



## Aktivitas Seismik Gempa Bumi Laut Flores: Periode 30 Tahun

Azmi Khusnani<sup>1\*</sup>, Adi Jufriansah<sup>2</sup>, Konsenius Wiran Wae<sup>3</sup>, Dwi Sulistyaningsih<sup>4</sup>, Margiono<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Pendidikan Fisika, Universitas Muhammadiyah Maumere, Maumere, Indonesia

<sup>4</sup>Pendidikan Fisika, Universitas Siliwangi, Kota Tasikmalaya, Indonesia

<sup>5</sup>Stasiun Geofisika, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Kupang, Indonesia

### Abstrak

Pulau Flores, yang terletak di bagian timur Indonesia, khususnya Nusa Tenggara Timur, merupakan salah satu daerah di Indonesia Timur yang memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi. Catatan sejarah mencatat bahwa wilayah Flores telah mengalami gempa bumi dengan kekuatan magnitudo lebih dari 7. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan sebuah studi yang komprehensif terhadap aktivitas seismik yang terjadi di wilayah ini. Penelitian ini bertujuan untuk memahami aktivitas gempa bumi di Laut Utara Flores selama periode 30 tahun dengan menganalisis frekuensi dan magnitudo gempa yang terjadi sehingga penting dalam upaya pemahaman dan mitigasi risiko gempa bumi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemetaan berdasarkan aktivitas seismik dan distribusi frekuensi, yang memungkinkan peneliti untuk lebih memahami pola gempa bumi di wilayah Flores dan menganalisis perubahan frekuensi kejadian gempa selama periode yang diteliti. Hasil penelitian ini mengungkapkan bahwa selama periode 30 tahun di Laut Flores, terdapat empat puncak gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 7. Data tersebut diperoleh berdasarkan data katalog gempa bumi di mana terdapat keterkaitan antara kejadian gempa bumi dengan magnitudo > 4, yang mengindikasikan adanya aktivitas seismik yang berlangsung secara berkelanjutan di wilayah ini. Pola distribusi gempa selama periode ini memberikan wawasan yang berharga tentang tingkat aktivitas lempeng tektonik di wilayah Laut Flores, serta risiko potensial terjadinya gempa bumi di masa depan.

Masuk:

30 Oktober 2023

Diterima:

26 Juni 2024

Diterbitkan:

30 Juni 2024

### Kata kunci:

Frekuensi, Gempa Bumi, Laut Flores, Magnitudo, Seismik

### PENDAHULUAN

Pulau Flores yang terletak di Nusa Tenggara Timur merupakan salah satu pulau di Indonesia Timur yang memiliki tingkat kerawanan gempa yang tinggi (Beckers & Lay, 1995; Goes dkk, 1997; Khusnani dkk, 2023). Wilayah Flores terbagi menjadi lima bagian yaitu zona *Flores back-arc thrust fault* di utara pulau dengan daya dorong dangkal hingga menengah, zona dorong dangkal dan menengah di Timor Through, *intermediate depth thrusts* di Cekungan Sawu dan normal di timur, antara Pulau Sumbawa dan Flores dengan *strike-slip* dan zona gempa subduksi (Fujii & Sinki, 2021;

Handayani, 2020; Pranantyo & Cummins, 2019, 2020). Selain itu adanya *Flores back-arc thrust fault* menambah sumber deformasi geologi dan lipatan di batuan yang dimungkinkan dapat memicu gempa bumi dan aktivitas vulkanik (Sasmi dkk, 2020; Yang dkk, 2020). Sejarah mencatat bahwa wilayah Flores pernah mengalami gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 7 pada tahun 1992, 1996, 2015, dan 2021 (Handayani, 2020; Jufriansah dkk, 2023; Supendi dkk, 2022). Selain itu, salah satu gempa di wilayah Flores mengakibatkan tsunami pada tahun 1992 dengan magnitudo 7.9 (Beckers & Lay, 1995; Kim dkk, 2015; Minoura dkk, 1997). Gempa ini

\*Korespondensi: Azmi Khusnani ✉ husnaniazmi@gmail.com 📍 Universitas Muhammadiyah Maumere, Jalan. Jenderal Sudirman, Maumere, Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara Timur, Indonesia

sangat berdampak dan bahkan melebihi gempa di Nicaragua (Khusnani dkk, 2023; Satake dkk, 1993), yang menelan lebih dari 2000 korban jiwa dan merusak infrastruktur (Julius & Daryono, 2021). Tingkat kehancuran yang parah ini menekankan urgensi perencanaan mitigasi bencana yang efektif.

Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan studi komprehensif terhadap aktivitas seismik yang pernah terjadi di wilayah Flores. Meskipun telah berlalu lebih dari 30 tahun sejak peristiwa kehancuran tersebut, kenangan akan kejadian tersebut masih sangat kuat. Kenangan ini menjadi semakin tajam dengan adanya peristiwa gempa bumi di Laut Flores pada tanggal 14 Desember 2021 dengan magnitudo 7,3 (Jufriansah dkk, 2023; Jufriansah dkk, 2023; Khusnani dkk, 2022). Pada kajian gempa bumi perlu memperhatikan parameter gempa bumi. Parameter gempa bumi adalah informasi kunci yang merujuk pada besaran dan letak kejadian gempa bumi, di mana besaran gempa bumi, yang merupakan indikator kekuatan gempa. Parameter gempa bumi mencakup waktu kejadian gempa bumi, hiposenter (kedalaman di bawah permukaan di mana gempa dimulai), episenter (lokasi di permukaan bumi yang tepat di atas hiposenter), kedalaman sumber gempa bumi, dan kekuatan gempa bumi yang dinyatakan dalam magnitudo. Meskipun kajian gempa bumi Flores telah banyak dilakukan penelitian berdasarkan parameter gempa bumi (Goes dkk, 1997; Handayani, 2020; Maneno dkk, 2019; Wiens & Louis, 1998), namun belum ada yang melakukan penelitian berkaitan dengan aktivitas seismik.

