

DEFORMASI POSTSEISMIC DAN INTERSEISMIC SECARA SPASIAL DAERAH BENGKULU DENGAN PENGAMATAN GPS PERIODE 2007-2016

(Spatial Postseismic and Interseismic Deformations in Bengkulu Region Through GPS Observations during 2007-2016)

Ashar Muda Lubis dan Edi Purwanto

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu
Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu, 38371

Diterima: 8 Februari 2024; Direvisi: 23 Maret 2024; Disetujui untuk Dipublikasikan: 29 April 2024

ABSTRAK

Daerah Bengkulu merupakan daerah yang rawan gempa bumi. Gempa bumi besar terakhir terjadi di daerah ini pada 12 September 2007 (Mw 8.4), setelah sebelumnya juga terjadi pada 4 Juni 2000 (Mw 7.9). Mengingat fenomena ini sering berulang, maka pengamatan terhadap proses siklus gempa bumi sangat penting untuk dilakukan. Siklus ini meliputi fase *interseismic*, *preseismic*, *coseismic*, *postseismic* dan kembali ke fase *interseismic*. Penelitian bertujuan untuk menentukan segmentasi deformasi *postseismic* dan *interseismic* di daerah Bengkulu dengan memanfaatkan teknologi *Global Positioning System* (GPS). Data GPS tahun 2007-2016 dari stasiun GPS KRUI, MNNA, SLMA, CBKL, UNBE, LAIS, dan MKMK diolah dengan menggunakan perangkat GAMIT/GLOBK. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa deformasi *postseismic* terjadi pada stasiun MKMK dan LAIS. Sebaliknya deformasi *interseismic* terjadi pada stasiun CBKL, UNBE, SLMA, MNNA dan KRUI. Selanjutnya, stasiun LAIS mengalami deformasi *postseismic* yang paling besar setelah gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4) yaitu 21.3 cm menuju arah barat daya. Sebaliknya, stasiun MNNA mengalami deformasi *interseismic* yang paling besar yaitu 13.5 cm menuju arah timur laut. Dari penelitian ini ditemukan bahwa daerah segmentasi *postseismic* dan *interseismic* berada diantara daerah Lais dan daerah Kota Bengkulu. Penelitian secara kontinu diperlukan untuk memahami fase siklus gempa bumi yang lebih baik untuk keperluan mitigasi bencana gempa bumi di daerah Bengkulu.

Kata kunci: *postseismic*, *interseismic*, deformasi GPS, segmentasi, siklus gempa bumi

ABSTRACT

Bengkulu area is an earthquake-prone area. The last major earthquake occurred on 12 September 2007 (Mw 8.4), having previously also occurred on 4 June 2000 (Mw 7.9). Since the earthquake is often repeated, it is very important to observe the earthquake cycle process. This cycle includes the interseismic, preseismic, coseismic, postseismic phases and returns to the interseismic phase. This study aims to determine the postseismic and interseismic deformation segmentation using Global Positioning System (GPS). GPS data during 2007-2016 from KRUI, MNNA, SLMA, CBKL, UNBE, LAIS, and MKMK stations were processed using the GAMIT/GLOBK software. Result show that postseismic deformations occurred at MKMK and LAIS stations. On the other hand, interseismic deformation occurred at CBKL, UNBE, SLMA, MNNA and KRUI stations, respectively. LAIS station experienced the largest postseismic deformation after the 12 September 2007 earthquake (Mw 8.4), which was 21.3 cm towards the southwest, and MNNA station run into the largest interseismic deformation of 13.5 cm towards the northeast. It was found that the postseismic and interseismic segmentation area is located between the Lais area and the Bengkulu City area. Continuous research is needed to better understand the phases of the earthquake cycle for earthquake disaster mitigation purposes in Bengkulu region.

Keywords: *postseismic*, *interseismic*, GPS deformation, segmentation, earthquake cycle

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik (Bock et al, 2003). Khusus di wilayah Sumatra lempeng Indo-Australia bertumbukan dengan lempeng Eurasia dengan kecepatan 50-70 mm/tahun (Bock et al, 2003). Karena adanya perbedaan densitas pada lempeng Indo-Australia lebih besar dibandingkan lempeng Eurasia, maka

Indo-Australia menghujam di bawah lempeng Eurasia. Batas antara lempeng yang menunjam dan massa batuan di atasnya disebut sebagai bidang kotak dari zona penunjaman atau disebut juga sebagai bidang zona subduksi Sumatra (**Gambar 1**). Batas kedua lempeng di beberapa tempat menyatu sangat erat. Karena adanya dorongan terus menerus dari lempeng Indo-Australia menyebabkan terjadinya akumulasi energi di bawah lempeng Eurasia pada pertemuan dengan lempeng Indo-Australia. Hal ini dikarenakan karena adanya

gaya gesekan antara dua plate tektonik tersebut yang mengakibatkan proses penguncian dan akumulasi energi pada zona subduksi Sumatra dalam selang waktu yang lama (Chlieh et al, 2008) sehingga lama-lama terjadi gempa bumi.

