



Analisis Propagasi *Rupture* Gempabumi Halmahera Selatan 14 Juli 2019 Menggunakan Metode *Back-Projection* dan Validasinya terhadap Model *Finite Fault* USGS

R. Grata Sabdo Yudhopratidino^{1*}, Darwin Harahap¹, Fatma Peera¹, Dimas Salomo J. Sianipar¹

¹ Program Studi Sarjana Terapan Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG), Tangerang, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3180>

Article Info:

Received : 28 Juli 2026
Revised : 19 Agustus 2026
Accepted : 29 Agustus 2026
Published : 19 September 2026

Correspondence:

R. Grata Sabdo Yudhopratidino

Phone:

Abstract: The South Halmahera region lies within a complex tectonic zone controlled by the Sorong-Bacan Fault system, making the rupture characteristics of large earthquakes in this area important to examine in detail. This study applies the Multiple Signal Classification Back-projection (MUSIC-BP) method to map the spatiotemporal dynamics of high-frequency P-wave energy release during the Mw 7.2 South Halmahera earthquake of July 14, 2019, using vertical-component recordings from 54 stations of the Australian (AU) seismic network at teleseismic distances of 30°-90°. The imaging results reveal a unilateral rupture propagating dominantly southeastward from the hypocenter, lasting 30-35 seconds with an average rupture velocity of ± 2.7 km/s. These results are independently validated against the USGS finite fault model through its three output products: surface projection, cross-section of slip distribution, and moment rate function. All three comparisons show strong agreement in propagation direction, rupture velocity, and the duration and pattern of energy release, confirming that the back-projection method can serve as an independent rupture-imaging tool that complements conventional finite fault inversion models.

Keywords: Back-Projection; MUSIC-BP; Finite Fault; Rupture; Sorong-Bacan Fault.

Citation: Yudhopratidino, G. S., Harahap, D., Peera, F., & Sianipar, D. S. J. (2026). Analisis Propagasi Rupture Gempabumi Halmahera Selatan 14 Juli 2019 Menggunakan Metode Back-Projection dan Validasinya terhadap Model Finite Fault USGS. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5555-5561. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3180>

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia karena berada pada zona pertemuan tiga lempeng besar, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, yang menghasilkan sistem tektonik kompleks berupa zona subduksi, sesar-sesar geser aktif, dan cekungan belakang busur di sepanjang Nusantara (Hall, 2002; Hamilton, 1973). Salah satu wilayah dengan karakteristik tektonik paling rumit adalah Halmahera Selatan, yang didominasi oleh keberadaan Sesar Sorong-Bacan, bagian dari sistem sesar geser besar Sorong *Fault Zone* dengan karakter dominan geser sinistral, cekungan tarik, dan segmentasi yang jelas (Permana dan Gaol, 2018). Pada 14 Juli 2019, wilayah ini diguncang oleh gempabumi kuat Mw 7,2 dengan

mekanisme sumber dominan geser (*strike-slip*) pada Sesar Sorong-Bacan (BMKG, 2019). Kejadian ini berlangsung pada zona transisi tektonik yang sangat kompleks, sehingga proses *rupture*-nya berpotensi tidak homogen dan tersegmentasi, menjadikan karakter *rupture* pada peristiwa ini penting untuk diteliti secara mendalam.

Dalam seismologi modern, pemahaman mengenai propagasi *rupture* sangat penting karena menggambarkan bagaimana *slip* merambat sepanjang bidang patahan dan bagaimana energi dilepaskan secara spasial dan temporal (Lay dan Wallace, 1995). *Rupture* dapat bergerak secara *unilateral* (dominan menjalar ke satu arah dari titik nukleasi) maupun *bilateral* (menjalar hampir simetris ke dua arah), bergantung pada kondisi

fisik batuan dan struktur patahan yang dilalui (Aki dan Richards, 2002; Bird dan Stein, 2024). Berdasarkan pengujian terhadap 100 gempabumi strike-slip kontinental dangkal terbesar ($M \geq 6,49$) periode 1977-2022, Bird dan Stein (2024) menemukan bahwa sekitar 55-70% *rupture* bersifat *unilateral*, sejalan dengan McGuire dkk. (2002) yang melaporkan dominasi *rupture unilateral* (~80%) pada katalog global gempabumi dangkal besar ($M \geq 7$). Identifikasi tipe penalaran *rupture* ini penting dalam interpretasi hasil *back-projection*, karena pola distribusi energi frekuensi tinggi secara spasiotemporal mencerminkan arah dan simetri penalaran *rupture* pada bidang sesar yang bersangkutan.

