



Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY

Fakultas Teknik Geologi
UNIVERSITAS PADJADJARAN

homepage: <http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X



Volume 24, No.01
April 2026

ANALISIS SEISMISITAS DAN MEKANISME FOKAL UNTUK MENDELINIASI SESAR DI WILAYAH TIMUR PULAU JAWA

Sinta Caenur Winusda¹, Deanne Ardelia Zahrani¹, Mia Uswatun Hasanah^{2*}

1. Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM 21
2. Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran Jl. Raya
Bandung-Sumedang KM 21

*Email: hasanah@geophys.unpad.ac.id

ABSTRACT

Java Island is characterized by complex seismotectonic activity driven by the subduction of the Indo-Australian Plate beneath the Sunda Plate, combined with the influence of active crustal faults on land. This study aims to analyze the spatial distribution of seismicity and focal mechanisms in East Java to provide an initial understanding of the regional tectonic framework. The dataset includes earthquake catalogues from ISC-EHB (1964–2021), BMKG (2009–2021), and moment tensor solutions from GCMT (1976–2022). After filtering and merging, a total of 13,782 earthquake events were examined through spatial mapping, depth distribution, and vertical cross sections at 1° longitude intervals. The results reveal a seismicity pattern consistent with the Indo-Australian subduction geometry, forming a north–northeast dipping Wadati–Benioff zone reaching depths of up to ~600 km. Lateral variations in seismicity across the cross sections suggest possible slab segmentation and the presence of a seismic gap in the central segment. Focal mechanism analysis shows that thrust faulting dominates the megathrust zone, while strike-slip and oblique-slip mechanisms are prevalent onshore, corresponding to active faults such as the Kendeng Timur, Probolinggo, and Blitar Faults. These findings highlight the combined influence of subduction processes and local crustal faulting on the tectonic deformation of East Java, emphasizing their significance for seismic hazard assessment and earthquake mitigation efforts in the region.

Keywords: *Seismicity, Focal Mechanism, Java Subduction, Megathrust, Slab Deformation.*

ABSTRAK

Pulau Jawa merupakan wilayah dengan aktivitas seismotektonik kompleks akibat interaksi antara subduksi Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Sunda serta keberadaan sejumlah sesar aktif di daratan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persebaran seismisitas dan mekanisme fokal gempa bumi di kawasan Jawa Timur sebagai kajian awal untuk memahami pola tektonik regional. Data yang digunakan meliputi katalog ISC-EHB (1964–2021), BMKG (2009–2021), serta data moment tensor dari GCMT (1976–2022). Setelah proses penyaringan dan penggabungan, sebanyak 13.782 kejadian gempa dianalisis berdasarkan distribusi spasial, kedalaman, serta penampang vertikal per interval 1° bujur. Hasilnya menunjukkan pola seismisitas yang mengikuti geometri subduksi Indo-Australia, membentuk zona Wadati–Benioff dengan kemiringan slab curam ke arah utara–timur laut hingga kedalaman ~600 km. Variasi seismisitas antar lintasan mengindikasikan kemungkinan adanya segmentasi lempeng serta keberadaan zona *seismic gap* pada segmen tengah. Analisis mekanisme fokal memperlihatkan dominasi sesar naik di zona *megathrust*, sedangkan wilayah daratan didominasi oleh mekanisme strike-slip dan oblique-slip yang secara spasial berkaitan dengan Sesar Kendeng Timur, Probolinggo, dan Blitar. Hasil ini menunjukkan bahwa deformasi tektonik di Jawa Timur dipengaruhi oleh kombinasi proses subduksi dan aktivitas sesar lokal, yang relevan untuk kajian bahaya seismik regional.

Kata Kunci : *Seismisitas Mekanisme Fokal, Subduksi Jawa, Megathrust, Deformasi Lempeng.*

PENDAHULUAN

Pulau Jawa merupakan wilayah dengan aktivitas seismotektonik yang kompleks.

Secara geografis, kawasan ini dipengaruhi oleh interaksi antara Lempeng Indo-Australia yang menunjani ke bawah Lempeng Eurasia

atau Sunda di sepanjang zona subduksi selatan Jawa. Proses konvergensi lempeng tersebut bergerak relatif ke arah utara-timur laut dan membentuk bagian dari sistem subduksi Sunda Megathrust, yaitu zona megathrust aktif yang membentang dari wilayah Andaman-Sumatra hingga selatan Jawa dan Nusa Tenggara. Panjang keseluruhan zona megathrust ini diperkirakan mencapai sekitar 5.500–5.600 km (USGS, 2012; ESDM, 2020). Zona ini menjadi sumber utama aktivitas seismik dan vulkanisme di Jawa. Selain pengaruh subduksi, kondisi geologi Pulau Jawa juga dikontrol oleh jalur sesar aktif seperti Sesar Opak, Sesar Kendeng, dan Sesar Probolinggo, yang berperan penting terhadap deformasi kerak di bagian utara zona penunjaman (Arisbaya et al., 2021).

Berdasarkan data signifikan dan merusak dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk periode 1821–2024, wilayah Pulau Jawa — khususnya bagian timur — telah mengalami sejumlah gempa bumi merusak dengan intensitas tinggi dan dampak langsung terhadap permukiman penduduk. Contohnya termasuk Gempa Malang tahun 2021 dengan magnitudo Mw 6,1 dan Gempa Blitar tahun 2021, yang menimbulkan kerusakan infrastruktur, runtuhnya bangunan, dan korban di wilayah pesisir selatan (BMKG, 2021; Arisbaya et al., 2021). Gempa-gempa ini sebagian dihasilkan oleh aktivitas sesar aktif daratan maupun sesar dekat zona subduksi — seperti Sesar Probolinggo, Sesar Blitar, Sesar Pasuruan, dan Sesar Kendeng Timur — berdasarkan pemetaan sumber gempa nasional dan data seismisitas regional (PUSGEN, 2017; BMKG, 2020).

