

ANALISIS DEFORMASI KOSEISMIK GEMPA NIAS 3 JUNI 2019 MENGUNAKAN DATA CORS BIG DAN SUGAR

Sry Suando Sinaga^{*)}, Moehammad Awaluddin, Laode M. Sabri

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
Email: srysuandosinaga@students.undip.ac.id

ABSTRAK

Aktivitas subduksi yang terjadi di Pulau Sumatra sering menimbulkan gempa sehingga Pulau Sumatra dianggap sebagai salah satu wilayah tektonik aktif di dunia. Pada tanggal 3 Juni 2019 telah terjadi gempa dengan magnituda sebesar 5,8 Mw yang berlokasi pada bagian selatan Pulau Nias tepatnya pada $0,378^{\circ}\text{U}$ $97,722^{\circ}\text{T}$. Gempa bumi yang terjadi akan mengakibatkan deformasi pada objek di sekitarnya. Deformasi Pulau Nias dan sekitarnya dapat dilakukan dengan menggunakan data pengamatan stasiun CORS BIG dan SuGAR. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah GAMIT/GLOBK 10,7. Deformasi yang diamati dalam penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu deformasi koseismik gempa Nias 3 Juni 2019 dan deformasi akibat proses subduksi di Pulau Sumatra. Pengamatan deformasi koseismik diperoleh dengan menggunakan data koordinat harian 10 hari sebelum dan sesudah gempa terjadi (21 DoY). Sementara itu, pengamatan deformasi subduksi Pulau Sumatra diperoleh dengan menghitung *velocity rate* dari data koordinat harian stasiun CORS selama setahun (71 DoY). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa deformasi koseismik gempa Nias 3 Juni 2019 tidak memiliki perubahan yang signifikan terhadap pergerakan stasiun GPS yang diamati. Deformasi subduksi di Pulau Sumatra terjadi secara signifikan dengan vektor pergeseran terbesar terjadi pada stasiun NIAN (Nias) sebesar 0,021 m mengarah ke barat daya. Vektor pergeseran stasiun CORS yang mengarah ke barat daya menunjukkan bahwa gempa Nias 3 Juni 2019 merupakan gempa yang terjadi pada fase *postseismic* gempa.

Kata Kunci: Deformasi, Koseismik, Nias, Subduksi, SuGAR

ABSTRACT

Subduction activities that occur on the island of Sumatra often cause earthquakes so that Sumatra Island is one of the most active tectonic areas in the world. On June 3rd, 2019 an earthquake with magnitude of 5,8 Mw was located in the southern part Nias island precisely at $0,378^{\circ}\text{N}$ $97,722^{\circ}\text{E}$, with a locking depth of 19 km. An earthquake that occurs will cause deformation of objects around it. Deformation of Nias Island and its surroundings can be determined by processing the observation data of the CORS BIG and SuGAR stations. The data processing was processed using scientific software GAMIT / GLOBK 10,7. The deformations observed in this study were divided into two parts, namely the coseismic deformation of the Nias June 3rd 2019 earthquake and deformations due to the subduction process on the island of Sumatra. Coseismic deformation observations were obtained using daily coordinate data 10 days before and after the earthquake occurred (21 DoY). Meanwhile, observations of subduction deformation in Sumatra Island were obtained by calculating the velocity rate from the daily coordinates of the CORS station for a year (71 DoY). The results of this study indicate that the coseismic deformation of the Nias earthquake June 3rd, 2019 did not have a significant shift to the observed GPS station. The subduction deformation in Sumatra Island occurs significantly with the largest vector shift occurring at NIAN station (Nias) of 0,021 m towards the southwest. The shift vector of the CORS station that points to the southwest shows that the Nias June 3rd earthquake was an earthquake that occurred in the postseismic phase of the earthquake.

Keywords: Coseismic, Deformation, Nias, Subduction, SuGAR

^{*) Penulis Penanggung Jawab}

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Pulau Sumatra merupakan bagian dari lempeng Eurasia yang bergerak dan berinteraksi secara konvergen dengan lempeng Indo-Australia. Zona pertemuan antar lempeng tersebut membentuk palung yang dikenal dengan nama zona tumbukan (*subduction zone*). Aktifitas lempeng Indo-Australia dan Eurasia pada zona subduksi tersebut sering menimbulkan gempa sehingga Pulau Sumatra dianggap sebagai salah satu wilayah tektonik aktif di dunia. (McCaffrey, 2009, dalam PusGeN, 2017).

Berdasarkan catatan aktifitas seismik (Maret 2005 - Juni 2019) telah terjadi sekitar 300 kali kejadian gempa di Pulau Sumatra. Salah satu bagian dari gempa Sumatra yang diteliti dalam penelitian ini adalah gempa Nias yang terjadi pada tanggal 3 Juni 2019 pukul 05:57:09 UTC atau 12:59:09 WIB dengan momen magnituda (Mw) sebesar 5,8 yang berlokasi pada bagian selatan Pulau Nias tepatnya pada $0,378^{\circ}U$ $97,722^{\circ}T$ dengan kedalaman pusat gempa sedalam 19 km. Gempa Nias 28 Maret 2005 merupakan gempa terbesar terakhir yang terjadi di Pulau Sumatra dengan momen magnituda sebesar 8,6 Mw, kemudian terjadi lagi dengan momen magnituda yang lebih rendah pada tanggal 19 Mei 2005 sebesar 6,9 Mw. Tingkat aktifitas gempa di Pulau Nias pada tahun 2005 merupakan masa aktifnya proses seismik di pulau tersebut. Berbeda halnya dengan kegempaan di Pulau Nias sepanjang tahun 2019, proses seismik yang terjadi tidak menimbulkan gempa dengan momen magnituda yang sangat kuat seperti yang terjadi pada tahun 2005, melainkan gempa dengan skala sedang sampai skala kuat.

Gempa bumi yang terjadi menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan disekitar pusat gempa, baik itu perubahan bentuk, dimensi, ruang, dan posisi atau dikenal dengan deformasi. Dalam bidang pemetaan, deformasi mengakibatkan perubahan pada posisi titik-titik referensi yang digunakan sebagai acuan dalam pengukuran dan pemetaan suatu wilayah, sehingga perlu dilakukan pemantauan terhadap dampak deformasi yang terjadi pada titik-titik referensi tersebut. Salah satu cara dalam mengamati perubahan atau pergerakan yang terjadi pada permukaan bumi akibat gempa yang ditimbulkan adalah dengan memanfaatkan pengamatan objek di permukaan bumi melalui teknologi GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Objek yang diamati adalah berupa titik-titik tetap yang dipasang sedemikian rupa dan tersebar di bagian-bagian permukaan bumi tertentu.