Aktivitas seismik dalam kurun waktu pada suatu daerah diartikan sebagai seismisitas (Wibowo & Sembri, 2017). Salah satu metode yang umum digunakan untuk menganalisis aktivitas kegempaan adalah dengan memeriksa hubungan antara frekuensi dan magnitudo gempa bumi (Shohaya dkk, 2013). Analisis ini menggambarkan pola seismisitas di suatu wilayah geografis dengan mengumpulkan

data historis gempa bumi yang mencakup seberapa sering gempa terjadi (frekuensi) dan seberapa kuat gempa tersebut (magnitudo) selama periode waktu tertentu. Pertama, penelitian ini menganalisis aktivitas seismik di Laut Flores selama periode 30 tahun, memberikan wawasan mendalam mengenai tren dan pola gempa bumi dalam jangka waktu yang panjang. Studi semacam ini jarang dilakukan dan sangat penting untuk memahami dinamika seismik yang lebih stabil dan akurat. Kedua, fokus penelitian ini pada Laut Flores, yang sering kali kurang mendapat perhatian dibandingkan wilayah-wilayah lain di Indonesia yang lebih sering dilaporkan mengalami gempa besar, mengisi kekosongan data dan analisis khusus untuk wilayah tersebut. Ketiga, dengan memusatkan analisis pada nilai frekuensi dan magnitudo gempa bumi, penelitian ini membantu mengidentifikasi hubungan antara kedua parameter tersebut di wilayah Laut Flores, yang dapat memberikan gambaran lebih lengkap tentang risiko seismik. Keempat, hasil analisis ini memiliki implikasi langsung untuk perencanaan mitigasi bencana. Memahami pola gempa bumi di Laut Flores memungkinkan pihak berwenang merancang strategi peringatan dini dan mengembangkan infrastruktur yang lebih tahan gempa, sehingga meningkatkan keselamatan dan perlindungan masyarakat. Kelima, data yang diperoleh dari penelitian ini sangat berguna untuk pengembangan bangunan dan infrastruktur di wilayah Laut Flores, memungkinkan arsitek dan insinyur merancang bangunan yang lebih aman dan tahan gempa. Terakhir, penelitian ini berpotensi meningkatkan sistem peringatan dini di wilayah Laut Flores. Dengan memahami pola dan frekuensi gempa bumi, sistem peringatan dini dapat menjadi lebih akurat dan efektif dalam memberikan peringatan kepada masyarakat sebelum gempa besar terjadi. Berdasarkan uraian tersebut maka penelitian ini memiliki tujuan untuk memahami aktivitas seismik gempa bumi

yang terjadi di Laut Utara Flores selama periode 30 tahun berdasarkan nilai frekuensi dan magnitudo.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data katalog gempa bumi yang tersedia dan diunduh melalui IRIS, fokus penelitian berlokasi di wilayah Laut Utara Flores. IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) adalah sebuah konsorsium nonprofit yang terdiri dari lebih dari 120 lembaga akademik dan penelitian di seluruh dunia, yang berfokus pada pengumpulan, pengelolaan, dan penyebaran data seismik. IRIS bertujuan untuk memajukan ilmu pengetahuan tentang bumi melalui pengembangan dan pemeliharaan fasilitas seismologi yang modern dan terpadu. Konsorsium ini didukung oleh *National Science Foundation* (NSF) Amerika Serikat dan berbagai lembaga pendanaan lainnya. Misi utama IRIS adalah menyediakan infrastruktur yang memungkinkan komunitas seismologi global untuk mengumpulkan data seismik berkualitas tinggi yang dapat digunakan untuk penelitian ilmiah, pendidikan, dan mitigasi bencana. Layanan dan fasilitas yang disediakan oleh IRIS meliputi *Data Management Center* (DMC) sebagai pusat penyimpanan dan distribusi data seismik, *Global Seismographic Network* (GSN) yang mengumpulkan data seismik dari seluruh dunia, dan *Portable Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere* (PASSCAL) yang menyediakan instrumen seismik portabel untuk eksperimen lapangan. IRIS juga mendukung proyek nasional *Earth Scope* dan platform berbagi perangkat lunak seismologi SeisCode. Data seismik yang dikumpulkan dapat diakses melalui layanan online seperti *Web Services*, *SeismiQuery*, dan BROWSE. Kontribusi IRIS sangat penting dalam penelitian seismik global, termasuk studi gempa bumi, struktur internal bumi, dan mitigasi bencana. Data yang dikumpulkan oleh IRIS, seperti yang digunakan dalam penelitian tentang aktivitas seismik di Laut Flores, sangat berharga untuk

analisis risiko gempa bumi dan pengembangan strategi mitigasi yang lebih efektif.