Penelitian seismotektonik di wilayah Jawa Timur umumnya berfokus pada pola seismisitas regional dan karakter subduksi secara umum. Namun, pemanfaatan seismisitas dan mekanisme fokal untuk mendelineasi geometri sesar bawah permukaan secara sistematis masih terbatas. Kajian yang menelusuri kontinuitas hiposenter dan keseragaman mekanisme sumber dalam kerangka penampang vertikal per interval bujur untuk mengidentifikasi sesar aktif dan sesar tersembunyi di wilayah timur Pulau Jawa masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persebaran seismisitas dan mekanisme fokal gempa bumi sebagai dasar delineasi sesar dan identifikasi segmentasi tektonik regional, dengan implikasi terhadap mitigasi bahaya gempabumi dan tsunami.

TINJAUAN PUSTAKA

Seismisitas dan Hubungan Gutenberg-Richter

Sebaran seismisitas di Pulau Jawa terutama dipengaruhi oleh aktivitas subduksi di selatan Jawa serta deformasi tektonik lokal di daratan. Karakteristik aktivitas seismik suatu wilayah secara umum dapat digambarkan melalui hubungan Gutenberg-Richter, yang merepresentasikan hubungan antara frekuensi kejadian gempa dan magnitudonya. Hubungan ini menghasilkan parameter *a*-value yang mencerminkan tingkat keaktifan seismik, serta *b*-value yang berkaitan dengan distribusi magnitudo gempa dan sifat mekanik batuan. Meskipun parameter Gutenberg-Richter sering digunakan dalam kajian seismotektonik regional, pada penelitian ini hubungan tersebut digunakan sebagai landasan konseptual untuk memahami karakter umum seismisitas, tanpa dilakukan analisis kuantitatif *b*-value pada bagian hasil.

Mekanisme Fokal dan Tipologi Sesar

Analisis mekanisme fokal merupakan metode penting untuk memahami tipe sesar dan arah slip yang terjadi pada sebuah kejadian gempabumi. Diagram *focal mechanism* atau *beachball diagram* memberikan informasi mengenai orientasi bidang sesar dan tipe pergerakannya, seperti *normal fault*, *reverse/thrust fault*, atau *strike-slip fault*. Analisis ini membantu mengidentifikasi gaya tektonik yang bekerja pada suatu wilayah, baik yang berasal dari sistem subduksi maupun dari sesar aktif di daratan (USGS, 2020).

Aktivitas Sesar Lokal di Jawa Timur

Sejumlah gempa bumi signifikan di wilayah Jawa Timur terbukti berkaitan dengan aktivitas sesar lokal, seperti Sesar Kendeng Timur, Sesar Pasuruan, dan Sesar Probolinggo. Hasil relokasi hiposenter BMKG periode 2009–2017 menunjukkan sebaran gempa dangkal (<40 km) di sepanjang zona-zona tersebut, yang menandakan adanya aktivitas tektonik lokal yang masih berlangsung (Rosalia et al., 2019).

Aktivitas tektonik di kawasan ini juga tercermin dari beberapa gempa merusak, misalnya Gempa Malang 2021 (Mw 6,1) dan Gempa Blitar 2021. Walaupun kedua gempa tersebut berpusat pada zona *intraslab* subduksi, guncangannya tetap memberikan dampak signifikan di wilayah daratan Jawa Timur, termasuk kerusakan bangunan dan gangguan infrastruktur (BMKG, 2021; Arisbaya dkk., 2021).

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi antara aktivitas sesar lokal dan proses subduksi selatan Jawa merupakan

faktor utama yang berkontribusi terhadap tingginya tingkat kerentanan seismik di kawasan Jawa Timur (BMKG, 2023). Aktivitas ini penting diperhatikan dalam upaya mitigasi bencana dan kajian potensi bahaya gempa bumi di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Data

Penelitian ini menggunakan data seismisitas gabungan yang diperoleh dari katalog *International Seismological Centre - Engdahl, van der Hilst, and Buland* (ISC-EHB) untuk periode Januari 1964 hingga Desember 2021 serta katalog gempa bumi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk periode 2009–2021. Pemilihan katalog ISC-EHB didasarkan pada kualitas relokasi hiposenter global yang tinggi, karena katalog ini telah melalui koreksi sistematis menggunakan model kecepatan tiga dimensi sehingga mampu merepresentasikan pola seismisitas regional secara konsisten dalam jangka panjang (Engdahl et al., 1998). Data BMKG digunakan untuk melengkapi informasi gempa bumi dangkal dan aktivitas seismik lokal di wilayah Indonesia dengan resolusi spasial yang lebih baik (BMKG, 2023).

Sebelum penggabungan, kedua katalog diseleksi dan disaring untuk menghindari duplikasi kejadian gempa dengan mencocokkan parameter waktu kejadian, lokasi episenter, magnitudo, dan kedalaman hiposenter. Kriteria seleksi data meliputi batas magnitudo minimum $M_w \geq 3,0$ untuk menjamin keandalan lokasi hiposenter serta rentang kedalaman hingga 700 km guna mencakup gempa dangkal hingga gempa dalam pada zona subduksi. Untuk katalog BMKG, hanya kejadian dengan kualitas lokasi hiposenter yang baik dan status kejadian terverifikasi yang digunakan. Setelah proses penyaringan dan penggabungan, diperoleh sebanyak 13.782 kejadian gempa bumi yang digunakan dalam analisis seismisitas.

Selain data gempa, digunakan informasi 179 stasiun seismik yang tercatat dalam katalog ISC-EHB, mencakup jaringan regional hingga global. Kombinasi data gempa dan stasiun ini menghasilkan cakupan lintasan gelombang (*ray path*) yang luas, sehingga memadai untuk menggambarkan distribusi seismisitas regional. Wilayah penelitian dibatasi pada koordinat $4^{\circ}\text{LS}-14^{\circ}\text{LS}$ dan $111^{\circ}\text{BT}-116^{\circ}\text{BT}$, yang mencakup wilayah timur Pulau Jawa dan zona subduksi selatan Jawa, dikenal sebagai segmen aktif secara tektonik dengan tingkat seismisitas tinggi.

