

Relokasi Hiposenter Gempabumi Donggala Tahun 2018 Menggunakan Metode Hyporelocate

Sigit Eko Kurniawan^{1*}, Febriani Saputri²

¹ BMKG Stasiun Geofisika Padang Panjang, Padang

² BMKG Stasiun Geofisika Manado, Manado

^{*}E-mail: sigitekokurniawan@yahoo.com

ABSTRAK

Pada Jumat, 28 September 2018, pukul 17.02.44 WIB terjadi gempabumi yang berpotensi tsunami di daerah Donggala. BMKG mengeluarkan parameter gempabumi dengan magnitudo 7.7, lokasi 0.18 LS dan 119.85BT atau 26 km dari Utara Donggala. Gempabumi dengan kedalaman 10 km tersebut terjadi dengan mekanisme sesar mendatar akibat aktivitas sesar Palu-Koro dan diikuti oleh ratusan gempabumi susulan. Sesar Palu-Koro melintang dari Selat Makasar sampai pantai utara Teluk Bone memotong jantung kota Palu hingga ke sungai Lariang, Donggala. Studi ini akan merelokasi hiposenter gempabumi Donggala beserta gempabumi pendahulu dan susulannya menggunakan metode hypoRelocate. Relokasi ini menggunakan waktu tempuh mutlak dari 599 gempabumi, beda waktu tempuh relatif dari 2.492 pasangan gempabumi dan waktu dari 11 tumpukan coda cross-correlogram untuk selanjutnya diinversi dengan simulated annealing. Metode ini memiliki kelebihan berupa pengurangan ketergantungan hasil relokasi pada lokasi absolut katalog dengan menyisir waktu tempuh mutlak, pembatasan jarak relatif antargempabumi dengan menggunakan perbedaan waktu tempuh dan koreksi jarak antargempabumi berdasarkan tumpukan coda cross-correlogram. Hasil relokasi menunjukkan episenter gempabumi lebih mengumpul atau terfokus daripada posisi awal dan membentuk kluster yang berwujud sebuah bidang dengan luas sekitar 250 km × 85 km. Sebagian besar episenter setelah direlokasi bergeser dengan jarak 15–20 km dan perubahan kedalaman gempabumi dominan kurang dari 10 km. Arah pergeseran episenter tersebar merata secara acak namun arah barat lebih sedikit dominan. Relokasi menggunakan hypoRelocate menunjukkan peningkatan kualitas yang cukup baik dengan turunnya nilai total residual setelah relokasi. Hasil validasi relokasi hypoRelocate dengan peta citra satelit ALOS-2 mode ScanSAR dan ALOS-2 PALSAR-2 menunjukkan bahwa hasil relokasi berada pada bidang sesar akibat gempabumi.

Kata kunci: Hiposenter Gempabumi Donggala, Relokasi hiposenter, Hyperelocate,

ABSTRACT

On Friday, September 28th 2018 at 17.02.44 WIB, a large earthquake that has the potential to cause a tsunami occurs in the Donggala area. BMKG release the earthquake parameters with magnitude 7.7, location 0.18 LS and 119.85BT or 26 km from the North Donggala Central Sulawesi. Earthquake that has depth 10 km was clarified as a strike slip fault mechanism due to the Palu-Koro fault activity and followed by a hundreds of aftershocks. The Palu-Koro fault crossing from the Makassar Strait to the northern coast of Bone Bay cuts the heart of Palu city to the Lariang River, Donggala. This study will relocate Donggala earthquake both foreshock, mainshock and aftershock using the Hyporelocate method. This relocation uses the absolute travel time of 599 earthquakes, the relative travel time of 2492 earthquake pairs and 11 time coda cross-correlogram which are inverted with simulated annealing. This method has the advantage by reducing reliance on relocation results in absolute catalog locations by combing absolute travel time, restricting the relative distance between earthquakes based on differential travel time of earthquake pairs, and of inter-earthquake distance correction based on stacking coda cross-correlogram. The results of relocation show that earthquake epicenter was more collected or focused than the initial position and formed a cluster in the form of a field with an area of about 250 km × 85 km. Most of the epicenter after being relocated shifted with a distance of 15–20 km and the change in the depth of the dominant earthquake was less than 10 km. The direction of shifting the epicenter is spread evenly at random but the west is less dominant. Relocation using hypoRelocate showed a good improvement in quality with a decrease in total residual values after relocation. The results of the validation of hypoRelocate relocation with maps of ALOS-2 mode ScanSAR and ALOS-2 PALSAR-2 satellite images show that the results of the relocation are in the plane of the fault moving due to the main earthquake.

Keywords: Donggala Earthquake, Earthquake relocation, Hyperelocate

1. PENDAHULUAN

Hari Jumat, 28 September 2018, pukul 17:02:44 WIB terjadi gempa bumi yang berpotensi tsunami di daerah Donggala, Sulawesi Tengah. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mengeluarkan parameter gempa bumi dengan magnitudo 7,7 dan berlokasi pada $0,18^{\circ}$ LS, $119,85^{\circ}$ BT atau 26 km dari Utara Kabupaten Donggala, dengan kedalaman 10 km. Gempa bumi tersebut diikuti ratusan gempa bumi susulan dengan magnitudo yang bervariasi. Hasil analisis BMKG menunjukkan mekanisme sumber dari gempa bumi tersebut adalah aktifitas dari struktur sesar mendatar Palu-Koro. Berdasarkan hasil laporan masyarakat, guncangan kuat dirasakan di Kota Palu, Mapaga, Gorontalo, Poso, Majene, Toraja, Soroako, Kendari, Kolaka, Konawe Utara, Bone, Sengkang, Kalimantan Timur, Kalimantan Utara, Makassar, dan Gowa. Gempa bumi juga menyebabkan kerusakan pada bangunan dan berbagai infrastruktur serta ribuan orang meninggal dan luka-luka akibat efek sekunder dari gempa bumi tersebut.