Salah satu contohnya gempa besar Sumatra-Andaman Mw 9.2 tahun 2004 (Lay et al, 2005; Ammon et al, 2004; Park et al, 2005; Tanioka et al, 2006; Lubis, Isezaki, & Sato, 2011) dan Gempa Nias tahun 2005 (Briggs et al, 2006). Kemudian pada 12 September 2007 (Mw 8.4) dengan episenter di daerah perairan Bengkulu (**Gambar 1**)(Konca et al, 2008; Lubis, Hashima, & Sato, 2013) ataupun gempa bumi 4 Juni 2000 (Mw 7.9) yang juga di perairan Bengkulu (Ambikapathy et al, 2010).

Gempa bumi menyebabkan terjadinya pergeseran (defromasi/dislokasi) secara tiba-tiba pada kerak bumi (crust). Dislokasi ini terjadi karena adanya sumber kekuatan sebagai penyebab terjadinya gempa bumi. Selanjutnya di dalam satu siklus gempa bumi terdapat beberapa fase sampai terjadi gempa bumi yaitu fase *interseismic*, *preseismic*, *coseismic*, dan *postseismic* (Natawidjaja et al., 2004).

Tahapan deformasi *interseismic* merupakan tahapan awal siklus gempa bumi. Pada tahapan ini energi pergerakan lempeng mulai terakumulasi di bagian lempeng yang *friction propertiesnya* tergolong kasar selama beberapa puluh tahun sampai ratusan/ribuan tahun. Kemudian sesaat sebelum terjadi gempa bumi dinamakan tahapan deformasi *preseismic* yang biasanya sangat singkat. Kemudian diikuti oleh tahapan deformasi *coseismic* saat terjadinya gempa bumi yang biasanya juga sangat singkat. Tahapan ini diikuti langsung oleh tahapan deformasi *postseismic* yang merupakan tahapan relaksasi secara perlahan dan dalam kurun waktu tahunan sampai puluhan tahun (Sun & Wang, 2015).

Pada tahapan *coseismic* penelitian yang berhubungan dengan gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4) di zona subduksi Sumatra telah banyak dilakukan seperti misalnya oleh Lubis (Lubis et al., 2013) dan Sun (Sun & Wang, 2015). Sementara itu untuk tahapan post-seismik baik model *afterslip*, *poroelastic* dan *viscoelastic* juga telah dilakukan oleh Lubis et al, (2013) dan Vladimirova et al, (2020). Namun setelah sampai hampir 10 tahun setelah terjadinya gempa bumi 12