Salah satu metode yang efektif untuk mempelajari evolusi *rupture* adalah *back-projection*, yaitu metode pencitraan sumber yang memanfaatkan koherensi gelombang P frekuensi tinggi dari jaringan stasiun teleseismik yang diproyeksikan kembali ke area sumber untuk memetakan distribusi radiasi energi secara waktu-nyata (Ishii dkk., 2005). Berbagai penelitian menunjukkan keberhasilan metode ini dalam merekonstruksi proses *rupture* gempabumi besar, seperti Sumatra-Andaman 2004 (Ishii dkk., 2005), Chile 2010 (Zhang dan Ge, 2012), dan Tohoku-Oki 2011 (Koper dkk., 2011), termasuk dalam mengidentifikasi sub-event, segmentasi, arah propagasi, serta kecepatan *rupture* yang bervariasi. Pendekatan *Multiple Signal Classification Back-projection* (MUSIC-BP) yang dikembangkan oleh Meng dkk. (2011) memanfaatkan dekomposisi nilai eigen dari matriks kovariansi sinyal untuk memisahkan komponen sinyal koheren dari noise, sehingga secara signifikan mereduksi *swimming effect* yang lazim dijumpai pada metode *back-projection* berbasis *beamforming* konvensional dan menghasilkan citra *rupture* dengan resolusi lebih tinggi (Beskardes dkk., 2018).

Sebagai pembandingan independen terhadap hasil pencitraan *back-projection*, tersedia pula model *finite fault* yang dipublikasikan rutin oleh *United States Geological Survey* (USGS) melalui *National Earthquake Information Center* (NEIC) untuk setiap gempabumi besar ($M \geq 7,0$) di dunia (Hayes, 2017), yang diperoleh melalui inversi non-linear data gelombang *body* dan permukaan teleseismik mengikuti metode inversi domain *wavelet* (Ji dkk., 2002). Validasi silang antara kedua metode ini penting dilakukan karena keduanya bekerja pada rentang frekuensi yang berbeda: *back-projection* pada frekuensi tinggi yang sensitif terhadap radiasi energi dari tepi *asperity*, sedangkan *finite fault* pada frekuensi rendah yang merepresentasikan distribusi *slip* rerata pada bidang patahan (Yagi dan Fukahata, 2011), sehingga kesesuaian di antara keduanya memperkuat keandalan interpretasi karakteristik *rupture* yang dihasilkan.

Metode *back-projection* itu sendiri telah mengalami perkembangan metodologis yang signifikan sejak pertama kali diterapkan. Pendekatan awal memanfaatkan teknik *delay-and-sum beamforming* klasik untuk mencitrakan proses *rupture* gempabumi Sumatra-Andaman 2004 (Ishii dkk., 2005), namun pendekatan ini rentan terhadap *swimming effect* akibat geometri *array* yang tidak simetris terhadap sumber gempabumi. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Meng dkk. (2011) mengembangkan pendekatan *Multiple Signal Classification Back-projection* (MUSIC-BP) yang memanfaatkan dekomposisi nilai eigen dari matriks kovariansi sinyal untuk memisahkan *signal subspace* dari *noise subspace*, sehingga menghasilkan resolusi spasial pencitraan *rupture* yang lebih tajam. Efektivitas berbagai varian metode *back-projection*, termasuk MUSIC-BP, turut dievaluasi secara komparatif oleh Beskardes dkk. (2018), yang menunjukkan bahwa pemilihan skema praproses sinyal sangat memengaruhi akurasi lokasi dan resolusi citra energi *rupture* yang dihasilkan.

Meskipun metode *back-projection* dan *finite fault* telah banyak diterapkan pada gempabumi subduksi skala megathrust seperti Sumatra-Andaman, Chile, dan Tohoku-Oki (Ishii dkk., 2005; Zhang dan Ge, 2012; Koper dkk., 2011), penerapan kedua metode secara terintegrasi pada gempabumi *strike-slip* di zona sesar geser kontinental, khususnya pada sistem Sesar Sorong-Bacan di Indonesia bagian timur, masih sangat terbatas dilaporkan dalam literatur. Kajian mengenai gempabumi Halmahera Selatan 14 Juli 2019 sejauh ini masih terbatas pada analisis makroseismik dan parameter sumber tunggal (BMKG, 2019), tanpa mengungkap secara rinci bagaimana energi *rupture* menjalar secara spasial dan temporal di sepanjang bidang sesar. Kesenjangan ini penting untuk diisi mengingat kompleksitas tektonik pada zona transisi Sorong-Bacan berpotensi menghasilkan pola *rupture* yang tersegmentasi dan tidak seragam, sebagaimana diindikasikan oleh McGuire dkk. (2002) dan Bird dan Stein (2024) pada gempabumi *strike-slip* besar secara global. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan validasi silang antara MUSIC-BP dan model *finite fault* USGS secara terintegrasi pada gempabumi *strike-slip* di sistem Sesar Sorong-Bacan, yang belum pernah dilaporkan pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik dan arah propagasi *rupture* gempabumi Halmahera Selatan Mw 7,2 melalui pencitraan energi gelombang P menggunakan metode *back-projection* (MUSIC-BP), serta mengevaluasi tingkat kesesuaiannya terhadap model *finite fault* USGS dari arah propagasi, kecepatan *rupture*, serta durasi dan pola pelepasan energi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman

