuaian dengan lobus merah yang merupakan daerah peningkatan *Coulomb stress* pada gempa bumi M_w 6,4. Sehingga diduga jika peningkatan nilai *Coulomb stress* memberikan tekanan dan energi pada zona *asperity* gempa bumi selanjutnya yang dapat menyebabkan zona *asperity* pecah dan menghasilkan gempa signifikan berikutnya.

Jika memperhatikan data *aftershocks* gempa bumi maka ada kemungkinan terjadi pelepasan secara bertahap pada zona peningkatan stress. Pada kasus gempa M_w 5,9 memiliki jarak yang cukup jauh dari gempa selanjutnya yaitu gempa M_w 6,4 yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Terlihat adanya distribusi *aftershock* dengan sebaran arah Barat-Timur setelah gempa M_w 5,9. Distribusi *aftershocks* dominan berada di wilayah berwarna merah yang merupakan daerah yang mengalami peningkatan nilai *Coulomb stress*. Gempa signifikan selanjutnya yaitu M_w 6,4 juga terjadi pada wilayah peningkatan nilai *Coulomb stress*. Sehingga terkonfirmasi bahwa fenomena gempa Lombok merupakan fenomena gempa bumi yang saling memicu satu sama lainnya.

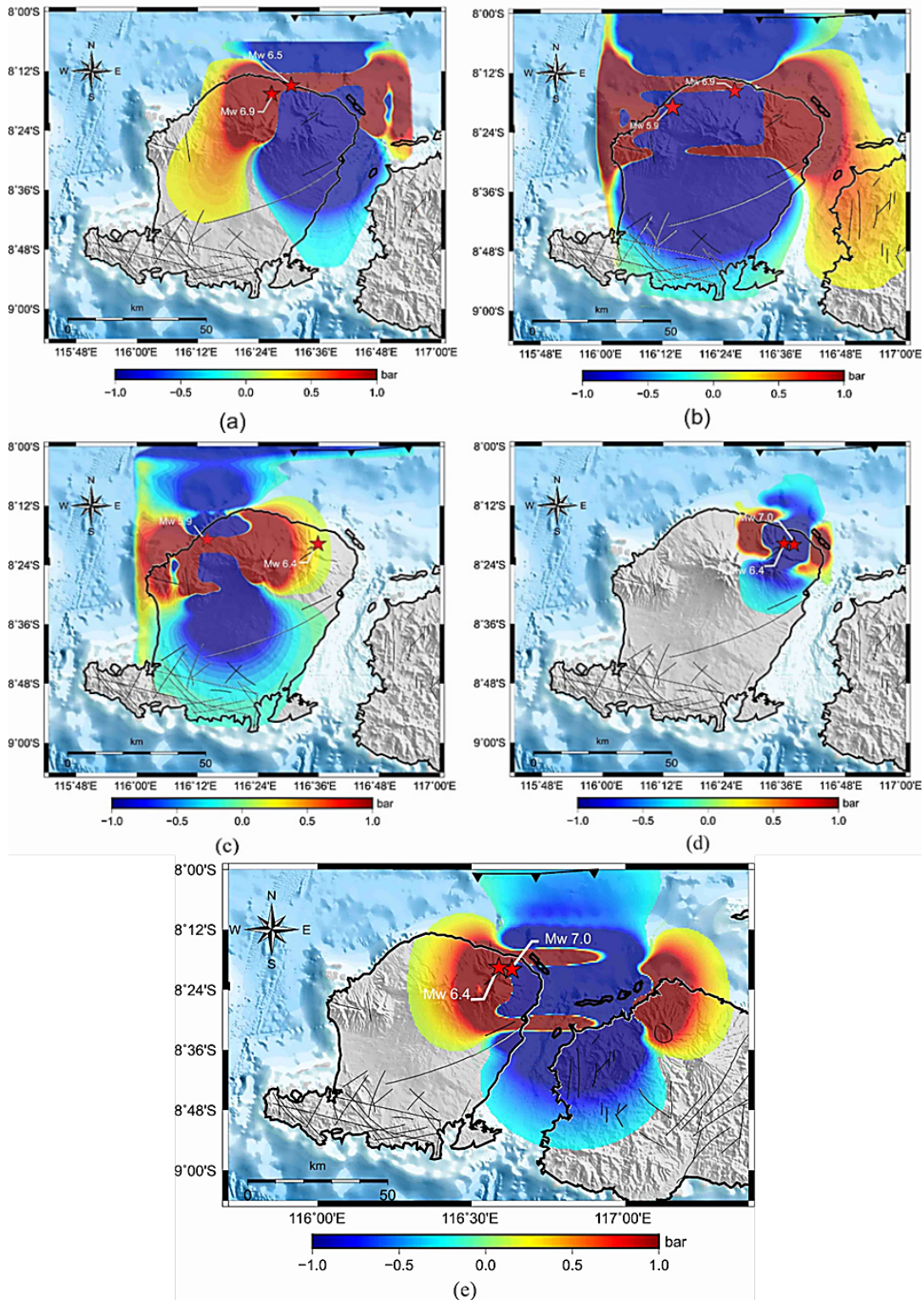
Ukuran magnitudo gempa bumi dan pola seismisitas pada setiap wilayah memiliki hubungan erat terhadap distribusi *asperity* (Yagi, 2004). Kelima gempa bumi Lombok memiliki arah slip individu yang berbeda di setiap bidang sesarnya, namun gempa bumi Lombok dominan memiliki *asperity* yang berada di bagian up-dip. Berdasarkan hasil perhitungan perubahan nilai *Coulomb stress* menunjukkan bahwa zona peningkatan *stress* dominan terdistribusi pada arah barat-timur. Sehingga gempa bumi Lombok saling memicu gempa bumi selanjutnya berdasarkan vektor slip dan distribusi perubahan nilai *Coulomb stress* pada periode Juli-Agustus 2018.