Daerah Sulawesi Tengah, khususnya Donggala merupakan wilayah tektonik aktif di Indonesia dengan aktivitas kegempaan yang tinggi. Gempa bumi di daerah ini digolongkan menjadi gempa bumi dangkal yang diakibatkan oleh keberadaan sesar. Sesar tersebut adalah sesar Palu Koro yang merupakan struktur utama Pulau Sulawesi serta merupakan sesar terpanjang yang ada di pulau tersebut. Sesar tersebut memanjang dari Selat Makassar sampai pantai utara Teluk Bone memotong jantung kota Palu hingga ke sungai Lariang, Donggala. Berdasarkan hasil perhitungan terkini, nilai *slip rate* (laju geser) sesar Palu Koro berkisar 33 mm/tahun. Sesar Palu Koro terdiri dari empat segmen sesar, yaitu segmen Makassar Strait, Mou, Saluki, dan Moa. Segmen Makassar Strait menjadi segmen yang paling panjang dalam sesar ini.

Salah satu parameter gempa bumi yang penting adalah penentuan hiposenter. Penentuan hiposenter sangat bermanfaat pada studi proses dan evolusi mekanisme sumber dari gempa bumi besar, validasi variasi kecepatan gelombang, dan studi struktur zona patahan. Manfaat tersebut membuat penentuan hiposenter yang akurat menjadi kebutuhan mutlak untuk analisis

kegempaan lanjutan. Teknik relokasi gempa bumi yang baik dibutuhkan untuk menghasilkan lokasi hiposenter gempa yang akurat.

Teknik relokasi hiposenter gempa bumi telah banyak mengalami perkembangan. Salah satunya teknik relokasi hiposenter adalah metode *hypoRelocate*. *hypoRelocate* merupakan metode yang dikembangkan oleh Sun dkk. (2016). Metode ini menggabungkan permasalahan waktu tempuh mutlak, perbedaan waktu tempuh relatif, dan penambahan permasalahan baru berupa waktu puncak lonjakan pada tumpukan *coda cross-correlogram* yang kemudian diinversi bersama menggunakan *simulated annealing*. Kelebihan dalam metode ini berupa pengurangan ketergantungan hasil relokasi pada lokasi absolut katalog dengan menyisir waktu tempuh mutlak, pembatasan jarak relatif antargempa bumi dengan menggunakan perbedaan waktu tempuh dan koreksi jarak antargempa bumi berdasarkan tumpukan *coda cross-correlogram*. Metode ini telah digunakan untuk merelokasi gempa bumi Lushan (2013), Pidie Jaya (2016), dan Jiuzhaigou (2017).

Kebaruan dalam metode *hypoRelocate* adalah penambahan tumpukan *coda cross-correlogram*. Tumpukan *coda cross-correlogram* merupakan hasil aplikasi seismik interferometri dalam seismologi gempa bumi. *Coda* adalah rangkaian gelombang kompleks yang datang setelah gelombang langsung akibat pengaruh heterogenitas di litosfer bumi. *Coda* dicacah dan dikorelasi-silangkan dan kemudian hasilnya ditumpuk sehingga menjadi tumpukan *coda cross-correlogram*. Tumpukan *coda cross-correlogram* akan mengandung fungsi green yang setara dari semua gelombang geser yang menjalar di antara dua sumber seismik. Fungsi green tersebut digunakan sebagai permasalahan dalam metode relokasi *hypoRelocate*.

Inversi *Simulated annealing* digunakan dalam *hypoRelocate* karena permasalahan dalam relokasi dan beberapa parameter model tidak memiliki ketergantungan linier pada fungsi tujuan. *Simulated annealing* merupakan metode pencarian acak terarah yang dikenalkan oleh Kirkpatrick, Gelatt, dan Vecchi (1983). Inversi ini dapat memberi gambaran keseluruhan bentuk permukaan fungsi objektif karena dilakukan pencarian secara global. Pencarian solusi dalam

dalam inversi ini dapat diarahkan dengan pemilihan model yang dimodifikasi mendekati daerah dengan probabilitas yang besar.

Dalam studi ini, penulis akan merelokasi hiposenter gempabumi Donggala tahun 2018 dengan menggunakan metode *hypoRelocate*.

2. METODE

Penelitian dilakukan pada daerah Sulawesi Tengah pada koordinat 1,76° S – 0,65° N dan 118,97° BT – 121,15° BT. Data yang digunakan berasal dari katalog BMKG dari tanggal 24 September 2018 s.d. 3 November 2018. Dalam rentang waktu tersebut terdapat 599 gempabumi. Stasiun pengamatan yang digunakan sebanyak 21 stasiun InaTEWS dengan jarak maksimal 5 derajat dari episenter gempabumi utama Donggala. Model referensi kecepatan gelombang P dan gelombang S menggunakan model kecepatan dari IASP91 (Tabel 1).

Tabel 1. Model kecepatan IASP91

Lapisan	Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
1	0 - 20	5.8	3.36
2	20 - 35	6.5	3.75
3	35 - 71	8.04	4.47
4	71 - 120	8.05	4.5

Langkah – langkah untuk melakukan relokasi hiposenter menggunakan metode *hypoRelocate* dijelaskan berikut ini.

1. Menghitung waktu mutlak gempabumi

Waktu mutlak gempabumi adalah perbedaan waktu antara waktu tiba gelombang dengan waktu terjadinya gempabumi (*origin time*). Waktu tiba didapatkan dari hasil pencuplikan fase gelombang gelombang P dan fase gelombang S dari 599 gempabumi. Data waktu tiba yang digunakan untuk inversi meliputi data waktu tiba gelombang P dan data waktu tiba gelombang S sebanyak 7.202 fase.

