

Studi Sumber Gempa Ambon 26 September 2019 Mw 6,5

Dimas Sianipar^{1*}, Yehezkiel Halauwet², Daryono³, Dwikorita Karnawati³

¹Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (STMKG), Tangerang Selatan

²Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Stasiun Geofisika Karang Panjang, Ambon

³Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Jakarta Pusat

*Email: dsj.sianipar@stmkg.ac.id

Abstrak

Pada tanggal 26 September 2019 pukul 06:46 WIB gempabumi bermagnitudo Mw 6,5 terjadi di wilayah Ambon dan mengakibatkan adanya korban jiwa dan kerusakan infrastruktur. Penjelasan yang rinci tentang mekanisme sumber gempa ini masih belum ada. Dalam penelitian ini, kami menggunakan metode inversi gelombang seismik untuk menjelaskan proses *rupture* dan distribusi *slip* koseismik menggunakan data gelombang badan dan gelombang permukaan teleseismik. Hasil menunjukkan bahwa bidang sesar dengan arah ke utara (*strike*=347° dan *dip*=70°) lebih cocok untuk dimodelkan dengan rekaman *displacement* observasi dan sesuai dengan distribusi gempa susulan. *Rupture* terinisiasi dari kedalaman 9 km dan bergerak secara bilateral tetapi dominan ke selatan. *Slip* maksimum bernilai 90 cm tercapai kurang dari 3 detik pada kedalaman 6,2 km. Bidang *rupture* berada pada kedalaman ~2 - 24 km dengan luas sekitar 567 km². Rata-rata dari amplitudo *slip* di bidang *rupture* adalah 29,4 cm. *Asperity* berada di bagian *up-dip* dan di selatan dari *initial break*, dengan luas sekitar 144 km² (25% dari total luas *rupture*). Momen seismik total yang dihasilkan dari gempa ini yaitu $6,60 \times 10^{18}$ Nm atau setara dengan magnitudo momen $M_w=6,47$. Gempa Ambon 2019 ini memiliki nilai *stress drop* yang rendah. Pemodelan *stress* menggunakan masukan *slip* hasil inversi menunjukkan bahwa gempa susulan dipromosikan oleh perubahan *Coulomb stress* yang positif pada kedalaman yang lebih dangkal (0-10 km). Gempa susulan di bagian barat-daya sesar (di bagian Pulau Ambon) lebih cocok dipromosikan oleh perubahan *Coulomb stress* positif pada kedalaman yang lebih dalam (10-30 km). Dalam penelitian ini juga didiskusikan kaitan antara parameter koseismik dan parameter seismisitas (gempa pendahuluan dan susulan). Gempa Ambon 2019 terjadi di sesar *strike-slip* dengan gerakan *right-lateral* yang berada di antara pulau Ambon dan Haruku memanjang ke utara di sebelah barat daya Kairatu, Pulau Seram. Sesar ini belum teridentifikasi sebelumnya dan keberadaannya berpengaruh terhadap bahaya kegempaan di Ambon dan sekitarnya.

Kata kunci: gempa Ambon 2019, finite fault, rupture, slip, stress drop, Coulomb stress, foreshocks, aftershocks, b-value, p-value

1. Pendahuluan

Gempa Ambon 2019 terjadi pada tanggal 26 September 2019 pukul 06:46 WIB dengan magnitudo 6,6 $M_w(mB)$ menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Pusat gempabumi berada di koordinat -3,42°LU, 128,45°BT pada kedalaman 10 km menurut hasil pemutakhiran BMKG. Gempa ini dirasakan oleh masyarakat dengan intensitas

maksimum mencapai VI MMI (*Modified Mercally Intensity*) dan menyebabkan kerusakan infrastruktur dan rumah masyarakat, serta menelan korban jiwa sedikitnya 30 orang.

Penjelasan yang rinci mengenai mekanisme sumber gempa ini masih belum ada. Lokasi pusat gempa merupakan wilayah yang aktif secara tektonik. Wilayah Pulau Seram dan sekitarnya berada dekat dengan palung Seram yang dapat membangkitkan gempa besar dengan tipe penyesaran naik (*thrust*). Menurut data BMKG, gempa Ambon 2019 merupakan gempa dengan tipe penyesaran *strike slip* pada lapisan kerak (*crustal earthquake*). Berdasarkan produk *moment tensor* gempa BMKG, gempa ini bisa terjadi akibat dari penyesaran mendatar dengan arah utara-selatan dengan *dip* yang hampir vertikal dengan pergerakan *right lateral* (bidang nodal 1: *strike*=166°, *dip*=81°, *rake*=180°), atau akibat dari pergerakan *left-lateral* dengan arah timur-barat (bidang nodal 2: *strike*=256°, *dip*=90°, *rake*=10°). Produk *moment tensor* BMKG ini dihasilkan lewat inversi seismik menggunakan data regional BMKG melalui perangkat lunak *Seiscomp3*. Produk BMKG ini juga sesuai dengan hasil mekanisme sumber dari berbagai lembaga pengamatan gempa. Pembangkit gempa ini bisa berupa struktur yang melintasi wilayah Kairatu bagian selatan berarah timur-barat yang secara umum sesuai dengan lineasi *strike slip* di bagian utara dan selatan Pulau Seram, atau bisa juga dibangkitkan oleh struktur berarah utara-selatan yang mungkin belum teridentifikasi.

Penyesaran dengan tipe *strike-slip* dan *thrust* di sekitar pulau Seram merupakan hal yang wajar secara tektonik sebagai akibat dari deformasi yang intens berkaitan dengan konvergensi antara lempeng Australia, Eurasia dan Pasifik dan beberapa *microplate* dengan skala dan kecepatan yang berbeda-beda. Beberapa struktur *strike slip* dan *thrust* di wilayah ini telah teridentifikasi sebelumnya dan sudah masuk dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Keberadaan sesar aktif penting untuk diidentifikasi dalam penilaian bahaya seismik di masa yang akan datang.

BMKG melaporkan bahwa gempa utama didahului oleh beberapa gempa pendahuluan yang terjadi beberapa bulan sebelumnya (Gambar 1). Gempa utama juga diikuti oleh ribuan gempa susulan menurut hasil pengamatan BMKG. Distribusi gempa susulan menunjukkan pola yang berarah utara-selatan. Pada penelitian ini, kami menggunakan inversi gelombang seismik untuk menyediakan model penyesaran yang dapat menjelaskan proses *rupture* dan distribusi *slip* koseismik saat gempa utama terjadi.

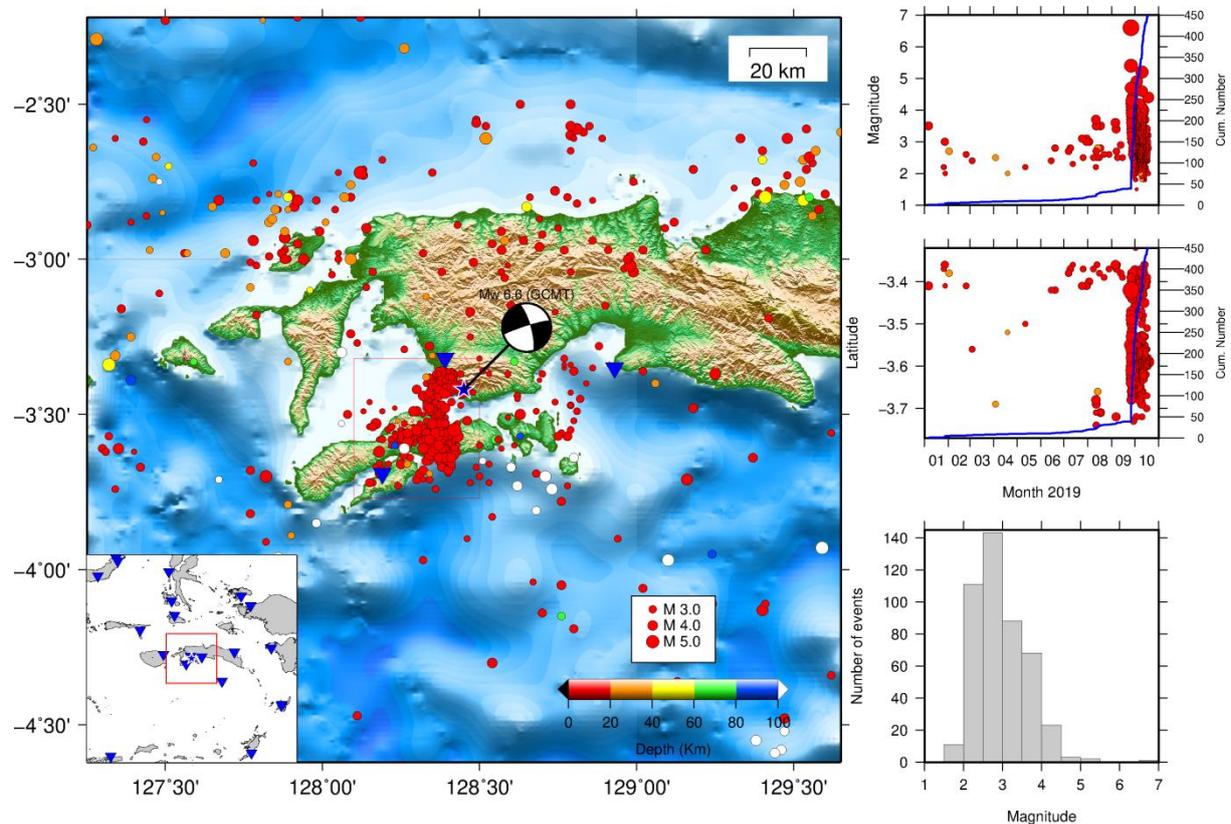
2. Metode

Respon dari penyesaran gempa pada sebuah stasiun seismik dapat diestimasi dengan penjumlahan masing-masing kontribusi dari *grid* yang regular (*sub-faults*) seperti yang ditunjukkan pada formula (Ji dkk., 2002) (Gambar 2):

$$u(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{jk} [\cos \lambda_{jk} Y_{jk}^1(V_{jk}, t) + \sin \lambda_{jk} Y_{jk}^2(V_{jk}, t)] \hat{S}_{jk}(t)$$

yang mana $u(t)$ merupakan *displacement* pada sebuah stasiun seismik, j adalah *sub-fault* ke- j sepanjang *strike*, k adalah *sub-fault* ke- k sepanjang *dip*. D_{jk} , λ_{jk} , $\hat{S}_{jk}(t)$ masing-masing adalah rata-rata amplitudo *slip*, sudut *rake* dan fungsi *rise-time*. V_{jk} adalah kecepatan rata-rata *rupture* antara hiposenter dan *sub-fault* jk . $Y_{jk}^1(V_{jk}, t)$ dan $Y_{jk}^2(V_{jk}, t)$ adalah fungsi Green's *sub-fault* untuk unit *slip* di arah *strike* dan arah *down-dip*.

