

Artikel

TATANAN TEKTONIK DAN IMPLIKASI KEGEMPAAN DI WILAYAH NUSA TENGGARA TIMUR DAN SEKITARNYA

(Suatu Kajian Awal-Preliminary Study)

JAYA MURJAYA

Perekayasa Ahli Utama Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

ABSTRAK

Wilayah pesisir Nusa Tenggara Timur (NTT) merupakan zona rawan gempabumi dan tsunami. Hal ini sebagai konsekuensi tatanan tektonik subduksi lempeng Indo-Australia dan Eurasia di selatan dan adanya gerak balik Flores back arc thrust (FBT) di utara NTT. ini mempelajari tatanan tektonik dan implikasi kegempaan Tulisan serta mengkelompokan zona potensi tsunami di wilayah NTT. Hasil analisis kualitatifkuantitatif hubungan tektonik dan bencana kegempaan sebagai bagian upaya mitigasi bencana gempabumi di wilayah NTT. Estimasi ketebalan slab yang menunjam berdasarkan sebaran epicenter pada bidang vertikal mencapai kedalaman hampir 700 km. Besarnya gaya lateral tektonik per satuan panjang berorde 10¹³ N/m, dan nilai b rata-rata 0.72-1.6. Waktu perulangan (recurrence time-RT) gempabumi outer rise di selatan NTT dengan Maximum Credible Earthquake (MCE) 8.3 (normal fault) dengan slip rate 50-70 mm/tahun, diperkirakan RT berkisar antara 150-220 tahun. Untuk gempabumi FBT dengan MCE 7.8 (thrust fault) dan slip rate 11.6 mm/tahun diperkirakan RT berkisar 320 tahun. Sedangkan gempabumi 14 Desember 2021 di utara zona FBT Mw 7.3 (strike slip fault) dengan asumsi slip ratenya 11.6 mm/tahun, diperkirakan RT sekitar 182 tahun. Hasil studi awal ini diharapkan menjadi salah satu masukan dalam perencanaan tataruang jangka panjang sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana gempabumi di wilayah NTT.

LATAR BELAKANG

Secara tektonik wilayah kepulauan Indonesia termasuk pinggiran aktif menumpu (active convergence margins) dengan letak tatanannya sebagai pertemuan tiga lempeng tektonik yang saling menumpu (triple junction) antara lempeng Eurasia yang relatif bergerak ke tenggara, lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara dan lempeng Pasifik yang bergerak ke barat. Keadaan ini menyebabkan adanya zona-zona lemah peka getaran (seismic zones) di sebagian besar wilayah Indonesia. Lajur zona sesar tarikan terdapat di daratan maupun di sebagian besar lautan wilayah Indonenesia. Tatanan tektonik yang membentuk lajur-lajur zona lemah berupa lajur tunjaman (subduction zones), lajur sesar tegak membuka (transtensional zones) dan lajur sesar naik atau sungkup (thrust zones) di sebagian besar wilayah Indonesia (Simanjuntak, 1994). Lajur zona lemah ini dicirikan adanya pergeseran kerak bumi yang memnimbulkan gempabumi tektonik. Berdasarkan tatanan tektonik yang demikian itu, di selatan Jawa-Nusa Tenggara yang merupakan zona subduksi dengan kecepatan relatif 5-7 cm/tahun (Bock et al, 2000) dan dalam peta ITRF tim *Geodysea* tahu 1994-1996 memperlihatkan kecepatan relatif gerakan lempeng Indo-Australia terhadap Eurasia sekitar 7.5 cm/tahun. Zona tekukan subduksi di sebelah timur pulau Timor lebih kompleks tatanan tektoniknya sebagai pembangkit gempabumi dangkal sampai dalam dengan kekuatan besar yang dapat memicu tsunami. Diantara gempabumi besar dengan pusat di zona selatan Nusa Tenggara yang memicu tsunami adalah gempabumi tanggal 19 Agustus 1977 dengan Mw 8.3 dengan kedalaman sumber (h) 25 km dan gempabumi Flores tanggal 12 Desember 1992 dengan Mw 7.8 pada segmen zona jalur patahan busur belakang (*Back arc thrust*) di utara Nusa Tenggara.