Metode

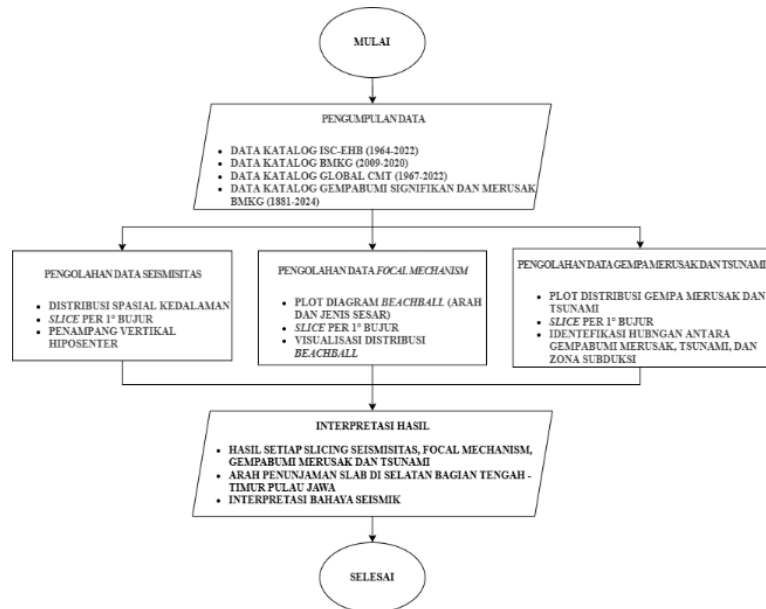
Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama yang meliputi pengolahan dan seleksi data seismisitas, analisis distribusi

seismisitas secara spasial dan vertikal, analisis mekanisme fokal, serta interpretasi tektonik berdasarkan hasil visualisasi dan kondisi geologi regional.

Distribusi episentrum gempa bumi divisualisasikan menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools* (GMT) dengan latar peta topografi dan batimetri. Analisis seismisitas dilakukan berdasarkan kedalaman hiposenter, serta melalui penampang vertikal yang dibagi per interval 1° bujur (longitude). Pendekatan ini digunakan untuk mengkaji variasi lateral seismisitas dan karakter subduksi di wilayah timur Pulau Jawa, mengingat zona subduksi selatan Jawa menunjukkan perubahan pola seismisitas dan geometri slab dari arah barat ke timur (Muttaqy et al., 2022; Xia et al., 2023). Analisis penampang per interval bujur memungkinkan pengamatan perbedaan kedalaman hiposenter dan intensitas seismisitas antar segmen tanpa mengasumsikan keberadaan struktur tertentu secara langsung.

Analisis mekanisme sumber gempa bumi dilakukan menggunakan data *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT) periode 1976–2022. Sebanyak 46 kejadian gempa dianalisis berdasarkan ketersediaan solusi moment tensor dan kualitas inversi yang memadai. Jumlah mekanisme fokal yang relatif terbatas disebabkan oleh keterbatasan ketersediaan data GCMT di wilayah penelitian, terutama untuk gempa bermagnitudo menengah hingga besar. Meskipun demikian, data tersebut dianggap representatif untuk menggambarkan karakter mekanisme sumber dominan pada zona subduksi dan wilayah daratan Jawa Timur. Visualisasi mekanisme sumber ditampilkan dalam bentuk diagram *beachball* menggunakan perintah *meca* pada perangkat lunak GMT, yang menunjukkan orientasi bidang nodal, arah slip, serta tipe mekanisme sesar seperti thrust, normal, strike-slip, dan oblique-slip (Zhao et al., 2023).

Tahap akhir berupa interpretasi tektonik dilakukan dengan membandingkan pola seismisitas dan mekanisme fokal terhadap arah penunjaman subduksi serta keberadaan sesar aktif di daratan, termasuk Sesar Probolinggo, Sesar Blitar, dan Sesar Kendeng Timur. Interpretasi ini bersifat indikatif dan bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai gaya tektonik dominan yang bekerja di wilayah penelitian serta keterkaitannya dengan deformasi kerak atas dan perilaku slab yang menjam di bawah Pulau Jawa bagian timur (Ward et al., 2024). Seluruh tahapan analisis dirangkum secara sistematis dalam diagram alir penelitian **Gambar.1** untuk meningkatkan kejelasan metodologi dan reproduktibilitas penelitian.

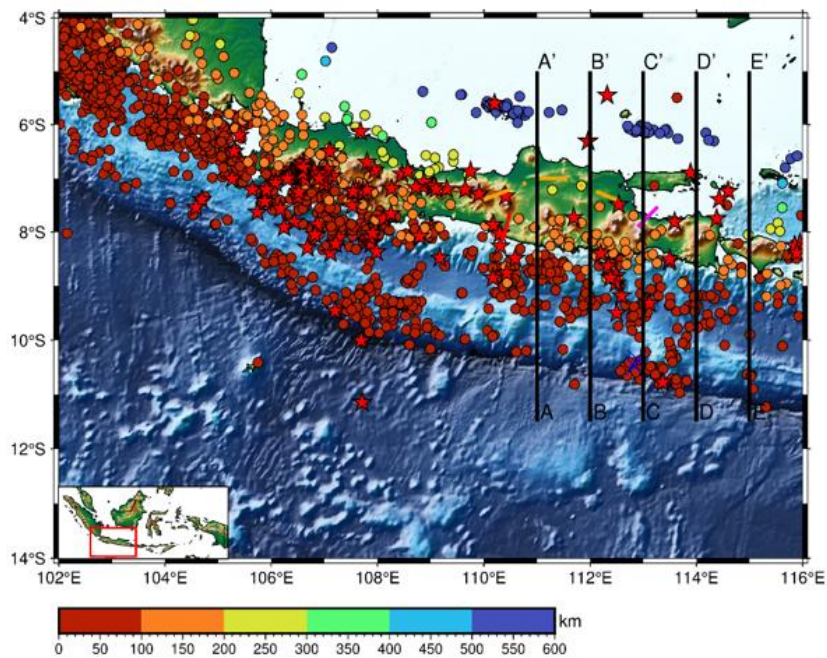


Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

HASIL PENELITIAN
Analisis Sebaran Seismisitas

Analisis seismisitas dilakukan untuk mengamati pola penyebaran gempa bumi di bagian timur Pulau Jawa serta keterkaitannya dengan aktivitas tektonik regional. Data yang digunakan berasal dari katalog ISC-EHB (1964–2021), BMKG (2009–2021), dan Katalog Gempa Signifikan dan Merusak BMKG

(1821–2024). Peta pada **Gambar 2** menampilkan simbol bulat sebagai representasi episenter gempa hasil pencatatan seismik, bintang untuk lokasi gempa merusak, serta tanda silang untuk kejadian tsunami. Garis vertikal pada peta menunjukkan pembagian lintasan analisis tiap 1° bujur (111°–115° BT).