Pada studi ini, digunakan metode inversi *waveform* dengan transformasi *wavelet* (Ji dkk., 2002; Hao dkk., 2017). Inversi ini merupakan inversi non-linear yang menerapkan metode *simulated annealing* yang secara simultan mencari parameter sumber gempa, yaitu nilai amplitudo *slip*, arah *slip*, sudut *rake*, waktu inisiasi *rupture*, kecepatan *rupture* dan fungsi laju *slip* untuk setiap *sub-fault*. Pada inversi ini, fungsi laju *slip* diestimasi dengan fungsi kosinus yang asimetrik dengan waktu awal dan akhir yang bervariasi (Ji dkk., 2002).



Gambar 1. Seismisitas di sekitar bagian barat Pulau Seram, Maluku, Indonesia dari 1 Januari – 18 Oktober 2019 berdasarkan katalog Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG (www.inatews.bmkg.go.id). *Beachball* menunjukkan mekanisme sumber gempa Ambon 26 September 2019 (GCMT). Kotak merah menunjukkan wilayah yang seismisitasnya dipetakan dalam tiga grafik di panel bagian kanan.

Secara ringkas, mekanisme sumber gempa yang dikeluarkan oleh beberapa lembaga (misalnya, BMKG, USGS, Geoscope IGP, Global CMT, Geofon GFZ dan IRIS) menunjukkan kesesuaian satu dengan yang lainnya yaitu gempa disebabkan oleh penyesaran bertipe *strike-slip* pada kedalaman dangkal di lapisan kerak. Pada studi ini, dilakukan inversi *waveform* dengan menggunakan data gelombang badan (*body-waves*) dan gelombang permukaan (*surface-waves*) teleseismik. Data teleseismik digunakan untuk menghindari gangguan dari heterogenitas struktur mantel bagian atas.

Bidang sesar dimodelkan sebagai suatu persegi panjang tunggal dengan panjang 45 km dan lebar 30 km yang dibagi menjadi 150 bagian (*sub-fault*) dengan ukuran 3x3 km masing-masing. Dalam hal ini, bidang sesar mempunyai 15 *sub-fault* sepanjang *strike*, dan 10 *sub-fault* sepanjang *dip* (Gambar 2). Posisi hiposenter gempa utama (*initial break*) yang digunakan merupakan hiposenter yang sudah direlokasi menggunakan data BMKG (Yehezkiel Halauwet, 2019), yaitu pada koordinat 128,32°BT, -3,40°LU pada kedalaman 9 km. *Initial break* ini ditempatkan pada *sub-fault* ke-11 sepanjang *strike*, dan *sub-fault* ke-3

sepanjang *dip*. Bidang nodal pertama memiliki parameter *strike*=347° dan *dip*=70°. Bidang nodal kedua memiliki parameter *strike*=253° dan *dip*=84° (Tabel 1).

Menurut *scaling law* yang biasa digunakan dalam ilmu seismologi (Wells and Coppersmith, 1994), gempa dengan magnitudo momen 6,5 - 6,6 bertipe *strike-slip* biasanya dihasilkan oleh *rupture* dengan ukuran panjang 29 - 34 km dan lebar sekitar 12 km. Digunakannya model dengan ukuran sedikit lebih besar (45x30 km) dalam studi ini adalah untuk mempertimbangkan bahwa *rupture* dapat menjalar secara bilateral ke dua arah dengan berpusat di *initial break*, juga dapat memperluas ke arah *down-dip* hingga batas kedalaman seismogenik di lapisan kerak bagian bawah (*lower crust*) dekat diskontinuitas *Moho*.

Untuk membuat pekerjaan inversi lebih ringan, diberikan beberapa batasan inisial. Kecepatan *rupture* (*Vr*) di awal merupakan kecepatan konstan sebesar 3,3 km/detik tetapi selama proses inversi, dicari kecepatan *rupture* terbaik pada rentang 1,65 – 4,95 km/detik. Sudut *rake* yang paling optimal juga dicari pada rentang 90-270° (bidang nodal 1, *right-lateral*) atau 270-90° (bidang nodal 2, *left-lateral*). Konvensi sudut *rake* di sini dihitung dari 0° ke 360°. Total momen seismik juga dibatasi pada nilai momen yang dihasilkan oleh model sumber titik dari Global CMT yaitu sebesar $6,60 \times 10^{18}$ Nm.

Inversi dilakukan dengan mencari model yang paling cocok (*waveform fitting*) dengan data observasi. Data yang digunakan adalah data gelombang badan dan gelombang permukaan teleseismik yang diunduh melalui IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) yaitu untuk stasiun seismik pada jarak 30-90° dari sumber gempa. Pemilihan data seismik dilakukan dengan mempertimbangkan kualitas sinyal (*signal-to-noise ratio*) dan distribusi *azimuth* dari stasiun seismik yang akan digunakan. Panjang data gelombang badan yang digunakan yaitu 51,2 detik untuk masing-masing sinyal dengan *sampling* tiap 0,2 detik.

Setelah dilakukan koreksi dengan respon instrumen, digunakan data *displacement* frekuensi rendah yang disaring dalam rentang frekuensi kurang dari 0,4 Hz untuk gelombang badan. Dalam studi ini digunakan sebanyak 38 gelombang badan (19 gelombang P, 19 gelombang SH), dan 35 gelombang permukaan (19 gelombang *Rayleigh* dan 16 gelombang *Love*). Untuk gelombang permukaan, sinyal disaring lebih rendah dari 0,007 Hz. Fungsi Green's dihitung menggunakan model kecepatan dari model CRUST2.0 dan PREM (Tabel 2).

Tabel 1. Parameter inisial gempa utama untuk inversi *finite fault*

Tanggal	<i>Origin time</i> (UTC)	Episenter (°BT, °LU)	<i>Strike</i> θ (°)	<i>Dip</i> δ (°)	<i>Rake</i> λ (°)	<i>Mo</i> (10^{18} Nm)	Rentang <i>Vr</i> (km/s)
2019-09-25	23:46:44	128,32, -3,40	347 253	70 84	90-270 270-90	6,60	1,65-4,95

Tabel 2. Model kecepatan yang digunakan dalam studi ini

<i>Vp</i> (km/s)	<i>Vs</i> (km/s)	ρ (Densitas)	Ketebalan (km)	<i>Qp</i>	<i>Qs</i>
1,50	0,01	1,02	1,3	1000	500
2,10	1,00	2,10	1,0	1000	500
6,00	3,40	2,70	7,0	1000	500
6,60	3,70	2,90	7,0	1000	500
7,20	4,00	3,05	7,0	1000	500

8,08	4,47	3,38	196,0	1200	500
8,59	4,66	3,45	36,0	360	140
8,73	4,71	3,49	108,0	370	140
8,87	4,76	3,53	36,0	370	140
9,22	4,98	3,74	33,3	370	140
9,56	5,18	3,83	100,0	360	140
9,90	5,37	3,91	33,3	360	140
10,07	5,47	3,95	33,3	360	140
10,21	5,54	3,98	70,0	360	140
10,79	5,98	4,39	25,3	760	310
10,87	6,06	4,40	0,0	750	310

3. Hasil dan Pembahasan

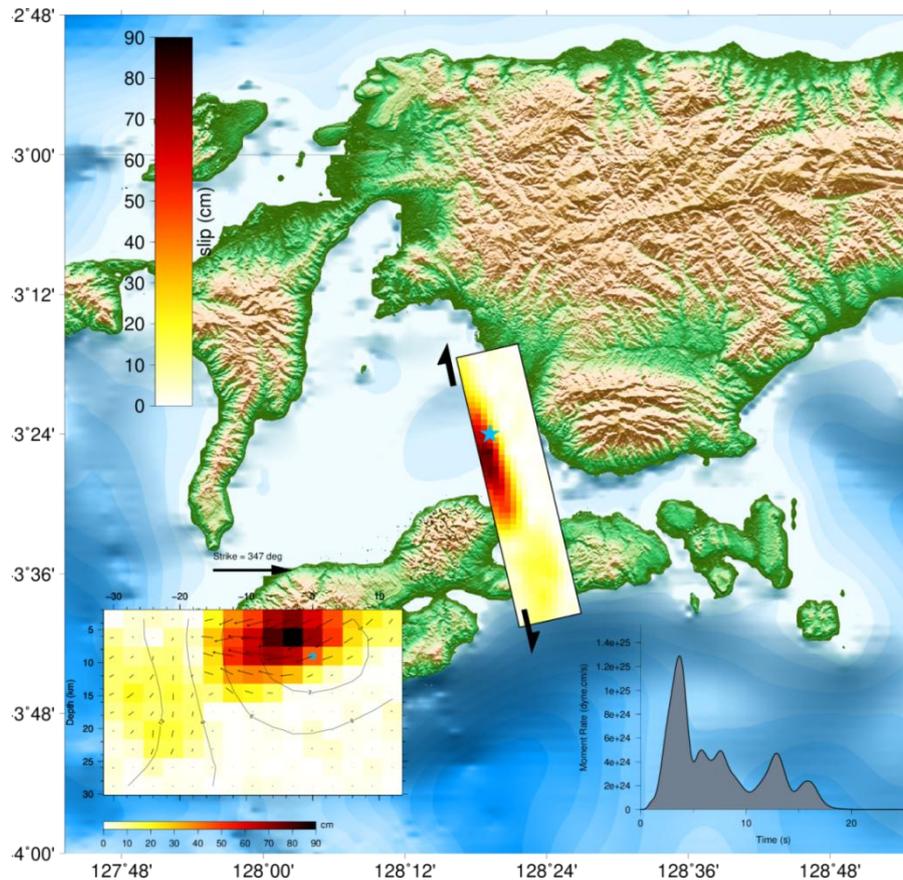
Hasil menunjukkan bahwa bidang *nodal* dengan orientasi ke utara (*strike*=347° dan *dip*=70°) lebih cocok untuk dimodelkan dengan rekaman *displacement* observasi teleseismik. *Error* minimum dengan model ini yaitu 0,3182973 yang tergolong cukup baik dalam studi sumber gempa. Kesesuaian antara sinyal sintetik dari model dengan sinyal observasi (*waveform fitting*) lebih baik bagi model ini (Gambar S2-S3). Hal ini juga didukung dengan kluster gempa susulan yang terdistribusi berarah utara-selatan yang dapat dilihat pada Gambar 1. Sementara untuk bidang *nodal* kedua, *error* minimum yang dihasilkan sebesar 0,3290477.