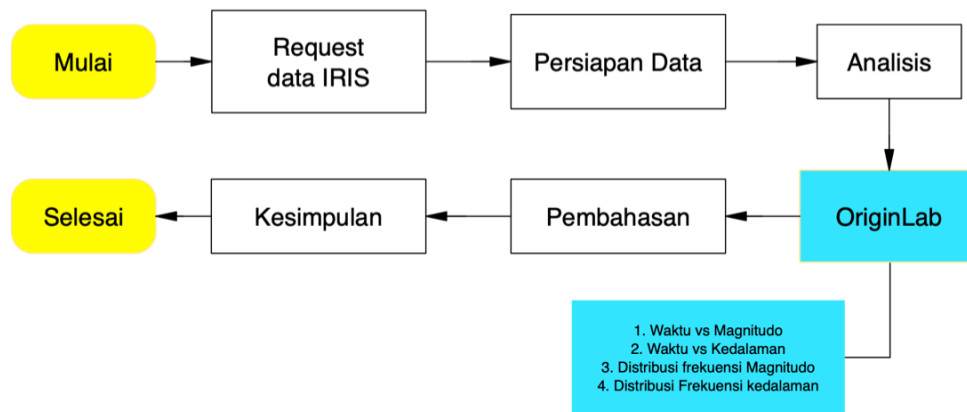
Data yang digunakan dalam penelitian mencakup periode waktu selama 30 tahun, mulai dari 12 Desember 1992 hingga 12 Desember 2022. Pada data magnitudo diberikan batas untuk magnitudo ( $M_w$ )  $>4$ , hal ini dikarenakan gempa bumi dengan nilai  $M_w >4$  dapat menimbulkan bencana (Maneno dkk, 2019). Pemilihan periode 30 tahun di mulai tahun 1992 dikarenakan fenomena tersebut merupakan fenomena yang memulai masa prainstrumental dalam bidang seismologi.

Prainstrumental adalah periode dalam studi seismologi yang merujuk pada masa sebelum adanya instrumen modern yang dapat secara akurat mencatat dan mengukur gempa bumi. Sebelum era prainstrumental, informasi tentang gempa bumi diperoleh melalui catatan sejarah, laporan saksi mata, dan analisis kerusakan yang terjadi. Dalam konteks penelitian ini, periode prainstrumental berakhir pada awal 1990-an, ketika teknologi dan jaringan seismograf modern mulai tersebar luas dan mampu merekam data seismik dengan lebih tepat dan rinci. Pemilihan periode 30 tahun mulai dari 12 Desember 1992 hingga 12 Desember 2022 untuk penelitian ini dikarenakan setelah tahun 1992, data seismik yang dihasilkan lebih akurat dan konsisten, memungkinkan analisis yang lebih komprehensif tentang aktivitas seismik. Selain itu, gempa bumi dengan magnitudo ( $M_w$ ) lebih dari 4 dipilih sebagai batasan dalam penelitian ini karena gempa dengan magnitudo tersebut memiliki potensi untuk menimbulkan bencana signifikan, sebagaimana dinyatakan oleh Maneno dan rekan-rekan pada tahun 2019. Oleh karena itu, analisis data selama periode ini memberikan gambaran yang lebih akurat tentang risiko dan karakteristik seismik di wilayah Laut Flores.

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan aplikasi OriginLab, yang memungkinkan analisis yang mendalam terhadap data gempa yang dikumpulkan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pemetaan berdasarkan aktivitas seismik dan distribusi frekuensi, memungkinkan peneliti untuk memahami pola gempa bumi di wilayah tersebut dengan lebih baik serta menganalisis perubahan frekuensi kejadian gempa selama periode yang diteliti (Shohaya dkk,

2013). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih baik tentang aktivitas gempa bumi di wilayah Laut Utara Flores selama periode yang diteliti, dan dapat menjadi landasan untuk upaya mitigasi risiko gempa bumi di wilayah tersebut. Secara lengkap alur penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas seismik di Laut Utara Flores, seperti banyak wilayah seismik lainnya di Indonesia, berkaitan dengan posisi geografis di Cincin Api Pasifik (Khusnani dkk, 2022). Wilayah ini terletak di persimpangan antara beberapa lempeng tektonik besar, termasuk Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Ketika lempeng-lempeng ini bersentuhan dan bergerak, tekanan dan energi terakumulasi di zona-zona subduksi dan perbatasan lempeng (Jufriansah dkk, 2023). Hal ini sering mengakibatkan gempa bumi yang signifikan (Jufriansah dkk, 2023). Distribusi aktivitas seismik di Laut Flores memiliki dampak signifikan pada kerentanan wilayah tersebut terhadap bencana alam.

Sebaran aktivitas seismik di wilayah Laut Flores selama 30 tahun terakhir, berdasarkan besarnya, ditunjukkan pada Gambar 2a. Temuan analisis menunjukkan wilayah tersebut memiliki empat puncak gempa dengan magnitudo lebih besar dari 7. Gempa berkekuatan 7,4 terjadi pada tahun 1992, berkekuatan 7,7 pada tahun 1996, berkekuatan 7 pada tahun 2015, dan

berkekuatan 7,3 pada tahun 2021. Terjadinya empat gempa dengan magnitudo lebih dari 7 di wilayah Laut Flores antara tahun 1992 hingga 2021 dapat dijelaskan melalui analisis geologis dan tektonik wilayah tersebut. Laut Flores terletak di zona tektonik yang sangat aktif, di mana Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan berbagai mikrolempeng lokal bertemu dan berinteraksi. Interaksi antara lempeng-lempeng ini menghasilkan stres tektonik yang signifikan di kerak bumi, yang kemudian dilepaskan melalui aktivitas seismik.