2. Menghitung beda waktu tempuh relatif

Penentuan beda waktu tempuh antargempabumi diawali dengan memasang pasangan gempabumi dengan jarak kurang dari 20 km sesuai dengan data katalog. Ketika ada 2 sumber gempa dengan jarak antar sumber lebih kecil daripada jarak kedua sumber terhadap suatu stasiun, maka lintasan kedua sumber

gempa tersebut dianggap sama. Sehingga perbedaan nilai waktu tempuh antar keduanya yang terekam di suatu stasiun dianggap sebagai fungsi jarak antara kedua jarak sumber gempa. Hasil pemasangan gempabumi didapatkan 2.492 pasangan gempabumi dengan data perbedaan waktu tiba gelombang P sebanyak 14.513 dan data perbedaan waktu tiba gelombang S sebanyak 1.038 dari data katalog.

3. Membuat tumpukan korelasi silang gelombang coda

Sumber tumpukan korelasi silang *coda* berasal dari sinyal 131 gempabumi referensi dengan magnitudo di atas 4,5 pada 21 stasiun pengamatan. Pembuatan tumpukan *coda* dimulai dari rotasi sinyal ke arah tangensial, *filter band-pass* 0,5 – 5,0 Hz, dan menggeser 13 kali jendela waktu sebanyak 10 detik dimulai dari 10 detik setelah perkiraan kedatangan gelombang S sampai 40 detik setelahnya. Korelasi silang dilakukan untuk setiap stasiun dan setiap jendela waktu antargempabumi, dan korelasi silang dari semua stasiun ditumpuk untuk setiap jendela waktu. Dari 131 gempabumi dihasilkan 152 tumpukan *coda cross-correlogram*. Dari jumlah tersebut, hanya 11 tumpukan *coda cross-correlogram* yang menunjukkan lonjakan yang jelas. Sun dkk. (2016) mengilustrasikan ketidakhadiran spike dalam tumpukan *coda cross-correlogram* di antaranya disebabkan oleh heterogenitas hamburan seismik, jenis mekanisme fokus pasangan gempabumi, jumlah dan cakupan stasiun pengamatan, orientasi relatif antarsumber gempabumi, dan bising seismik.

4. Melakukan inversi *simulated annealing*

Hasil dari langkah 1-3 yakni waktu tempuh mutlak gempabumi, beda waktu tempuh relatif pasangan gempabumi dan waktu puncak lonjakan dari tumpukan korelasi silang *coda* selanjutnya diinversi dengan *simulated annealing*. Pemanfaatan inversi dengan *simulated annealing* untuk mencari hiposenter terbaik dan *origin time* gempabumi berdasarkan total residu minimal dari semua gempabumi yang ditentukan oleh perbedaan antara hasil pengamatan dan perhitungan dari tiga permasalahan yang ada.

Berikut ini adalah persamaan total residu dalam perhitungan *hyporelocate*

$$\Delta T^{res} = w_1 * \sum_i^N \frac{\Delta T_{i,a}}{N} + w_2 * \sum_{i,j}^M \frac{\Delta T_{i,j,r}}{M} + w_3 * \sum_{i,j}^Q \frac{\Delta T_{i,j,c}}{Q} \quad (1)$$

di mana

$\Delta T_{i,a}$ = residual waktu mutlak dari gempabumi i,

$\Delta T_{i,j,r}$ = residual perbedaan waktu tempuh antara pasangan gempabumi i, j,

$\Delta T_{i,j,c}$ = residual waktu tumpukan *coda cross-correlogram* antara pasangan gempabumi i, j,

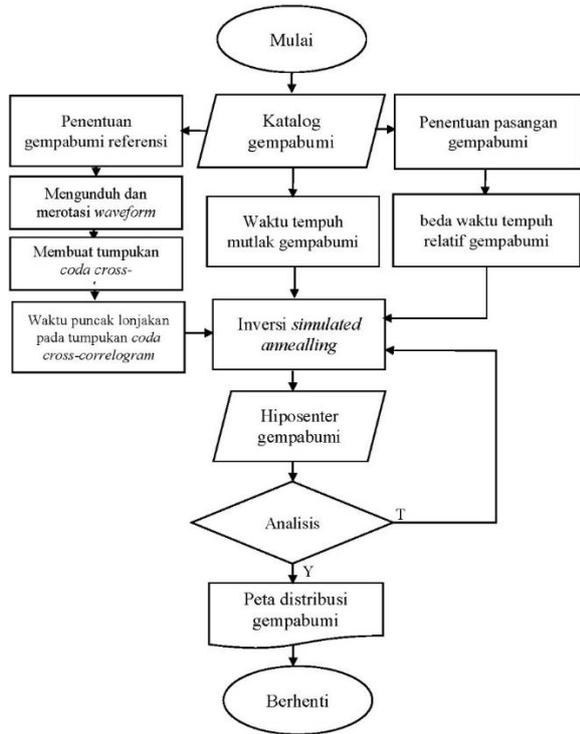
N = jumlah total gempabumi,

M = jumlah pasangan gempabumi dengan data perbedaan waktu tempuh,

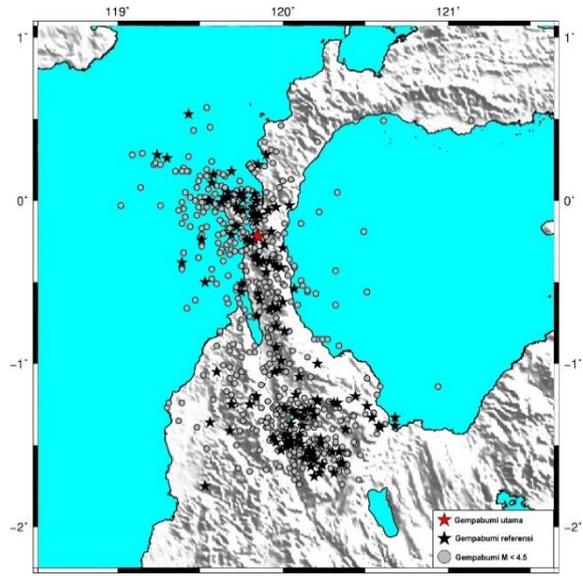
Q = jumlah pasangan tumpukan *coda cross-correlogram*,

w_1 , w_2 , dan w_3 ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$) = faktor pembobotan