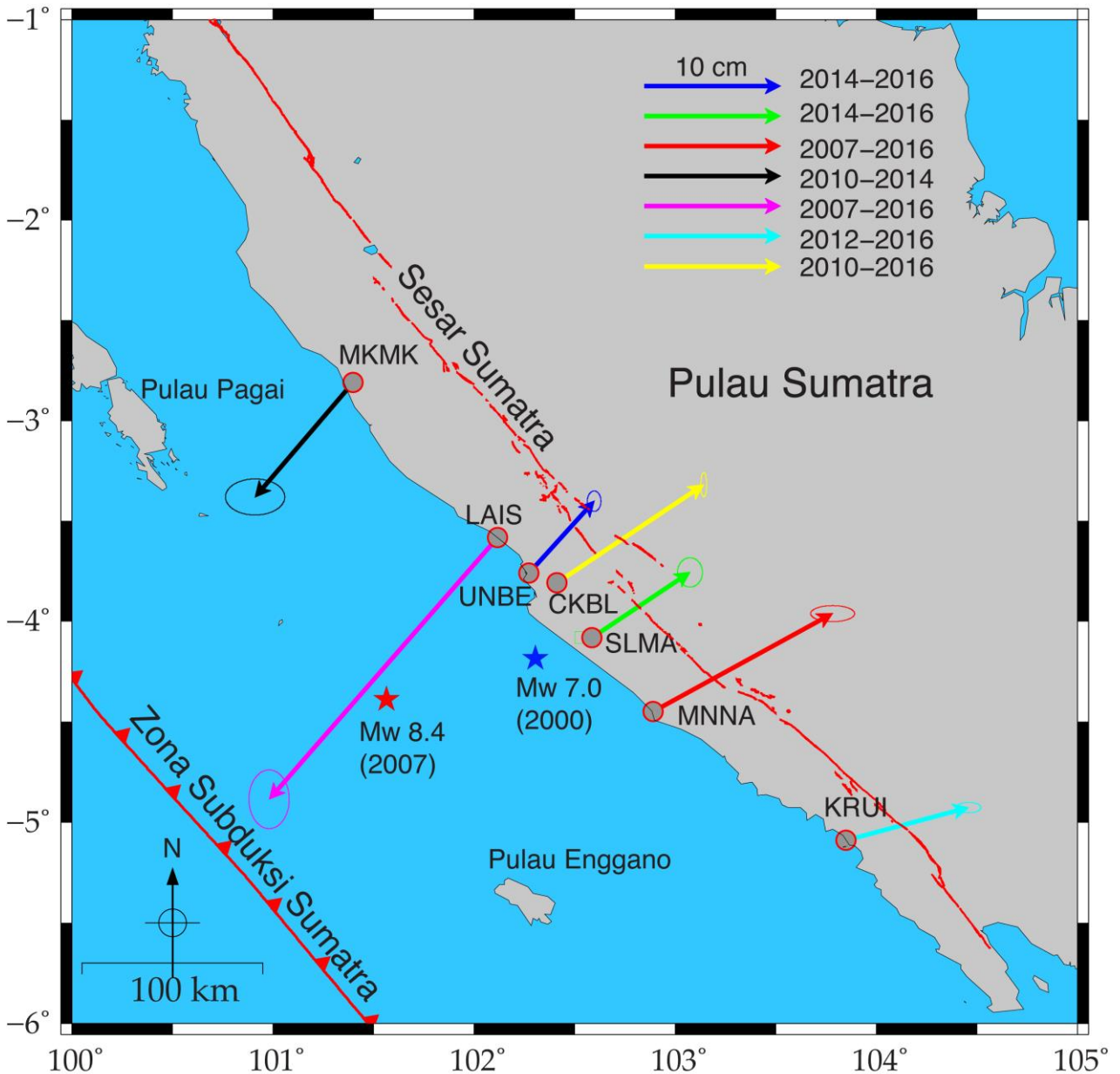
September 2007 (Mw 8.4) penelitian tentang deformasi *postseismic* dan *interseismic* dalam jangka yang lebih panjang secara temporal belum dilakukan. Padahal penelitian seperti ini sangat berguna untuk melihat daerah segmentasi antara daerah mana yang masih mengeluarkan energi pada zona subduksi Sumatra dan mana daerah yang sudah mulai mengakumulasi energi akibat daerah tumbukan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan daerah mana yang mengalami tahapan *postseismic* maupun daerah mana saja yang mengalami tahapan *interseismic* melalui analisa vektor pergerakan stasiun-stasiun *Global Positioning System* (GPS) di wilayah Provinsi Bengkulu setelah hampir 10 tahun terjadinya gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4). Dengan ini kita dapat untuk menentukan segmentasi deformasi melalui pola deformasi *postseismic* maupun deformasi *interseismic* di wilayah Bengkulu.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data pengamatan harian stasiun-stasiun GPS di wilayah Bengkulu. Dengan mengamati posisi stasiun GPS tersebut dalam periode selama ~10 tahun maka pola pergerakan pada suatu daerah dalam hal ini wilayah Bengkulu dapat ditentukan baik itu yang berhubungan deformasi *postseismic* maupun deformasi *interseismic*.

METODE

Penelitian dilakukan dengan mengamati posisi harian dari 7 stasiun GPS kontinu yang berada di wilayah Provinsi Bengkulu (**Gambar 1**). Durasi data yang digunakan lebih kurang selama ~10 tahun, namun tergantung pada ketersediaan data. Posisi yang diamati mulai dari tahun 2007 setelah kejadian gempa bumi tanggal 12 September 2007 (Mw 8.4) sampai tahun 2016. Titik-titik stasiun pengamatan GPS terdapat di daerah Muko-Muko, Lais, Bengkulu, Seluma, Manna dan Krui. Secara detail tentang lokasi stasiun-stasiun GPS diperlihatkan pada **Tabel 1**. Data pada penelitian berupa data sekunder yaitu data jaringan GPS geodetic *Sumatran GPS Array* (SUGAR), jaringan *Sumatran Fault Monitoring* (SUMO) dan jaringan Badan Informasi Geospasial (BIG).



Gambar 1. Map daerah penelitian, episenter kejadian gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8,4) (bintang merah) dan episenter kejadian gempa bumi 4 Juni 2000 (Mw 7.9). Vektor hasil penelitian yang deformasi *postseismic* dan *interseismic* pada daerah Bengkulu relatif terhadap ITRF 2005.

Tabel 1. Stasiun GPS yang digunakan pada penelitian ini.