Gempa dengan magnitudo besar sering terjadi di wilayah dengan konvergensi lempeng yang tinggi, seperti yang ditemukan di Laut Flores. Pada tahun 1992, gempa berkekuatan 7,4 terjadi akibat pergerakan sesar naik di zona subduksi, yang juga memicu tsunami. Gempa berkekuatan 7,7 pada tahun 1996 mungkin disebabkan oleh mekanisme serupa, di mana akumulasi stres di zona subduksi mencapai titik kritis dan dilepaskan melalui gempa besar. Pada tahun 2015, gempa berkekuatan 7 disebabkan oleh aktivitas sesar lokal yang masih terkait dengan dinamika tektonik regional. Gempa

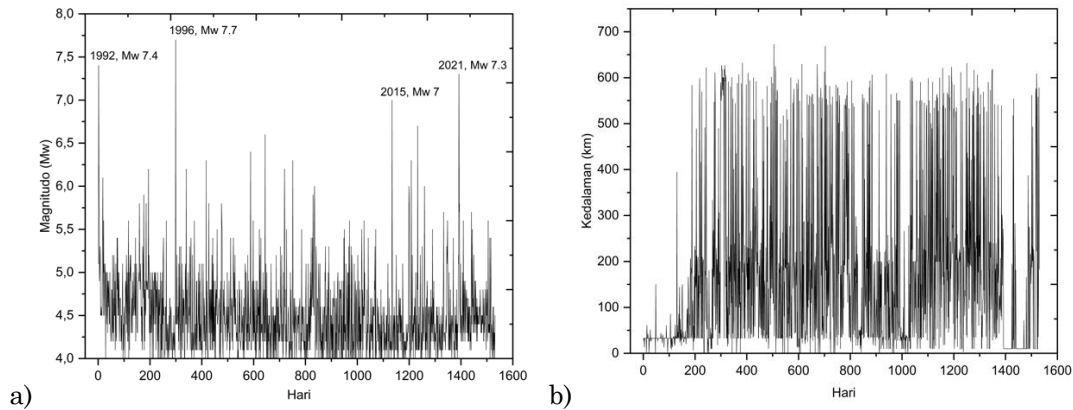
berkekuatan 7,3 pada tahun 2021, yang juga memicu tsunami, merupakan hasil dari pergeseran sesar yang signifikan di zona yang sama.

Secara umum, frekuensi gempa besar di Laut Flores mencerminkan akumulasi dan pelepasan energi tektonik yang cepat di wilayah konvergen ini. Variasi dalam kedalaman, jenis patahan, dan kondisi geologis lokal juga berkontribusi terhadap potensi terjadinya gempa dengan magnitudo besar. Dua dari empat peristiwa ini yang terjadi pada tahun 1992 dan 2021 memiliki kapasitas untuk memicu tsunami. Berdasarkan temuan penelitian sebelumnya, menjelaskan bahwa gempa bumi yang terjadi berada di wilayah Laut Flores di mana ini berhubungan dengan *Flores back-arc thrust fault*, di mana fenomena ini dapat menjadi permasalahan besar bagi wilayah Flores, khususnya di wilayah pesisir utara (Khusnani dkk, 2022). Namun pola aktivitas seismik menurut kedalaman terlihat pada Gambar 2b. Temuan analisis yang menunjukkan bahwa kedalaman gempa secara umum tetap konsisten selama tiga puluh tahun pengamatan di wilayah Laut Flores memiliki implikasi penting terhadap sebaran dan karakteristik aktivitas seismik di wilayah tersebut. Kedalaman gempa yang konsisten biasanya menunjukkan bahwa gempa-gempa tersebut terjadi pada zona patahan yang sama atau pada lapisan kerak bumi yang sama secara geologis. Di Laut Flores, kedalaman gempa yang konsisten dapat dikaitkan dengan aktivitas di zona subduksi atau di sesar-sesar utama yang berada di bawah laut.

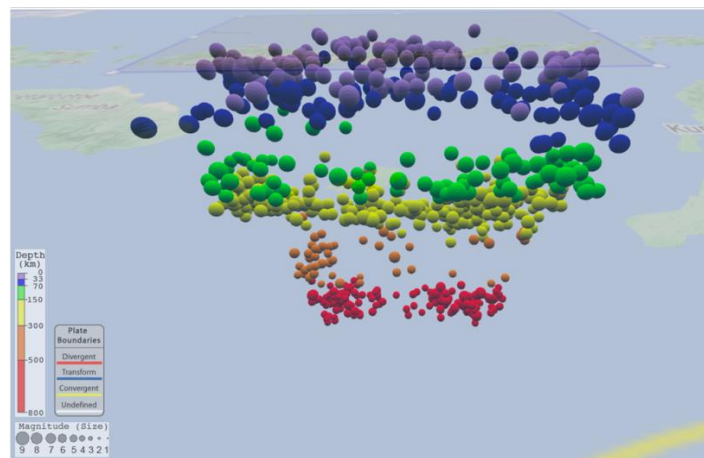
Relasi antara kedalaman gempa yang konsisten dan sebaran gempa dapat dijelaskan melalui mekanisme tektonik di

wilayah tersebut. Kedalaman gempa yang konsisten menunjukkan bahwa akumulasi stres dan pelepasan energi terjadi pada kedalaman tertentu di kerak bumi, yang sering kali terkait dengan zona subduksi di mana satu lempeng tektonik masuk di bawah lempeng lainnya. Di wilayah Laut Flores, subduksi lempeng Indo-Australia di bawah lempeng Eurasia menghasilkan gempa pada kedalaman menengah hingga dalam, biasanya berkisar antara 70 hingga 300 kilometer.