Penelitian Ini melakukan pengamatan deformasi akibat gempa Nias 3 Juni 2019 menggunakan metode pengamatan GNSS dengan menggunakan data pengamatan stasiun CORS (*Continuously Operating Reference Station*) yang tersebar di sepanjang Pulau Sumatra secara kontinu. Pengolahan data GNSS dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah GAMIT 10.7. Hasil pengolahan tersebut adalah posisi atau koordinat harian yang selanjutnya akan digunakan

dalam menghitung dan menganalisis pergeseran stasiun CORS akibat proses koseismik gempa Nias 2019.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian kali ini membahas beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana deformasi yang terjadi akibat gempa Nias 3 Juni 2019?
2. Bagaimana pergerakan stasiun CORS pegamatan yang terjadi dari Desember 2018-Desember 2019?

I.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan akhir sebagai berikut:

1. Mengetahui deformasi yang terjadi akibat gempa Nias 3 Juni 2019
2. Mengetahui pergerakan stasiun CORS pengamatan yang terjadi sepanjang Desember 2018-Desember 2019

I.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan yang diharapkan tidak terlalu luas dan fokus pada tujuan tertentu. Batasan penelitian ini adalah:

1. Wilayah penelitian ini difokuskan pada segmen subduksi Nias, Sumatra Utara
2. Stasiun pengamatan GPS yang digunakan berjumlah 7 stasiun CORS BIG (Badan Informasi Geospasial) yaitu CAIR, CBKJ, CBLG, CSBH, CSBS, CSIB, dan NIAN serta menggunakan 4 stasiun SuGAR (*Sumatran GPS Array*) yaitu ABGS, BIT2, BTHL, dan PTLO. Selanjutnya digunakan stasiun IGS sebagai titik ikat berjumlah 4 stasiun yaitu BAKO, COCO, DGAR, dan DARW
3. Jumlah DoY pengamatan yang digunakan sebanyak 71 DoY yang mewakili data pengamatan selama setahun (Desember 2018 – Desember 2019)
4. Perhitungan deformasi koseismik gempa Nias 3 Juni 2019 dilakukan dengan menggunakan data koordinat harian 10 hari sebelum dan sesudah gempa Nias 3 Juni 2019 terjadi
5. Perhitungan deformasi akibat proses subduksi dilakukan dengan menggunakan data koordinat harian dari seluruh DoY yang diperoleh dari pengolahan GAMIT/GLOBK
6. Perhitungan deformasi pada penelitian ini difokuskan pada komponen horizontal saja

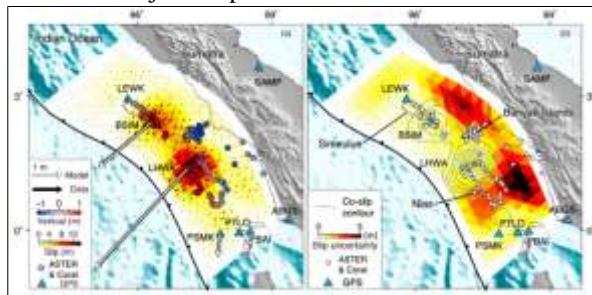
II. Tinjauan Pustaka

II.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Pelaksanaan penelitian ini didasari beberapa penelitian yang mendukung. Pada penelitian Anggriani (2020), metode penelitian yang digunakan dalam menganalisis deformasi gempa Mentawai 2008 ini dilakukan dengan menggunakan data GPS SuGAR yang diolah menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK. Penentuan vektor fase koseismik gempa Mentawai Februari 2008 dihitung pada bidang

horizontal (dN dan dE) dengan mengamati pergeseran DoY setelah gempa terhadap DoY sebelum gempa. Pada penelitian Nurdianasari (2017), deformasi *postseismic* gempa Nias dilakukan menggunakan data pengamatan 9 stasiun SuGAR dengan data pengamatan selama 1 tahun (Maret 2005 sampai dengan bulan Maret 2006). Hasil penelitian ini menunjukkan besar pergeseran rata-rata stasiun GPS SuGAR akibat proses deformasi *postseismic* gempa Nias 2005 sebesar 0,221636 m mengarah ke barat daya, sedangkan untuk besar pergeseran secara vertikal memiliki sebesar 0,00643 m.

Penelitian Qiu (2018), metode yang digunakan dalam menganalisis *coseismic* dan *postseismic slip* yaitu dengan menggunakan *offset* GPS statis jarak dekat, dan perpindahan vertikal berdasarkan data pengamatan satelit. Stasiun GPS terdiri dari 12 stasiun SuGAR dan 1 CORS BIG dengan waktu pengamatan sekitar sembilan tahun setelah gempa Nias tahun 2005. Pemodelan deformasi *coseismic* dan *postseismic* gempa tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



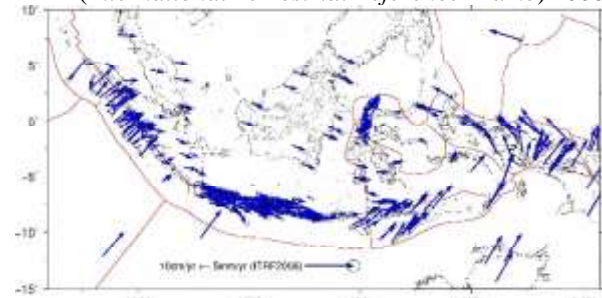
Gambar 1 Model deformasi *coseismic* dan *postseismic* gempa Nias (Qiu dkk, 2018)

II.2 Studi Geodinamika Menggunakan GNSS

GNSS merupakan suatu sistem teknologi satelit navigasi yang dirancang untuk memberikan informasi tentang posisi dan kecepatan tiga dimensi serta informasi waktu, secara kontinu di seluruh dunia, baik dalam domain spasial maupun temporal tanpa tergantung waktu dan cuaca secara kontinu atau simultan (Abidin, 2008). Secara umum metode dan sistem geodesi satelit akan punya peran yang cukup penting dalam studi geodinamika bumi, baik dalam cakupan lokal, regional maupun global. Metode deteksi pergerakan dari lempeng-lempeng bumi secara episodik dilakukan dengan mengamati secara teliti perubahan koordinat beberapa titik yang terletak pada lempeng tersebut secara periodik, sedangkan metode kontinu dilakukan dengan mengamati lempeng tersebut secara kontinu. Vektor pergerakan yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mempelajari potensi terjadinya gempa bumi di kawasan pergerakan lempeng tersebut (Segall dan Davis, 1997 dalam Abidin, 2008). Hasil pengamatan GPS kontinu maupun episodik merupakan posisi relative, untuk memperoleh posisi absolutnya diperlukan suatu sistem referensi yang diketahui yaitu ITRS (*International Terrestrial Reference System*) dan direalisasikan dengan ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