Tabel 3. Hasil parameter sumber gempa Ambon 2019 yang rinci

Parameter Gempa Ambon 2019	Hasil
Kedalaman inisiasi (hiposenter) (km)	9,0
Kedalaman <i>slip</i> maksimum (km)	6,2
Ekstensi kedalaman <i>rupture</i> (km)	~2 - 24
Luas <i>rupture</i> (RA) (km ²)	63 x 9 = 567
Kedalaman <i>asperity</i> ($S > 1,5 \times \dot{D}$) (km)	~2 - 10
Luas <i>asperity</i> (SA) (km ²)	16 x 9 = 144
SA/RA	25 %
Momen seismik (10^{18} Nm) (<i>M_w</i>)	6,60 (6,47)
Amplitudo <i>slip</i> maksimum (cm)	90,1
Rata-rata amplitudo <i>slip</i> \dot{D} (cm)	29,4
Durasi <i>rupture</i> (s)	21
Rata-rata sudut <i>rake</i> (°)	210
L _{eff} (km)	34
W _{eff} (km)	17
<i>Stress drop</i> (bars)	2,14 – 4,28

Rupture didominasi dengan pergerakan *strike slip* dengan sedikit komponen turun (*normal*) utamanya di sekitar *asperity*. *Rupture* ini terinisiasi dari kedalaman 9 km dan bergerak secara bilateral tetapi dominan ke selatan. *Slip* maksimum bernilai 90 cm tercapai kurang dari 3 detik pada kedalaman dangkal 6,2 km. Untuk mempertimbangkan ketidakpastian hasil inversi, wilayah yang disebut *rupture* harus memiliki amplitudo *slip* minimal 10% dari *slip* maksimum. Bidang *rupture* ini berada pada kedalaman 2 - 24 km dengan luas sekitar 567 km². Rata-rata dari amplitudo *slip* di bidang *rupture* adalah 29,4 cm. *Asperity* didefinisikan sebagai wilayah dengan nilai amplitudo *slip* yang lebih besar dari 1,5 kali rata-rata *slip*.

Rupture gempa Ambon hanya memiliki satu *asperity* besar (Gambar 2). *Asperity* ini berada di bagian *up-dip* dan di selatan dari *initial break*, dengan luas sekitar 144 km² (25% dari total luas *rupture*). Momen seismik total yang dihasilkan dari gempa ini yaitu 6,60 x 10¹⁸ Nm atau setara dengan magnitudo momen $M_w=6,47$.



Gambar 2. Proses *rupture* dan distribusi *slip* gempa Ambon 26 September 2019. Bintang biru merupakan hiposenter (*initial break*) gempa utama. Warna menunjukkan amplitudo *slip*. Pada panel bawah kiri ditunjukkan penampang distribusi *slip* terhadap kedalaman. Panah merupakan arah *rake* pada masing-masing *sub-fault*. Kontur menunjukkan waktu propagasi *rupture*. Pada bagian kanan bawah merupakan fungsi laju momen.

Dimensi sesar yang paling efektif dapat diestimasi dengan metode *autocorrelation width* (W^{ACF}) yang diusulkan oleh Mai dan Beroza (2000). *Slip* sepanjang arah *strike* dan *dip* masing-masing dijumlahkan untuk menunjukkan fungsi *slip* yang ditujukan untuk menghitung panjang sesar efektif (L_{eff}) dan lebar sesar efektif (W_{eff}). Kemudian, L_{eff} dan W_{eff} dihitung dengan menormalkan luas di bawah fungsi korelasi diri dengan fungsi korelasi diri *zero lag* (ACF) seperti yang ditunjukkan oleh rumus:

$$W^{ACF} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (f * f) dx}{f * f|_{x=0}}$$

Menggunakan rumus di atas, untuk gempa Ambon 2019 didapatkan ukuran efektif *rupture* sebesar 34 km x 17 km. Kemudian *stress drop* dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta\sigma = C \frac{M_0}{AL}$$

yang mana C adalah konstanta non-dimensional yang bergantung pada geometri sesar ($C=2/\pi$ untuk *strike-slip*) (Kanamori dan Anderson, 1975), M_o adalah total momen seismik, A adalah luas *rupture* dan L adalah panjang atau lebar sesar. *Stress drop* gempa Ambon dihitung sebesar sekitar 2,14 - 4,28 bars (0,2-0,4 MPa).

Menggunakan distribusi *slip* hasil inversi, perubahan *Coulomb stress* statik dari gempa utama juga dapat dihitung menggunakan rumus:

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

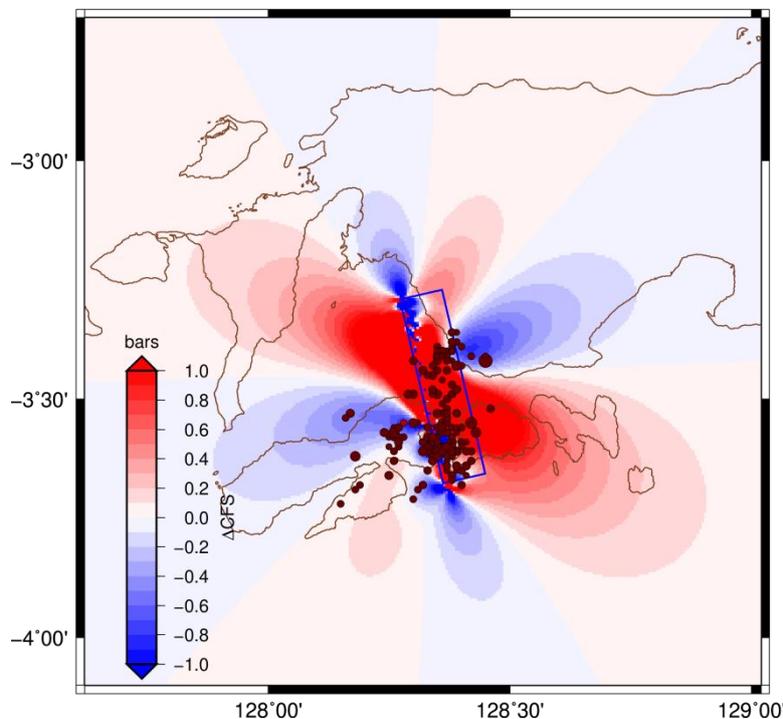
yang mana $\Delta\tau$ dan $\Delta\sigma_n$ masing-masing merupakan perubahan *shear stress* dan *normal stress*, ΔP merupakan perubahan *pore-pressure* di dalam zona sesar dan μ adalah koefisien friksi. Dalam kondisi *undrained*, perubahan *pore-pressure* dapat dihitung dengan:

$$\Delta P = -B \frac{\Delta\sigma_{ii}}{3}$$

yang mana B adalah koefisien Skempton dan $\Delta\sigma_{ii}$ adalah tensor *stress*. Jika $\Delta\sigma_n = \frac{\Delta\sigma_{ii}}{3}$ di dalam bidang sesar, maka dapat dihitung perubahan *Coulomb stress* sebagai berikut:

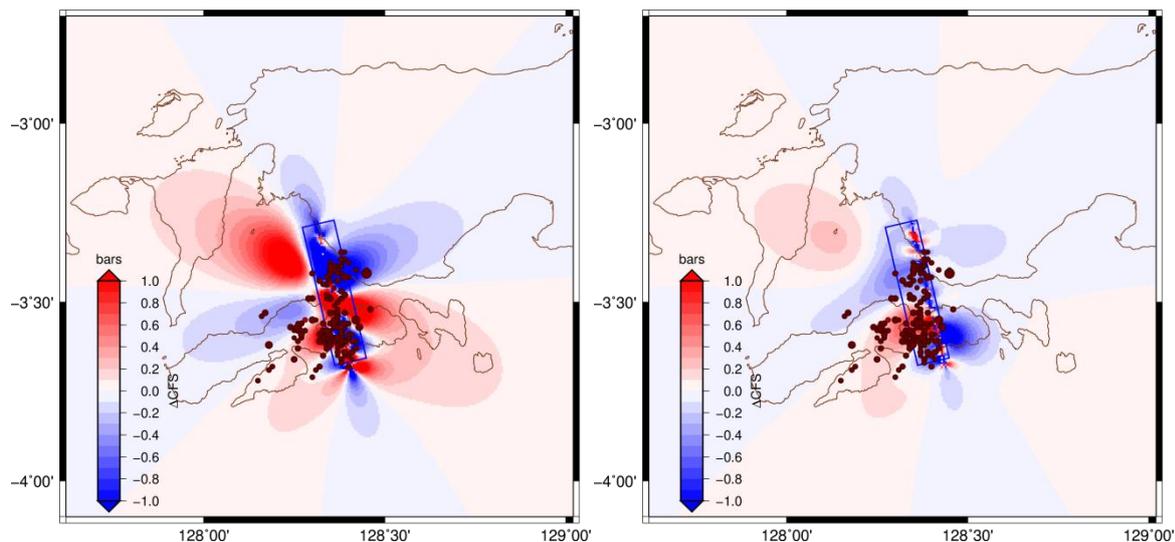
$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n$$

yang mana μ' adalah koefisien friksi efektif dengan $\mu' = (1 - B)\mu$. Nilai dari koefisien friksi bervariasi dari 0 hingga 0,8 tergantung kondisi pada sesar. Dalam studi ini digunakan nilai koefisien friksi $\mu'=0,4$. Pemodelan *Coulomb stress* dihitung pada sesar utama itu sendiri sebagai sesar penerima (*receiver fault*) dengan geometri *strike*=347°, *dip*=70° dan *rake*=210°.



Gambar 3. Perubahan *Coulomb stress* akibat gempa Ambon 2019 pada kedalaman dangkal 5 km pada sesar penerima dengan *strike*=347°, *dip*=70°, dan *rake*=210°. Bulat cokelat merupakan episenter gempa susulan $M>3.0$.