Stasiun	Longitude (°)	Latitude (°)	Tempat	Data periode	Reference
KRUI	104.6160	-5.0466	Krui	2011-2016	SuGAR
MNNA	102.8903	-3.5833	Manna	2007-2016	SuGAR
SLMA	102.5865	-4.0824	Seluma	2012-2016	SUMO
CBKL	102.4117	-3.9086	Bengkulu	2010-2015	BIG
UNBE	102.2722	-3.7601	Bengkulu	2014-2016	SUMO
LAIS	102.1156	-3.7859	Lais	2007-2016	SuGAR
MKMK	101.3975	-2.8102	Muko-Muko	2007-2016	SuGAR

Data GPS yang digunakan adalah data *Receiver Independent Exchange Format (RINEX), station.info, list station, lunar/solar ephemerides, spacecraft, Internasional GPS service (IGS) Satellite Orbit Solution (SP3) ephemerisfile*

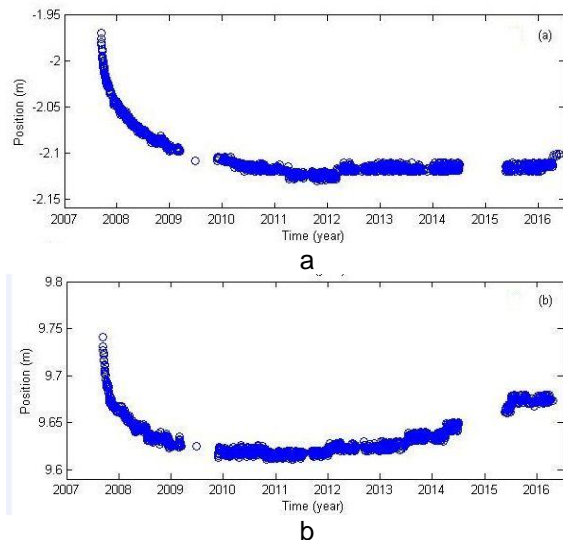
(igsWWWWD.sp3). Data RINEX diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK 10.61 (Herring, King, Floyd, & McClusky, 2015) dan perangkat Translation, Editing, and Quality Check (TEQC).

Setelah didapatkan posisi harian dari pengolahan data pada stasiun GPS, seterusnya dilakukan perhitungan deformasi *postseismic* dan intersesimik. Salah satu cara untuk menghitung besarnya kecepatan vektor pergeseran masing-masing titik adalah dengan metode *linier fitting* (Walpole, 1995), yaitu memanfaatkan pendekatan fungsi linier untuk posisi komponen Utara-Selatan dan komponen Barat-Timur dalam selang waktu tertentu. Untuk perhitungan deformasi *postseismic* menggunakan fungsi logaritma untuk non-linear deformasi *postseismic* (Chen, Chuang, & Ching, 2020).

Untuk menentukan segmentasi daerah yang mengalami deformasi *postseismic* maupun kawasan intersesimik di daerah Bengkulu didasarkan pada arah perubahan posisi/deformasi pada nilai posisi harian GPS secara *time series*. Setelah mendapatkan nilai posisi GPS secara *time series* pada stasiun pengamatan GPS, maka dilakukan perhitungan vektor pergeseran. Melalui informasi arah vektor pergeseran, maka batasan wilayah yang merupakan daerah *postseismic* maupun daerah intersesimik dapat ditentukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

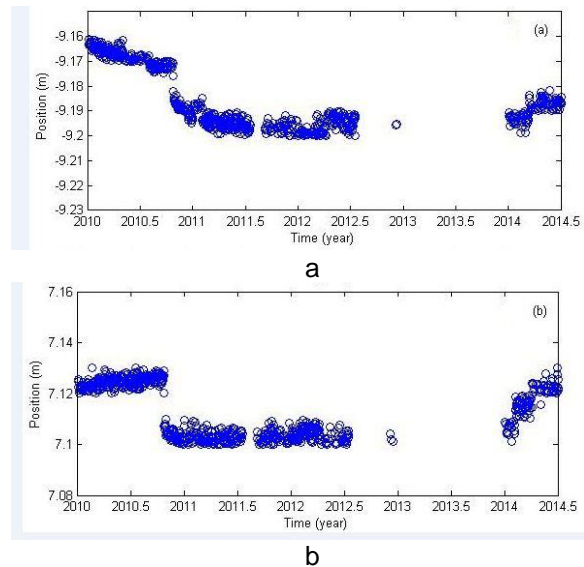
Deformasi *Postseismic*



Gambar 2. Posisi GPS pada stasiun LAIS, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).