Gambar 2. Peta sebaran seismisitas hasil perekaman dari data katalog ISC-EHB, BMKG, dan Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak. Garis vertikal menunjukkan pembagian wilayah studi per 1° bujur untuk analisis seismisitas dan penampang lintang. Simbol bulat untuk seismisitas, bintang untuk gempa merusak, tanda silang untuk tsunami, dan garis berwarna untuk sesar.

Berdasarkan peta kedalaman episentrum pada **Gambar 2**, sebaran gempa bumi di Pulau Jawa memperlihatkan pola yang sejajar dengan Palung Jawa di bagian selatan. Gempa dengan kedalaman dangkal (<70 km) umumnya terkonsentrasi di sekitar zona palung, bertepatan dengan lokasi bidang kontak antar-lempeng Indo-Australia dan Eurasia. (Hutchings & Mooney, 2021; Xia et al., 2023).

Selain gempa tektonik reguler, tercatat pula sejumlah gempa merusak di wilayah pesisir selatan Jawa, khususnya di Jawa Timur, seperti Gempa Malang 2021 (Mw 6,7) dan Gempa Blitar 2021 (Mw 6,1). Kedua peristiwa tersebut mengakibatkan kerusakan bangunan, gangguan infrastruktur, serta korban jiwa di beberapa wilayah terdampak (BMKG, 2021). Fenomena ini menunjukkan bahwa deformasi tektonik tidak hanya terjadi di zona subduksi lepas pantai, tetapi juga menjalar hingga ke kerak atas daratan, sejalan dengan temuan beberapa penelitian mengenai kompleksitas tektonik Jawa bagian selatan (Widiyantoro et al., 2020).

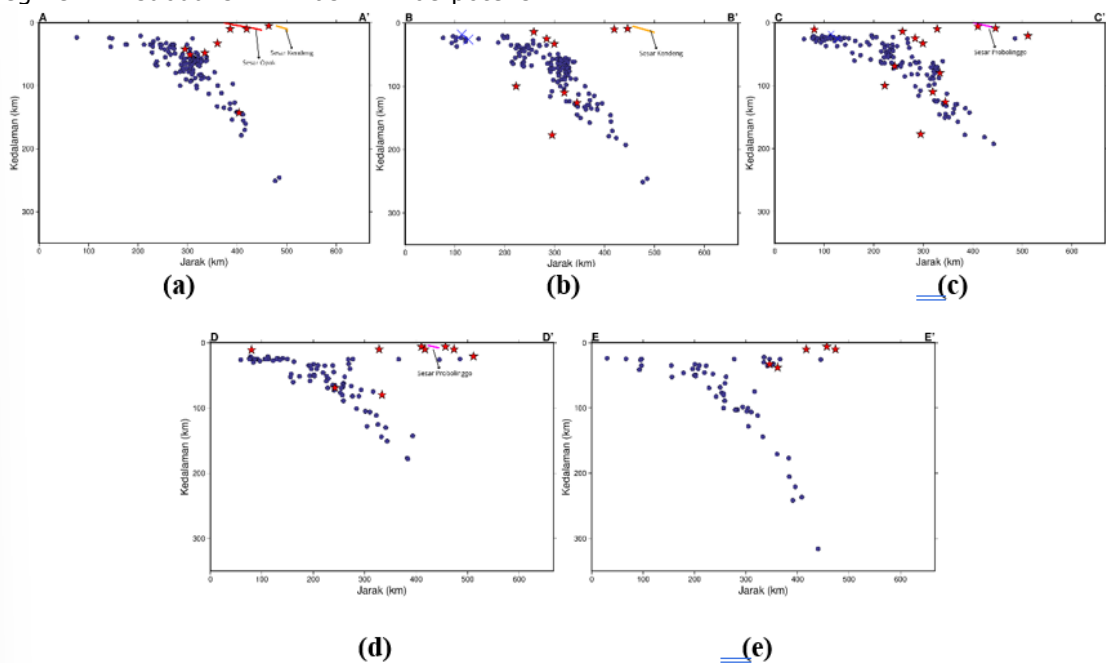
Simbol tanda silang pada peta menunjukkan lokasi kejadian tsunami, yang umumnya berkaitan dengan gempa dangkal di zona megathrust selatan Jawa. Kejadian-kejadian tersebut menegaskan bahwa beberapa segmen subduksi masih berpotensi

menghasilkan gempa besar yang berasosiasi dengan tsunami, seperti yang juga diidentifikasi dalam pemodelan bahaya megathrust Jawa oleh studi-studi sebelumnya (mis. Widiyantoro et al., 2020).

Berdasarkan karakter kedalaman dan lokasinya, gempa bumi di wilayah ini dapat dibedakan menjadi dua tipe utama. Gempa antar-lempeng (interplate) terjadi di sepanjang bidang kontak subduksi pada kedalaman dangkal hingga menengah dan berpotensi menghasilkan magnitudo besar. Sementara itu, gempa dalam-lempeng (intraplate) tersebar di dalam slab yang menunjam maupun di kerak atas Eurasia dengan variasi kedalaman hingga lebih dari 200 km. Gempa intraplate ini umumnya dipengaruhi oleh deformasi internal slab dan reaktivasi struktur aktif di daratan (Hutchings & Mooney, 2021; Xia et al., 2023).