Pemodelan *Coulomb stress* menggunakan masukan *slip* hasil inversi menunjukkan bahwa gempa susulan dipromosikan oleh perubahan *Coulomb stress* yang positif pada kedalaman yang lebih dangkal (0-10 km). Secara umum, seperti yang dimodelkan pada Gambar 3, *aftershocks* berada di zona yang menerima perubahan *Coulomb stress* positif (warna merah). Dalam peta tersebut ditampilkan distribusi *aftershocks* $M > 3,0$, yang dianggap memiliki ketidakpastian episenter yang lebih kecil. Gempa susulan ini perlu direlokasi lagi untuk memperbaiki kedalaman hiposenternya. Di sisi lain, *aftershocks* di bagian barat-daya sesar (di bagian Pulau Ambon) lebih cocok dipromosikan oleh perubahan *Coulomb stress* positif pada kedalaman yang lebih dalam (10-30 km) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan *Coulomb stress* akibat gempa Ambon 2019 pada kedalaman 15 km (kiri) dan 25 km (kanan) pada sesar penerima dengan $strike=347^\circ$, $dip=70^\circ$, dan $rake=210^\circ$.

4. Diskusi dan Kesimpulan

4.1 Limitasi

Inversi menggunakan data gelombang badan teleseismik saja tidak sensitif terhadap lokasi spasial heterogenitas *slip* di zona sesar. Biasanya analisis menggunakan gabungan dengan data lokal (*near field*) penting untuk melihat heterogenitas *slip* dengan rinci. Tetapi data teleseismik cukup mampu memberikan gambaran besar ukuran dan pergerakan *rupture* seperti yang ditunjukkan dalam studi ini. Data teleseismik memberikan resolusi temporal yang baik yang membantu dalam menunjukkan evolusi dari rilis momen, seberapa cepat dan seberapa jauh *rupture* dapat menjalar, dan rilis energi. Di sini juga digunakan gelombang permukaan (*surface waves*) yang dapat meningkatkan resolusi distribusi *slip* sepanjang arah *down-dip* (Hao dkk., 2013). Penggunaan gelombang permukaan frekuensi sangat rendah ini juga dapat meningkatkan resolusi dari total momen seismik yang dihasilkan saat gempa utama (koseismik).

4.2 Asperity dan Kedalaman seismogenik

Seperti yang dilihat pada Gambar 2, *asperity* gempa Ambon berada pada kedalaman yang dangkal yaitu pada kedalaman kurang dari 10 km. Luas *asperity* pada umumnya sekitar 20% dari luas *rupture* (Murotani dkk., 2008), tetapi untuk gempa Ambon 2019, luas *asperity* sedikit lebih besar yaitu 25% dari luas *rupture*. Secara umum, pada model konseptual sesar *strike-slip*, *rupture* dapat terjadi pada kedalaman 0 - 15 km (Burgmann,

2018) atau disebut sebagai zona seismogenik. Zona ini memiliki sifat paling *brittle*. Gempa Ambon 2019 tampaknya mengikuti pola umum dari tipe sesar *strike slip*. Pada kedalaman 6 km di zona seismogenik, biasanya suhu mencapai 180°C dan meningkat ke 360°C pada kedalaman 12 km. Mekanisme deformasi pada wilayah ini dapat berupa *frictional faulting* dan juga *pressure solution creep*. Wilayah pada kedalaman 0-6 km merupakan wilayah yang stabil tetapi *rupture* dapat menjalar melalui bagian ini seperti pada gempa Ambon 2019. Sementara, kedalaman 6-12 km merupakan kedalaman yang ideal sebagai zona seismogenik untuk proses nukleasi *rupture* gempa besar. Sementara itu, kedalaman 12-15 km biasanya merupakan zona transisi antara seismik dan aseismik. Di bagian bawah dari zona seismogenik ini dapat menjadi sumber dari sinyal-sinyal aseismik seperti *creeping events*, *small repeating earthquakes (repeaters)* dan tremor tektonik. Hal ini untuk mengakomodasi transisi aseismik dari zona yang sifatnya *brittle* ke yang lebih *ductile*. Hal ini didukung dengan observasi gempa pendahuluan (*foreshocks*) yang terjadi pada gempa Ambon 2019. Gempa pendahuluan seringkali berasosiasi dengan sinyal-sinyal aseismik sebagai manifestasi dari *slip* yang lambat (*slow-slips*) pada proses nukleasi sumber gempa utama (Gomberg, 2018, Burgmann, 2018). Pembebanan *stress* terkonsentrasi pada batas transisi *brittle-ductile* ini yang sering terobservasi lewat *foreshocks*. Pembuktian dari dugaan ini perlu dilakukan dengan menganalisis lebih rinci sinyal seismik yang bersumber dari zona ini. Di bagian selatan gempa Ambon 2019 ini, yaitu di bagian antara Pulau Ambon dan Haruku, juga ada kealpaan *asperity*, yang menunjukkan tanda-tanda bahwa zona ini merupakan bagian yang tidak terkunci (*creeping*). Gempa-gempa pendahuluan (*foreshocks*) dalam kasus Ambon 2019 juga terjadi di zona bagian selatan ini (Gambar 1).

4.3 *Stress drop* rendah

Dalam studi ini, didapatkan gempa Ambon 2019 memiliki nilai *stress drop* yang rendah yaitu 0,2-0,4 MPa. Untuk tipikal gempa tektonik, nilai median *stress drop* sekitar 3-4 MPa. Gempa-gempa dalam lempeng (*intraplate*) biasanya memiliki nilai *stress drop* yang lebih besar dari gempa akibat subduksi (*interplate*). Gempa *strike slip* juga seringkali memiliki *stress drop* yang lebih besar (Allmann dan Shearer, 2009).

Nilai *stress drop* yang rendah diduga berasal dari sifat mekanis yang lemah pada lapisan kerak. Lapisan kerak di sekitar wilayah gempa memiliki kekuatan yang lemah. Hal ini merefleksikan lapisan kerak di wilayah gempa tersebut mempunyai sifat yang lebih *brittle* dan rentan terhadap akumulasi *strain* yang tinggi karena adanya *barrier* dan *asperity* yang mengontrol proses *rupture* di zona sesar. Nilai *stress drop* yang rendah juga dapat menunjukkan keterlibatan fluida yang signifikan pada proses *rupture*. Keterlibatan mekanisme aseismik juga dapat menjadi alasan nilai *stress drop* yang rendah. Nilai *stress drop* yang rendah juga diamati pada kejadian gempa *swarm* dan *slow earthquakes*.

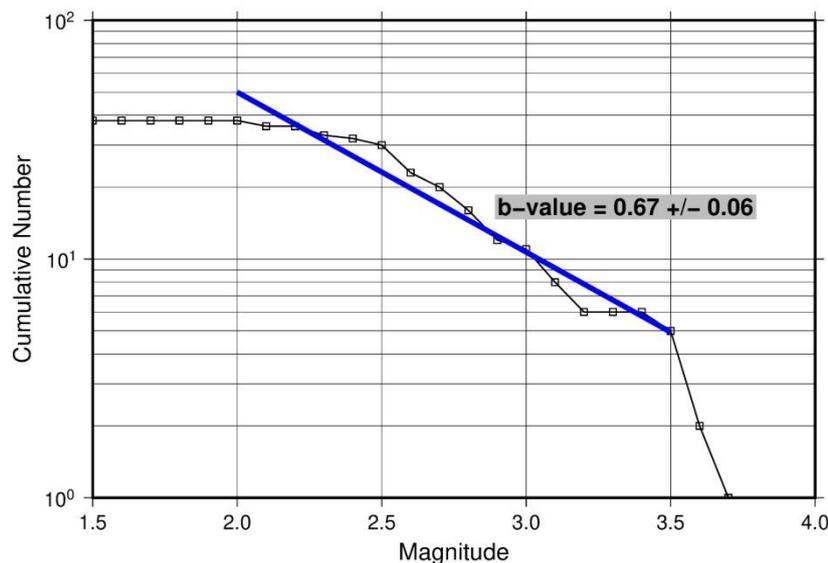
4.4 Gempa-gempa pendahuluan

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kasus kemunculan *foreshocks* lebih jarang terjadi pada gempa *intraplate* dibandingkan dengan gempa subduksi (*interplate*) (Bouchon dkk., 2013). Tetapi, gempa Ambon 2019 yang *intraplate* didahului oleh rangkaian gempa pendahuluan atau *foreshocks*. Pada Gambar 1, dapat dilihat bahwa gempa pendahuluan muncul di bulan Januari di bagian utara dekat *initial break* gempa utama, kemudian berhenti di bulan Maret-Mei 2019. *Foreshocks* kembali muncul di zona bagian utara ini pada bulan Juni-September 2019 dan aktivitasnya semakin meningkat hingga inisiasi gempa utama. Hal ini terlihat jelas di distribusi spasial dan temporal dan jumlah kumulatif gempa yang dipetakan di Gambar 1. Di bulan Agustus

2019 atau sekitar satu bulan sebelum gempa utama, *foreshocks* juga muncul di bagian selatan dari zona *rupture* gempa utama. Kluster *foreshocks* ada di kedua ujung dari *rupture* gempa utama dan observasi ini penting untuk studi nukleasi sumber gempa. Dalam ilmu statistik seismologi, distribusi frekuensi-magnitudo gempa dapat dilihat dari parameter *b-value* yang berasal dari hubungan:

$$\text{Log } N = a - bM$$

yang mana N adalah jumlah kumulatif dari gempa dengan magnitudo di atas M (di atas magnitudo kelengkapan M_c), a mendeskripsikan produktivitas, dan b merupakan rata-rata distribusi ukuran gempa. Nilai konstanta b (disebut *b-value*) sensitif dan berkebalikan terhadap *differential stress* batuan. Nilai *b-value* pada umumnya adalah 1,0 untuk gempa-gempa tektonik. Pada banyak kasus, rangkaian *foreshocks* memiliki nilai *b-value* yang rendah/turun yang artinya zona sesar memiliki *differential stress* batuan yang tinggi/meningkat (Gulia dan Wiemer, 2019). Pada Gambar 5 disajikan bahwa *foreshocks* gempa Ambon 2019 mempunyai *b-value* yang rendah yaitu $0,67 \pm 0,06$. Kemunculan *foreshocks* pada gempa Ambon 2019 mungkin berkaitan dengan pembahasan pada sub-bagian 4.2 dan 4.3 di atas.