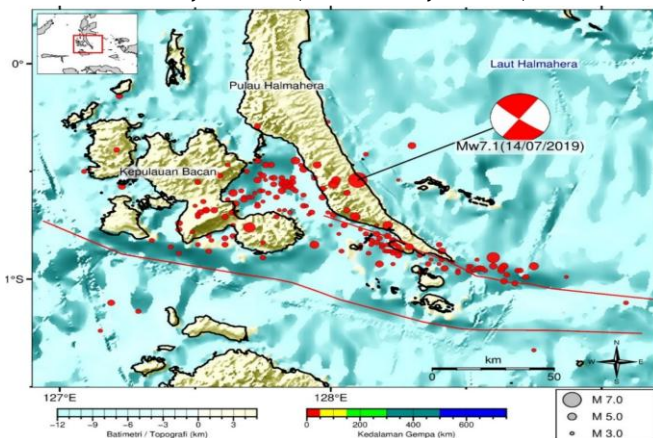
mengenai mekanisme propagasi energi pada sistem Sesar Sorong-Bacan sekaligus menjadi acuan penerapan *back-projection* sebagai metode pencitraan *rupture* yang independen dan saling melengkapi dengan model inversi *finite fault* konvensional.

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian analitik kuantitatif yang memanfaatkan data rekaman seismik gempabumi Halmahera Selatan Mw 7,2 pada 14 Juli 2019 untuk mencitrakan dan mengevaluasi pola penyebaran *rupture* menggunakan metode *back-projection*, kemudian membandingkan hasilnya secara langsung dengan model *finite fault* USGS untuk gempabumi tersebut.

Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian dilakukan pada gempabumi Halmahera Selatan yang berlokasi pada koordinat episentral 127°-129° BT dan 1,5° LS-0,2° LU (Gambar 1). Analisis karakteristik *rupture* dilakukan dengan memanfaatkan rekaman komponen vertikal (Z) gelombang P teleseismik dari 54 stasiun seismik jaringan Australia (AU) pada rentang jarak episentral 30°-90°. Data model *finite fault* USGS untuk gempabumi ini diakses dari laman resmi USGS (U.S. Geological Survey, 2019), mencakup tiga produk keluaran yaitu *surface projection* bidang patahan, *cross-section of slip distribution*, dan *moment rate function* (*source time function*).

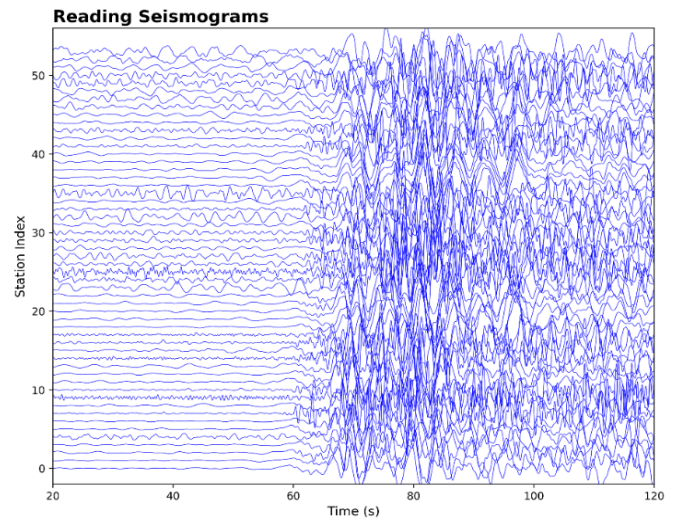


Gambar 1. Lokasi penelitian Halmahera Selatan (14 Juli – 31 Desember 2019). Data seismisitas bersumber dari BMKG dan data *focal mechanism* bersumber dari GCMT.