Gambar 1 merupakan peta seismisitas gempabumi kuat $M \ge 7.0$ di wilayah NTT. Tampak pada zona patahan busur belakang Flores yang menerus sampai sebelah timur pulau Timor telah membangkitkan beberapa kali gempabumi kuat dangkal (lingkaran Merah) yang disinyalir akibat dari aktivitas patahan busur belakang Flores. Gempabumi kedalaman menengah (lingkaran kuning) di sepanjang patahan busur belakang Flores dan gempabumi dalam (lingkaran hijau) di utaranya di sebabkan oleh subduksi lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif ke utara. Selain itu terdapat gempabumi besar M > 7 terjadi pada zona pensesaran dangkal di utara *back-arc thrusting* diantaranya gempabumi yang terjadi tanggal 14 Desember 2021 dengan Mw 7.3 (h 15.1 km) (USGS dan BMKG, 2021). Gempabumi ini menimbulkan beberapa kerusakan bangunan di wilayah pulau Selayar dan beberapa tempat di utara pulau Flores. Gempabumi besar M >7 lainnya pernah terjadi pada wilayah ini pada tanggal 03 Maret 1927 dengan M 7.1 (h = 15 km, USGS). Gempabumi diperkirakan lokasi episenternya kurang lebih berjarak sekitar 100 km lokasi episenter gampabumi 14 Desember 2021. Gempabumi pada zona utara Flores back-arc thrusting ini walaupun tidak berpotensi tsunami, tetap harus diwaspadai karena mempunyai magnitude cukup besar sehingga dapat menimbulkan kerusakan bangunan. Oleh karena itu untuk program mitigasi resiko bencana gempabumi tetap harus di perhitungkan di masa depan.



Gambar 1: Peta seismisitas gempabumi besar $M \ge 7.0$ di wilayah Nusa Tenggara Timur. Lingkaran berwarna menunjukan kedalaman sumber gempabumi.

Dengan melihat dari tatanan tektonik yang kompleks maka wilayah Nusa Tenggara (Timur) merupakan zona rawan gempabumi kuat dan berpotensi memicu terjadinya tsunami. Selain itu adanya sesar-sesar aktif dan merefer data-data kegempaan masa lalu di wilayah NTT maka sangat mungkin atau mempunyai potensi untuk terjadinya perulangan kegempaan (earthquake recurrence) di zona selatan dan utara NTT ini. Waktu perulangan (Recurrence time) gempabumi merupakan salah satu parameter kunci untuk menaksir resiko bencana gempabumi, hanya sampai saat ini gempabumi belum bisa di prediksi secara eksak. Oleh karena itu perlunya kajian-kajian potensi dampak yang mungkin dapat ditimbulkan oleh gempabumi di masa datang. Kajian-kajian tersebut diantaranya memprediksi tingkat guncangan (intensitas) gempabumi, percepatan tanah maksimum (Peak Ground Accelaration-PGA), kecepatan tanah maksimum (Peak Ground Velocity-PGV), pembuatan estimasi waktu ulang gempabumi dengan model dinamik dari deformasi kerakbumi dan termasuk mempelajari tatanan tektonik serta geodinamikanya. Diharapkan dengan memiliki dan memahami pengetahuan tektonik aktif yang baik suatu wilayah, akan lebih mudah memahami potensi bencana kegempaan yang mungkin akan terulang di masa datang sehingga dapat dijadikan sebagai suatu upaya mitigasi bencana gempabumi. Hasil analisis kuantitatif dan kualitatif dari kajian awal dalam artikel ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran umum dan sebagai pengetahuan bahan kajian lanjut yang mungkin bisa dijadikan salah satu pertimbangan untuk mendukung perencanaan tataruang atau *landscape* jangka panjang (*longterm*).

DATA DAN METODE

Data gempabumi yang digunakan pada analisis kajian ini adalah data sekunder gempabumi tahun 1964 sampai tahun 2008 dari *International Institute of Seismologi and Earthquake Engineering* (IISEE, 2010) Tsukuba Japan, Katalog Gempabumi 1900-2019 (BMKG, USGS 2020). Sedangkan data *slip rate* untuk sesar-sesar aktif di wilayah NTT digunakan data dari Buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Pusgen, 2017). Untuk menganalisis suatu tektonik aktif suatu wilayah dapat mempelajari dari aktivitas sesar yang terdapat pada wilayah tersebut, data geologi, analisis morfologi dan morfometri, dan data kegempaannya. Metode yang digunakan pada penelitian artikel ini adalah deskriptif, kualitatif dan kuantitatif dari hubungan tektonik aktif dan data kegempaannya di wilayah NTT.

TEORI

Gaya Lateral Tektonik. Analisis mekanisme sumber (*mechanism focal*) hanya dapat mengetahui sifat-sifat gaya penyebab gempabumi yaitu gaya yang bersifat menekan (*compresion*) dan atau gaya yang bersifat tarikan (*tensional*). Ada beberapa macam gaya yang mempengaruhi proses penunjaman lempeng, yaitu gerakan mantel, gerakan tumbukan antar lempeng, interaksi lempeng yang relatif bergerak terhadap mantel, dan perubahan suhu dan rapat massa lempeng. Faktor-faktor tersebut yang menyebabkan terjadi gaya-gaya penggerak yang kompleks pada proses penunjaman lempeng.