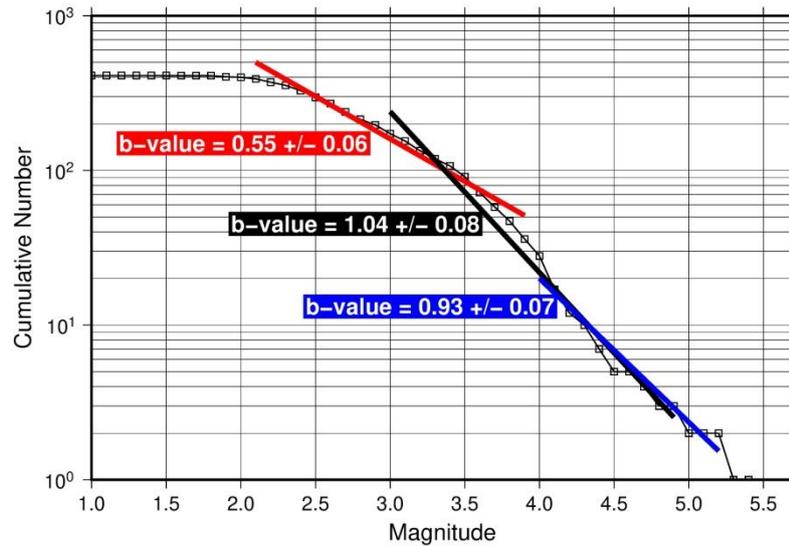


Gambar 5. Nilai *b-value* rangkaian *foreshocks* ($N=38, M_c=2,0$)

4.5 Gempa-gempa susulan

Aftershocks gempa Ambon 2019 mempunyai nilai *b-value* 0,93 apabila menggunakan data dengan magnitudo kelengkapan $M_c=3,0$ (Gambar 6). Menggunakan nilai M_c yang lebih tinggi yaitu 4,0 didapatkan nilai *b-value aftershocks* sebesar 1,04. Hal ini artinya gempa susulan sudah merefleksikan nilai normal *b-value* gempa tektonik yaitu mendekati 1,0. Apabila mempertimbangkan nilai M_c yang lebih kecil ($M_c=2,0$), didapatkan nilai *b-value* yang bertahan di level yang rendah ($b=0,55 \pm 0,05$). Hal ini perlu dianalisis apakah ini berkaitan dengan ketidaklengkapan katalog atau berhubungan dengan mekanisme fisis yang berlangsung setelah gempa utama yang mungkin berkaitan dengan pembahasan pada sub-bagian 4.2 dan 4.3.

Produktivitas gempa-gempa susulan dalam kasus gempa Ambon 2019 ini tergolong cukup tinggi (Gambar 7). Hal ini mungkin disebabkan oleh gempa utama yang memiliki nilai *stress drop* yang rendah. Gempa dengan *stress drop* yang rendah cenderung memproduksi *aftershocks* yang lebih banyak (Wetzler dkk., 2016).

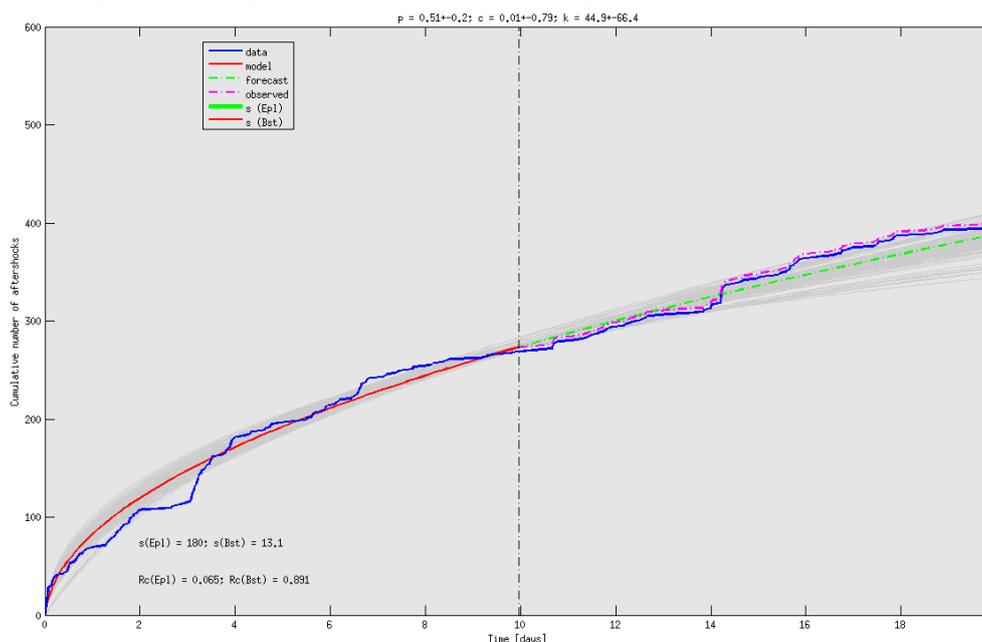


Gambar 6. Nilai *b-value* rangkaian *aftershocks* (N=411, $M_c=2,0$:merah, 3,0:hitam dan 4,0:biru)

Aftershocks dapat dianalisis dengan laju peluruhan *aftershocks* $R(t)$ dengan rumus:

$$R(t) = \frac{K}{(t + c)^p}$$

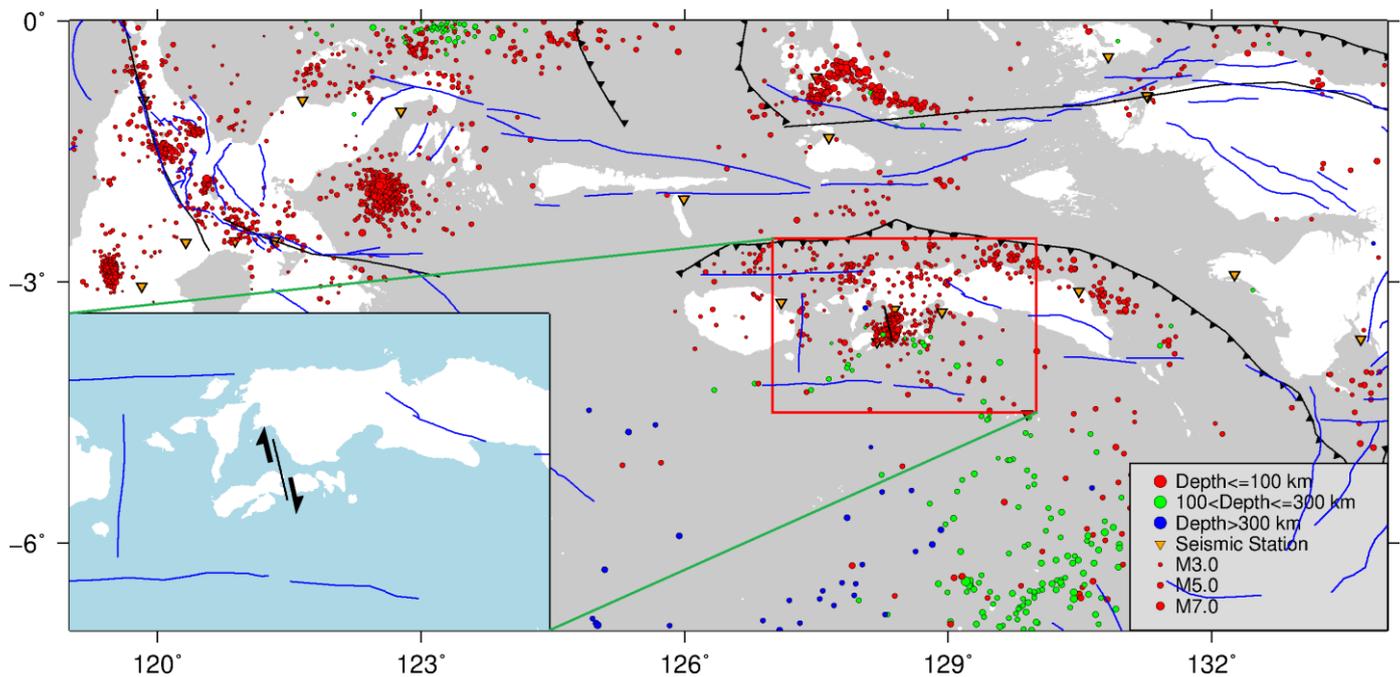
yang mana t adalah waktu sejak *mainshock*; K mendeskripsikan produktivitas *aftershocks* yang tergantung pada magnitudo gempa utama; c dan p adalah konstanta empiris. Rumus ini dikenal sebagai *modified Omori's law*. Nilai p -value secara global adalah 1,0 tetapi fluktuasinya bervariasi antara tiap *mainshock*. Nilai p -value yang rendah menunjukkan peluruhan yang lambat (*slow decay*) dari aktivitas gempa susulan. Pada Gambar S6 dan S7 disajikan hasil *fitting* peluruhan *aftershocks* yang menunjukkan gempa Ambon 2019 mempunyai nilai p -value 0,60 (untuk *aftershocks* di atas $M_c=2,5$) dan 0,76 untuk *aftershocks* di atas $M_c=3,0$). Hal ini menunjukkan bahwa gempa Ambon 2019 mempunyai laju peluruhan *aftershocks* yang lambat (Gambar 7 dan S8).



Gambar 7. Prakiraan *aftershocks* dalam 10-20 hari sejak gempa utama menggunakan data 0 - 10 hari setelah *mainshock*.

4.6 Implikasi tektonik

Gempa dengan magnitudo 6,5 dapat terjadi dengan *rupture* yang kompleks yang melibatkan beberapa segmen, tetapi dalam pemodelan di studi ini, gempa diasumsikan terjadi pada segmen tunggal. Seperti yang disebutkan di atas bahwa keberadaan struktur *strike slip* dan *thrust* adalah hal yang wajar di sekitar Pulau Seram sebagai bentuk akomodasi atas deformasi yang kompleks (Watkinson dan Hall, 2017). Model menunjukkan bahwa gempa Ambon 2019 terjadi pada sesar dengan tipe *right lateral strike slip* berarah selatan-utara. Sesar ini diperkirakan berada di antara pulau Ambon dan Haruku memanjang ke utara di sekitar barat daya Kairatu, Pulau Seram. Pada Gambar 8 ditunjukkan posisi relatif dugaan sesar ini pada tatanan tektonik di sekitar Seram. Terlihat bahwa sesar ini paralel dengan sesar *strike slip* Buru. Perlu penelitian lebih lanjut untuk membuktikan dugaan sesar yang disampaikan dalam studi ini.



Gambar 8. Posisi sesar penyebab gempa Ambon 2019 relatif terhadap tatanan tektonik di sekitar Pulau Seram. Juga dipetakan episenter gempa yang terjadi selama 1 Januari – 18 Oktober 2019. Garis biru merupakan struktur sesar aktif yang ada pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017.