II.3 Deformasi

Deformasi adalah perubahan yang terjadi pada suatu benda baik itu perubahan bentuk, perubahan luas, perubahan posisi, pergeseran, ataupun perubahan volume secara relatif/absolut. (Abidin, 2008). Berdasarkan penelitian Susilo, dkk (2015) model deformasi negara Indonesia dimodelkan dalam SRGI 2013 (Sistem Referensi Geospasial Indonesia). Model ini merepresentasikan kecepatan pergerakan permukaan bumi Indonesia sehingga dikenal dengan datum semi-dinamis. Kecepatan pergerakan yang dimodelkan dalam model deformasi ini merupakan gabungan dari pergerakan lempeng-lempeng dan aktifitas kegempaan di Indonesia. Berikut ini adalah kecepatan pergerakan permukaan bumi Indonesia dengan elips kepercayaan 95% sehubungan dengan ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) 2008



Gambar 2 Model deformasi Indonesia (Susilo dkk, 2015)

II.4 Gempa Bumi

Gempa mempunyai sifat yang *repeatable* atau berulang-ulang yang dikenal dengan siklus gempa. Siklus ini mengakibatkan terjadinya deformasi di permukaan bumi. Secara garis besar siklus tersebut dibedakan menjadi tiga siklus utama yaitu *Interseismic*, *Coseismic*, dan *Postseismic* (PuSGeN, 2017).

Interseismic merupakan tahapan awal dari suatu siklus gempa bumi. Pada tahap ini terjadi akumulasi energi dalam bumi di beberapa bagian lempeng tempat biasanya terjadi gempa seperti batas antar lempeng atau antar sesar. Beberapa kasus subduksi antara dua lempeng, pada saat fase *interseismic* zona subduksi akan mengalami *locking* sehingga energi terkumpul di zona tersebut dan material lempeng yang tersubduksi mengalami *shortening*. Besarnya energi yang terkumpul di area *locking* semakin lama semakin meningkat hingga memasuki fase berikutnya.

Coseismic merupakan tahap lanjutan dari siklus gempa yaitu fase *interseismic*. Pada tahap ini terjadi pelepasan energi dalam bumi yang sudah terakumulasi secara maksimal dan melebihi batas kekuatan destruktif dari area *locking* atau bidang gempa, sehingga mengalami pergerakan secara tiba-tiba yang disebut dengan gempa. Untuk beberapa kasus subduksi antara dua lempeng, pada saat fase *coseismic* zona subduksi akan mengalami *unlocking* sehingga energi yang terkumpul mengalami pelepasan energi dan mengakibatkan *rupture* atau pecahan pada bidang yang terkunci di zona tersebut dan material lempeng yang tersubduksi mengalami *extension* atau pemanjangan.

Postseismic merupakan tahap pelepasan sisa-sisa energi gempa secara perlahan dalam jangka waktu yang panjang sampai kondisi kembali pada tahap keseimbangan awal yang baru.

II.4.1 Kegempaan Sumatra

Gempa-gempa signifikan yang terjadi di Pulau Sumatra secara umum didominasi oleh gempa dengan mekanisme *thrust* yang terjadi akibat proses subduksi serta beberapa gempa sesar geser. Seismisitas di sekitar Nias yang memanjang lebih dari 300 km sejajar dengan jalur subduksi, terjadi di sekitar zona *rupture* dari gempa Nias dengan Mw = 8,6 pada tahun 2005. Distribusi gempa Nias ini berkorelasi dengan zona deformasi *postseismic* yang tinggi (Tilman dkk., 2010 dalam PuSGeN, 2017).

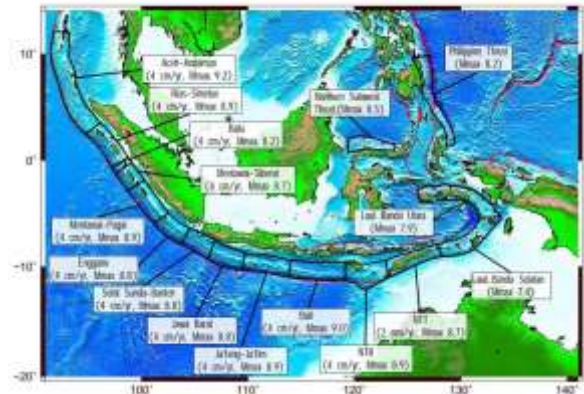


Gambar 3 Gempa bumi Sumatra Utara 2005-2019 (USGS, 2020)

Sepanjang tahun 2005-2019, aktifitas seismik di Sumatra Utara terdapat 289 kejadian gempa dengan momen magnitude diatas 5,0 Mw seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Magnitude* terbesar yang dihasilkan pada kejadian gempa ini yaitu 8,6 Mw yang terjadi pada 28 Maret 2005 dengan kedalaman 30 km dan terjadi kembali dengan besar *magnitude* 7,8 Mw yang terjadi pada 6 April 2010 berlokasi di Pulau Nias pada kedalaman 31 km. Kekuatan gempa terbesar yang dihasilkan di Pulau Nias tahun 2010 sampai tahun 2019 memiliki rata-rata 5,2 Mw, hal ini menunjukkan bahwa gempa yang terjadi merupakan aktifitas dari pelepasan energi bumi sebagai sisa-sisa dari proses gempa yang sebelumnya yaitu pada tahun 2010 (*postseismic*).

II.4.2 Segmentasi Subduksi / *Megathrust*

Berdasarkan PusGeN (2017), segmentasi subduksi di Indonesia dibagi menjadi dua belas segmen subduksi yang membentang dari barat Sumatra hingga selatan Nusa Tenggara Timur. Selain itu, terdapat lima segmen yang dipecah yaitu segmen Mentawai dibagi menjadi segmen Mentawai-Siberut dan segmen Mentawai Pagai. Kemudian, untuk segmen Jawa dibagi menjadi tiga segmen yaitu segmen selat Sunda Banten, segmen Jawa Barat, dan segmen Jawa Tengah-Jawa Timur. Ketiga segmen tersebut dapat diskenariokan *rupture* bersamaan. Secara detail pembagian segmen subduksi di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Segmentasi megathrust Indonesia (PusGeN, 2017)

II.5 Sesar Sumatra

Sesar Sumatra adalah zona patahan *slip-slip dextral* kurang-lebih sepanjang 1900 km yang mengakomodasi bagian dari konvergensi miring subduksi dengan arah subduksi 10°U ~ 7°S antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia (Sieh dan Natawidjaja, 2000).

Pergerakan dari sesar Sumatra secara umum cenderung bergerak mengangan dengan laju geser (*slip rate*) yang berbeda-beda pula. Berdasarkan hasil penelitian (Natawidjaja dan Triyoso, 2007), diperoleh hasil estimasi laju pergeseran sesar Sumatra seperti pada Tabel 1, dengan asumsi yang digunakan kedalaman lokasi gempa (*Locking Depth*) sedalam 15 km dan M_0 (*seismic moment*) = $\mu \cdot (L \cdot D) \cdot S$ cm; dimana $\mu = 3 \cdot 10^{10}$ dyne/cm².