Sebaran gempa yang terjadi pada kedalaman yang konsisten mencerminkan stabilitas relatif dalam dinamika tektonik di wilayah tersebut. Ini berarti bahwa meskipun gempa terjadi dengan magnitudo bervariasi, sumber energinya tetap berada di kedalaman yang sama, di mana menunjukkan adanya pola deformasi yang stabil di zona subduksi. Selain itu, konsistensi pada kedalaman gempa juga memberikan petunjuk tentang sifat material dan struktur geologi di wilayah tersebut, di mana lapisan yang lebih dalam mungkin memiliki kekuatan dan komposisi yang serupa, memungkinkan akumulasi stres yang seragam. Di sisi lain, pola sebaran gempa yang bergantung pada kedalaman menjadi terlihat ketika kita melihat keseluruhan pemandangan dalam tiga dimensi, seperti digambarkan pada Gambar 3. Mayoritas gempa bumi, menurut data, cenderung terjadi pada kedalaman dangkal sampai dalam. Sebaran variasi kedalaman gempa bumi di wilayah Flores mencerminkan proses subduksi lempeng yang terjadi di daerah tersebut (Minarto dkk, 2021). Hal ini dapat dimungkinkan terjadi karena adanya faktor seperti sudut kemiringan lempeng, sifat batuan, dan tekanan di zona subduksi (Zhao dkk, 2023).



**Gambar 2. a. Sebaran Gempa Bumi Berdasarkan Waktu Kejadian dan Magnitudo; dan b. Sebaran Gempa Bumi Berdasarkan Waktu Kejadian dan Kedalaman**



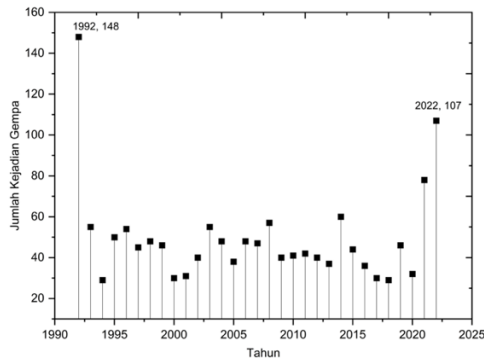
**Gambar 3. Sebaran Gempa Bumi Berdasarkan Kedalaman dalam Bentuk 3D**

Gempa bumi dengan magnitudo (Mw) lebih besar dari 7 yang tercatat terjadi di wilayah Flores sebelum tahun 1992 memiliki sedikit data rekaman yang tersedia (Kânođlu dkk, 2019, 2020; Khusnani dkk, 2023). Selama periode 30 tahun, jumlah kejadian gempa bumi setiap tahun diilustrasikan dalam Gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa jumlah gempa bumi pada tahun 1992 mencapai 148 kejadian, sementara pada tahun 2022 tercatat sebanyak 107 kejadian. Dalam rentang waktu antara tahun 1992 dan 2022, jumlah kejadian gempa bumi berkisar antara 29 hingga 78 kejadian. Kenaikan signifikan dalam jumlah kejadian gempa bumi pada tahun 1992 dan 2022 disebabkan oleh adanya gempa susulan yang mengikuti gempa besar dengan magnitudo 7.9 pada tahun 1992 dan magnitudo 7.3 pada tahun 2022 (Jufriansah dkk, 2023; Supendi dkk, 2022). Fenomena ini menggambarkan

tingginya aktivitas seismik di zona tektonik Laut Flores dan kuatnya korelasi antara gempa-gempa tersebut dengan rangkaian kejadian gempa di wilayah ini.

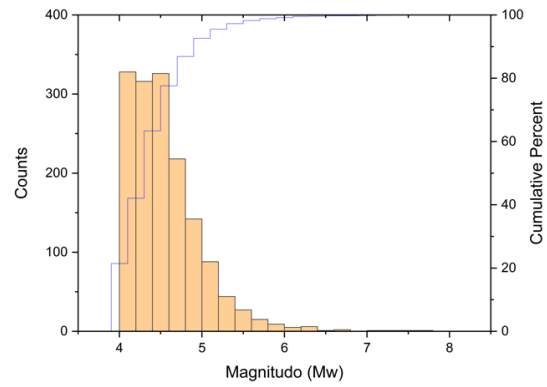
Rangkaian gempa yang terjadi saat ini masih memiliki potensi untuk mengalami gempa susulan, yang membuat estimasi tren seismik dalam periode waktu yang akan datang sangat penting untuk kondisi patahan di wilayah tersebut. Salah satu metode yang sering digunakan untuk memprediksi tren seismik adalah analisis statistik waktu kejadian gempa bumi, seperti model Poisson dan model waktu pemulihan. Model Poisson mengasumsikan bahwa gempa bumi terjadi secara acak dalam waktu, dengan frekuensi kejadian yang dapat diestimasi berdasarkan data historis (Gerstenberger et al., 2020; Salditch et al., 2020). Sementara itu, model waktu pemulihan, atau *time-to-failure model*, memprediksi gempa bumi besar berdasarkan akumulasi stres di patahan

yang dihasilkan oleh gempa-gempa kecil sebelumnya. Metode ini mempertimbangkan interaksi kompleks antara berbagai segmen patahan dan dampak gempa susulan terhadap peningkatan stres di wilayah sekitarnya (Kato & Ben-Zion, 2021; Segall et al., 2024). Model ini sangat berguna untuk memprediksi aktivitas seismik jangka pendek dan menengah, serta untuk memahami dinamika patahan dalam konteks gempa susulan.