4.7 Kesimpulan

- a. Gempa Ambon 2019 bersumber dari penyesaran mendatar dekstral dan bilateral dengan orientasi selatan-utara. Ukuran *rupture* sekitar $34 \times 17 \text{ km}^2$, rata-rata *slip* 29,4 cm dan *slip* maksimum 90,1 cm. Ukuran *asperity* sekitar 25% dari ukuran *rupture* dan berada di kedalaman dangkal kurang dari 10 km. Total momen seismik gempa ini setara dengan magnitudo momen 6,47.
- b. Gempa ini memiliki *stress drop* yang tergolong rendah.
- c. Sebaran *aftershocks* dapat dijelaskan dengan perubahan *Coulomb stress* statik positif pada kedalaman dangkal (0-10 km).
- d. *Aftershocks* memiliki laju peluruhan yang lambat (*slow decay rate*).

5. Ucapan Terima kasih

Data gempabumi bersumber dari katalog Pusat Gempabumi dan Tsunami Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data teleseismik diunduh dari *The Global Seismographic Network (GSN) Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)* (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event). Kami mengucapkan terima kasih kepada petugas Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG dan Stasiun Geofisika Karang Panjang Ambon atas diskusi tentang gempa Ambon 2019.

6. Referensi

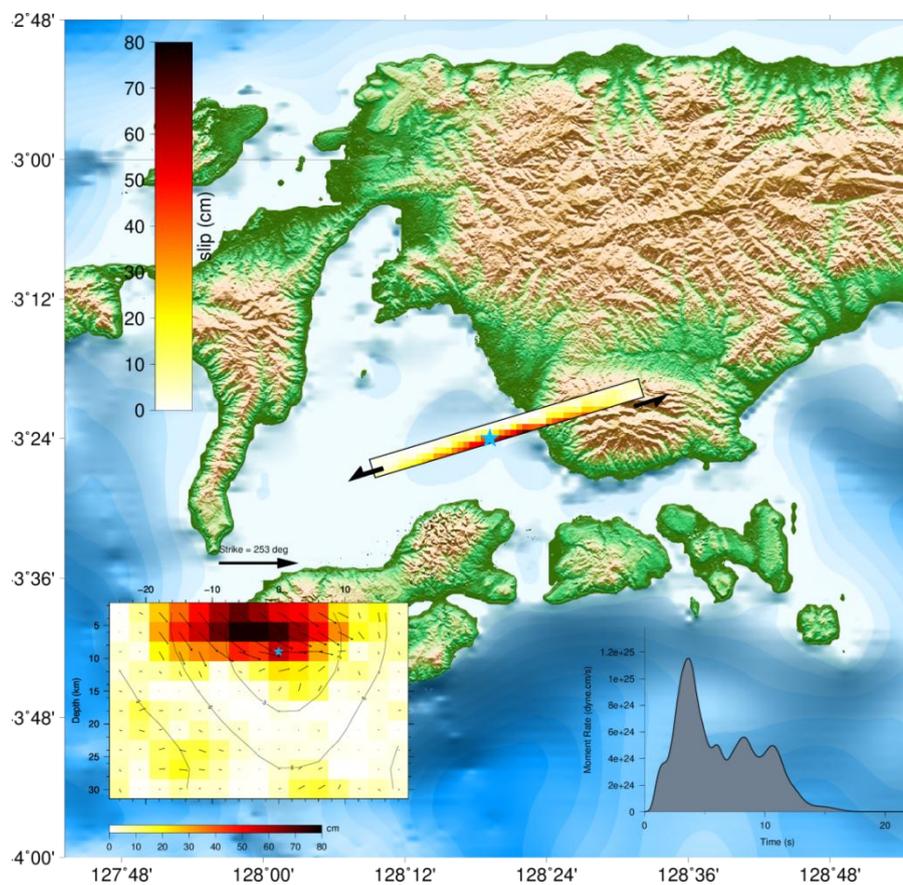
- Allmann, B.P. dan Shearer, P.M., 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1).
- Bouchon, M., Durand, V., Marsan, D., Karabulut, H. dan Schmittbuhl, J., 2013. The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nature Geoscience*, 6(4), p.299.
- Bürgmann, R., 2018. The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 495, pp.112-134.
- Gomberg, J., 2018. Unsettled earthquake nucleation. *Nature Geoscience*, 11(7), p.463.
- Gulia, L. dan Wiemer, S., 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, 574(7777), pp.193-199.
- Hao, J., Ji, C., Wang, W. dan Yao, Z., 2013. Rupture history of the 2013 Mw 6.6 Lushan earthquake constrained with local strong motion and teleseismic body and surface waves. *Geophysical Research Letters*, 40(20), pp.5371-5376.
- Ji, C., Wald, D.J. dan Helmberger, D.V., 2002. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), pp.1192-1207.
- Kanamori, H. dan Anderson, D.L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the seismological society of America*, 65(5), pp.1073-1095.
- Lin, X., Chu, R. dan Zeng, X., 2019. Rupture processes and Coulomb stress changes of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou and 2013 Mw 6.6 Lushan earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 71(1), p.81.
- Mai, P.M. dan Beroza, G.C., 2000. Source scaling properties from finite-fault-rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), pp.604-615.
- Murotani, S., Miyake, H. dan Koketsu, K., 2008. Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes. *Earth, planets and space*, 60(9), pp.987-991.
- Shao, G., Li, X., Ji, C. dan Maeda, T., 2011. Focal mechanism and slip history of the 2011 Mw 9.1 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, constrained with teleseismic body and surface waves. *Earth, planets and space*, 63(7), p.9.

Watkinson, I.M. dan Hall, R., 2017. Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. *Geological Society, London, Special Publications*, 441(1), pp.71-120.

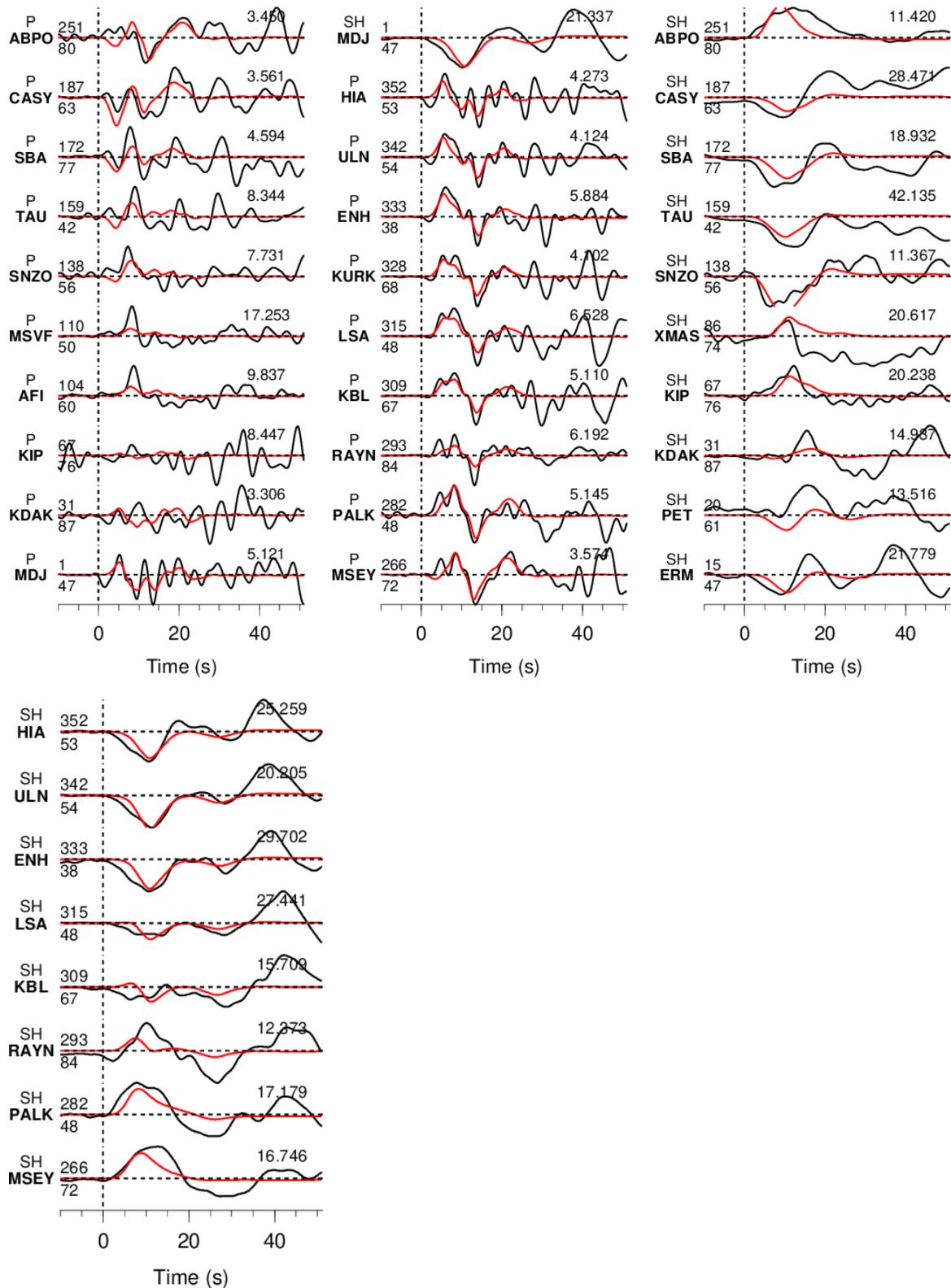
Wells, D.L. dan Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), pp.974-1002.

Wetzler, N., Brodsky, E.E. dan Lay, T., 2016. Regional and stress drop effects on aftershock productivity of large megathrust earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 43(23), pp.12-012.