4 KESIMPULAN

Distribusi slip gempa bumi signifikan Lombok rata-rata dominan mengarah ke utara dengan slip minor ke arah barat laut. Zona *asperity* yang terbentuk dari masing-masing gempa bumi Lombok berada di bagian up-dip. *Asperity* yang terbentuk bukan tunggal melainkan terdistribusi pada bidang sesar. Selain itu, vektor slip gempa bumi M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC) menuju ke arah gempa bumi M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC). Konfirmasi dilakukan dengan menghitung perubahan nilai *Coulomb stress* yang menunjukkan bahwa gempa bumi M_w 6,9 tanggal 5 Agustus 2018 (11:46:38 UTC) berada di zona peningkatan *stress* dari gempa bumi M_w 6,5 tanggal 28 Juli 2018 (22:47:38 UTC). Wilayah utara pulau Lombok diduga mengalami pelemahan batuan karena tidak mampu lagi menahan akumulasi energi sehingga gempa bumi yang terjadi pada bulan Juli-Agustus 2018 saling memicu antara gempa bumi yang satu dengan yang lainnya.

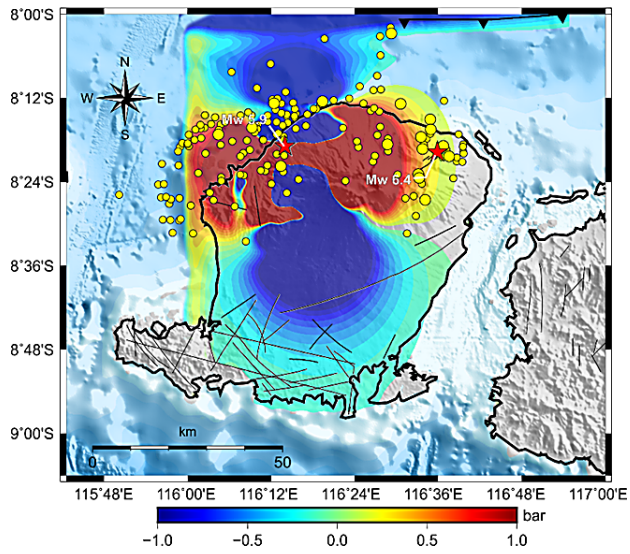
UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan terutama kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) serta *Incorporate Research Institution for Seismology* (IRIS) yang telah menyediakan data dalam penelitian ini.



Gambar 6. Perubahan nilai *Coulomb stress* gempabumi Lombok a). M_w 6,5 (22:47:38 UTC), b). M_w 6,9 (11:46:38 UTC), c). M_w 5,9 (05:25:31 UTC), d). M_w 6,4 (04:10:22 UTC), e). M_w 6,9 (14:56:28 UTC). (bintang merah merupakan episenter gempabumi, wilayah berwarna biru menunjukkan daerah penurunan *Coulomb stress*, dan wilayah berwarna merah menunjukkan daerah peningkatan *Coulomb stress*).