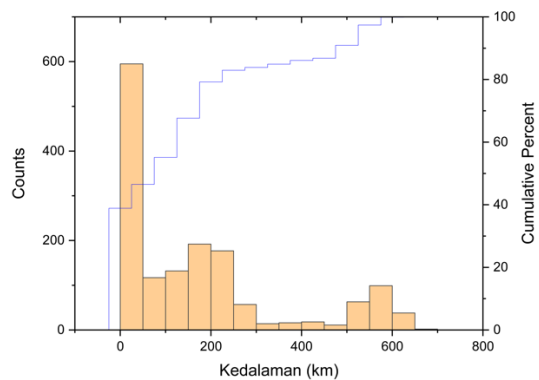
**Gambar 4. Jumlah Kejadian Gempa Bumi Selama Periode 30 Tahun dengan  $M_w > 4$**

Distribusi frekuensi aktivitas seismik digambarkan dalam sebaran frekuensi gempa berdasarkan besaran magnitudo dan kedalaman yang ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Distribusi ini akan memberikan informasi tentang karakteristik seismik di wilayah Laut Flores. Pada Gambar 5 merupakan distribusi frekuensi magnitudo yang menunjukkan bahwa sebagian besar data berada di skala 4 dan 5. Ini berarti bahwa sebagian besar magnitudo yang terukur memiliki kekuatan yang relatif rendah. Namun, ada beberapa data yang berada di skala 6 dan 7, yang berarti bahwa beberapa magnitudo memiliki kekuatan yang tinggi. Garis hitam di grafik menunjukkan kumulatif persentase. Garis ini mencerminkan bahwa 20% dari data berada pada magnitudo 4 atau di bawahnya, sementara 80% dari data berada pada magnitudo 5 atau di bawahnya, memberikan gambaran lebih terinci mengenai sebaran magnitudo gempa di wilayah Laut Flores.



**Gambar 5. Distribusi Frekuensi Magnitudo**

Gambar 6 merupakan distribusi frekuensi kedalaman gempa bumi. Grafik ini menunjukkan bahwa sebagian besar sampel berada pada kedalaman antara 0 dan 200 km. Ini menunjukkan bahwa gempa bumi yang terjadi merupakan gempa bumi dangkal. Namun terdapat juga gempa bumi yang memiliki nilai kedalaman yang lebih dalam di atas 600 km. Garis hitam pada grafik mencerminkan kumulatif persentase data. Garis tersebut menunjukkan bahwa 20% dari gempa bumi berada pada kedalaman 0 km atau lebih dangkal, sementara 40% dari sampel berada pada kedalaman 200 km atau lebih dangkal. Data ini memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai sebaran kedalaman gempa bumi di wilayah Laut Flores.



**Gambar 6. Distribusi Frekuensi Kedalaman Gempa Bumi**

Penelitian Hutchings dan Mooney (2021) yang mengkategorikan jenis gempa berdasarkan kedalaman menjadi dasar analisis. Gempa tersebut diklasifikasikan menjadi gempa dalam dengan hiposenter

lebih besar dari 300 km, gempa sedang dengan hiposenter antara 70 hingga 300 km, dan gempa dangkal dengan hiposenter kurang dari 70 km. Menurut sejumlah sumber kisaran gempa dangkal dapat meluas hingga kedalaman 100 km (Kiser dkk, 2011; Tocheport dkk, 2007).

Hasil ini menunjukkan adanya hubungan periode gempa bumi selama 30 tahun di Flores, yang mencakup gempa dengan magnitudo  $>4$ , menggambarkan adanya aktivitas seismik yang berkelanjutan di wilayah tersebut. Pola distribusi gempa selama periode waktu ini memberikan wawasan tentang seberapa aktif lempeng tektonik di daerah tersebut, serta risiko gempa bumi yang mungkin terjadi di masa depan. Jufriansah dkk., (Jufriansah dkk, 2023a; Jufriansah dkk, 2023b) telah meneliti sumber gempa di Pulau Flores. Dari temuan penelitian diketahui bahwa sesar normal yang mendominasi wilayah ini. Maneno dkk (Maneno et al., 2019) memberikan klarifikasi, dengan menyatakan bahwa gempa dalam yang terhubung dengan *Flores Thrust Zone* mendominasi hiposenter gempa di wilayah Utara Flores. Guncangan yang berkisar dari dangkal hingga sedang sebagian besar terjadi di wilayah utara. Ruang lingkup studi gempa bumi Flores sampai saat ini terbatas pada pemetaan gempa dan relokasi. Kurnio dkk., (Kurnio et al., 2019) hanya memberikan gambaran umum tentang tanah longsor di bawah air, termasuk salah satu peristiwa tersebut yang menjadi katalis terjadinya gempa bumi Laut Flores tahun 1992. Pranantyo dkk (2021) dan Pranantyo & Cummins (2019) telah memberikan penjelasan mengenai permasalahan yang sama dengan mengacu pada bahaya seismik dan non-seismik di Indonesia, khususnya di wilayah timur. Bahaya seismik kemudian dijelaskan oleh Aprianti dkk (2019), khususnya di wilayah Laut Flores yang telah terjadi tujuh kali gempa bumi penting. Menurut Supendi dkk (2022), studi gempa memberikan rincian baru mengenai bahaya seismik dan proses seismogenik di Indonesia, termasuk lokasi patahan aktif yang baru-baru ini terjadi di

Laut Flores yang terjadi pada 14 Desember 2021.