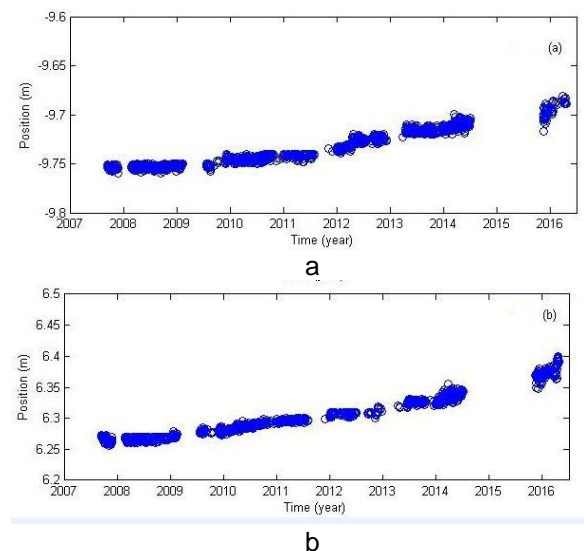
Hasil pengolahan di stasiun GPS LAIS selama kurang lebih ~10 tahun dapat dilihat pada **Gambar 2**. Dapat lihat bahwa posisi GPS LAIS mengalami pergerakan deformasi *postseismic* dari tahun 2008 sampai 2012. Pergerakan deformasi untuk komponen Utara-Selatan bergerak sebesar -160 mm, sedangkan untuk komponen Barat-Timur bergerak sebesar -140 mm. Pada stasiun ini terlihat kekosongan data pada tahun 2015 ini dikarenakan pada stasiun LAIS terjadi masalah teknis di tahun tersebut, sehingga posisi harian pada tidak diperoleh. Pada stasiun ini juga dapat dilihat mungkin terjadi

kombinasi pergerakan *postseismic* dengan *interseismic* mengingat mulai tahun 2012 terlihat secara *time series* pergerakan stasiun ini mulai mengalami pergerakan *interseismic* untuk komponen Barat-Timur.



Gambar 3. Posisi GPS pada stasiun MKMK, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).

Selanjutnya pada **Gambar 3** diperlihatkan posisi harian GPS pada stasiun MKMK yang terletak di daerah Muko-Muko. Pada stasiun ini terdeteksi deformasi *coseismic* akibat gempa bumi di Mentawai Mw 7.7 pada 25 Oktober 2010 yang ditandai pergeseran posisi pada hari yang sama. Offset dislokasi sekitar ~ 20 mm akibat gempa bumi ini dapat dilihat pada stasiun GPS yang berada di daerah Muko-Muko.



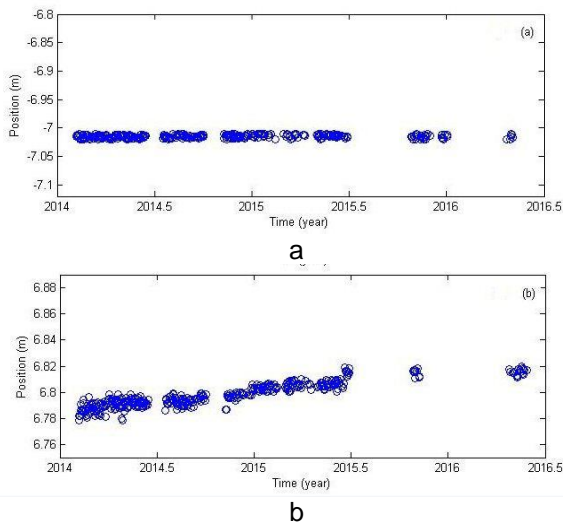
Gambar 4. Posisi GPS pada stasiun MNNA, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).

Selain itu pada stasiun GPS MKMK juga teramati deformasi *postseismic* pada tahun 2010-2014. Pada stasiun ini pergerakan deformasi komponen Utara-Selatan bergerak sebesar -35

mm untuk komponen Barat-Timur bergerak sejauh -30 mm (**Gambar 3**). Deformasi post seismik ini searah dengan arah deformasi coseismic akibat gempa bumi Mentawai pada Oktober 2010.

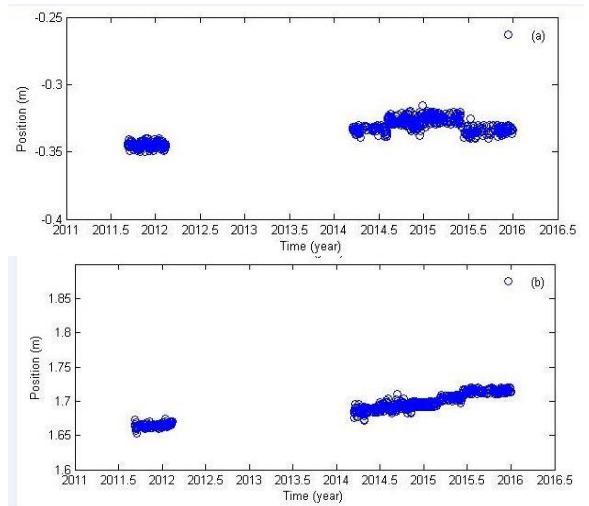
Deformasi Interseismic

Untuk hasil pengolahan di stasiun MNNA selama kurang lebih 10 tahun setelah terjadinya gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4) dapat dilihat pada **Gambar 4**. Posisi stasiun GPS MNNA dari akhir tahun 2007-2016 mengalami pergerakan deformasi *interseismic*. Pergerakan deformasi *interseismic* untuk komponen Utara-Selatan sebesar 60 mm, sedangkan untuk komponen Barat-Timur sebesar 110 mm selam hampir 10 tahun pengamatan.