Pengolahan Data *Back-projection* (MUSIC-BP)

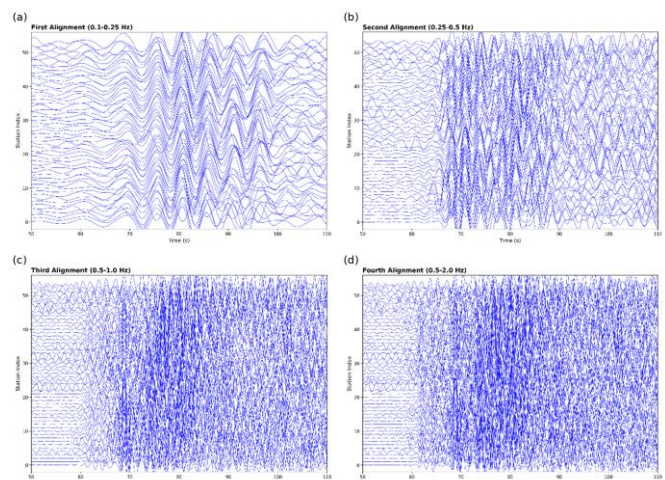
Tahap awal pengolahan data dimulai dengan *pre-processing* berupa pengaturan jendela waktu (*windowing*) sepanjang 600 detik, termasuk tambahan 60 detik sebelum waktu tiba gelombang P teoritis sebagai referensi level *background noise* sekaligus mengompensasi variasi waktu tiba. Rekaman gelombang P dari seluruh stasiun jaringan AU pada jendela waktu tersebut ditampilkan pada Gambar 2,

yang memperlihatkan onset gelombang P yang relatif seragam di antar stasiun sebelum dilakukan penyelarasan lebih lanjut.



Gambar 2. *Waveform windowing* rekaman gelombang P teleseismik dari 54 stasiun jaringan AU pada jendela waktu 600 detik (termasuk 60 detik sebelum waktu tiba gelombang P teoritis).

Proses dilanjutkan dengan penyelarasan (*alignment*) waveform antar stasiun menggunakan korelasi silang (*cross-correlation*) secara bertahap (*multi-band cross-correlation*) pada empat rentang frekuensi, yaitu 0,1-0,25 Hz, 0,25-0,5 Hz, 0,5-1,0 Hz, dan 0,5-2,0 Hz, dari frekuensi rendah ke tinggi (Gambar 3a-d). Gelombang frekuensi rendah yang lebih koheren digunakan sebagai pemandu awal untuk menghindari ambiguitas siklus (*cycle skipping*), sebelum akhirnya diterapkan pada gelombang frekuensi tinggi untuk memperoleh presisi penyelarasan fase yang optimum dan koreksi waktu tempuh yang stabil.



Gambar 3. Penyelarasan (*alignment*) waveform secara bertahap (*multi-band cross-correlation*) pada rentang

frekuensi (a) 0,1-0,25 Hz, (b) 0,25-0,5 Hz, (c) 0,5-1,0 Hz, dan (d) 0,5-2,0 Hz.

Validasi terhadap Model *Finite Fault* USGS

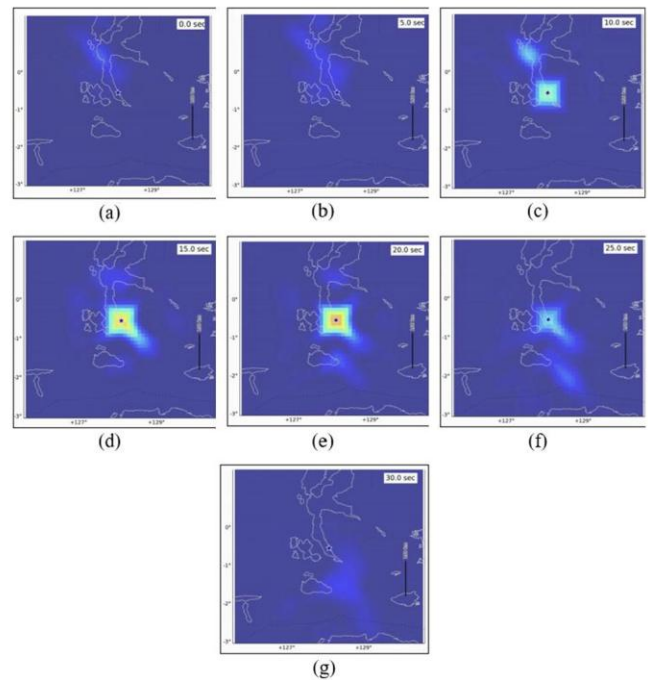
Hasil citra *back-projection* divalidasi melalui perbandingan langsung dengan tiga produk model *finite fault* USGS. Komponen *surface projection* digunakan untuk menguji kesesuaian geometri dan orientasi bidang patahan (*strike*) hasil inversi terhadap peta arah propagasi *rupture* yang terdeteksi array teleseismik. Plot jarak-waktu hasil *back-projection* dikomparasikan dengan *cross-section of slip distribution* untuk menilai kesesuaian pola perambatan kecepatan *rupture*. Sebagai pelengkap dimensi waktu, kurva *normalized energy back-projection* dibandingkan dengan *moment rate function* untuk meninjau kesesuaian total durasi dan pola pelepasan momen seismik. Ketiga perbandingan ini penting dilakukan mengingat zona slip besar dan zona radiasi energi frekuensi tinggi tidak selalu berimpit secara spasial maupun temporal (Yagi dan Fukahata, 2011), sehingga tingkat kesesuaian maupun perbedaan di antara keduanya memberikan informasi tambahan mengenai validitas dan heterogenitas bidang patahan yang dianalisis.