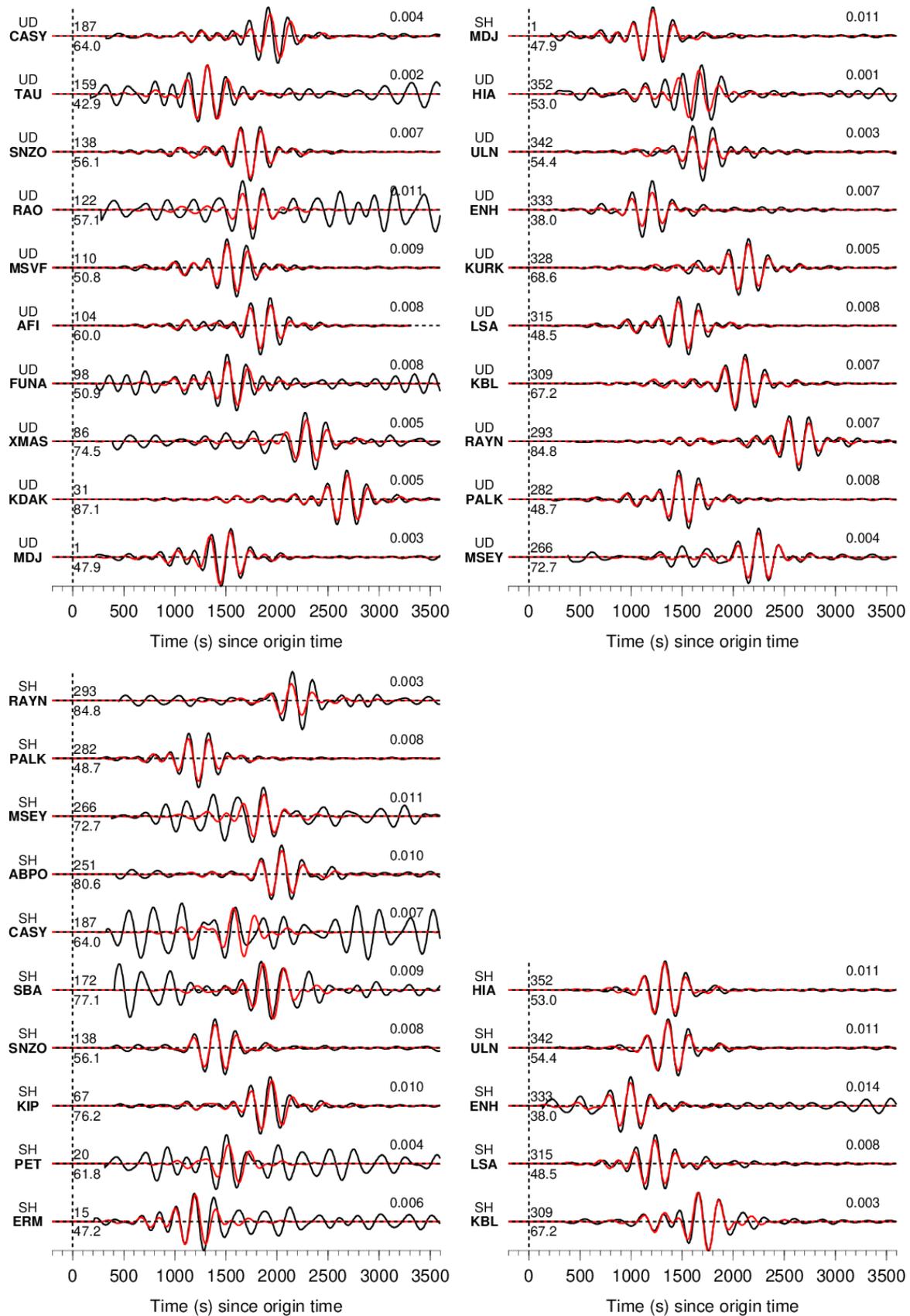
7. Lampiran Gambar



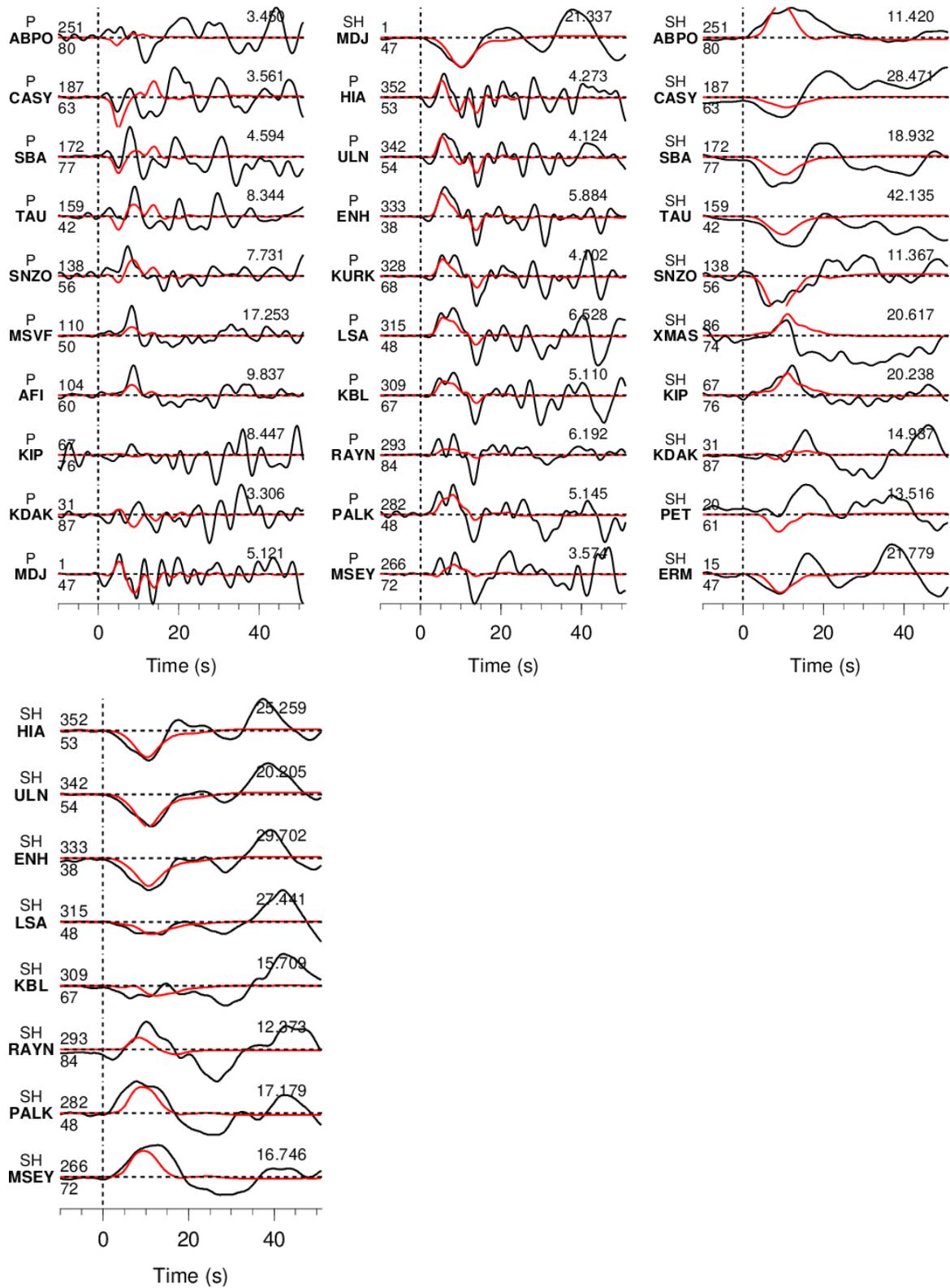
Gambar S1. Model *slip* untuk bidang nodal kedua (*strike*=253°, *dip*=84°)



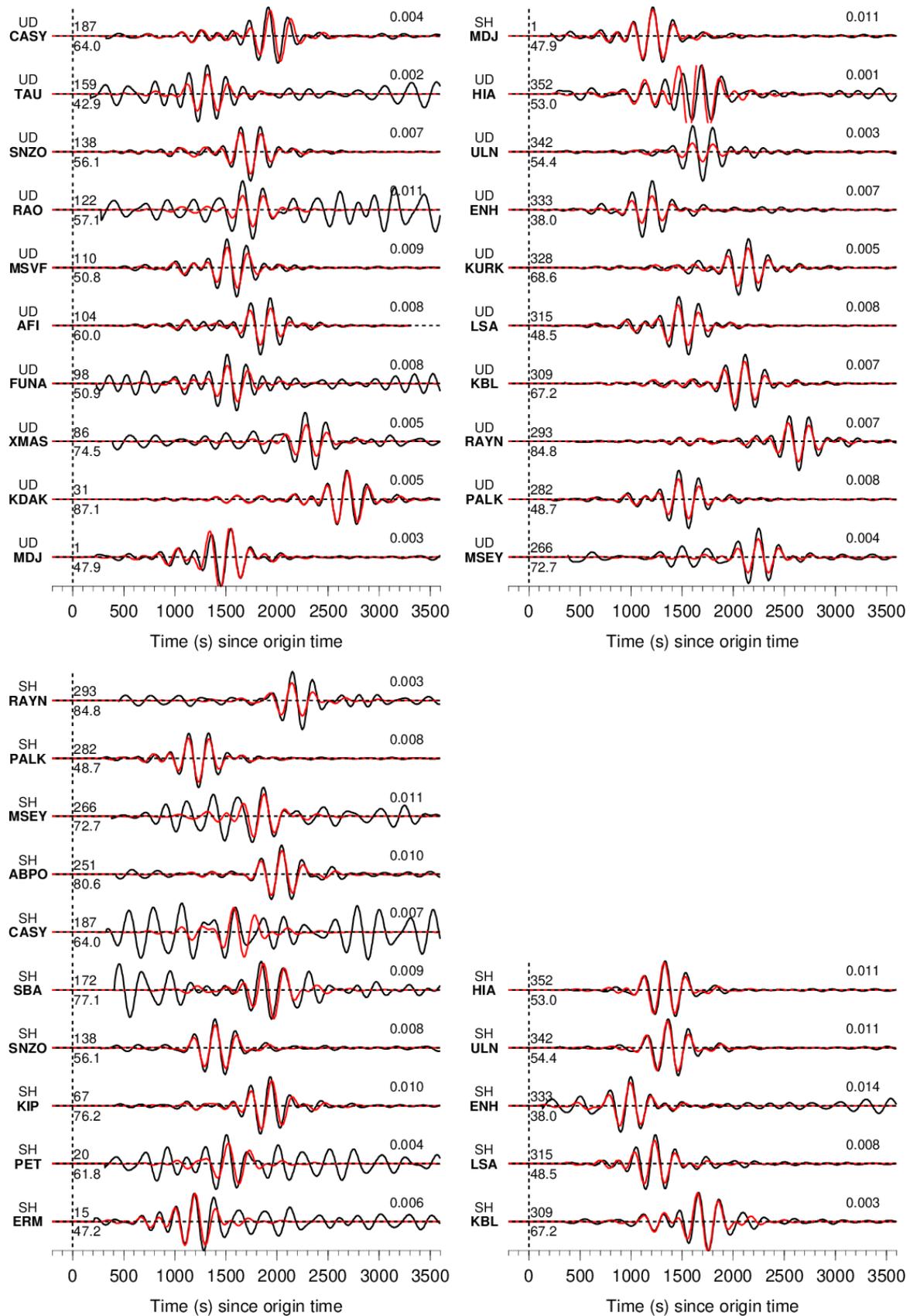
Gambar S2. Waveform fitting untuk model bidang nodal 1. Garis hitam adalah sinyal observasi dan garis merah adalah sinyal sintetik. Label pada awal tiap sinyal menunjukkan komponen dan nama stasiun. Angka pada akhir tiap sinyal menunjukkan amplitudo maksimum sinyal observasi dalam mikrometer. Angka di atas dan bawah dari awal tiap sinyal menunjukkan azimuth stasiun dan jarak stasiun dari pusat gempa (dalam derajat).