Dari empiris Mohr-Coulomb, Gerbault (2000) menyebutkan bahwa gaya lateral tektonik persatuan panjang (F) merupakan integrasi dari stress yang bekerja sepanjang ketebalan elastis lempeng (*slab*) dengan sudut kehancuran θ dirumuskan sebagai:

$$F = \int_{0}^{h} \frac{\sigma_{1} - \sigma_{3}}{2} \, dy \qquad(1)$$

dimana F sebagai gaya lateral persatuan panjang (Nm⁻¹), h ketebalan elastis litosfer (km), σ_1 tekanan kompresi maksimum (Nm⁻²) dan σ_3 tekanan litostatis (Nm⁻²). Dengan diketahuinya estimasi ketebalan lempeng dan dengan menguraikan σ_1 dan σ , maka besarnya gaya lateral persatuan panjang pada persamaan (1) dapat dihitung. Ketebalan elastis litosfer digunakan pendekatan berdasarkan distribusi hiposenter pada irisan penampang vertikal (*cross section*).

Nilai b (*b value*). Gutenberg dan Richter tahun (1954) membuat hubungan logaritmik antara frekuensi dan magnitude gempabumi dalam bentuk;

Dimana N merupakan jumlah gempabumi dengan magnitude lebih besar dari M yang terjadi dalam suatu periode tertentu. Konstanta a₁ bergantung pada jumlah gempabumi di suatu tempat dalam periode tertentu dan b merupakan kemiringan atau *slope* dari hubungan tersebut. Nilai b (b *value*) secara fisis menggambarkan karakteristik suatu batuan dan bernilai sekitar 1. Sebagian peneliti banyak yang memakai bentuk kumulatif *Frequency Distribution* yaitu dengan mengintegrasikan persamaan (2). Selain itu perhitungan b value dapat digunakan dengan rumus:

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_o} = \frac{0.4343}{\bar{M} - M_o} \qquad(3)$$

dimana \overline{M} harga rata-rata magnitudo gempabumi di suatu tempat, M_o batas bawah magnitudo 4,95 jika menggunakan M \geq 5,0. Batas atas dan bawah dari harga b dihitung dengan konfidensial limit 95 % dihitung dengan rumus:

$$\bar{b} = b \left(1 + \frac{1,960}{N}\right)$$
(4a)

$$\underline{b} = b \left(1 - \frac{1,960}{N}\right)$$
(4b)

Nila a yang berhubungan dengan persamaan (4a) dan (4b) dengan rumus kumulatif *frequency distribution* untuk $M \ge 5.0$ (Soedarmo, 1978);

 $a = \log N (M) + \log (b \ln 10) + 5,0 b \dots (5)$

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. HASIL

Seismisitas. Gambar 2 merupakan sebaran spasial episenter di wilayah Nusa Tenggara dan sekitarnya berdasarkan data sumber gempabumi tahun 1964-2008. Gambar 3 merupakan diagram hubungan magnitude (M) terhadap waktu (t) terjadinya gempabumi berdasarkan data sumber gempabumi tahun 1964-2008 pada segmen irisan penampang persegi panjang yang dilalui garis A-B pada gambar 2 zona 4°-12° LS dan 121° -122° BT. Pada gambar 3 terlihat terdapat satu gempabumi besar yang memicu tsunami pada tanggal 12 Desember 1992 dengan magnitude 7,8.

1964 1/1 0: 0 -- 2008 12/31 23:59



Gambar 2: Sebaran spasial episenter di wilayah Nusa Tenggara Timur dari tahun 1964-2008. Penampang pada garis A-B akan dibuat sebaran gempabumi (seismisitas) dalam hubungan magnitude (M) dan Waktu (t) kejadiannya pada gambar 3.



Gambar 3: Seismisitas pada zona 4°-12° LS dan 121° -122° BT dalam bentuk hubungan Magnitudo (M) dan Waktu (t) kejadian gempabumi pada zona tersebut.

Gambar 4 merupakan penampang vertikal irisan penampang persegi pada zona A-B lintang 4°-12° LS dan 121° -122° BT. Penampang vertikal ini mencerminkan slab atau kerak lempeng Indo-Australia yang menyusup kebawah kerak Eurasia pada zona A-B yang dilihat berdasarkan sebaran hiposenter secara vertikal. Beerdasarkan data gempabumi tanun 1964-2008, tampak pada penampang vertikal zona A-B adanya 2 (dua) *seismic gap* pada sekitar kedalaman 400-500 km dan 650 km. Pada kedalaman sekitar 650 km slab tidak terus menunjam kebawah tetapi berbelok"datar"(*flat slab*) yang

sekaligus menunjukan adanya *seismic gap*. Untuk menerangkan fenomena ini secara fisis tidaklah sederhana, perlu cabang-cabang ilmu kebumian lainnya.



Gambar 4: Irisan penampang vertikal (A-B) arah selatan-utara gambar 2. Tampak adanya zona *seismic gap* pada kedalaman sekitar 400-500 km dan 650 km dan fenomena *flat slab*.

Harga b (*b value*) pada zona lintang 4°-12° LS dan 121° -122° BT berkisar antara 0.85-1.2 seperti terlihat pada gambar 5.