Hasil dan Diskusi

Pencitraan Spasiotemporal *Back-projection*

Hasil pencitraan *back-projection* (Gambar 4) menampilkan evolusi spasiotemporal distribusi energi frekuensi tinggi gempa bumi Halmahera Selatan Mw 7,2 yang direkonstruksi dalam interval 5 detik, dari $t = 0$ detik hingga $t = 30$ detik pasca *rupture*. Pada jendela awal 0-10 detik (Gambar 4a-c), pusat energi masih terkonsentrasi di sekitar episenter, mengindikasikan tahap awal nukleasi *rupture*. Memasuki jendela 15-20 detik (Gambar 3d-e), intensitas energi meningkat tajam dan bergeser konsisten ke arah tenggara episenter. Pada jendela akhir 25-30 detik (Gambar 4f-g), pusat energi terus bergerak menjauh ke tenggara dengan intensitas yang melemah bertahap, menandakan atenuasi pelepasan energi seiring *rupture* mendekati fase terminasi.

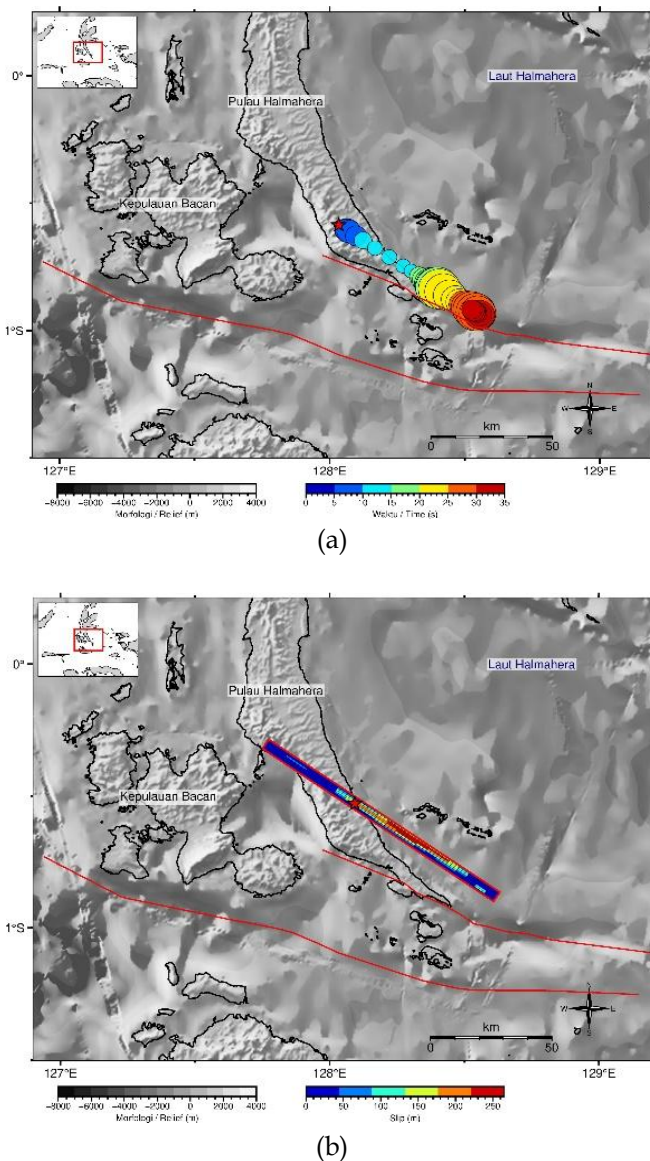
Secara keseluruhan, evolusi ruang-waktu ini konsisten menggambarkan proses *rupture* yang bersifat *unilateral* dengan arah dominan menjalar ke tenggara dari titik hiposenter, dengan durasi total diperkirakan berkisar 30-35 detik, konsisten dengan kecenderungan dominasi *rupture unilateral* pada gempa bumi besar (McGuire dkk., 2002; Bird dan Stein, 2024).



Gambar 4. Hasil penalaran energi *rupture* secara spasiotemporal dalam interval 5 detik. Warna biru ke kuning-jingga-merah menunjukkan intensitas (*normalized power*) energi *back-projection* ternormalisasi; bintang menandakan lokasi episenter.