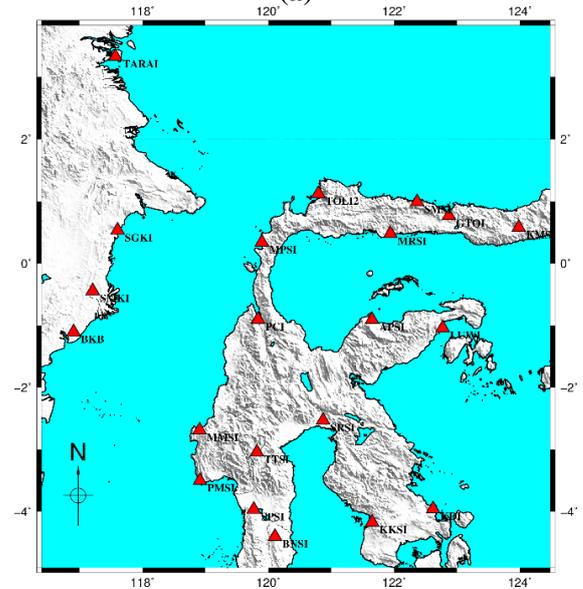
Prosedur metode *hypoRelocate* diilustrasikan secara skematis pada Gambar 1



Gambar 1. Prosedur metode *hypoRelocate*

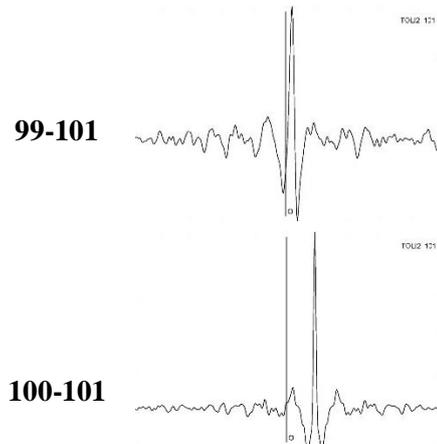


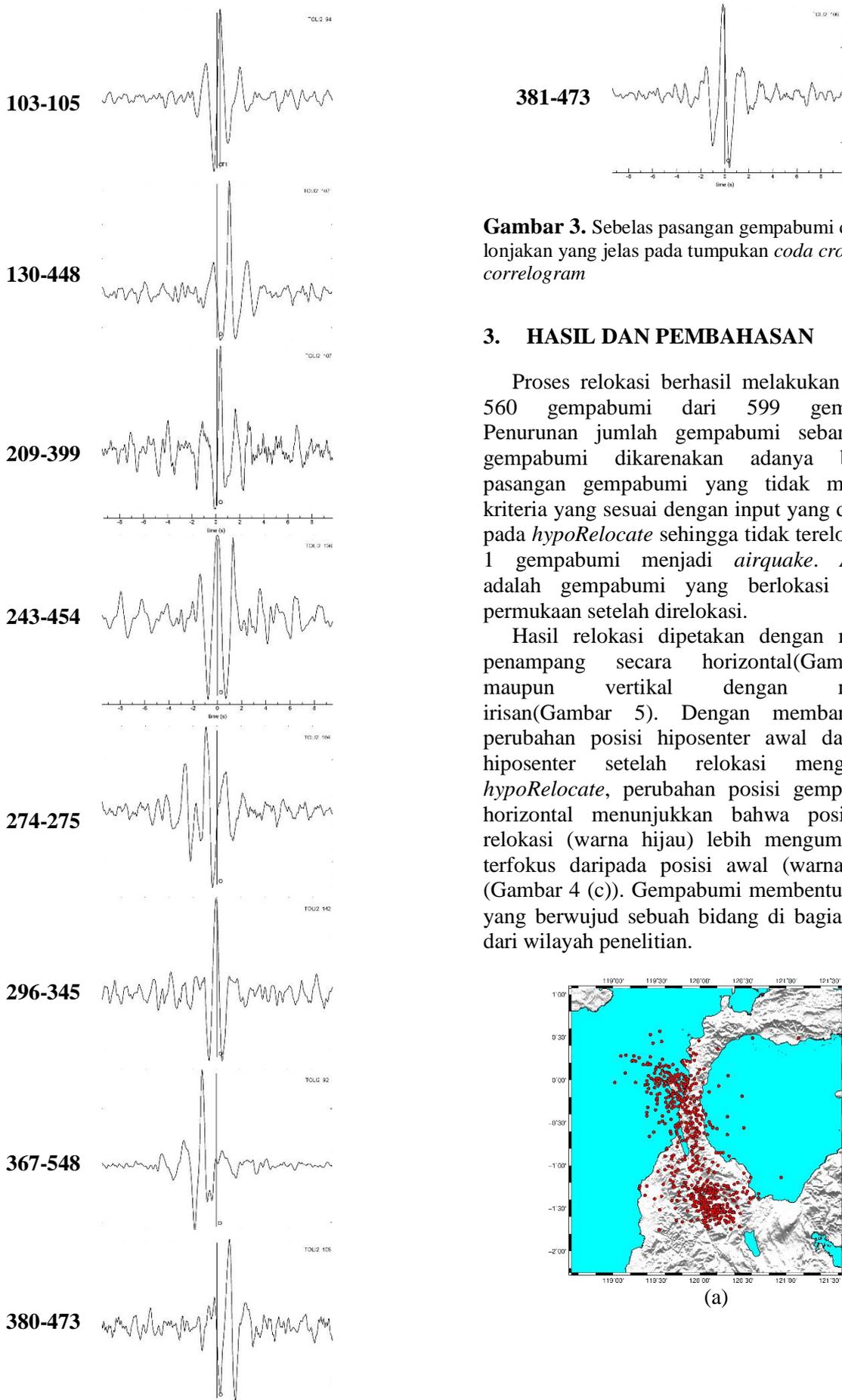
(a)



(b)

Gambar 2. (a) Hiposenter gempabumi sebelum direlokasi, (b) Stasiun pengamatan yang digunakan dalam relokasi (segitiga merah).