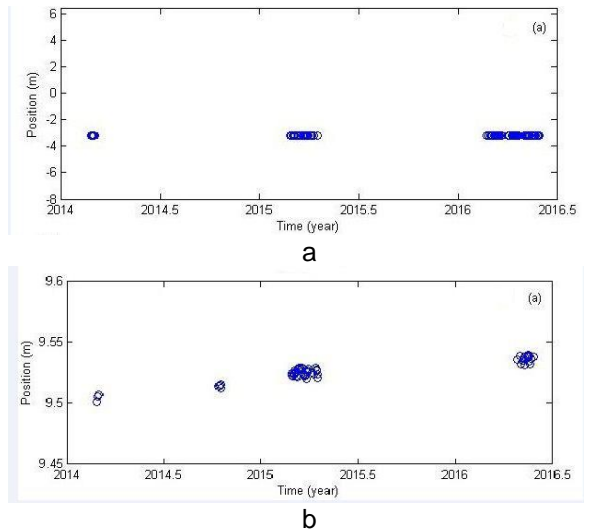


Gambar 5. Posisi GPS pada stasiun UNBE, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).

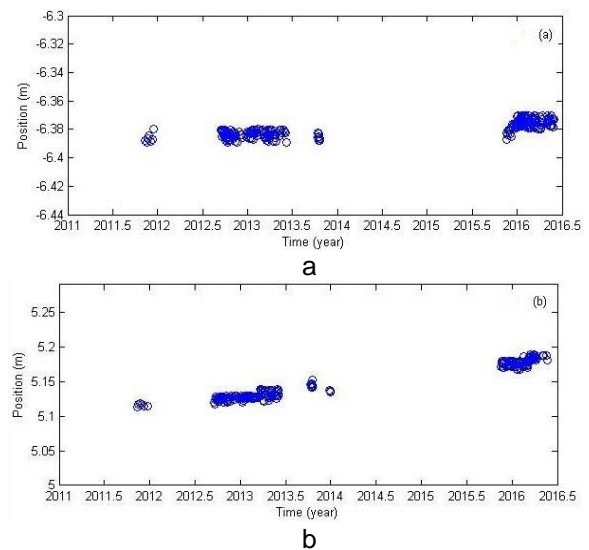
Hasil pada stasiun MNNA berbeda hasil penelitian oleh Tsang (Tsang et al., 2016), yang mana memperlihatkan pola deformasi *postseismic* pada stasiun MNNA setelah lebih dari setengah dekade setelah kejadian gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4). Namun hasil penelitian ini memperlihatkan hasil yang lebih konsisten dikarenakan hasil pengamatan deformasi *interseismic* tidak hanya terlihat pada stasiun MNNA, akan tetapi pola deformasi *interseismic* dapat diamati pada stasiun GPS UNBE, CBKL, SLMA, dan KRUI (**Gambar 1**). Pada stasiun GPS UNBE pengolahan data dilakukan selama tahun 2014-2016 didapatkan pergerakan deformasi komponen Utara-Selatan sebesar 22 mm dan untuk komponen Barat-Timur sebesar 20 mm (**Gambar 5**).



Gambar 6. Posisi GPS pada stasiun CBKL, arah Utara-Selatan (atas) dan arah Barat-Timur (Bawah).



Gambar 7. Posisi GPS pada stasiun SLMA, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).



Gambar 8. Posisi GPS pada stasiun KRUI, arah Utara-Selatan (a) dan arah Barat-Timur (b).

Sementara itu untuk stasiun GPS CBKL hasil pengamatan tahun 2010-2016 dapat dilihat pergerakan posisi untuk komponen Utara-Selatan sebesar 30 mm, dan untuk komponen Barat-Timur sebesar 45 mm (**Gambar 6**). Hal yang sama juga teramati pergerakan *interseismic* pada stasiun GPS SLMA pada tahun 2014-2016 sebesar 20 mm untuk komponen Utara-Selatan dan sebesar 20 mm komponen Barat-Timur (**Gambar 7**). Terakhir untuk stasiun GPS KRUI dengan waktu pengamatan tahun 2012-2016, dapat dilihat pergerakan *interseismic* pada komponen Utara-Selatan sebesar 20 mm dan untuk komponen Barat-Timur sebesar 75 mm (**Gambar 8**).