Gambar 5: Grafik b value untuk penampang zona lintang 4°-12° LS dan 121° - 122° BT. Harga b rata-rata pada zona tersebut berkisar 0.85-1.2.

Gambar 6a dan 6b merupakan distribusi Mekanisme Focal (*focal mechanism*) masingmasing secara lateral dan vertikal wilayah Nusa Tenggara Timur dan sekitarnya untuk M \geq 5.0. Gambar 6 (b) merupakan penampang vertikal irisan AB pada zona 4°-12° LS dan 121° -122° BT seperti tampak pada gambar 6(a).



Gambar 6: (a) Mekanisme sumber gempabumi (*focal mechanism*) untuk wilayah Nusa Tenggara Timur dan sekitarnya. (b) merupakan penampang vertikal irisan AB zona 4°-12° LS dan 121° -122° BT.

Dengan cara yang sama diatas (gambar 1-6), analisis kuantitatif untuk zona-zona 4°-12° LS dan 122° -123° BT, 4°-12° LS dan 123° -124° BT, 4°-12° LS dan 124° -125° BT dapat dilihat pada gambar 8, 9 dan 10 dibawah.

Seismisitas dan Penampang vetikal Zona lintang 4° - 12° LS dan bujur 122° - 123° BT











Gambar 8: a) Distribusi gempabumi di wilayah Nusa Tenggara Timur. b) Penampang vertikal irisan AB gambar 8a untuk zona 4°-12° LS dan 122° -123° BT. c) Distribusi Mekanisme focal di wilayah Nusa Tenggara Timur. d) Penampang vertikal Fokal Mekanisme irisan AB gambar 8c untuk zona 4°-12° LS dan 122° -123° BT. e) Distribusi magnitude terhadap waktu gempa dalam kotak irisan AB gambar a. f) Grafik b value zona (kotak) irisan AB gambar 8a.

Seismisitas dan Penampang vetikal Zona lintang 4° - 12° LS dan bujur 123° - 124° BT







Gambar 9: a) Distribusi Gempabumi di wilayah Nusa Tenggara Timur. b) Penampang vertikal irisan AB gambar 9 a untuk zona 4°-12° LS dan 123° -124° BT. c) Distribusi Mekanisme focal di wilayah Nusa Tenggara Timur. d) Penampang vertikal Fokal Mekanisme irisan AB gambar 9c untuk zona 4°-12° LS dan 123° -124° BT. e) Distribusi magnitude terhadap waktu gempa dalam kotak irisan AB gambar 9 a. f) Grafik b value zona (kotak) irisan AB gambar 9a.

Seismisitas dan Penampang vetikal Zona lintang 4° - 12° LS dan bujur 124° - 125° BT







10 d



Gambar 10: a) Distribusi Gempabumi di wilayah Nusa Tenggara Timur. b) Penampang vertikal irisan AB gambar 10 a untuk zona 4°-12° LS dan 124° -125° BT. c) Distribusi Mekanisme focal di wilayah Nusa Tenggara Timur. d) Penampang vertikal Fokal Mekanisme irisan AB gambar 10 c untuk zona 4°-12° LS dan 124° -125° BT. e) Distribusi magnitude terhadap waktu gempa dalam kotak irisan AB gambar 10 a. f) Grafik b value zona (kotak) irisan AB gambar 10 a.

Seismisitas dan Penampang vetikal Zona lintang 4° - 12° LS dan bujur 125° - 126° BT

Gambar 11: a) Distribusi Gempabumi di wilayah Nusa Tenggara Timur. b) Penampang vertikal irisan AB gambar 11 a untuk zona 4°-12° LS dan 125° -126° BT. c) Distribusi Mekanisme focal di wilayah Nusa Tenggara Timur. d) Penampang vertikal Fokal Mekanisme irisan AB gambar 11 c untuk zona 4°-12° LS dan 125° -126° BT. e) Distribusi magnitude terhadap waktu gempa dalam kotak irisan AB gambar 11 a. f) Grafik b value zona (kotak) irisan AB gambar 11 a.

Seismisitas dan Penampang vetikal Zona lintang 4° - 12° LS dan bujur 126° - 127° BT

12 d

Gambar 12: a) Distribusi Gempabumi di wilayah Nusa Tenggara Timur. b) Penampang vertikal irisan AB gambar 12 a untuk zona 4°-12° LS dan 126° -127° BT. c) Distribusi Mekanisme focal di wilayah Nusa Tenggara Timur. d) Penampang vertikal Fokal Mekanisme irisan AB gambar 12 c untuk zona 4°-12° LS dan 126° -127° BT. e) Distribusi magnitude terhadap waktu gempa dalam kotak irisan AB gambar 12 a. f) Grafik b value zona (kotak) irisan AB gambar 12 a.