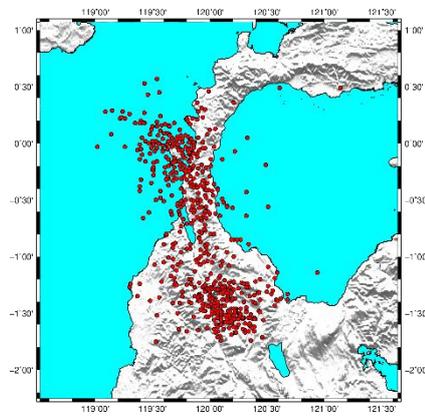


Gambar 3. Sebelas pasangan gempabumi dengan lonjakan yang jelas pada tumpukan *coda cross-correlogram*

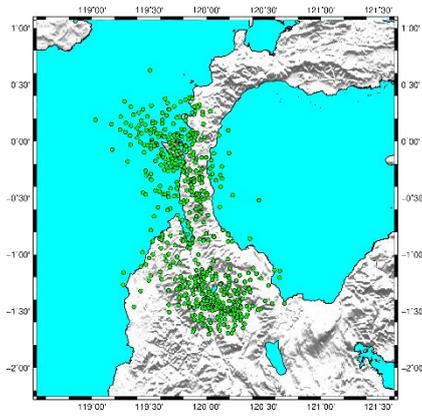
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses relokasi berhasil melakukan relokasi 560 gempabumi dari 599 gempabumi. Penurunan jumlah gempabumi sebanyak 39 gempabumi dikarenakan adanya beberapa pasangan gempabumi yang tidak memenuhi kriteria yang sesuai dengan input yang diberikan pada *hypoRelocate* sehingga tidak terlokasi dan 1 gempabumi menjadi *airquake*. *Airquake* adalah gempabumi yang berlokasi di atas permukaan setelah direlokasi.

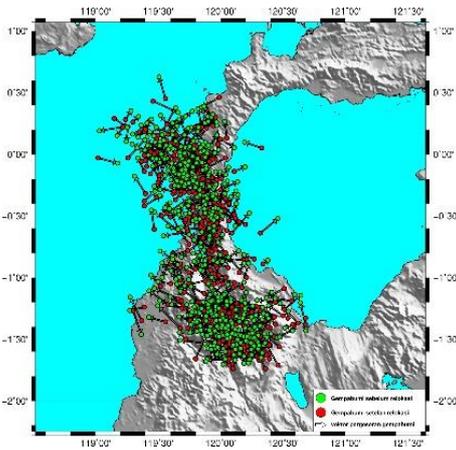
Hasil relokasi dipetakan dengan membuat penampang secara horizontal (Gambar 4) maupun vertikal dengan membuat irisan (Gambar 5). Dengan membandingkan perubahan posisi hiposenter awal dan posisi hiposenter setelah relokasi menggunakan *hypoRelocate*, perubahan posisi gempa secara horizontal menunjukkan bahwa posisi hasil relokasi (warna hijau) lebih mengumpul atau terfokus daripada posisi awal (warna merah) (Gambar 4 (c)). Gempabumi membentuk kluster yang berwujud sebuah bidang di bagian tengah dari wilayah penelitian.



(a)



(b)



(c)

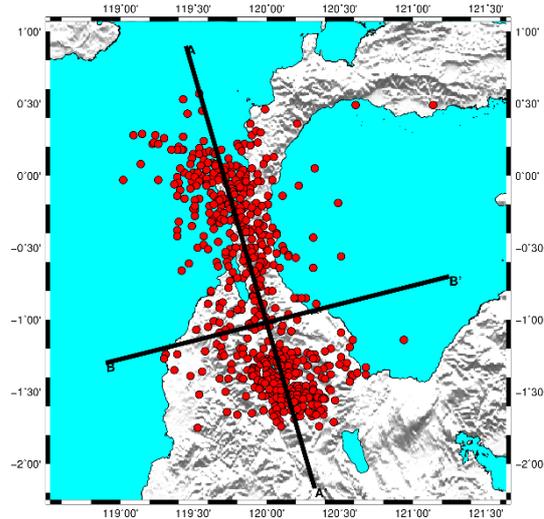
Gambar 4. (a) Penampang horizontal gempabumi sebelum direlokasi, (b) setelah direlokasi, (c) dan perbandingan sebelum dan setelah direlokasi

Pada penampang vertikal dibuat irisan A-A' yang merupakan irisan searah *strike* sesar dan irisan B-B' yang merupakan irisan tegak lurus terhadap *strike* sesar untuk melihat pola sebaran kedalaman gempabumi baik sebelum dan sesudah relokasi.