Penampang Vertikal Seismisitas

Penampang vertikal seismisitas dibuat untuk memahami struktur bawah permukaan dan geometri *slab* di bawah Pulau Jawa. Penampang tersebut dibagi setiap 1° bujur dari 111° hingga 115° BT. Dalam **Gambar 3**, simbol bulat menandai hiposenter gempa, sedangkan simbol bintang menunjukkan gempabumi merusak.



Gambar 3. Penampang vertikal seismisitas di timur Pulau Jawa berdasarkan pembagian lintasan per 1° bujur dari 111°BT hingga 115°BT. (a) 111°BT, (b) 112°BT, (c) 113°BT, (d) 114°BT, (e) 115°BT. Distribusi episentrum membentuk bidang miring ke utara yang merepresentasikan geometri *slab* subduksi Indo-Australia. Simbol bulat untuk seismisitas, bintang untuk gempa merusak, tanda silang untuk tsunami, dan garis berwarna untuk sesar.

Penampang vertikal hiposenter gempa bumi memperlihatkan geometri *slab* yang

menunjam ke bawah, yang umumnya dikenal sebagai *Zona Wadati-Benioff* (ZWB). Sebaran

hiposenter membentuk bidang miring yang berawal dari kedalaman dangkal di sekitar Palung Jawa, kemudian menekuk ke arah utara di bawah Pulau Jawa hingga ke Laut Jawa dengan kedalaman mencapai ratusan kilometer, bahkan hingga ± 600 km pada segmen tertentu. Pola ini menunjukkan proses subduksi Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Sunda (bagian dari Eurasia), dengan arah penunjaman utara-timur laut yang relatif tegak lurus terhadap arah konvergensi lempeng. Sudut penunjaman di zona subduksi Jawa tergolong curam, berkisar antara 40° – 70° (Hayes et al., 2012; Hayes et al., 2018).

Meskipun secara umum penampang A–E memperlihatkan pola serupa yaitu hiposenter dangkal di zona palung yang berlanjut ke bidang seismik pada kedalaman menengah (50–300 km) terdapat variasi spasial yang signifikan antar lintasan. Pada lintasan A–B, seismisitas padat terdistribusi dari kedalaman dangkal hingga lebih dari 200 km menunjukkan *slab* yang masih kontinu dengan kemiringan sedang hingga curam. Sebaliknya, di lintasan C–D tampak penurunan jumlah hiposenter pada kedalaman sekitar 250–400 km yang membentuk zona *seismic gap*. Fenomena ini juga diidentifikasi oleh Widiyantoro et al. (2020) yang memetakan zona aseismik pada selatan Jawa melalui tomografi kecepatan dalam dan mengaitkannya dengan kemungkinan keberadaan segmen megathrust yang sebagian kurang aktif secara seismik. Selain itu, hasil relokasi katalog global menunjukkan bahwa *gap* dapat berhubungan dengan perubahan sifat mekanik slab atau adanya bagian slab yang terputus (Engdahl et al., 2007).

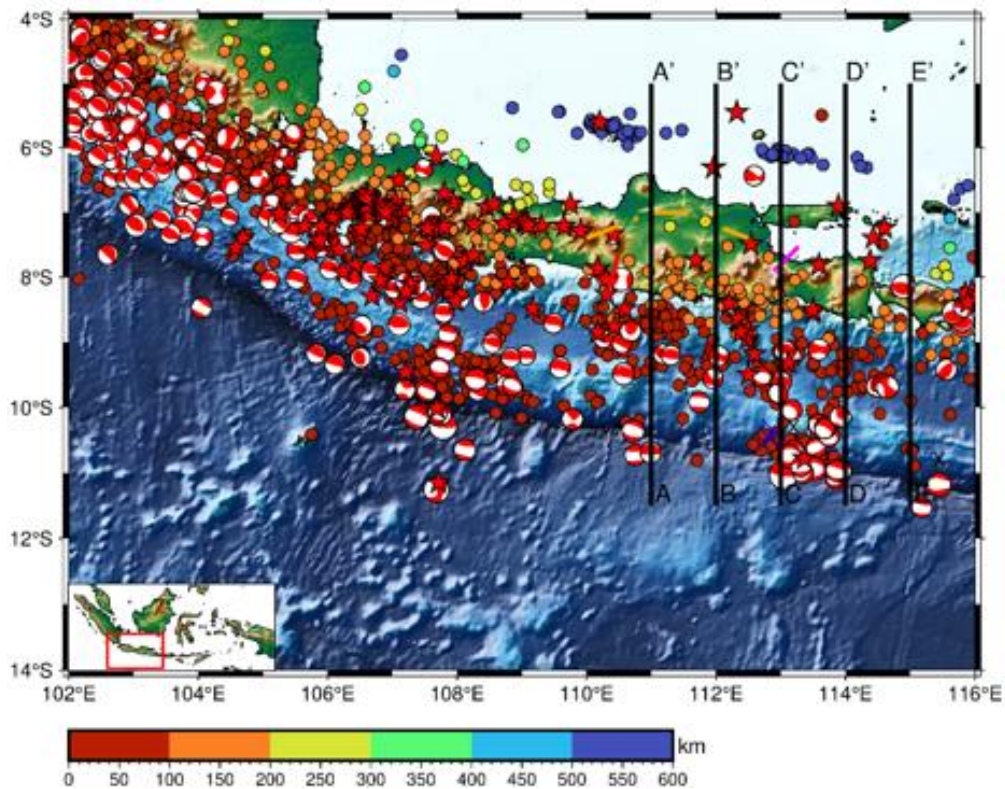
Pada lintasan E, seismisitas kembali muncul dengan pola yang lebih dangkal dan membentuk klaster terpisah. Kondisi ini dapat mengindikasikan perubahan geometri slab, seperti kemungkinan adanya *slab tear*, sebagaimana disinggung oleh beberapa penelitian tomografi regional yang menemukan anomali kecepatan rendah di

selatan Jawa Timur (Koulakov et al., 2007; Widiyantoro et al., 2020). Di sepanjang segmen ini juga tercatat beberapa gempa merusak, seperti Gempa Malang 2021 (Mw 6,7) dan Gempa Blitar 2021 (Mw 6,1), yang keduanya terjadi pada kedalaman dangkal di zona antarmuka subduksi dan menghasilkan guncangan kuat di daratan selatan Jawa Timur (BMKG, 2021). Kemunculan gempa merusak di segmen ini menunjukkan bahwa deformasi tidak hanya terjadi di bawah laut, tetapi juga telah menjalar ke kerak atas Eurasia, memperlihatkan transfer tegangan dari zona megathrust ke sistem sesar daratan (Supendi et al., 2020).