2. PEMBAHASAN

Berdasarkan gambar 1 dan gambar 2 wilayah NTT merupakan wilayah aktif gempabumi baik gempabumi akibat interaksi lempeng tektonik Indo-Australia dengan Eurasia, respons dari fenomena back-arc thrusting, pensesaran pada zona di utara backarc thrusting dan aktivitas sesar aktif darat. Selain itu terdapat gempabumi besar kedalaman dangkal di outer rise di sisi luar interaksi lempeng tektonik Indo-Australia dengan Eurasia di selatan NTT dapat memicu terjadinya gempabumi tsunami. Sebagai contoh gempabumi outer rise Mw 8.3 tanggal 19 Agustus 1977 di selatan pulau Sumba (USGS, BMKG) memicu terjadinya tsunami besar. Selain itu gempabumi besar Mw 7.8 tanggal 12 Desember 1992 di utara pulau Flores pada zona back-arc thrusting, juga memicu tsunami besar dengan korban jiwa ribuan. Gempabumi terkini yang terjadi pada tangal 14 Desember 2021 terjadi gempabumi kuat 7.3 di utara zona back-arc thrusting dan walaupun tidak membangkitkan tsunami namun menimbulkan kerusakan berbagai bangunan di wilayah di NTT. Estimasi waktu perulangan (recurrence time-RT) gempabumi megathust di selatan NTT dengan skenario Maximum Credible Earthquake (MCE) 8.3 (gempabumi selatan Sumba tahun 1977) dengan sliprate 50-70 mm/tahun (Bock et al, 2000) dan mekanisme sumber nya normal fault diperkirakan RT antara 150-220 tahun. Untuk gempabumi Flores back arc thrusting dengan MCE 7.8 dengan slip rate 11.6 mm/tahun (Pusgen, 2017) dan mekanisme sumbernya thrust fault, nilat RT sekitar 320 tahun. Sedangkan gempabumi 14 Desember 2021 di utara zona back-arc thrust Mw 7.3 dengan asumsi slip ratenya 11.6 mm/tahun dan mekanisme sumber strike slip fault, estimasi periode ulangnya sekitar 182 tahun. Hasil studi awal ini sebagai gambaran umum yang dapat menjadi salah satu masukan untuk dipertimbangkan dalam perencanaan tataruang (landscape) jangka panjang sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana gempabumi di wilayah NTT.

Berdasarkan gambaran dua kejadian gempabumi besar yang memicu tsunami dari selatan dan utara NTT, membuktikan bahwa wilayah ini rawan terhadap kejadian gempabumi besar yang memicu tsunami baik dari arah selatan maupun dari utara (zona back-arc thrusting). Gempabumi besar juga terjadi pada zona pensesaran dangkal di utara back-arc thrusting dengan magnitude besar diantaranya gempabumi yang terjadi tanggal 14 Desember 2021 dengan Mw 7.3 (h 15.1 km) (USGS dan BMKG, 2021). Gempabumi ini menimbulkan beberapa kerusakan bangunan di wilayah pulau Selayar dan beberapa tempat di utara pulau Flores. Gempabumi besar pernah terjadi pada wilayah ini pada tanggal 03 Maret 1927 dengan M 7.1 (h = 15 km, USGS). Gempabumi diperkirakan lokasi episenternya kurang lebih sekitar 100 km lokasi episenter gampabumi 14 Desember 2021. Gempabumi pada zona utara Flores back-arc thrusting ini walaupun tidak berpotensi tsunami, tetap harus diwaspadai karena mempunyai magnitude cukup besar sehingga dapat menimbulkan kerusakan bangunan. Oleh karena itu untuk program mitigasi resiko bencana gempabumi tetap harus di perhitungkan di masa depan. Selain itu terdapat beberapa gempabumi kuat dan merusak dan memicu tsunami terjadi di wilayah NTT. Berdasarkan data kejadian gempabumi besar, Wilayah NTT merupakan zona rawan terhadap ancaman tsunami baik dari arah selatan maupun dari arah utara.

Dari sebaran gempabumi pada zona 4°-12° LS dan 121° -122° BT dapat dibuat penampang vertikal (*cross section*) untuk zona-zona kedalaman "*seismic gap*" dan mengestimasi ketebalan elastis kerak litosfeer. Ketebalan kerak atau slab yang menumjam ini dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya gaya lateral tektonik per