Tabel 1 Estimasi laju geser sesar Sumatra (Natawidjaja dan Triyoso, 2007)

No	Segment	L (km)	Bipolar	Slip Accumulation (cm)		100 Yr- Return Period		200 Yr- Return Period	
				100yr	200yr	M=100	M=100	M=200	M=200
1	Sunda	150	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
2	Serasang	65	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
3	Kusoring	150	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
4	Mentawai	85	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
5	Mind	70	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
6	Kotam	85	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
7	Dikit	60	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
8	Sulak	70	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
9	Siditi	95	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
10	Sumsari	60	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
11	Susak	90	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
12	Sungur	35	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
13	Berumen	125	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
14	Anglida	160	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
15	Taru	90	2.7	27	54	1.82E+26	7.5	3.63E+26	7.7
16	Bosan	220	2.7	27	54	1.82E+26	7.5	3.63E+26	7.7
17	Trips	180	2.7	27	54	1.82E+26	7.5	3.63E+26	7.7
18	Acek	200	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4
19	Sulawesi	120	1	10	20	6.75E+25	7.2	1.35E+26	7.4

II.5.1 Perhitungan Pergeseran Sesar Sumatra

Besarnya pergeseran sesar Sumatra dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) (Hidayat dkk, 2012).

$$S(y) = \frac{D}{\pi} \text{ArcTan} \left(\frac{y}{w} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

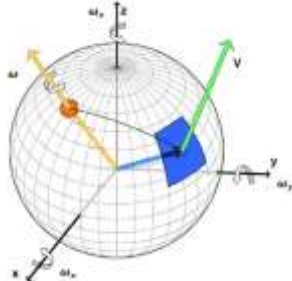
- S(y) = pergeseran sesar sebagai fungsi jarak (mm/yr)
- D = laju geser / *slip rate* (mm/yr)
- y = jarak tegak lurus terhadap garis sesar (km)
- w = kedalaman sumber gempa / *locking depth* (km)

II.6 Blok Sunda

Lempeng minor Sunda atau yang lebih dikenal dengan sebutan blok Sunda merupakan lempeng tektonik minor yang meliputi Pulau Sumatra, Jawa, Bali, Kalimantan dan Sulawesi bagian barat. Arah kecepatan pergerakan blok Sunda cenderung ke arah timur (Permana, 2012 dalam Lail, 2018). Berdasarkan penelitian Kuncoro (2013), solusi parameter rotasi blok Sunda adalah $46,202^{\circ} \pm 0,620^{\circ}N$ untuk lintang kutub *euler*, dan $-85,899^{\circ} \pm 0,256^{\circ}E$ untuk bujur kutub *euler*. Sedangkan kecepatan sudut rotasi blok Sunda adalah $0,370 \pm 0,004$ derajat/juta-tahun.

II.6.1 Konsep Rotasi Euler

Pada konsep rotasi *euler* ini Bumi dianggap berbentuk bulat seperti bola (**Gambar 5**). Perlunya mengetahui pergerakan atau rotasi dari blok ini adalah untuk menghilangkan efek dari rotasi blok tersebut terhadap pengolahan data GPS dalam menganalisis arah pergerakan lempeng yang sesungguhnya tanpa terpengaruh oleh efek rotasi blok Sunda.



Gambar 5 Rotasi *euler* pada bumi (Kuncoro, 2013)

Berdasarkan **Gambar 5** terdapat beberapa parameter rotasi euler didefinisikan oleh kutub Euler dalam lintang dan bujur (λ, φ) dan kecepatan sudut rotasi (ω) dengan asumsi bahwa bumi berbentuk bola. Kutub *euler* ditunjukkan oleh lingkaran kecil berwarna jingga, sedangkan blok yang mengalami rotasi ditunjukkan oleh bidang berwarna biru. Vektor rotasi sudut dapat diestimasi berdasarkan persamaan (2) (Cox dan Hart, 1986 dalam Kuncoro, 2013).

$$\begin{bmatrix} V_n \\ V_e \\ V_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \cos\lambda & -\sin\varphi \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z & -Y \\ -Z & 0 & X \\ Y & -X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \dots (2)$$

Keterangan,

- V_n, V_e, V_u : Vektor rotasi sudut (mm/tahun)
- λ, φ : Lintang dan bujur kutub *euler*
- $\omega_x, \omega_y, \omega_z$: Kecepatan sudut rotasi (der/jttahun)

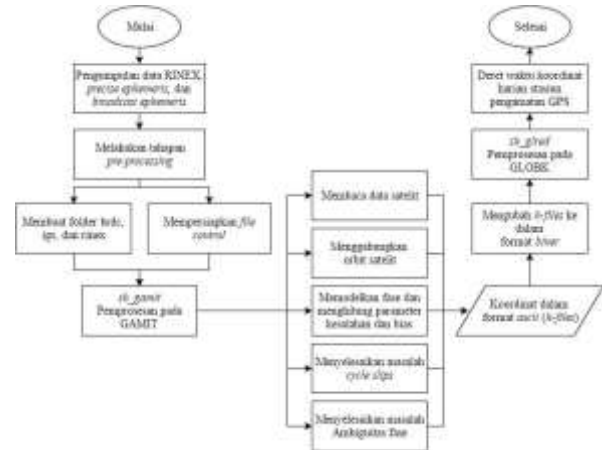
II.7 Metode Pengolahan Data GPS

Pengolahan data GPS dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah GAMIT versi 10.7 dan GLOBK versi 5.30. GAMIT merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mengestimasi posisi dalam ruang tiga dimensi dari masing-masing stasiun pengamatan GPS serta kecepatan perubahannya (Herring dkk, 2018).

GLOBK adalah filter Kalman yang tujuan utamanya adalah menggabungkan solusi dari pemrosesan data primer dari pengamatan ruang-geodetik atau terrestrial. GLOBK menerima sebagai data, atau perkiraan "pengamatan semu" dan matriks

kovarian yang terkait untuk stasiun koordinat, parameter rotasi bumi, parameter orbital, dan posisi sumber yang dihasilkan dari analisis pengamatan utama (Herring dkk, 2018).

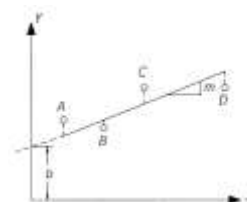
Secara garis besar proses pengolahan data GPS menggunakan GAMIT/GLOBK ditunjukkan pada **Gambar 6**



Gambar 6 Proses pengolahan data GPS dengan GAMIT/GLOBK (PuSGeN, 2017)

II.8 Estimasi Vektor Kecepatan Pergerakan

Data deret waktu koordinat yang diperoleh dari hasil pengolahan data GPS merupakan perubahan posisi stasiun GPS tersebut, sehingga dapat digunakan dalam estimasi nilai vektor kecepatan pergerakan suatu stasiun GPS.