Keberadaan *seismic gap* di lintasan tengah dan gempa merusak di segmen timur dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme. Hasil tomografi seismik menunjukkan keberadaan anomali kecepatan rendah pada kedalaman menengah di beberapa segmen selatan Jawa, yang diinterpretasikan sebagai bagian slab yang lebih panas atau melemah sehingga aktivitas gempa menurun (Koulakov et al., 2007; Widiyantoro et al., 2020). Selain itu, proses subduksi fitur batimetri seperti seamount dan punggung samudra telah diketahui dapat memodifikasi *coupling* antarlempeng, menghasilkan asperity yang terkunci kuat maupun deformasi aseismik (Bilek & Engdahl, 2016). Variasi tingkat penguncian antarlempeng juga diidentifikasi melalui data geodetik, di mana beberapa segmen Jawa–Timor memperlihatkan *partial locking*, yang berarti sebagian energi dilepaskan sebagai slip aseismik, sehingga mengurangi jumlah gempa terdeteksi (Supendi et al., 2020).

Analisis Mekanisme Fokal

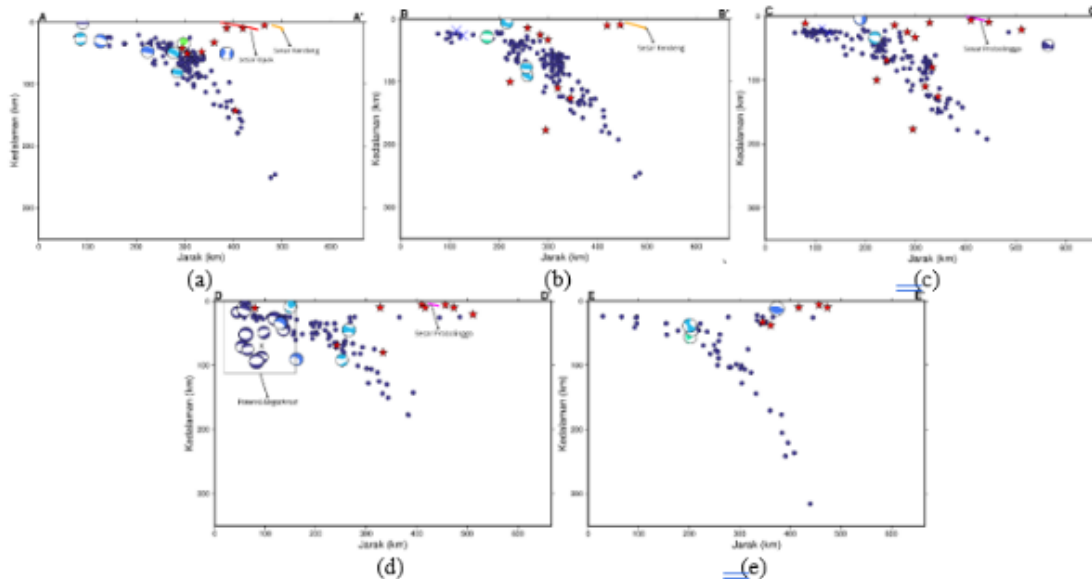
Untuk mengetahui arah tegasan utama dan jenis sesar yang mendominasi, dilakukan analisis mekanisme fokal menggunakan data GCMT (1976–2022). Dalam **Gambar 4**, simbol bulat menunjukkan episenter gempa, sedangkan diagram *beachball* menampilkan orientasi bidang sesar dan arah slip utama dari setiap kejadian gempa.



Gambar 4. Peta persebaran seismisitas dan mekanisme fokal untuk gempa 4 M-9 M yang signifikan di Pulau Jawa berdasarkan data katalog ISC-EHB, BMKG, dan GCMT. Mekanisme dominan berupa *thrust fault* pada zona subduksi selatan Jawa, sedangkan di daratan muncul variasi strike-slip dan oblique-slip yang berkaitan dengan aktivitas sesar aktif. Simbol bulat untuk seismisitas, bintang untuk gempa merusak, tanda silang untuk tsunami, garis berwarna untuk sesar, dan *beachball* untuk mekanisme fokal.

Pola mekanisme pada **Gambar 4** memperlihatkan dominasi tipe *thrust fault* di zona subduksi selatan, yang menunjukkan gaya kompresi akibat konvergensi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Sunda. Kondisi ini sejalan dengan hasil *interseismic coupling* yang tinggi pada beberapa segmen megathrust Jawa-Timor berdasarkan analisis geodetik GPS (Supendi et al., 2020), yang mengindikasikan potensi akumulasi regangan besar di zona antarmuka subduksi. Di wilayah daratan, tipe sesar strike-slip dan oblique-slip cenderung mendominasi, yang secara spasial berasosiasi dengan keberadaan sesar aktif seperti Sesar Probolinggo, Sesar Blitar, dan Sesar Kendeng Timur. Aktivitas tektonik ini sesuai dengan interpretasi sumber gempa pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia

(Irsyam et al., 2020) dan beberapa studi mengenai struktur aktif Jawa Timur (Herman et al., 2018). Mekanisme sesar darat mengindikasikan kemungkinan adanya transfer tegangan dari zona subduksi ke kerak atas, sehingga sistem sesar daratan diduga turut berperan dalam distribusi deformasi tektonik di Jawa Timur. Penampang gabungan antara seismisitas dan mekanisme fokal digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antara kedalaman gempa dan tipe sesar di sepanjang lintasan 111°-115° BT. Dalam **Gambar 5**, simbol bulat menandai episenter gempa, garis miring menunjukkan sesar aktif, dan diagram *beachball* menggambarkan jenis mekanisme sumber gempa.