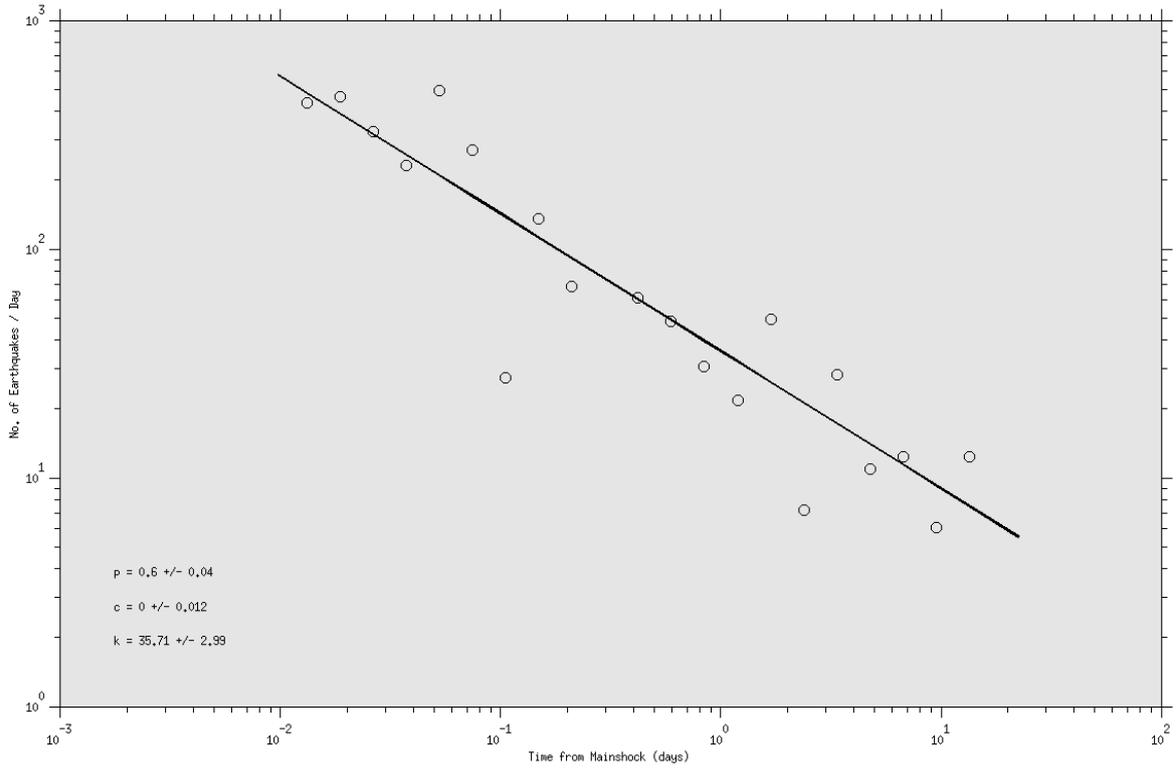
Gambar S3. Sama dengan Gambar S2 tetapi untuk *surface wave* bidang nodal 1.



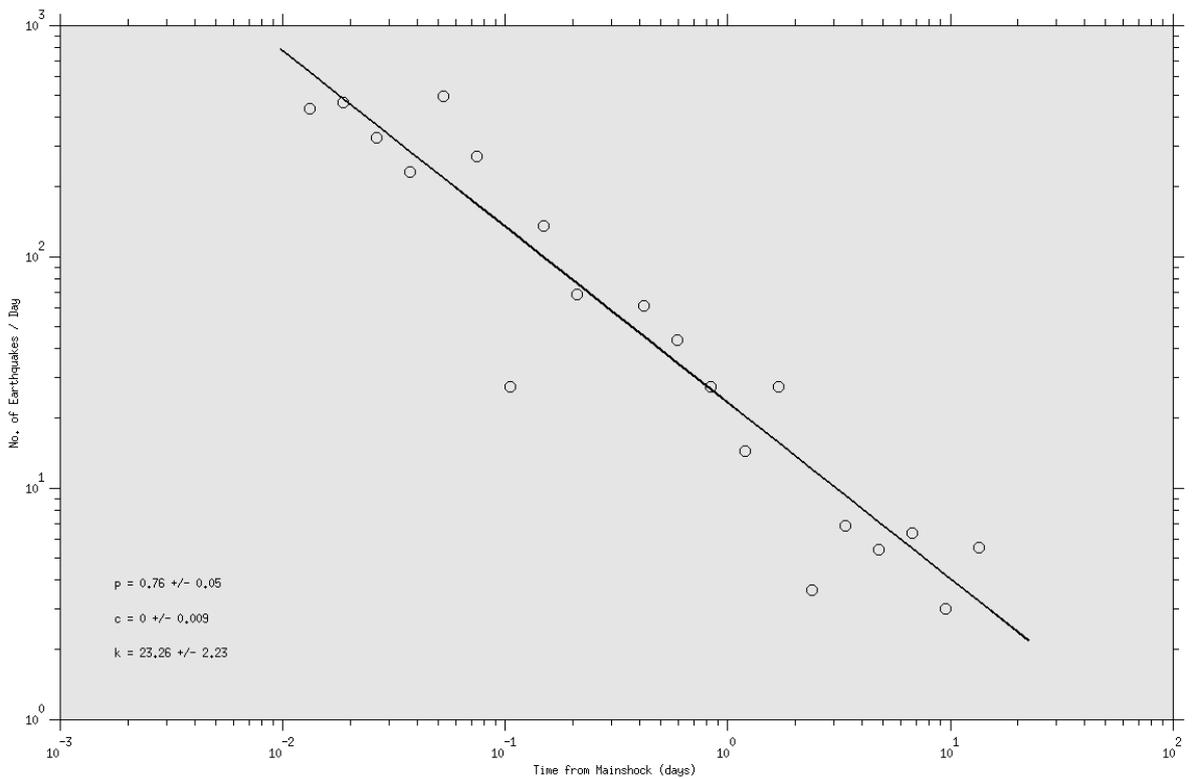
Gambar S4. Sama dengan Gambar S2 tetapi untuk *body-wave* bidang nodal 2.



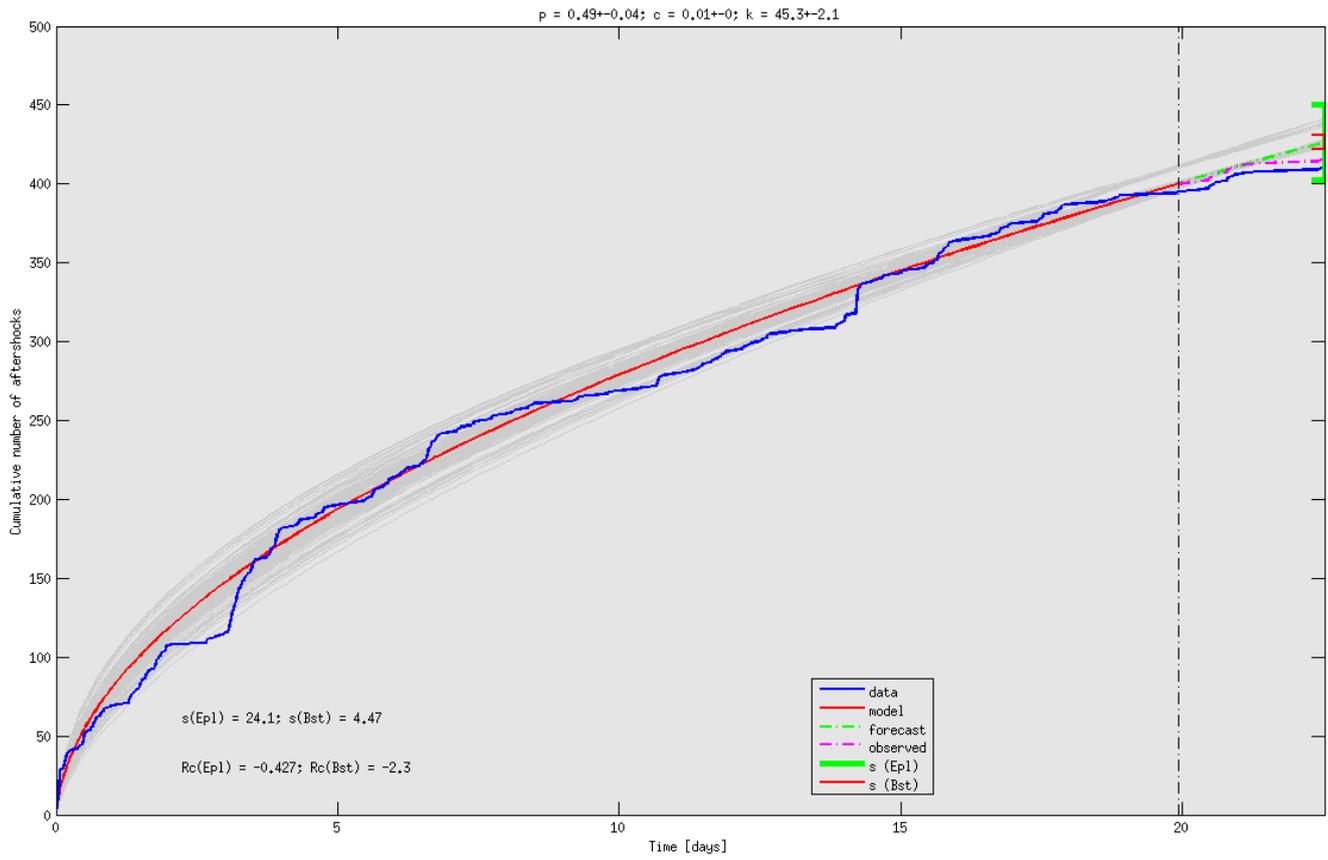
Gambar S5. Sama dengan Gambar S2 tetapi untuk *surface-wave* bidang nodal 2.



Gambar S6. Fitting untuk peluruhan *aftershocks* menurut *Omori's law* dengan $M_c=2,5$



Gambar S7. Fitting untuk peluruhan *aftershocks* menurut *Omori's law* dengan $M_c=3,0$



Gambar S8. Forecast aftershocks setelah 20 hari sejak gempa utama menggunakan data 0-20 hari setelah mainshock.