Gambar 7 Persamaan kecepatan oleh garis lurus

Melalui ilustrasi **Gambar 7** di atas, persamaan umum garis tersebut dapat dituliskan secara matematis yaitu:

$$y = mx + b \dots \dots \dots (3)$$

x dan y merupakan koordinat hasil pengolahan data GPS, m merupakan gradien garis (vektor kecepatan), dan b adalah y yang memotong pada x = 0, Pengestimasi vektor kecepatan dilakukan dengan menggunakan metode kuadrat terkecil (Ghilani dan Wolf, 2006), sehingga persamaan diatas dibuat kedalam persamaan matriks terlebih dahulu yaitu:

$$AX = L + V \dots \dots \dots (4)$$

Dengan defenisi dari matriks tersebut adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} x_a & 1 \\ x_b & 1 \\ x_c & 1 \\ x_d & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} m \\ b \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} y_a \\ y_b \\ y_c \\ y_d \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} U_{ya} \\ U_{yb} \\ U_{yc} \\ U_{yd} \end{bmatrix}$$

Keterangan,
 x_a, x_b, x_c, x_d : Epok pengamatan GPS,

m : Vektor kecepatan
 b : Konstanta.
 ya, yb, yc, yd : Perubahan posisi stasiun GPS
 Uya, Uyb, Uyc, Uyd : Residu dari pengamatan GPS

Perhitungan parameter pada matriks X dapat dilakukan menggunakan perataan kuadrat terkecil, secara matematis dituliskan kedalam persamaan (5).

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \dots\dots\dots(5)$$

III. Metodologi Penelitian

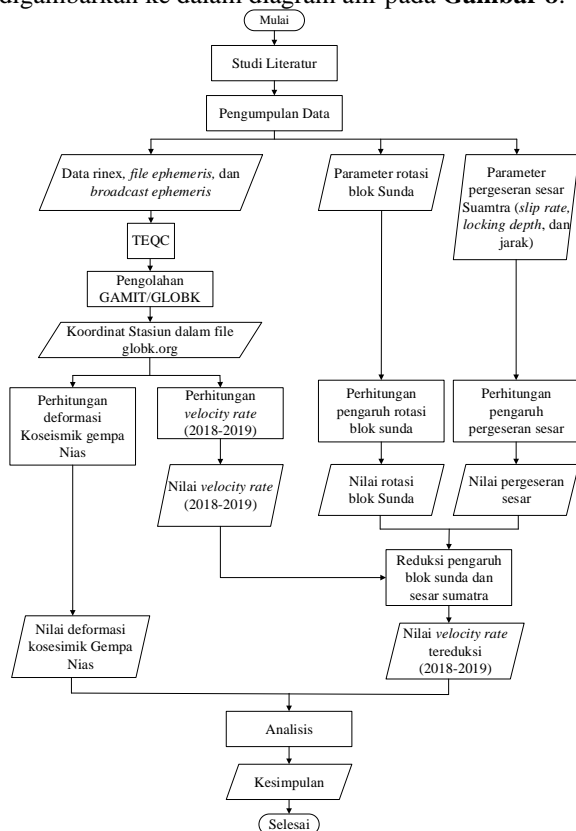
III.1 Tahap Persiapan

Persiapan kebutuhan data dilakukan untuk mendukung keberlangsungan dari penelitian ini. Data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

1. Data CORS GPS
 Stasiun CORS pengamatan yang digunakan berjumlah 7 stasiun CORS BIG dan 4 stasiun CORS SuGAR yang tersebar disekitar Pulau Nias. Stasiun CORS ikat yang digunakan adalah stasiun IGS berjumlah 4 stasiun yaitu BAKO, COCO, DGAR, dan DARW
2. Data Pendukung
 Beberapa data pendukung yang dibutuhkan dalam pengolah data GPS adalah *file broadcast ephemeris, precise ephemeris, H-files Global, file gelombang laut (pasang-surut), file pemodelan cuaca, dan file atmosfer dan shapefile* sesar Sumatra

III.2 Tahap Pengolahan Data

Secara garis besar, alur pelaksanaan penelitian ini digambarkan ke dalam diagram alir pada Gambar 8.



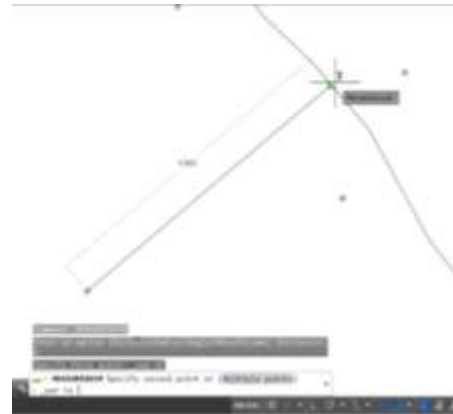
Gambar 8 Diagram Alir

III.2.1 Perhitungan Kecepatan Stasiun GPS

Data deret waktu (*time series*) yang dihasilkan dari pengolahan GAMIT/GLOBK digunakan untuk menghitung kecepatan pergerakan stasiun GPS (*velocity rate*) menggunakan persamaan (5). Perhitungan tersebut dilakukan secara otomatis menggunakan perangkat lunak Matlab R2017a.

III.2.2 Perhitungan Pergeseran Sesar

Berdasarkan persamaan (1), data yang dibutuhkan adalah nilai *slip rate* dan *locking depth*. Nilai kedua data tersebut diambil dari hasil penelitian Natawidjaja (2007). Data jarak tegak lurus (Y) antara stasiun GPS dan sesar Sumatra belum tersedia, proses ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *AutoCAD 2018* yaitu dengan menginput *shapfile* dari lokasi stasiun GPS dan sesar Sumatra lalu menghitung jarak tegak lurus menggunakan perintah *MEASGEOMETRY* atau *DIMLINEAR* pada *AutoCAD 2018* seperti pada Gambar 9.



Gambar 9 Jarak tegak lurus

Hasil perhitungan tersebut berupa pergeseran dari permukaan sebagai fungsi jarak $S(y)$. $S(y)$ merupakan vektor pergeseran yang sejajar dengan sesar Sumatra, sehingga untuk mendapatkan pergeseran dalam komponen *easting* dan *northing* maka perlu dilakukan perhitungan lebih lanjut dengan menggunakan persamaan (9) dan (10).

$$V_n = S(y) \sin \alpha \dots\dots\dots(9)$$

$$V_e = S(y) \cos \alpha \dots\dots\dots(10)$$

III.2.3 Perhitungan Pengaruh Rotasi Blok Sunda

Perhitungan kecepatan stasiun GPS akibat pengaruh gempa diperoleh dengan mereduksi pengaruh dari rotasi blok Sunda dan pergeseran sesar Sumatra. Perhitungan rotasi blok Sunda dilakukan pada perangkat lunak Matlab R2017a menggunakan rumus pada persamaan (2).