## SIMPULAN

Aktivitas seismik di Laut Utara Flores, seperti banyak wilayah seismis di Indonesia, dipengaruhi oleh posisi geografisnya di Cincin Api Pasifik. Wilayah ini terletak pada persimpangan beberapa lempeng tektonik besar, termasuk Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Ketika lempeng-lempeng ini berinteraksi dan bergerak, tekanan dan energi terakumulasi di zona-zona subduksi dan perbatasan lempeng, yang sering mengakibatkan gempa bumi yang signifikan. Distribusi aktivitas seismik di Laut Flores memiliki dampak besar pada kerentanan wilayah ini terhadap bencana alam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama periode 30 tahun di Flores, terdapat empat puncak gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 7, terjadi pada tahun 1992, 1996, 2015, dan 2021. Gempa-gempa tersebut, terutama yang terjadi pada tahun 1992 dan 2021, memiliki potensi besar untuk menimbulkan tsunami dan dampak berbahaya terutama pada wilayah pesisir. Dalam analisis distribusi gempa berdasarkan magnitudo, sebagian besar gempa memiliki magnitudo relatif rendah (skala 4 dan 5), meskipun terdapat beberapa kejadian dengan magnitudo tinggi (skala 6 dan 7). Distribusi gempa berdasarkan kedalaman menunjukkan bahwa sebagian besar gempa bumi Laut Flores diklasifikasikan dalam gempa bumi dangkal, meskipun ada beberapa yang terjadi pada kedalaman yang lebih besar. Studi ini menunjukkan adanya hubungan antara periode gempa bumi selama 30 tahun di Flores dan aktivitas seismik yang berkelanjutan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian melalui Skema Hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun 2023.



## REFERENSI

- Aprianti, A., Jufriansah, A., Donuata, B., Khusnani, A., & Ayuba, J. (2019). Comparison of K-Means Algorithm and DBSCAN on Aftershock Activity in the Flores Sea: Seismic. *Journal of Novel Engineering Science and Technology*, 2(3), 77–82. <https://doi.org/10.56741/jnest.v2i03.393>
- Beckers, J., & Lay, T. (1995). Very broadband seismic analysis of the 1992 Flores, Indonesia, earthquake (Mw = 7.9). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9), 18179–18193. <https://doi.org/10.1029/95JB01689>
- Fujii, Y., & Sinki, K. P. (2021). *Numerical Simulations of the 1992 Flores Tsunami Using Earthquake Fault and Landslide Models*.
- Gerstenberger, M. C., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., Danciu, L., Field, E. H., Fujiwara, H., Luco, N., Ma, K. -F., Meletti, C., & Petersen, M. D. (2020). Probabilistic Seismic Hazard Analysis at Regional and National Scales: State of the Art and Future Challenges. *Reviews of Geophysics*, 58(2). <https://doi.org/10.1029/2019RG000653>
- Goes, S., Ruff, L., & Winslow, N. (1997). The Complex Rupture Process of the 1996 Deep Flores, Indonesia Earthquake (Mw 7.9) from Teleseismic P-waves. *Geophysical Research Letters*, 24(11), 1295–1298. <https://doi.org/10.1029/97GL01245>
- Handayani, L. (2020). Seismic Hazard Analysis of Maumere, Flores: a Review of the Earthquake Sources. *Proceedings of the Proceedings of the 7th Mathematics, Science, and Computer Science Education International Seminar, MSCEIS 2019, 12 October 2019, Bandung, West Java, Indonesia*. <https://doi.org/10.4108/eai.12-10-2019.2296247>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Jufriansah, A., Khusnani, A., Pramudya, Y., & Afriyanto, M. (2023). Comparison of aftershock behavior of the flores sea 12 december 1992 and 14 december 2021. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 7(1), 65-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.20961/jphystheor-appl.v7i1.71609>
- Jufriansah, A., Khusnani, A., Pramudya, Y., Afriyanto, M., History, A., Jufriansah, A., Khusnani, A., Pramudya, Y., & Afriyanto, M. (2023). Estimation of Flores Sea Aftershock Rupture Data Based on AI. *Indones. Rev. Phys*, 6(1), 46–56. <https://doi.org/10.12928/irip.v6i1.6705>
- Julius, A. M., & Daryono. (2021). Overview of 1990s deadly tsunamis in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 331, 07001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133107001>
- Kânoğlu, U., Tanioka, Y., Okal, E. A., Baptista, M. A., & Rabinovich, A. B. (2019). Introduction to “Twenty Five Years of Modern Tsunami Science Following the 1992 Nicaragua and Flores Island Tsunamis, Volume I.” *Pure and Applied Geophysics*, 176(7), 2757–2769. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02266-5>
- Kânoğlu, U., Tanioka, Y., Okal, E. A., Baptista, M. A., & Rabinovich, A. B. (2020). Introduction to “Twenty Five Years of Modern Tsunami Science Following the 1992 Nicaragua and Flores Island Tsunamis, Volume II.”