Kesesuaian Arah Propagasi *Rupture*

Arah propagasi *rupture* hasil MUSIC-BP (Gambar 5a) selanjutnya divalidasi melalui perbandingan langsung dengan *surface projection finite fault* dari USGS (U.S. Geological Survey, 2019) (Gambar 5b). Peta arah propagasi memperlihatkan lintasan titik-titik energi yang bergerak dari hiposenter secara konsisten ke arah tenggara selama 0-35 detik. Pola lintasan ini sangat sejalan dengan *surface projection finite fault* USGS yang menampilkan bidang patahan berorientasi baratlaut-tenggara dengan zona slip terbesar juga terkonsentrasi di sisi tenggara hiposenter. Kesesuaian arah antara jejak energi frekuensi tinggi (*back-projection*) dan distribusi slip frekuensi rendah (*finite fault*) ini mengindikasikan bahwa kedua metode, meskipun bekerja pada rentang frekuensi berbeda, secara konsisten mengidentifikasi arah dan luasan bidang patahan yang sama, sekaligus membantu menentukan bidang nodal yang secara fisik merupakan bidang patahan sebenarnya (*fault plane*) dengan mekanisme sumber *strike-slip*.



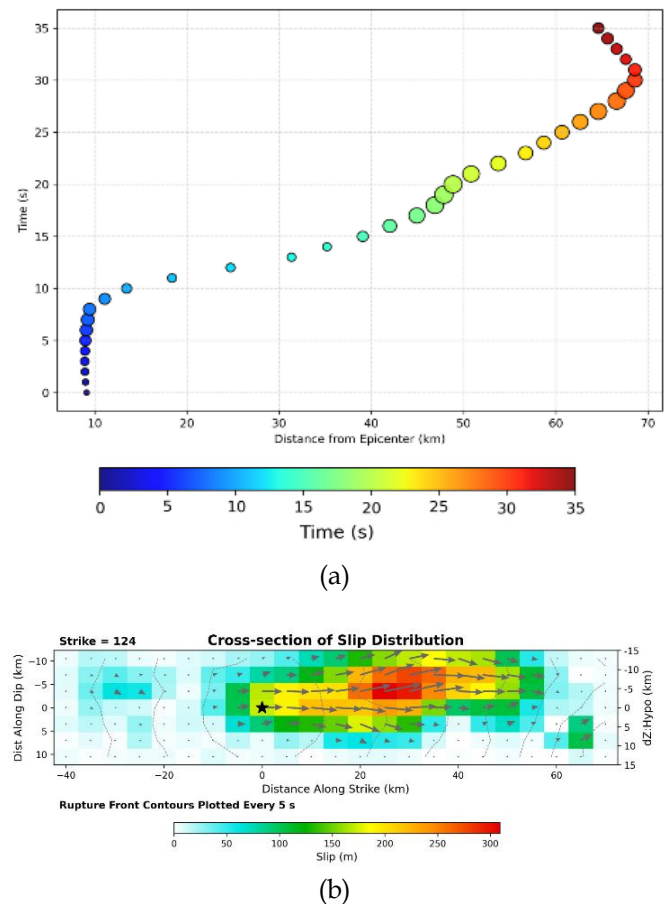
Gambar 5. (a) Peta arah propagasi *rupture* hasil MUSIC-BP gempa bumi Halmahera Selatan (14 Juli 2019); warna menunjukkan skala waktu (biru = awal, merah = akhir *rupture*) dan ukuran lingkaran merepresentasikan intensitas energi. (b) *Surface projection finite fault* USGS (U.S. Geological Survey, 2019).

Kesesuaian Pola Perambatan Kecepatan *Rupture*

Analisis kuantitatif kecepatan *rupture* (V_r) dilakukan dengan meninjau plot jarak-waktu hasil *back-projection* (Gambar 6a), yang divalidasi melalui perbandingan dengan *cross-section of slip distribution finite fault* USGS (Gambar 6b). Diagram tersebut memperlihatkan hubungan relatif linear antara jarak radiasi energi terhadap waktu, dengan pergerakan energi dari jarak sekitar 14 km pada $t = 10$ detik hingga mencapai jarak maksimum sekitar 68 km pada $t = 30$ detik. Berdasarkan kemiringan hubungan tersebut, diperoleh estimasi kecepatan *rupture* rata-rata sebesar kurang lebih 2,7 km/detik. Menjelang akhir rekaman (t

= 30-35 detik), kurva menunjukkan pembalikan arah yang mengindikasikan tahap *rupture arrest* sebelum akhirnya terminasi.