Vektor Pergerakan Deformasi

Vektor pergerakan *postseismic* dan *interseismic* relative terhadap ITRF 2005 di daerah Bengkulu dapat dilihat **Gambar 1**. Dari **Gambar 1** dapat diamati bahwa stasiun pengamatan GPS MKMK lebih cenderung bergerak ke barat daya dengan pergerakan sebesar 4,6 cm selama tahun 2010-2014. Hal yang sama juga teramati pada stasiun LAIS dimana magnitude pergerakan lebih besar yakni 21,3 cm dari tahun 2008 sampai 2016. Stasiun GPS LAIS bergerak lebih besar secara postsesimik dibandingkan dengan stasiun MKMK, hal ini disebabkan oleh stasiun lain lebih dekat sumber gempa bumi yang terjadi pada 12 September 2007 (Mw 8.4).

Kedua stasiun GPS MKMK dan LIAS lebih cenderung bergerak menuju lautan, dimana pergerakan deformasi postsismik bergerak berlawanan arah dengan lempeng tektonik. Stasiun GPS MKMK dan LIAS lebih cenderung melepaskan energi, secara perlahan dan terus menerus dan bergerak menuju barat daya (**Gambar 1**). Dengan demikian daerah antara stasiun LIAS and MKMK juga merupakan daerah postsesimik yang berhubungan dengan gempa bumi besar tahun 2007 di Bengkulu.

Sebaliknya pada **Gambar 1** juga dapat dilihat bawah stasiun GPS UNBE, CBKL, SLMA, MNNA dan KRUI mengalami deformasi *interseismic*. Dari kelima stasiun tersebut, vector-vektor pergerakan relatif sama yakni menuju ke daratan dan menuju timur laut sesuai arah pergerakan lempeng tektonik. Pada stasiun GPS UNBE diperkirakan mengalami pergerakan sebesar 1,20 cm/tahun, hampir mirip dengan stasiun GPS UNBE yang berdekatan stasiun GPS CBKL dengan berjarak ~ 5 km ke arah selatan. Stasiun GPS CBKL bergerak sekitar 1,22 cm/tahun menuju timur laut. Sementara itu untuk stasiun GPS SLMA mengalami deformasi *interseismic* dengan kecepatan 1,34 cm/tahun, yang juga mirip dengan pergerakan *interseismic* pada stasiun GPS MNNA yakni sebesar 1,35 cm/tahun. Terakhir untuk stasiun GPS KRUI mengalami pergerakan sebesar 1,56 cm/tahun juga menuju arah timur laut.

Secara umum hasil penelitian pada daerah

interseismic juga memiliki kemiripan dengan hasil penelitian oleh Lubis (Lubis, Sahputra, Hermawan, & Comfort, 2018) juga memperoleh pengamatan *interseismic* di daerah Sumatera barat dengan menggunakan GPS dan arah pergerakan stasiun-stasiun GPS yang relatif sama dengan hasil penelitian ini.

KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan pada 7 stasiun GPS tetap yang ada di daerah Bengkulu dari tahun 2007-2016 dapat disimpulkan bahwa stasiun GPS MKMK dan LAIS mengalami fase deformasi *postseismic*, sedangkan stasiun UNBE, CBKL, SLMA, MNNA dan KRUI mengalami fase deformasi *interseismic*. Dari hasil analisis deformasi *postseismic* dan deformasi intersismik stasiun GPS yang telah dilakukan, stasiun LAIS mengalami deformasi *postseismic* yang paling besar setelah gempa bumi 12 September 2007 (Mw 8.4) yaitu 21,3 cm menuju arah barat daya pada kurun waktu tahun 2008 sampai 2016. Sebaliknya stasiun MNNA mengalami deformasi *interseismic* yang paling besar yaitu 13.5 cm pada kurun tahun 2007-2016, akan tetapi dalam laju kecepatan *interseismic* stasiun KRUI mengalami yang paling cepat yakni 1,56 cm/tahun.

Selanjutnya dapat disimpulkan juga bahwa daerah segmentasi peralihan dari proses *postseismic* ke proses *interseismic* berada antara daerah yang mengalami *postseismic* yakni pada stasiun GPS LAIS yang berada daerah Lais dan daerah yang mengalami *interseismic* pada stasiun GPS UNBE yang berada di daerah Kota Bengkulu. Untuk dapat menambah pemahaman tentang siklus gempa bumi untuk keperluan mitigasi dan perencanaan wilayah, maka pemantauan fase *interseismic*, *preseismic*, *coseismic*, *postseismic* dan kembali lagi ke fase *interseismic* sangat diperlukan secara kontinu melalui pengamatan GPS maupun dengan alat geodetik lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas kepada *Earth Observatory of Singapore* (EOS), Nanyang Technological University, Singapore dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) atas ketersediaan data GPS untuk penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih ke *Badan Informasi Geospasial* (BIG) dan Jaringan Sumatran Fault Monitoring (SuMo) atas data GPS di Kota Bengkulu. Data-data pendukung untuk pengolahan data berasal dari *Scripps Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC).