III.2.4 Perhitungan Deformasi Koseismik

Vektor pergeseran koseismik gempa dapat dihitung dengan rumus berikut ini:

$$dE_{12} = (E_2 - E_1) \dots\dots\dots(11)$$

$$dN_{12} = (N_2 - N_1) \dots\dots\dots(12)$$

$$D = \sqrt{dN^2 + dE^2} \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan,

- dN dan dE : deformasi *northing* dan *easting*
- D : deformasi horisontal,
- E₂ : koordinat rata-rata sesudah gempa
- E₁ : koordinat rata-rata sebelum gempa

IV. Hasil dan Analisis

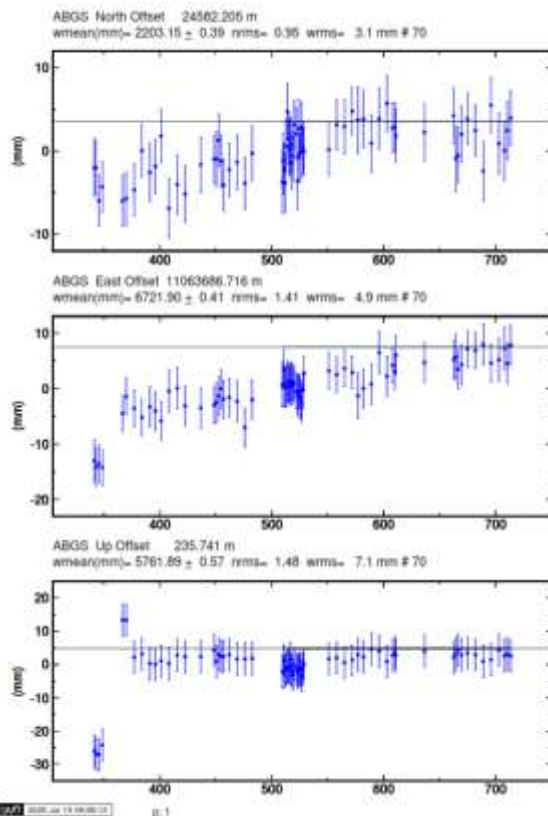
IV.1 Pengolahan GAMIT/GLOBK

Pada pengolahan GAMIT/GLOBK terdiri dari 2 hasil utama yaitu hasil dari proses *Automatic Batch Processing* (*sh_gamit*) dan proses pengujian koordinat *Repeatabilities* stasiun CORS dengan GLRED/GLOBK. Berikut ini akan dibahas satu per satu hasil dari kedua proses tersebut:

1. *Automatic Batch Processing*

File keluaran hasil pengolahan GAMIT disimpan pada *Q-File* seri a, *H-file* seri a, dan *sh_gamit.<ddd>.summary*. Kualitas hasil pada tahap ini telah sesuai dengan kriteria yang baik yaitu: nilai *postfit* *nrms* harus lebih kecil dari 0,25 dan harus lebih besar daripada nilai *prefit* *nrms*nya, yang menandakan bahwa efek dari *cycle slips* berhasil dihilangkan, kemudian total *WL-Fixed* dan *NL-Fixed* dari ambiguitas fase > 80%. Hal ini menandakan persentase penghilangan kesalahan akibat ambiguitas fase berhasil dihilangkan, dengan kata lain semakin besar persentasenya maka semakin bagus hasil yang diperoleh (dapat dilihat pada *file sh_gamit_ddd.summary*), lalu nilai *fract* atau nilai perbandingan antara nilai *adjustment* dan nilai formal tidak lebih dari 10 (dapat dilihat pada *qfile* seri a). Tahap selanjutnya yaitu pengujian koordinat *repeatabilities* stasiun CORS dengan GLRED/GLOBK.

2. Pengujian Koordinat *Repeatabilities* Stasiun CORS dengan GLRED/GLOBK



Gambar 10 Grafik *time series* stasiun ABGS

Beberapa keluaran yang dihasilkan oleh perintah GLRED/GLOGR diantaranya yaitu:

- i. *Log-files* (*.log) :berisi rekaman (log) dari proses pengolahan dimulai saat *h files* dimasukkan dan dikombinasikan dengan *H-files* baru sampai selesai
- ii. *Print-files* (*.prt) :berisi solusi *loosely constraint* dari GLOBK
- iii. *Org-files* (*.org) :berisi solusi *tight constrained* terikat pada kerangka acuan ITRF global yang didefinisikan oleh perintah GLOGR, pada *file* ini koordinat stasiun GPS ditampilkan.

Koordinat yang dihasilkan dalam pengolahan ini memiliki standar deviasi kurang dari 5 mm, sehingga hasil ini sangat memadai untuk pengamatan deformasi. Berikut ini adalah grafik *time series* stasiun ABGS yang diperoleh dari pengolahan GAMIT/GLOBK ditunjukkan pada Gambar 10, Nilai *wrms* < 10 mm menandakan tidak adanya *outlier* pada koordinat tersebut.

IV.2 Perhitungan Kecepatan stasiun GPS

Berikut ini merupakan hasil dari perhitungan kecepatan stasiun GPS dalam komponen *northing*, *easting*, dan *updown* berdasarkan persamaan (5).

Tabel 2 Kecepatan stasiunn GPS

STA	Velocity (m/tahun)			Standard Deviasi (m)		
	n	e	u	n	e	u
ABGS	0,026	0,014	0,017	0,002	0,002	0,008
BIT2	0,000	0,020	0,014	0,004	0,004	0,005
BTHL	0,011	0,009	0,005	0,003	0,003	0,005
CAIR	0,023	0,011	0,012	0,002	0,002	0,004
CBKJ	-0,005	0,017	0,013	0,002	0,002	0,003
CBLG	-0,008	0,017	0,012	0,002	0,002	0,003
CSBH	-0,001	0,019	0,009	0,002	0,002	0,003
CSBS	-0,003	0,014	0,018	0,002	0,002	0,004
CSIB	0,002	0,012	0,013	0,002	0,002	0,003
NIAN	0,025	0,015	0,007	0,002	0,002	0,004
PTLO	0,003	0,009	0,014	0,002	0,002	0,004

Secara jelas vektor pergerakan stasiun GPS tersebut digambarkan pada Gambar 11. Hasil pada Tabel 2 masih memiliki pengaruh dari rotasi blok Sunda dan pergeseran sesar Sumatra. Berikut ini adalah hasil dari perhitungan pengaruh rotasi blok Sunda terhadap masing-masing stasiun GPS yang digunakan.