Estimasi kecepatan *rupture* ini konsisten dengan *cross-section of slip distribution finite fault* USGS (Gambar 6b), yang menunjukkan orientasi *strike* sebesar 124° dan *distribusi slip* terkonsentrasi pada rentang jarak 0 hingga sekitar 60 km di sepanjang arah *strike* positif, searah dengan arah penalaran *rupture* hasil MUSIC-BP. Kontur *rupture front* yang diplot setiap 5 detik pada penampang tersebut turut memperlihatkan pola perambatan yang konsisten ke arah tenggara, sehingga memperkuat validitas hasil *back-projection* baik dari arah maupun kecepatan penalarannya.



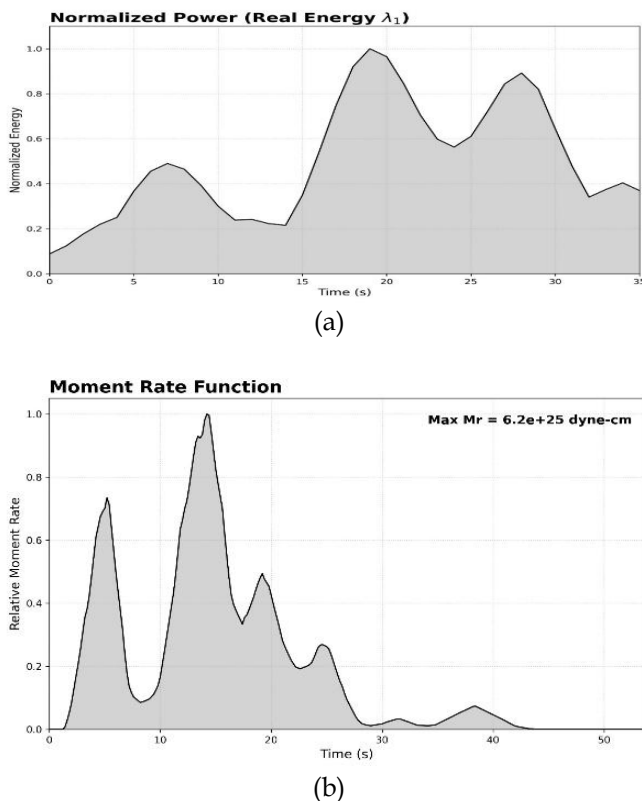
Gambar 6. (a) Plot *back-projection* pada jarak dan waktu. (b) *Cross-section of slip distribution finite fault* USGS (U.S. Geological Survey, 2019).

Kesesuaian Durasi dan Pola Pelepasan Energi

Kurva *normalized energy* hasil *back-projection* (Gambar 7a) dibandingkan dengan *moment rate function* USGS (Gambar 7b) untuk menilai kesesuaian durasi dan pola pelepasan energi antara kedua metode. Kurva *normalized energy* menunjukkan pola pelepasan energi frekuensi tinggi yang tidak seragam, ditandai puncak kecil pertama pada $t = 5-8$ detik, diikuti penurunan sesaat, puncak energi tertinggi pada $t \approx 19$ detik, dan

puncak kedua yang juga signifikan pada $t \approx 28$ detik, sebelum meluruh hingga $t = 35$ detik. Pola multi-puncak ini mengindikasikan bahwa *rupture* tidak berlangsung homogen, melainkan tersegmentasi menjadi beberapa *sub-event* pada beberapa *asperity* di sepanjang bidang sesar.

Pola serupa turut teramati pada *moment rate function* USGS (Gambar 7b), yang juga menunjukkan karakter multi-puncak dengan puncak utama pada $t \approx 14$ detik (M_r maksimum = $6,2 \times 10^{25}$ dyne-cm), puncak sekunder pada $t \approx 19$ detik, dan durasi total pelepasan momen seismik berakhir pada kisaran $t \approx 30$ detik.



Gambar 7. (a) *Normalized energy back-projection*. (b) *Moment rate function finite fault USGS* (U.S. Geological Survey, 2019).

Kemiripan pola multi-puncak antara kedua kurva ini memperkuat interpretasi adanya segmentasi *rupture*, meskipun terdapat pergeseran waktu (*time lag*) antar puncak yang sejalan dengan temuan Yagi dan Fukahata (2011) bahwa zona radiasi energi frekuensi tinggi tidak selalu berimpit secara spasial maupun temporal dengan zona *slip* utama, karena kedua besaran merepresentasikan proses fisik yang berbeda. Meskipun demikian, kemiripan durasi total *rupture* antara kedua metode (kurang lebih 30-35 detik) menunjukkan konsistensi yang baik antara hasil MUSIC-BP dengan model sumber USGS, sehingga memperkuat validitas *back-projection* sebagai metode pencitraan *rupture* yang saling melengkapi dengan model *finite fault*.