satuan panjang. Berdasarkan pendekatan analisis penampang vertikal sebaran hiposenter seperti gambar 4, 8b, 9b dan 10b, ketebalan elastis kerak litosfeer rata-rata yang menunjam kebawah diasumsikan sekitar 30 km sampai dengan 40 km (tidak eksak). Sedangkan untuk gambar 11b dan 12b tidak sederhana untuk analisis ketebalan kerak litosfeer pada kedua gambar ini. Berdasarkan persamaan (1) dan dengan menggunakan rata-rata nilai batas ketebalan elastic diatas, nilai densitas rata-rata kerak 3300 kg/m³ dan sudut kemiringan penunjaman 30°, besarnya gaya lateral persatuan panjang berkisar antara 0,95 x 10¹³ N/m-2,6 x 10¹³ N/m. Besarnya gaya lateral tektonik dengan orde 10¹³ N/m sesuai dengan gaya rata-rata yang dianalisis oleh Gerbault dan kawan-kawan (2000) untuk wilayah lautan Hindia besarnya sekitar 3 x 10^{13} N/m, di Asia Tengah 5.4 x 10^{13} N/m dan di Australia 10¹⁴ N/m. Murjaya, dkk (2009) mengestimasi besarnya gaya lateral tektonik di Sumatra dengan memperhitungkan kemiringan subduksi mendapat nilai berkisar antara 1.44 - 6.76 x 10¹³ N/m. Gaya lateral tektonik ini bukan satu-satunya gaya yang mempengaruhi slab yang menunjam dalam proses terjadinya gempabumi, tetapi ada banyak gaya-gaya lainnya yang tidak sederhana untuk diterangkan (tidak diterangkan pada artikel ini).

Sebaran Mekanisme fokus gempabumi pada zona 4°-12° LS dan 121° -127° BT sumber gempabumi dengan M \geq 5.0 dapat dilihat pada penampang vertikal gambar 6b, 8d, 9d, 10 d, 11 d dan 12 d. Pada gambar 11 d dan 12 d tampak ada ketidak jelasan (tidak sederhana) pola slab masuk menunjam, kemungkinan ada kesalahan dalam mengambil pemotongan arah zona yang akan di buat penampang vertikalnya. Hal ini karena tatanan tektonik di zona 4°-12° LS dan 125°-126° BT, dan 4°-12° LS dan 126° -127° BT lempeng tektonik Indo-Australia yang menunjam ke bawah lempeng Eurasia sudah menekuk secara lateral sehingga gaya lateral yang mempengaruhi kemungkinan tidak tunggal dari satu arah. Dengan demikian interpretasi nya tidak sederhana seperti zona lainnya yang tidak mengalami penekukan secara lateral. Penampang vertikal zona 4°-12° LS dan 124°-125° BT masih terlihat pola penenunjaman teratur, kemungkinan masih peralihan dari subduksi yang "hampir" frontal di ujung barat daya pulau Timor (Nusa Tenggara Timur) berubah menyerong. Oleh karena itu dalam mengambil pemotongan arah zona yang akan dibuat penampang vertikalnya.

Pada gambar 7b, 8b, 9b dan 10 b pada irisan garis bujur 121°-125° BT terlihat bahwa kedalaman gempabumi hampir mencapai kedalaman sekitar 700 km dimana menandakan bahwa ada kerak lautan (*oceanic crust*) yang menunjam sampai kedalaman tersebut. Pada gambar tersebut diatas dimana pada kedalaman "maksimum", penunjaman slab tidak menerus menukik namun berubah arah datar (*slab flat*). Dengan demikian sangat mungkin adanya alasan-alasan pengaruh sifat fisis dari material dikedalaman \geq 700 km yang berbeda dengan sifat-sifat fisis material di sekitar kerak yang menunjam pada kedalaman dangkal atau menengah. Pengaruh sifat fisis dari material di kedalaman \geq 700 km yang berbeda dengan sifat-sifat fisis material di sekitar kerak yang menunjam pada kedalaman dangkal atau menengah menyebabkan zona-zona seismik pada sekitar kedalaman tersebut mengalami gejala fenomena "*rollback*" untuk kerak atau slab yang menunjam tersebut. Gambar 7b, 8b dan 9b pada irisan garis bujur 121°-124° BT juga memperlihatkan adanya zona seismic gap pada interval kedalaman tertentu sekitar 320-520 km. Namun pada zona 4°-12° LS dan 124° -125° BT seismic gap semakin mengecil (menyempit) seperti terlihat pada gambar 10 b.

Harga b (*b value*) rata-rata berkisar antara 0.85-1.2 (gambar 5), 0.72-1.25(gambar 8f), 1.5-1.6 (gambar 9f), 1.0 (gambar 10f), 1.0-1.1(gambar 11f), dan 0.9-1.0 (gambar 12f) pada garis lintang 4°-12° LS untuk masing-masing bujur 121°-122° BT, 122°-123° BT, 123°-124° BT, 124°-125° BT, 125°-126° BT dan 126°-127° BT. Berdasarkan nilai b diatas, maka untuk zona penelitian mempunyai nilai b antara 0.72-1.25, kecuali untuk bujur123°-124° BT mempunyai nilai b antara 1.5-1.6. Penelitian yang sama dilakukan oleh Soedarmo (1978) menggunakan data tahun 1897-1973 mendapatkan nilai b sekitar 0.72-0.76 untuk gempabumi dangkal wilayah selatan pulau Sumba dan pulau Timor.