Gambar 5. Penampang gabungan seismisitas dan mekanisme fokal pada lintasan (a) 111°BT, (b) 112°BT, (c) 113°BT, (d) 114°BT, (e) 115°BT. Distribusi episentrum memperlihatkan zona Benioff yang menekuk ke utara, sementara mekanisme fokal menunjukkan jenis sesar pada gempa dangkal hingga menengah. Simbol bulat untuk seismisitas, bintang untuk gempa merusak, tanda silang untuk tsunami, garis berwarna untuk sesar, dan *beachball* untuk mekanisme fokal.

Pada bagian dangkal, mekanisme fokus didominasi oleh tipe sesar naik yang sejalan dengan arah kompresi konvergensi lempeng, sedangkan pada kedalaman menengah muncul kombinasi sesar normal dan strike-slip yang mencerminkan deformasi internal slab akibat gaya slab pull, bending, serta pengaruh segmentasi (Hutchings dan Mooney, 2021; Xie dkk., 2023).

Lintasan A - C menunjukkan distribusi seismisitas yang padat dan relatif kontinu, dengan dominasi mekanisme *thrust* di zona antarmuka serta munculnya mekanisme normal dan *strike-slip* pada kedalaman menengah. Pola ini menunjukkan bahwa segmen barat hingga tengah Jawa Timur merupakan bagian yang aktif secara tektonik, di mana regangan dari zona subduksi sebagian ditransfer ke kerak atas. Hal ini diduga berkaitan dengan aktivitas sesar-sesar aktif di daratan, seperti Sesar Blitar dan Sesar Probolinggo, yang secara spasial berdekatan dengan beberapa kejadian gempa merusak di pesisir selatan Jawa Timur (BMKG, 2021; Widiyantoro dkk., 2020). Aktivitas ini memperlihatkan bahwa deformasi akibat subduksi tidak hanya terjadi di laut, tetapi juga menjalar hingga ke wilayah daratan, sehingga meningkatkan potensi bahaya gempabumi di kawasan padat penduduk.

Pada lintasan D (sekitar 114° BT), terlihat kluster mekanisme fokal dangkal dengan orientasi kompresi yang seragam pada bagian atas penampang. Pola ini mengindikasikan adanya aktivitas

megathrust yang relatif homogen, yang secara interpretatif dapat dikaitkan dengan keberadaan asperity atau segmen dengan tingkat kopling relatif tinggi. Namun, pada kedalaman menengah hingga dalam, arah tegasan menjadi lebih bervariasi dan mekanismenya berubah, menandakan perbedaan kondisi tegasan antara bidang kontak antarlempeng dan bagian dalam slab (Xie dkk., 2023).

Pada segmen di sekitar lintasan D, tercatat beberapa gempa merusak seperti Gempa Malang 2021 (Mw 6,7) dan Gempa Blitar 2021 (Mw 6,1), yang terjadi pada kedalaman dangkal di zona antarmuka dan menghasilkan guncangan kuat di wilayah selatan Jawa Timur (BMKG, 2021). Kejadian ini menunjukkan bahwa sebagian bidang subduksi telah mengalami rupture parsial, sementara bagian lainnya masih terkunci. Kondisi tersebut berpotensi menjadi sumber gempa besar di masa mendatang (Zhao dkk., 2022). Gempa dangkal ini juga berasosiasi dengan potensi tsunami yang dihasilkan oleh pelepasan energi besar di bidang antarmuka subduksi. Fakta ini menegaskan bahwa segmen selatan Jawa Timur merupakan wilayah dengan potensi gempabumi dan tsunami tinggi akibat interaksi kuat antara aktivitas subduksi dan deformasi kerak atas (Widiyantoro dkk., 2020; Xia dkk., 2023).

Sementara itu, pada lintasan E (sekitar 115° BT), distribusi gempa menengah kembali terlihat kontinu dengan variasi mekanisme yang lebih beragam. Pola ini mengindikasikan bahwa slab di segmen timur relatif lebih utuh

dibandingkan segmen sebelumnya. Variasi spasial ini menunjukkan bahwa aktivitas seismik di busur selatan Jawa dipengaruhi oleh kombinasi faktor seperti geometri slab, kondisi termal, sifat mekanik batuan, dan topografi dasar laut yang tersubduksi (Hutchings dan Mooney, 2021; Xia dkk., 2023). Hasil penelitian geodetik juga mendukung hal ini dengan menunjukkan adanya heterogenitas tingkat penguncian (locking heterogeneity) di sepanjang zona megathrust Jawa-Timor, di mana sebagian seismic gap bukan merupakan area terkunci, melainkan zona slip aseismik (Zhao dkk., 2022).

Dengan demikian, distribusi seismisitas dan mekanisme fokal pada penampang vertikal A-E menggambarkan interaksi kompleks antara geometri slab, kondisi tegasan, dan pengaruh topografi dasar laut yang tersubduksi. Keberadaan klaster thrust yang homogen pada lintasan D, disertai gempa merusak dan indikasi aktivitas tsunami di sekitarnya, menunjukkan bahwa segmen ini merupakan zona kunci dalam memahami mekanisme megathrust dan potensi sumber gempa besar di masa mendatang (Widiyantoro dkk., 2020; Hutchings dan Mooney, 2021; Zhao dkk., 2022).

KESIMPULAN

Analisis seismisitas di timur Pulau Jawa menunjukkan keberadaan zona aktivitas gempa tinggi yang menitik ke arah utara, konsisten dengan penunjaman Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Sunda. Variasi sudut penunjaman, dengan kecenderungan lebih curam di segmen timur, serta keberadaan zona aktivitas gempa rendah (*seismic gap*) mencerminkan heterogenitas geometri slab, kondisi termal, dan kemungkinan interaksi dengan fitur batimetri yang tersubduksi, seperti seamount dan ridge.