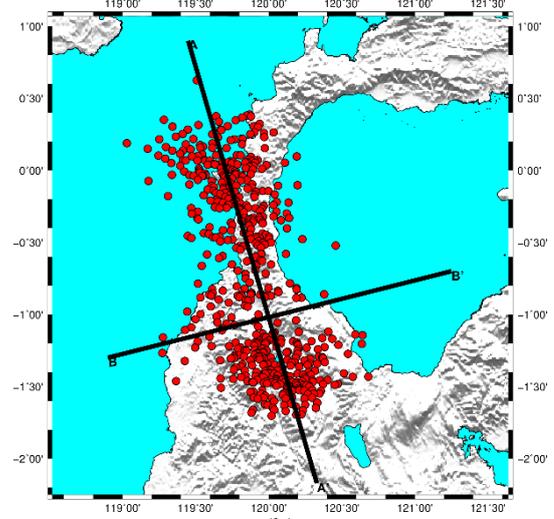
Pada segmen irisan A – A', terlihat bahwa setelah direlokasi membentuk sebuah bidang dengan panjang patahan berkisar 250 km. Dari segi kedalaman tampak perubahan kedalaman yang signifikan. Relokasi mampu memperbaiki kedalaman tetap 10 km menjadi kedalaman gempabumi yang diakibatkan oleh sesar Palu Koro. Dalam periode 2009-2015, kedalaman gempabumi akibat sesar Palu Koro adalah 40 km¹.

Pada segmen irisan B – B', terlihat bahwa setelah direlokasi membentuk sebuah bidang dengan lebar patahan berkisar 85 km. Pola sebaran kedalaman tampak menunjukkan hasil yang sama dengan irisan A-A'. Gempabumi dengan kedalaman awal 10 km mengalami pergeseran kedalaman dengan acak. Dari irisan

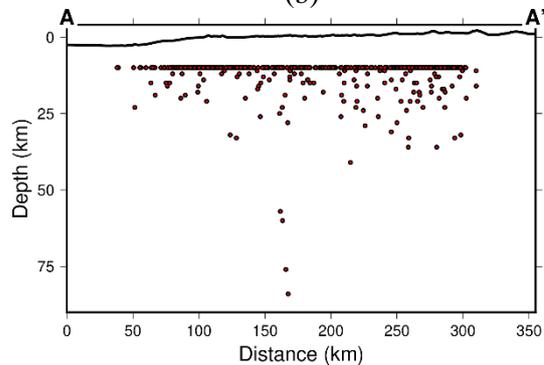
A-A' dan B-B', bidang sesar yang mengalami pergerakan diperkirakan sebesar 250 km × 85 km.



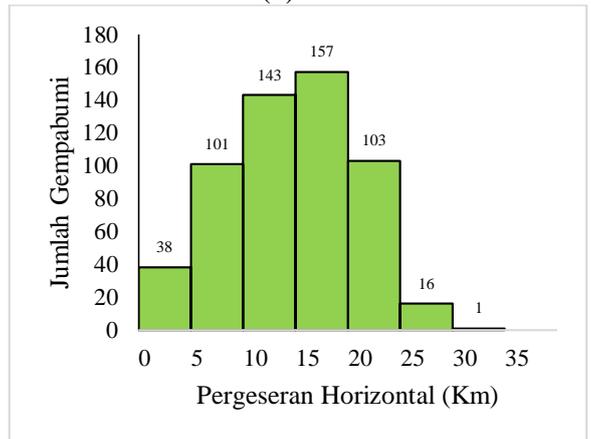
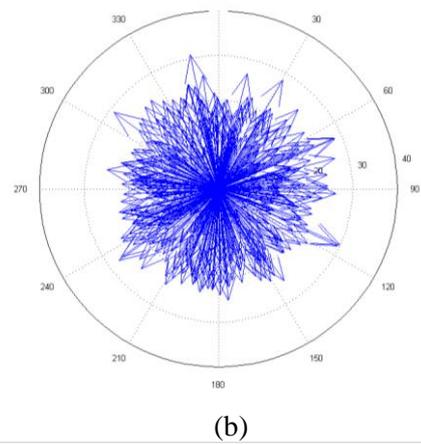
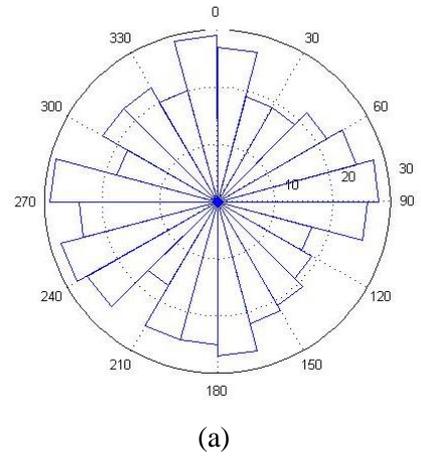
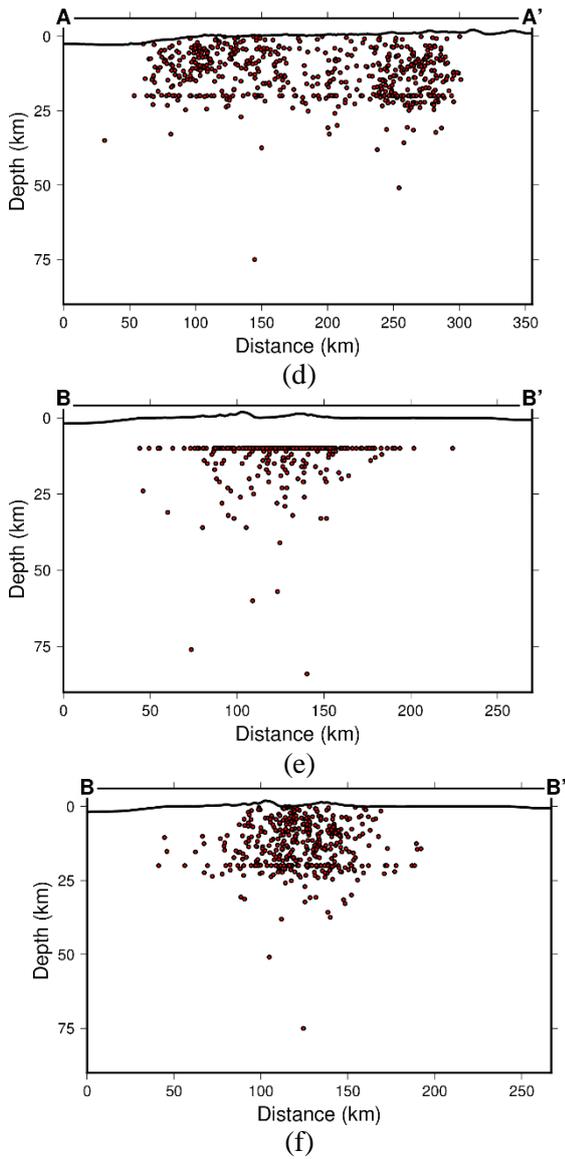
(a)