KESIMPULAN

Dengan memperhatikan tatanan tektonik yang kompleks dan implikasinya, wilayah NTT merupakan salah satu daerah rawan gempabumi dan tsunami. Sumber lokasi gempabumi dapat berasal dari zona subduksi, *Flores back-arc thrust* dan sesar-sesar aktif di daratan sebagai sumber gempabumi di wilayah ini. Berdasarkan hal tersebut diatas dapat disimpulkan beberapa hal:

- 1. Interaksi konvergen lempeng tektonik di selatan NTT dimana lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah lempeng Eurasia sampai kedalaman hampir 650-700 km. Pada kedalaman ini di beberapa zona terdapat fenomena *flat slab* atau *rollback*.
- Berdasarkan tatanan tektonik dan sejarah tsunami yang terjadi, maka wilayah NTT ini merupakan zona yang rawan gempabumi tektonik dan tsunami. Hal ini dengan melihat dua kali kejadian gempabumi tsunami dalam 50 tahun terakhir yaitu gempabumi *outer rise* tanggal 19 Agustus 1977 dengan Mw 8.3 dan gempabumi *Flores back arc thrust* tanggal 12 Desember 1992 dengan magnitudo tertarget 7.8.
- 3. Dengan mengasumsikan ketebalan rata-rata lempeng tektonik yang menyusup antara 30 40 km pada wilayah kajian di NTT seperti gambar-gambar diatas, maka besarnya gaya lateral tetonik per satuan panjang mempunyai orde 0.95-2.6 x 10¹³ N/m. Nilai ini masih bersesuaian dengan gaya rata-rata yang dianalisis oleh Gerbault dan kawan-kawan (2000) untuk wilayah lautan Hindia besarnya sekitar 3 x 10¹³ N/m, di Asia Tengah 5.4 x 10¹³ N/m dan di Australia 10¹⁴ N/m. Besarnya gaya dorong lateral persatuan panjang dengan orde 10¹³ N/m dapat menyebabkan fenomena *buckling* pada kolom batuan zona tersebut sehingga dapat berimplikasi menjadikan zona tersebut berpotensi lebih kerentanan dibandingkan zona lainnya yang mempunyai nilai gaya persatuan panjang kurang dari 10¹³ N/m.
- 4. Nila b (*b value*) dari tiap irisan 1° bujur pada gambar-gambar di atas rata-rata berkisar antara 0.85-1.2 (gambar 5), 0.72-1.25(gambar 8f), 1.5-1.6 (gambar 9f), 1.0 (gambar 10f), 1.0-1.1(gambar 11f), dan 0.9-1.0 (gambar 12f) pada garis lintang 4°-12° LS untuk masing-masing bujur 121°-122° BT, 122°-123° BT, 123°-124° BT, 124°-125° BT, 125°-126° BT dan 126°-127° BT. Berdasarkan nilai b diatas, maka untuk zona penelitian mempunyai nilai b antara 0.72-1.25, kecuali untuk bujur123°-124° BT mempunyai nilai b antara 1.5-1.6. Dapat ditafsirkan bahwa *b value* sebagai karakter batuan dasar di zona ini yang mampu menahan akumulasi energi tektonik besar. Hal ini didukung berdasarkan data gempabumi yang terjadi baik di zona megathrust Mw 8.3 (gempabumi 19 Agustus 1977), zona *Flores back-arc thrust* Mw 7.8 (12 Desember 1992) dan zona gempabumi 14 Desember 2021 di utara zona *back-arc thrust Mw* 7.3. Untuk mengetahui karakter batuan dasar yang lebih teliti diperlukan kajian lanjut salah satunya dari sisi *rheology* batuan di wilayah itu.

- 5. Gempabumi outer rise dengan Mw 8.3 (gempabumi 19 Agustus 1977), slip rate 50-70 mm/tahun dan mekanisme sumbernya normal fault, estimasi periode ulangnya berkisar antara 150-220 tahun. Untuk gempabumi Flores back arc thrust tanggal 12 Desember 1992 dengan magnitudo tertarget 7.8, slip rate 11.6 mm/tahun dan mekanisme sumbernya thrust fault, estimasi periode ulangnya sekitar 320 tahun. Sedangkan gempabumi 14 Desember 2021 di utara zona back-arc thrust Mw 7.3 dengan asumsi slip ratenya 11.6 mm/tahun dan mekanisme sumber strike slip fault, estimasi periode ulangnya sekitar 182 tahun. Pada kajian periode ulang gempabumi ini ambang batas kesalahan (margin error) masing-masing variabel-variabel masukan (*input*) yang belum dimasukan. Namun demikian masing-masing empiris dari variable inputan masih dalam batas-batas toleransi sehingga rumus-rumus tersebut masih digunakan untuk berbagai kajian. Estimasi periode ulang gempabumi ini sangat diperlukan untuk dipertimbangkan dalam mendukung mitigasi resiko bencana gempabumi pada perencanaan tata ruang atau *landscape* jangka panjang (*longterm*) untuk melengkapi estimasi dampak guncangan (shakemap), peta PGA, peta PGV dan peta mikrozonasi serta data geologi lainnya di wilayah NTT.
- 6. Studi awal (*Preliminary Study*) tatanan tektonik aktif ini untuk mendapatkan gambaran atau mengkorelasikan antara tatanan tektonik dan proses geodinamika terhadap implikasi kegempaan di wlayah NTT. Mengkelompokan zona tatanan tektonik kaitannya dengan potensi tsunami yang ditimbulkan oleh gempabumi. Untuk mendapatkan hal-hal lebih rinci perlu ditindak lanjuti dengan penelitian lanjut yang lebih komprehensif termasuk keberadaan sesar-sesar aktif lainnya, site efek dan data geologi lainnya. Dengan demikian diharapkan hasilnya dapat dijadikan sebagai salah satu masukan yang mungkin perlu dipertimbangkan dalam perencanaan tataruang (*landscape*) jangka panjang (*longterm*) sebagai bagian upaya mitigasi bencana gempabumi di wilayah NTT.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kajian awal terkait tektonik aktif dan implikasi kegempaan di wilayah NTT ini di dukung oleh data dan software dari International Institute of Seismology and earthquake Engineering (IISEE)-Building Research Institute di Tsukuba Jepang, dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika serta Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) terkait data *geodetic slip rate* atau *slip rate* sesar-sesar aktif di wilayah NTT.