Analisis mekanisme fokal memperlihatkan dominasi sesar naik pada zona megathrust selatan Jawa, sementara gempa menengah hingga dalam didominasi mekanisme normal dan strike-slip yang merefleksikan deformasi internal *slab*. Hal ini secara spasial berasosiasi dengan sesar aktif, seperti Sesar Blitar dan Probolinggo, mengindikasikan bahwa deformasi tektonik tidak hanya terfokus di zona subduksi, tetapi juga menjalar ke kerak atas. Kejadian gempa merusak, seperti Gempa Malang 2021 (Mw 6,7) dan Gempa Blitar 2021 (Mw 6,1), serta kejadian tsunami di selatan Jawa Timur menegaskan bahwa sebagian segmen megathrust masih berpotensi melepaskan energi besar.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi analisis seismisitas, dan mekanisme

fokal secara spasial tersegmentasi di sepanjang timur Pulau Jawa, yang memberikan gambaran lebih rinci mengenai variasi geometri slab dan kondisi tegasan dibandingkan studi regional sebelumnya yang bersifat lebih umum. Hasil ini memperkaya pemahaman seismotektonik Jawa Timur dengan menyoroti perbedaan karakter tektonik antar segmen bujur.

Dari sisi implikasi kebencanaan, identifikasi *seismic gap*, segmen megathrust yang masih terkunci, serta keterkaitan deformasi subduksi dengan sesar aktif daratan menjadi informasi penting bagi evaluasi potensi gempabumi dan tsunami di wilayah selatan Jawa Timur yang berpenduduk padat.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan hasil ini dengan data tomografi seismik resolusi tinggi dan data geodetik (GPS/InSAR) guna menguji hipotesis terkait heterogenitas slab, tingkat penguncian antarlempeng, serta mekanisme transfer tegangan dari zona subduksi ke kerak atas secara lebih kuantitatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *International Seismological Centre* (ISC-EHB), serta *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT) yang telah menyediakan data seismisitas dan mekanisme fokus sehingga penelitian ini dapat terlaksana. Apresiasi juga diberikan kepada Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan. Tidak lupa, penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing dan rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan masukan, diskusi, serta bantuan dalam proses analisis data hingga penyusunan manuskrip ini.

REFERENSI

- Arisbaya, I., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Supendi, P. (2021). Seismotektonik Jawa Timur berdasarkan analisis seismisitas dan struktur aktif regional. *Jurnal Geofisika Indonesia*, **19**(2), 85–102.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2020). *Katalog Gempabumi Indonesia*. BMKG, Jakarta.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2021). *Laporan Gempabumi Signifikan dan Merusak Tahun 2021*. BMKG, Jakarta.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2023). *Katalog Gempabumi Indonesia 1821–2023*. BMKG, Jakarta.
- Bilek, S. L., & Engdahl, E. R. (2016). Seismicity and deformation of subducting

- oceanic lithosphere. *Geosphere*, **12**(1), 1–20. <https://doi.org/10.1130/GES01251.1>
- Engdahl, E. R., van der Hilst, R. D., & Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**(3), 722–743.
- Engdahl, E. R., Villaseñor, A., DeShon, H. R., & Thurber, C. H. (2007). Seismicity and active tectonics of the Sunda–Java subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B08307. <https://doi.org/10.1029/2006JB004681>
- Hayes, G. P., Wald, D. J., & Johnson, R. L. (2012). Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B01302. <https://doi.org/10.1029/2011JB008524>
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, **362**(6410), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Herman, M. W., Supendi, P., Nugraha, A. D., & Widiyantoro, S. (2018). Active fault structures and seismic hazard in East Java, Indonesia. *Tectonophysics*, **724–725**, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.012>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). Subduction zone geometry and seismicity beneath Java. *Geophysical Journal International*, **226**(3), 1963–1980. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab164>
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., et al. (2020). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), Bandung.
- Koulakov, I., Tikhotsky, S., Bushenkova, N., Vasilevsky, A., & Kulakov, R. (2007). P- and S-wave velocity structure beneath Java from local tomography inversion. *Geophysical Journal International*, **170**(2), 512–528. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03410.x>
- Muttaqy, A., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Supendi, P. (2022). Lateral variation of slab geometry beneath Java revealed by seismicity and tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, **230**, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105188>
- Rosalia, S., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., & Supendi, P. (2019). Relocation of earthquakes in East Java and implications for active fault identification. *Geophysical Journal International*, **218**(3), 1745–1760. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz250>
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., et al. (2020). Interseismic coupling and strain accumulation along the Java–Timor subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB018418. <https://doi.org/10.1029/2019JB018418>
- USGS. (2012). *Subduction zone geometry and megathrust systems of Southeast Asia*. United States Geological Survey.
- USGS. (2020). *Earthquake focal mechanism and moment tensor solutions*. United States Geological Survey.
- Ward, S. N., Supendi, P., & Widiyantoro, S. (2024). Stress transfer and segmentation along the Java subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **617**, 118231. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118231>
- Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Supendi, P., et al. (2020). Subduction structure and megathrust segmentation beneath Java revealed by seismic tomography. *Geophysical Journal International*, **223**(1), 356–375. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa312>
- Xia, S., Zhao, D., Widiyantoro, S., & Liu, X. (2023). Slab geometry, dehydration, and seismicity beneath the Sunda subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **128**, e2022JB025981. <https://doi.org/10.1029/2022JB025981>
- Xie, Y., Zhao, D., & Li, S. (2023). Seismic anisotropy and stress regime in subduction zones: Implications for slab deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, **598**, 117819. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117819>
- Zhao, D., Tian, Y., & Liu, X. (2022). Locking heterogeneity and seismic potential along the Sunda megathrust. *Nature Communications*, **13**, 5412. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33155-6>
- Zhao, D., Xia, S., & Widiyantoro, S. (2023). Seismic imaging and focal mechanism constraints on slab dynamics beneath Indonesia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **340**, 106890. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.106890>