Tabel 3 Pengaruh rotasi blok Sunda

Stasiun	Vn (m/th)	Ve (m/th)	Stasiun	Vn (m/th)	Ve (m/th)
ABGS	-0,003	0,03	CSBH	0,002	0,03
BIT2	-0,002	0,03	CSBS	-0,002	0,031
BTHL	-0,002	0,03	CSIB	-0,002	0,031
CAIR	-0,003	0,03	NIAN	-0,002	0,03
CBKJ	-0,002	0,032	PTLO	-0,002	0,03
CBLG	-0,002	0,031			

Secara keseluruhan pengaruh rotasi blok Sunda terhadap masing-masing stasiun GPS cenderung mengarah ke timur, sehingga perlu dihilangkan pengaruhnya untuk mendapatkan nilai *velocity* stasiun GPS akibat proses subduksi. Secara jelas vektor

pergerakan stasiun GPS tanpa pengaruh rotasi blok Sunda digambarkan pada **Gambar 12**.



Gambar 11 Kecepatan stasiun GPS komponen horizontal



Gambar 12 Kecepatan horizontal stasiun GPS tanpa pengaruh rotasi blok Sunda

Nilai kecepatan stasiun GPS akibat proses subduksi diperoleh dengan menghilangkan satu faktor lagi yaitu pergeseran sesar Sumatra. Berikut adalah hasil perhitungan pergeseran sesar Sumatra yang ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Pergeseran sesar Sumatra (S_y)

Stasiun	Y (km)	S_y (m/th)	Stasiun	Y (km)	S_y (m/th)
ABGS	58,689	-0,011	CSBH	23,511	0,009
BIT2	159,02	-0,013	CSBS	34,154	-0,01
BTHL	196,04	-0,013	CSIB	29,356	-0,009
CAIR	58,845	-0,011	NIAN	170,03	-0,013
CBKJ	0,724	0	PTLO	177,93	-0,013
CBLG	33,575	0,01			

Hasil pada tabel tersebut masih dalam fungsi sebagai jarak. Berikut ini adalah hasil pergeseran sesar

Sumatra dalam komponen *easting* dan *northing* yang diperoleh berdasarkan persamaan (9) dan (10) dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Pergeseran sesar Sumatra dalam (V_n) dan (V_e)

Stasiun	V_n (m/th)	V_e (m/th)	Stasiun	V_n (m/th)	V_e (m/th)
ABGS	0,002	-0,011	CSBH	-0,007	0,004
BIT2	0,006	-0,011	CSBS	0,004	-0,009
BTHL	0,007	-0,011	CSIB	0,005	-0,008
CAIR	0,002	-0,011	NIAN	0,006	-0,011
CBKJ	0,000	0,000	PTLO	0,007	-0,011
CBLG	-0,006	0,008			

Berikut ini adalah hasil dari nilai *velocity* tanpa pengaruh dari rotasi blok Sunda dan pergeseran sesar Sumatra atau kecepatan stasiun GPS akibat proses subduksi yang ditunjukkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Kecepatan stasiun GPS akibat proses subduksi

Stasiun	Kecepatan (m/tahun)			Standard Deviasi (m)		
	n	e	u	n	e	u
ABGS	-0,006	-0,006	0,017	0,002	0,002	0,008
BIT2	-0,004	0,001	0,014	0,004	0,004	0,005
BTHL	-0,006	-0,01	0,005	0,003	0,003	0,005
CAIR	-0,009	0,004	0,012	0,002	0,002	0,004
CBKJ	-0,004	-0,014	0,013	0,002	0,002	0,003
CBLG	0,001	-0,021	0,012	0,002	0,002	0,003
CSBH	0,004	-0,015	0,009	0,002	0,002	0,003
CSBS	-0,006	-0,008	0,018	0,002	0,002	0,004
CSIB	0,000	-0,01	0,013	0,002	0,002	0,003
NIAN	-0,02	-0,004	0,007	0,002	0,002	0,004
PTLO	-0,002	-0,01	0,014	0,002	0,002	0,004

Secara jelas vektor pergerakan stasiun GPS akibat proses subduksi digambarkan pada **Gambar 13**.



Gambar 13 Vektor kecepatan horizontal stasiun GPS akibat proses subduksi

Dari gambar tersebut dapat dianalisis bahwa pergerakan stasiun GPS cenderung mengarah ke barat daya setelah pengaruh dari rotasi blok Sunda dan pergeseran sesar Sumatra dihilangkan. Arah pergeseran ini merupakan arah yang terjadi pada saat proses setelah

gempa atau yang dikenal dengan proses *postseismic* gempa (Rino dkk, 2012).

Besar deformasi *postseismic* gempa Nias 2019 menghasilkan pergeseran terbesar pada stasiun NIAN (Nias) sebesar 0,021 m mengarah ke barat daya. Penelitian Nurdianasari (2017) menunjukkan besar pergeseran rata-rata stasiun GPS SuGAR akibat proses deformasi *postseismic* gempa Nias 2005 sebesar 0,221636 m mengarah ke barat daya. Gempa yang terjadi di Pulau Nias pada tahun 2019 merupakan gempa yang terjadi pada fase *postseismic* sejak 14 tahun yang lalu dihitung dari kejadian gempa Nias 28 maret 2005. Hasil tersebut menunjukkan bahwa deformasi *postseismic* gempa Nias tahun 2019 tidak sebesar deformasi *postseismic* gempa Nias tahun 2005 karena pelepasan sisa-sisa energi gempa sudah terjadi dalam jangka waktu yang panjang dan mungkin akan kembali lagi ke fase keseimbangan awal yang baru lagi.

IV.3 Deformasi Koseismik Gempa Nias

Berdasarkan persamaan (11), (12), dan (13) telah diperoleh hasil perhitungan deformasi koseismik gempa Nias dengan data koordinat yang digunakan adalah koordinat rata-rata dari 10 hari sebelum dan sesudah gempa terjadi. Berikut ini adalah hasil dari perhitungan deformasi koseismik gempa Nias 3 Juni 2019:

Tabel 7 Deformasi koseismik gempa Nias 3 Juni 2019

Stasiun	dN (m)	dE (m)	dHor (m)	std n (m)	std e (m)	std u (m)
ABGS	0,001	0,000	0,001	0,003	0,003	0,004
BIT2	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,006
BTHL	-0,004	0,001	0,004	0,003	0,003	0,004
CAIR	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004
CBKJ	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,004
CBLG	0,000	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004
CSBH	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004
CSBS	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,004
CSIB	0,000	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004
NIAN	0,000	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004
PTLO	0,001	-0,001	0,001	0,003	0,003	0,004

Besar deformasi *coseismic* gempa Nias 2019 menghasilkan pergeseran terbesar pada stasiun BTHL (Botohilitano) sebesar 0,004 m. Penelitian Qiu (2018) menunjukkan besar pergeseran rata-rata stasiun GPS SuGAR akibat proses deformasi *coseismic* gempa Nias 2005 < 5 m mengarah ke barat daya. Deformasi *coseismic* yang telah diperoleh dari penelitian ini tidak lebih besar dari deformasi *coseismic* yang terjadi pada tahun 2005. Hasil tersebut menunjukkan bahwa deformasi gempa Nias 3 Juni 2019 tidak sebesar deformasi gempa Nias 28 Maret 2005 karena gempa yang terjadi berada di fase yang berbeda. Gempa Nias 28 Maret 2005 merupakan gempa yang terjadi sebagai akibat dari pelepasan energi yang besar dan terjadi secara tiba-tiba.