REFRENSI

- 1. Badan Meteorologi Klimatologi. (2019). Katalog Gempabumi Indonesia. Jakarta.
- 2. Frederick C. Davidson and Christofeher H. Schole (1985). Frequency Moment Distribution of earthquake arc: A Test the Characteristic Earthquake Model. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol.75. No.5.pp.1349-1361. October 1985.
- 3. Gerbault.M. (2000). At What stress level is the Central Indian Ocean Lithosphere Buckling?. Earth and Planetary Science Letters, 178 (2000) 165-185. Elsevier.
- 4. Hardi Prasetyo. (1994). Geodinamika dan Tsunami di Indonesia. Seminar Sehari Masalah Tsunami di Indonesia dan Aspek-Aspeknya. Dewan Riset Nasional, Pusat

Pengembangan Geologi Kelautan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Badan Meteorologi dan Geofisika. Bandung 1994.

- Ida Bagus Suananda Y; Irfan Aufa; Ulvienin Harlianti. (2018). Identifying Intraplate Mechanism by b value Calculation in South of Java island. 41st HAGI Annual Convention and Exhibition 2016. IOP Conf.Series: Earth and Environmental Science 132 (2018) 012032 doi:10.1088/1755-1315/132/1/012032.
- 6. International Institute of Seismology and earthquake Engineering, Building Research Institute. (2010). Bahan Kuliah. Tsukuba, Japan.
- Jaya Murjaya, Kirbani Sri Brotopuspito, Lilik Hendrajaya, Subagyo Pramumijoyo.(2009). Strain rate of lithosphere Based on Buckling Phenomena for the Intermediate Depth Earthquake Parallel Trench (Case Sudy: Sumatra region). Presented in The International Symposium on Earthquake and Precursor Monitoring System. Bukit Tinggi, West Sumatra-Indonesia, November 16th-18th 2009.
- Linda, Nasrul Ihsan, Pariabti Palloan. (2019). Analysis of Spatial and Temporal Distribution of Seismotectonics Based on b value using the likelihood method on Java. Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika (JSPF). Jilid 15, Nomor 1. April 2019. Hal 16-31.
- 9. Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Soedarmo R.P. (1978). Statistical Analysis of The earthquakes Occurrence and Seismic Activity in Some of Indonesian Region 1897-1973. Pusat Meteorologi dan Geofisika. Departemen Perhubungan.
- 11. Sukendar Asikin, (1972). Diktat Geologi Struktur Indonesia. Lab. Geologi Dinamis-Geologi Institut Teknologi Bandung. Departemen Teknik Geologi ITB. Bandung.
- 12. Supartoyo dan Surono. (2008). Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1629-2007. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Badan Geologi. Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral. Bandung.
- 13. Stephen Kirby, Stein.S, Okal E.A, and Rubie D.C (1996). Metastable Mantle Phase Transformations and Deep earthquakes in Subducting oceanic lithosphere. Reviews of Geophysics, 34, 2 May 1996. Pages 261-306.paper number 96 RG01050.
- 14. T.O. Simanjuntak. (1994). Tsunami dan Gempabumi dalam Pinggiran Lempeng Aktif di Indonesia. Dewan Riset Nasional, Pusat Pengembangan Geologi Kelautan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Badan Meteorologi dan Geofisika. Bandung 1994.
- 15. United State Geological Survey. (2020). www. usgs.gov earthquake map.
- Yehuda Bock, Linette Prawirodirdjo, Genrich. J.F, Stevens. C.W, McCaffrey.R, Cecep Subarya, Puntodewo, and Calais.E. (2003). Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements. Journal Geophysics Research, vol.108, No. B8, 2367.