DAFTAR PUSTAKA

Ambikapathy, A., Catherine, J. K., Gahalaut, V. K., Narsaiah, M., Bansal, A., & Mahesh, P. (2010). The 2007 Bengkulu earthquake, its rupture model and implications for seismic hazard. *Journal of Earth*

- System Science, 119(4), 553–560. doi:10.1007/s12040-010-0037-2.
- Ammon, J. C., C. Ji, H. Thio, D. Robinson, S. Ni, V. Hjorleifsdottir, H. Kanamori, T. Lay, S. Das, D. Helmberger, G. Ichinose, J. Polet, & D. Wald. (2005). Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 308, 1133-1139.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J.F., Stevens, C.W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S.S.O., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements. *Journal of Geophysical Research*, 108(B8). doi:10.1029/2001jb000324
- Briggs, R. W., Sieh, K., Meltzner, A. J., Natawidjaja, D., Galetzka, J., Suwargadi, B., ... Bock, Y. (2006). Deformation and slip along the Sunda megathrust in the great 2005 Nias-Simeulue earthquake. *Science*, 311(5769), 1897–1901. doi:10.1126/science.1122602
- Chen, K. H., Chuang, R. Y., & Ching, K. E. (2020). Realization approach of non-linear postseismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame. *Earth, Planets and Space*, 72(1), 75. doi:10.1186/s40623-020-01209-y
- Chlieh, M., Avouac, J. P., Sieh, K., Natawidjaja, D. H., & Galetzka, J. (2008). Heterogeneous coupling of the Sumatran megathrust constrained by geodetic and paleogeodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(5). doi:10.1029/2007JB004981
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., & McClusky, S. C. (2015). *Introduction to GAMIT/GLOBK*.
- Konca, A. O., Avouac, J. P., Sladen, A., Meltzner, A. J., Sieh, K., Fang, P., ... Helmberger, D. V. (2008). Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence. *Nature*, 456(7222), 631–635. doi:10.1038/nature07572.
- Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, R. Butler, H. R. Deshon, G. Ekstrom, K. Satake, & Sipkin. (2005). The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004, *Science*, 308, 1127-1132.
- Lubis, A M, Sahputra, R., Hermawan, I., & Comfort, L. K. (2018). Towards a Better Understanding of Interseismic Deformation in the Mentawai Seismic Gap by Establishing a Denser GPS Network in West Sumatra. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 608, 2018.
- Lubis, Ashar Muda, Hashima, A., & Sato, T. (2013). Analysis of afterslip distribution following the 2007 September 12 southern Sumatra earthquake using poroelastic and viscoelastic media. *Geophysical Journal International*, 192(1), 18–37. doi:10.1093/gji/ggs020
- Lubis, Ashar Muda, Isezaki, N., & Sato, T. (2011). Two-dimensional coseismic deformation field of the Sumatra-Andaman earthquake 2004 Mw 9.2 derived from synthetic aperture radar observation. *Remote Sensing Letters*, 2(2), 107–116. doi:10.1080/01431161.2010.497783
- Natawidjaja, D. H., Sieh, K., Ward, S. N., Cheng, H., Edwards, R. L., Galetzka, J., & Suwargadi, B. W. (2004). Paleogeodetic records of seismic and aseismic subduction from central Sumatran microatolls, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(4). doi:10.1029/2003JB002398
- Park, J., T. A. Song, J. Tromp, E. Okal, S. Stein, G. Roullet, E. Clevede, G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M. V. Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu, & S. Rosat. (2005). Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 308, 1139-1144.
- Sun, T., & Wang, K. (2015). Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2), 1329–1344. doi:10.1002/2014JB011707.
- Tanioka, Y., Yudhicara, Kususose, T. Kathirolu, S., Nishimura, Y., Iwasaki, S., and Satake, K. (2006). Rupture process of the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake estimated from tsunami waveforms. *Earth Planet Space*, 58, 203-209 <https://doi.org/10.1186/BF03353379>.
- Tsang, L. L. H., Hill, E. M., Barbot, S., Qiu, Q., Feng, L., Hermawan, I., ... Natawidjaja, D. H. (2016). Afterslip following the 2007 Mw 8.4 Bengkulu earthquake in Sumatra loaded the 2010 Mw 7.8 Mentawai tsunami earthquake rupture zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12), 9034–9049. doi:10.1002/2016JB013432
- Vladimirova, I. S., Lobkovsky, L. I., Gabsatarov, Y. V., Steblou, G. M., Vasilenko, N. F., Frolov, D. I., & Prytkov, A. S. (2020). Patterns of the Seismic Cycle in the Kuril Island Arc from GPS Observations. *Pure and Applied Geophysics*, 177(8), 3599–3617. doi:10.1007/s00024-020-02495-z
- Walpole, R., E. (1995). *Ilmu Peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan*. Bandung: ITB

Halaman Ini Sengaja Kami Kosongkan