(b)

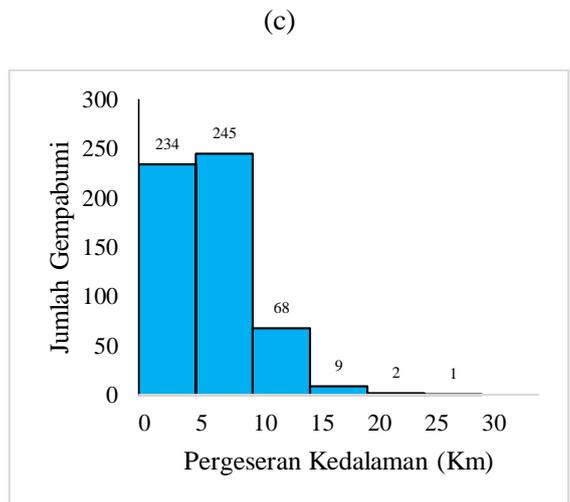


(c)



Gambar 5. (a) dan (b) irisan A-A' dan B-B' pada peta sebelum dan sesudah relokasi, (c) dan (d) irisan penampang vertikal A-A' sebelum dan sesudah relokasi, (e) setelah relokasi, (f) penampang vertikal irisan B-B' sebelum relokasi, (d) setelah relokasi.

Besarnya pergeseran dan arah episenter setelah relokasi ditunjukkan oleh diagram rose dan diagram kompas (Gambar 6). Sebagian besar episenter bergeser pada jarak antara 15–20 km. Pergeseran maksimum dalam relokasi gempabumi Donggala sebesar 30,76 km, sedangkan pergeseran minimum sebesar 435 meter. Pergeseran maksimum ini hanya terjadi pada satu gempabumi. Arah pergeseran posisi gempa tersebar secara acak ke segala arah, namun dominan terjadi pada arah barat.

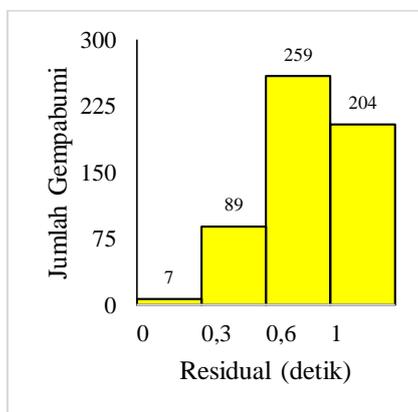


(d)

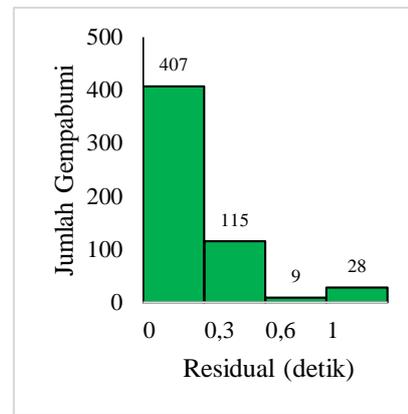
Gambar 6. (a) diagram rose , (b) diagram kompas , (c) histogram pergeseran episenter horizontal, dan (d) histogram pergeseran kedalaman.

Besarnya distribusi perubahan kedalaman gempabumi setelah direlokasi digambarkan histogram pada Gambar 6 (d). Nilai perubahan kedalaman terbesar adalah 25,56 km. Sebagian besar gempabumi mengalami perubahan pada skala kecil. Dua ratus tiga puluh empat gempabumi mengalami pergeseran antara 0–5 km, dilanjutkan dengan jumlah terbesar yakni 245 gempabumi mengalami pergeseran kedalaman senilai 5–10 km. Sebagian kecil lainnya mengalami pergeseran kedalaman yang cukup besar antara lain 68 gempabumi bergeser antara 10-15 km, 9 gempabumi mengalami pergeseran kedalaman senilai 15-20 km, 2 gempabumi berada pada rentang pergeseran 20-25 km dan 1 gempabumi dengan nilai terbesar memiliki pergeseran lebih dari 25 km.

Setelah dilakukan relokasi, nilai residual total mulai berkurang. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 7 yang memperlihatkan histogram residual total dari katalog BMKG sebelum dan setelah dilakukan relokasi. Dari kedua histogram tersebut nampak bahwa nilai-nilai residual total setelah dilakukan relokasi lebih banyak yang mendekati nol dibandingkan sebelum dilakukan relokasi. Nilai residual total yang menurun, menunjukkan hasil relokasi hiposenter gempabumi dengan memanfaatkan *hypoRelocate* dapat memberikan nilai residual yang lebih baik.