Coulomb Failure Stress



Gambar 7. Distribusi *aftershock* dan perubahan nilai *Coulomb stress* gempa bumi Lombok M_w 5,9 tanggal 9 Agustus 2018 (05:25:31 UTC) terhadap gempa bumi M_w 6,4 tanggal 19 Agustus 2018 (04:10:22 UTC). (bintang merah merupakan episenter gempa bumi, bulatan kuning menunjukkan episenter dari *aftershock* gempa M_w 5,9 (05:25:31 UTC), wilayah berwarna biru menunjukkan daerah penurunan *Coulomb stress*, dan wilayah berwarna merah menunjukkan daerah peningkatan *Coulomb stress*)

Pustaka

- Astra, I.M.K.A. (2011): Coulomb static stress change dalam interaksi gempabumi doublets 5.8 mw dan 5.9 mw 22 januari 2007 dan gempabumi 7.0 mw 16 juni 2010 di wilayah papua. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, **12**(1).
- Cocco, M. dan Rice, J.R. (2002): Pore pressure and poroelasticity effects in coulomb stress analysis of earthquake interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107**(B2), ESE-2, doi:10.1029/2000jb000138.
- Ibrahim, G. (2010): Tektonik dan mineral di indonesia. Jakarta, Puslitbang BMKG.
- Ide, S. (2015): Slip inversion. In: *Treatise on Geophysics*. Elsevier, 215–241, doi:10.1016/b978-0-444-53802-4.00076-2.
- Kikuchi, K. (2003): Note on teleseismic body-wave inversion program. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>.
- Kikuchi, M. dan Kanamori, H. (1991): Inversion of complex body waves—III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**(6), 2335–2350, doi:10.1785/bssa0810062335.
- Kikuchi, M., Nakamura, M. dan Yoshikawa, K. (2003): Source rupture processes of the 1944 tonankai earthquake and the 1945 mikawa earthquake derived from low-gain seismograms. *Earth, Planets and Space*, **55**(4), 159–172, doi:10.1186/bf03351745.
- Kilb, D., Gomberg, J. dan Bodin, P. (2002): Aftershock triggering by complete coulomb stress changes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107**(B4), ESE 2–1–ESE 2–14, doi:10.1029/2001jb000202.
- King, G.C.P., Stein, R.S. dan Lin, J. (1994): Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(3), 935–953, ISSN 0037-1106, doi:10.1785/BSSA0840030935.
- Krantz, R.W. (1991): Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures. *Tectonophysics*, **188**(1-2), 203–207, doi:10.1016/0040-1951(91)90323-k.
- Lay, T. dan Kanamori, H. (1981): An asperity model of large earthquake sequences.
- Mangga, A.S., Atmawinata, S., Hermanto, B. dan Amin, T.C. (1994): Peta geologi lembar lombok, nusa tenggara.
- Murotani, S., Satake, K. dan Fujii, Y. (2013): Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for $m \sim 9$ subduction-zone earthquakes. *Geophysical Research Letters*, **40**(19), 5070–5074, doi:10.1002/grl.50976.
- Sokos, E., Zahradník, J., Gallovič, F., Serpetsidaki, A., Plicka, V. dan Kiratzi, A. (2016): Asperity break after 12 years: The m_w 6.4 2015 lefkada (greece) earthquake. *Geophysical Research Letters*, **43**(12), 6137–6145, doi:10.1002/2016gl069427.
- Stein, R.S., King, G.C.P. dan Lin, J. (1994): Stress triggering of the 1994 $m = 6.7$ northridge, california, earthquake by its predecessors. *Science*, **265**(5177), 1432–1435, doi:10.1126/science.265.5177.1432.
- Sumy, D.F., Cochran, E.S., Keranen, K.M., Wei, M. dan Abers, G.A. (2014): Observations of static coulomb stress triggering of the november 2011 m 5.7 oklahoma earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**(3), 1904–1923, doi:10.1002/2013jb010612.
- Woessner, J., Jónsson, S., Sudhaus, H. dan Baumann, C. (2012): Reliability of coulomb stress changes inferred from correlated uncertainties of finite-fault source models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **117**(B7), n/a–n/a, doi:10.1029/2011jb009121.
- Yagi, Y. (2004): Source rupture process of the tecoman, colima, mexico earthquake of 22 january 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-wave and near-source data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**(5), 1795–1807, doi:10.1785/012003095.
- Yamanaka, Y. dan Kikuchi, M. (2003): Source process of the recurrent tokachi-oki earthquake on september 26, 2003, inferred from teleseismic body waves. *Earth, Planets and Space*, **55**(12), e21–e24, doi:10.1186/bf03352479.
- Yamanaka, Y. dan Kikuchi, M. (2004): Asperity map along the subduction zone in northeastern japan inferred from regional seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **109**(B7), doi:10.1029/2003jb002683.
- Zubaidah, T., Korte, M., Manda, M. dan Hamoudi, M. (2014): New insights into regional tectonics of the sunda–banda arcs region from integrated magnetic and gravity modelling. *Journal of Asian Earth Sciences*, **80**, 172–184, doi:10.1016/j.jseae.2013.11.013.