Kesimpulan

Gempabumi Halmahera Selatan Mw 7,2 dicirikan oleh proses *rupture* yang bersifat unilateral dengan arah penjaralan dominan ke tenggara dari titik hiposenter. Proses pelepasan energi frekuensi tinggi hasil pencitraan *back-projection* (MUSIC-BP) terbukti valid dan konsisten dengan model *finite fault* USGS berfrekuensi rendah, yang ditunjukkan oleh keselarasan arah lintasan terhadap *surface projection* bidang patahan, kesesuaian spasial antara radiasi energi dengan penampang melintang distribusi *slip* terbesar pada rentang jarak 0-60 km sepanjang arah *strike*, serta kemiripan pola multi-puncak antara kurva *normalized energy* MUSIC-BP dan *moment rate function* USGS yang mengonfirmasi adanya segmentasi *rupture* di sepanjang bidang sesar selama durasi total berkisar 30-35 detik dengan kecepatan rata-rata $\pm 2,7$ km/detik. Kesesuaian yang konsisten pada ketiga aspek perbandingan ini (arah, kecepatan, dan durasi) menegaskan bahwa metode *back-projection* mampu memberikan citra *rupture* yang valid dan sekaligus saling melengkapi dengan model *inversi finite fault* dalam mengungkap karakteristik sumber gempabumi pada sistem sesar geser aktif seperti Sesar Sorong-Bacan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas penyediaan data seismisitas, kepada United States Geological Survey (USGS) atas keterbukaan akses data model *finite fault*, serta kepada dosen pembimbing di Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas bimbingan selama penelitian ini berlangsung.

Referensi

- Aki, K., and Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2nd ed.). University Science Books.
- Beskardes, G. D., Hole, J. A., Wang, K., Michaelides, M., Wu, Q., Chapman, M. C., Davenport, K. K., Brown, L. D., and Quiros, D. A. (2018). A comparison of earthquake backprojection imaging methods for dense local arrays. *Geophysical Journal International*, 212(3), 1986-2002. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx520>
- Bird, P., and Stein, R. S. (2024). Majority of ruptures in large continental strike-slip earthquakes are unilateral: Permissive evidence for hybrid brittle-to-dynamic ruptures. *Seismological Research Letters*, 95(6), 3306-3315. <https://doi.org/10.1785/0220240172>
- BMKG. (2019). Ulasan guncangan tanah akibat gempabumi di Halmahera Selatan 14 Juli 2019. Bidang Seismologi Teknik - BMKG.
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), 353-431. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4)

- Hamilton, W. (1973). Tectonics of the Indonesian Region. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 6, 3-10. <https://doi.org/10.7186/bgsm06197301>
- Hayes, G. P. (2017). The finite, kinematic rupture properties of great-sized earthquakes since 1990. *Earth and Planetary Science Letters*, 468, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.003>
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H., and Vidale, J. E. (2005). Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array. *Nature*, 435(7044), 933-936. <https://doi.org/10.1038/nature03675>
- Ji, C., Wald, D. J., and 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), 1192-1207. <https://doi.org/10.1785/0120000916>
- Koper, K. D., Hutko, A. R., Lay, T., Ammon, C. J., and Kanamori, H. (2011). Frequency-dependent rupture process of the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models. *Earth, Planets and Space*, 63(7), 599-602. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.026>
- Lay, T., and Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology* (Vol. 58). Academic Press.
- McGuire, J. J., Zhao, L., and Jordan, T. H. (2002). Predominance of unilateral rupture for a global catalog of large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(8), 3309-3317. <https://doi.org/10.1785/0120010293>
- Meng, L., Inbal, A., and Ampuero, J. P. (2011). A window into the complexity of the dynamic rupture of the 2011 Mw 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(7), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2011GL048118>
- Permana, H., dan Gaol, K. L. (2018). Sesar geser Sorong Segmen Sorong-Kofiau, Papua Barat, Indonesia: bukti dari data batimetri dan SBP. *Jurnal Geologi Kelautan*, 16(1), 37-50. <https://doi.org/10.32693/jgk.v16i1.543>
- U.S. Geological Survey. (2019, July 14). M 7.2 - 102 km NNE of Laiwui, Indonesia: Finite fault. U.S. Department of the Interior. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70004jyv/finite-fault>
- Wessel, P., and Luis, J. F. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Yagi, Y., and Fukahata, Y. (2011). Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release. *Geophysical Research Letters*, 38(19), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL048701>
- Zhang, H., and Ge, Z. (2012). Rupture imaging of the 2010 Mw 8.8 great chilean earthquake using relative back-projection method. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4), 583-584.