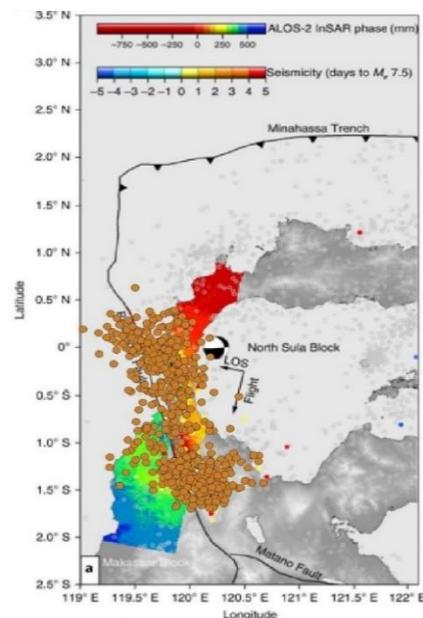
(a)



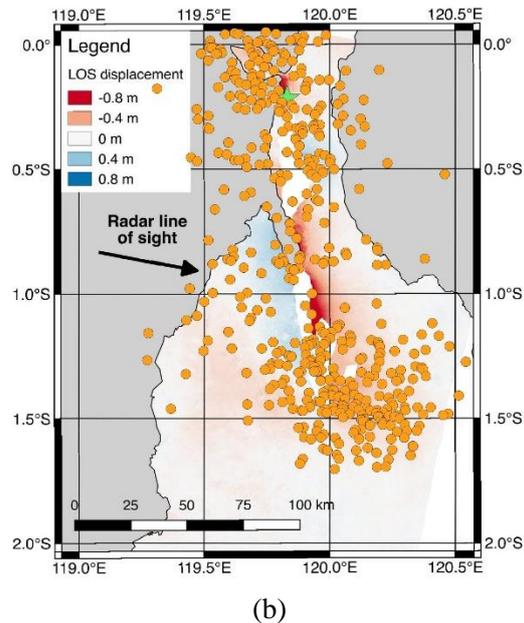
(b)

Gambar 7. (a) Histogram residual awal, (b) histogram residual sesudah relokasi

Hasil relokasi dari *hypoRelocate* dilakukan validasi terhadap peta perpindahan koseismik hasil citra satelit Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) mode ScanSAR oleh JAXA¹⁰ dan perpindahan horizontal hasil citra satelit Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) PALSAR-2 oleh JAXA¹¹. Hasil pencocokan menunjukkan bahwa lokasi episenter hasil relokasi berada pada bidang sesar yang bergerak akibat gempabumi. Gempabumi utama memicu tegangan utama pada sistem yang kompleks akibat pergeseran tiba-tiba. Kawasan zona rupture memerlukan penyesuaian kembali menuju keadaan baru sehingga menghasilkan gempabumi susulan. Pada gambar 8 tampak bahwa distribusi gempabumi susulan memanjang dengan pola yang searah dengan jurus sesar. Hasil tersebut menandakan bahwa relokasi dengan *hypoRelocate* sudah cukup baik.



(a)



(b)
Gambar 8. Hasil validasi dengan pemetaan citra satelit (a) ALOS-2 mode ScanSAR dari Socquet dkk. (2019), dan (b) ALOS-2 PALSAR-2

4. KESIMPULAN

Dari hasil relokasi gempabumi Donggala menggunakan *hypoRelocate* dapat disimpulkan bahwa:

1. Episentris hasil relokasi memiliki hasil yang lebih mengumpul atau terfokus daripada posisi awal dan membentuk kluster yang berwujud sebuah bidang dengan luas sekitar 250 km × 85 km.
2. Sebagian besar episentris setelah direlokasi bergeser dengan jarak 15–20 km dengan dengan pergeseran maksimum 30,76 km dan pergeseran minimum 435 meter. Perubahan kedalaman gempabumi dominan kurang dari 10 km dan perubahan kedalaman maksimal 25,56 km. Arah pergeseran episentris tersebar merata secara acak namun arah barat lebih sedikit dominan.
3. Relokasi menggunakan *hypoRelocate* menunjukkan peningkatan kualitas yang cukup baik dengan turunnya nilai total residual setelah relokasi
4. Hasil validasi relokasi *hypoRelocate* dengan peta citra satelit ALOS-2 mode ScanSAR ALOS-2 PALSAR-2 menunjukkan bahwa hasil relokasi berada pada bidang sesar gempabumi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BMKG untuk data katalog gempa dan atas akses data yang diberikan; Dr. Sun Li, Miao Zhang dan Lianxing Wen untuk program *hypoRelocate*; Wessel dan Smith untuk program GMT, dan Mas Yusuf Haidar Ali atas bantuan dan kerjasamanya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Long, H., & Wen, L. 2012. Using repeated sources to quantitatively determine temporal change of medium properties: Theory and an example. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(9).
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. 2000. A Double-difference Earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368.
- Sun, L., Zhang, M., & Wen, L. 2016. A new method for high-resolution event relocation and application to the aftershocks of Lushan Earthquake, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4), 2539–2559.
- Kurniawan. 2018. Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan *hypoRelocate* (Studi Kasus Gempabumi Pidie Jaya Tahun 2016 - 2017). Skripsi. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
- Liang J H, Sun L, Liu J. 2018 A high precision relocation study of the Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake and the aftershocks occurred in 2017. *Chinese J. Geophys*, 2152–2162.
- Aki, K. 1969. Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as Scattered Waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(2), 615–631
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Kennett, B. & Engdahl, E. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase

- identification, *Geophys. J. Int.*, 105, 429–465
- Socquet, A., Hollingsworth, J., Pathier, E., Bouchon, M. 2019. Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nature Geoscience* 12 :192–199
- ARIA Along-track Deformation Map of the M7.5 September 28, 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia. (<https://disasters.nasa.gov/sulawesi-island-indonesia-earthquake-and-tsunami-2018/aria-along-track-deformation-map-m75-september>)