- Pure and Applied Geophysics*, 177(3), 1183–1191.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-020-02451-x>
- Kato, A., & Ben-Zion, Y. (2021). The generation of large earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 160–160.  
<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00145-z>
- Khusnani, A., Husein, R., Jufriansah, A., Welly Jenni Thalo, O., Dewi Rahmawati, K., Fitri, M., & Aurora Adina, C. (2023). Identification of Understanding of Disaster Preparedness in the School Environment. *Indonesian Journal on Learning and Advanced Education*, 5(3), 233–248.  
<https://doi.org/10.23917/ijolae.v5i3.22974>
- Khusnani, A., Jufriansah, A., & Afriyanto, M. (2022). Utilization of Seismic Data as a Tsunami Vulnerability Review. *Indonesian Review of Physics*, 5(2), 66–72.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.12928/irip.v5i2.6706>
- Khusnani, A., Jufriansah, A., Welly, O., & Thalo, J. (2023). Tsunami event in Flores: literature review. *Journal of Physics: Theories and Applications J. Phys.: Theor. Appl.*, 7(2), 139–151.  
<https://doi.org/10.20961/jphystheor-appl.v7i2.74625>
- Kim, K. O., Kim, D. C., Yuk, J. H., Pelinovsky, E., & Choi, B. H. (2015). Extreme Tsunami Inundation at Babi Island due to Flores Earthquake Induced Tsunami in 1992. *Ocean and Polar Research*, 37(2), 91–105.  
<https://doi.org/10.4217/OPR.2015.37.2.091>
- Kiser, E., Ishii, M., Langmuir, C. H., Shearer, P. M., & Hirose, H. (2011). Insights into the mechanism of intermediate-depth earthquakes from source properties as imaged by back projection of multiple seismic phases. *Journal of Geophysical Research*, 116(B6), B06310.  
<https://doi.org/10.1029/2010JB007831>
- Kurnio, H., Naibaho, T., & Purwanto, C. (2019). Review of Submarine Landslides in the Eastern Indonesia Region. *Bulletin of the Marine Geology*, 34(2), 63–76.  
<https://doi.org/10.32693/bomg.34.2.2019.618>
- Maneno, R., Sentosa, B. J., & Rachman, G. (2019). Relocation Of Earthquake Hypocenter In The Flores Region Using Hypo71. *IPTEK The Journal of Engineering*, 5(2).  
<https://doi.org/10.12962/j23378557.v5i2.a5024>
- Minarto, E., Santosa, B. J., Faridawati, Azhari, N. Y., Widihartanti, T., & Titi, Y. L. A. (2021). Regional Bouguer anomaly gravity data: 3-D modelling of subsurface structures of the Flores and Timor earthquake risk area. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012017>
- Minoura, K., Imamura, F., Takahashi, T., & Shuto, N. (1997). Sequence of Sedimentation Processes caused by the 1992 Flores Tsunami: Evidence from Babi Island. *Geology*, 25(6), 523–526. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0523:SOSPCB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0523:SOSPCB>2.3.CO;2)
- Pranantyo, I. R., & Cummins, P. R. (2019). Multi-Data-Type Source Estimation for the 1992 Flores Earthquake and Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 176(7), 2969–2983.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-018-2078-4>

- Pranantyo, I. R., & Cummins, P. R. (2020). The 1674 Ambon Tsunami: Extreme Run-Up Caused by an Earthquake-Triggered Landslide. *Pure and Applied Geophysics*, 177(3), 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02390-2>
- Pranantyo, I. R., Heidarzadeh, M., & Cummins, P. R. (2021). Complex tsunami hazards in eastern Indonesia from seismic and non-seismic sources: Deterministic modelling based on historical and modern data. *Geoscience Letters*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00190-y>
- Salditch, L., Stein, S., Neely, J., Spencer, B. D., Brooks, E. M., Agnon, A., & Liu, M. (2020). Earthquake supercycles and Long-Term Fault Memory. *Tectonophysics*, 774, 228289. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228289>
- Sasmi, A. T., Nugraha, A. D., Muzli, M., Widiyantoro, S., Zulfakriza, Z., Wei, S., Sahara, D. P., Riyanto, A., Puspito, N. T., Priyono, A., Greenfield, T., Afif, H., Supendi, P., Daryono, D., Ardianto, A., Syahbana, D. K., Husni, Y. M., Prabowo, B. S., & Narotama Sarjan, A. F. (2020). Hypocenter and Magnitude Analysis of Aftershocks of the 2018 Lombok, Indonesia, Earthquakes Using Local Seismographic Networks. *Seismological Research Letters*, 91(4), 2152–2162. <https://doi.org/10.1785/0220190348>
- Satake, K., Bourgeois, J., Abe, K., Abe, K., Tsuji, Y., Imamura, F., Lio, Y., Katao, H., Noguera, E., & Estrada, F. (1993). Tsunami field survey of the 1992 Nicaragua earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 74(13), 145–157. <https://doi.org/10.1029/93EO00271>
- Segall, P., Matthews, M. V., Shelly, D. R., Wang, T. A., & Anderson, K. R. (2024). Stress-driven recurrence and precursory moment-rate surge in caldera collapse earthquakes. *Nature Geoscience*, 17(3), 264–269. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01372-3>
- Shohaya, J. N., Chasanah, U., Mutiarani, A., P, L. W., & Madlazim, M. (2013). Survey dan Analisis Seismisitas Wilayah Jawa Timur Berdasarkan Data Gempa Bumi Periode 1999-2013 sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 3(2). <http://www.iris.edu/SeismiQuery/sq-events.htm>
- Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Widiyantoro, S., Simanjuntak, A., Palgunadi, K. H., Kurniawan, A., Marliyani, G. I., Nugraha, A. D., Daryono, D., Anugrah, S. D., Fatchurochman, I., Gunawan, M. T., Sadly, M., Adi, S. P., Karnawati, D., & Arimuko, A. (2022). The Kalaotoa Fault: A Newly Identified Fault that Generated the Mw 7.3 Flores Sea Earthquake. *The Seismic Record*, 2(3), 176–185. <https://doi.org/10.1785/0320220015>
- Tocheport, A., Rivera, L., & Chevrot, S. (2007). A systematic study of source time functions and moment tensors of intermediate and deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7). <https://doi.org/10.1029/2006JB004534>
- Wibowo, N. B., & Sembri, J. N. (2017). Analisis Seismisitas dan Energi Gempabumi di Kawasan Jalur Sesar Opak-Oyo Yogyakarta. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 7(2), 2089–2133.
- Wiens, D. A., & Louis, S. (1998). Source and Aftershock Properties of the 1996

- Flores Sea Deep Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 25(6), 781–784.
- Yang, X., Singh, S. C., & Tripathi, A. (2020). Did the Flores backarc thrust rupture offshore during the 2018 Lombok earthquake sequence in Indonesia? *Geophysical Journal International*, 221(2), 758–768. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa018>
- Zhao, D., Wang, J., Huang, Z., Liu, X., & Wang, Z. (2023). Seismic anisotropy and geodynamics of the East Japan subduction zone. *Journal of Geodynamics*, 156, 101975. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101975>