IV.4 Uji Statistik

IV.4.1 Uji Statistik Velocity Rate

Uji statistik ini dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik (*Pij*) dari sesi pengamatan i ke pengamatan j yang nilainya dapat dihitung menggunakan rumus:

$$t = \frac{dV}{\sigma} \dots\dots\dots (14)$$

Menurut Prayitno (2015), pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesa nol ditolak jika:

$$t > t_{df,\alpha/2} \dots\dots\dots (15)$$

Derajat kebebasan (df) diasumsikan tak terhingga karena data yang diamati sangat banyak, oleh karena itu digunakan tabel distribusi normal dengan selang kepercayaan 95% sehingga *tdf,α/2* adalah 1,96. Hipotesa nol yang digunakan pada uji statistik ini adalah titik pengamatan tidak mengalami perubahan kecepatan pergeseran yang signifikan sehingga:

Hipotesis nol $H_0 : dV = 0$

Hipotesis alternatif $H_a : dV \neq 0$

Keterangan:

t : besaran signifikansi pergeseran

α : level signifikan yang digunakan

σ : standard deviasi

Berikut ini adalah hasil uji statistik *velocity rate* berdasarkan persamaan (14) dan (15)

Tabel 8 Hasil uji statistik *velocity rate* komponen horizontal

STA	Velocity (m/th)			Standard Deviasi (m)			t hitung	Signifi kansi
	Vn	Ve	Vhor	std. N	std. E	std. Hor		
ABGS	-0,006	-0,006	0,008	0,002	0,002	0,008	1,76	Tidak
BIT2	-0,004	0,001	0,004	0,004	0,004	0,005	0,69	Tidak
BTHL	-0,006	-0,010	0,012	0,003	0,003	0,005	2,42	Ya
CAIR	-0,009	0,004	0,010	0,002	0,002	0,004	2,36	Ya
CBKJ	-0,004	-0,014	0,014	0,002	0,002	0,003	3,52	Ya
CBLG	0,001	-0,021	0,021	0,002	0,002	0,003	5,03	Ya
CSBH	0,004	-0,015	0,015	0,002	0,002	0,003	3,77	Ya
CSBS	-0,006	-0,008	0,010	0,002	0,002	0,004	2,12	Ya
CSIB	0,000	-0,010	0,010	0,002	0,002	0,003	2,52	Ya
NIAN	-0,020	-0,004	0,021	0,002	0,002	0,004	4,63	Ya
PTLO	-0,002	-0,010	0,010	0,002	0,002	0,004	2,07	Ya

IV.4.2 Uji Statistik Deformasi Koseismik

Berikut ini adalah hasil uji statistik deformasi koseismik berdasarkan persamaan (14) dan (15)

Tabel 9 Hasil uji statistik deformasi koseismik

STA	Velocity (m/th)			Standard Deviasi (m)			t hitung	Signifi kansi
	Vn	Ve	Vhor	std. N	std. E	std. Hor		
ABGS	0,0009	0,0001	0,0009	0,003	0,003	0,004	0,21	Tidak
BIT2	-0,0002	-0,0001	0,0002	0,004	0,004	0,006	0,03	Tidak
BTHL	-0,0037	0,0009	0,0038	0,003	0,003	0,005	0,82	Tidak
CAIR	0,0022	0,0026	0,0034	0,003	0,003	0,004	0,81	Tidak
CBKJ	0,0000	0,0003	0,0002	0,003	0,003	0,004	0,06	Tidak
CBLG	-0,0001	0,0020	0,0020	0,003	0,003	0,004	0,51	Tidak
CSBH	0,0006	0,0008	0,0010	0,003	0,003	0,004	0,26	Tidak
CSBS	0,0004	0,0002	0,0005	0,003	0,003	0,005	0,11	Tidak
CSIB	0,0005	0,0017	0,0018	0,003	0,003	0,004	0,45	Tidak
NIAN	0,0003	0,0008	0,0009	0,003	0,003	0,004	0,20	Tidak
PTLO	0,0008	-0,0010	0,0013	0,003	0,003	0,005	0,27	Tidak

V. Kesimpulan dan Saran

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Deformasi koseismik yang terjadi akibat gempa Nias 3 Juni 2019 tidak memiliki perubahan yang signifikan terhadap pergerakan stasiun GPS yang diamati. Vektor pergerakan stasiun GPS tahun 2018-2019 akibat proses subduksi mengarah ke barat daya. Pergerakan stasiun GPS ini terjadi akibat proses *postseismic* gempa.
2. *Velocity rate* paling besar dirasakan oleh stasiun NIAN (Nias) sebesar 0,021 m, hal ini dikarenakan lokasi stasiun berada paling dekat dengan lokasi terjadinya gempa. Sementara *Velocity rate* paling kecil dirasakan oleh stasiun BIT2 sebesar 0,004 m. Setelah dilakukan uji statistik, *velocity rate* yang terjadi akibat proses *postseismic* gempa ini memberikan pengaruh yang signifikan terhadap beberapa stasiun pengamatan kecuali stasiun ABGS dan BIT2 tidak memiliki pergeseran yang signifikan.

V.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memilih lokasi penelitian yang mengalami gempa dengan skala sangat besar supaya dapat membentuk model deformasi yang terjadi dengan baik.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan jumlah stasiun CORS dan DoY yang lebih banyak lagi untuk meningkatkan kualitas pengamatan.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, HZ. 2008. Peranan Geodesi Satelit Dalam Memahami Dinamika Bumi di Wilayah Indonesia. *Artikel*. Majelis Guru Besar ITB Bandung

Anggriani, RM., Pujiastuti, D., dan Arisa, D. 2020, Analisis Deformasi Koseismik Gempa Mentawai 2008 Menggunakan Data GPS SuGAR. *Jurnal*. Vol 9. No 2. hal 150-155. ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)

Ghilani, CD. dan Wolf, PR. 2006. Adjustment Computations Spatial Data Analysis. Buku. Edisi IV. Hal 59. ISBN: 978-0-471-69728-2. United States of America.

Herring, TA., King, RW., Floyd, MA., dan McClusky, SC. 2018. GAMIT Reference Manual Realese 10,7. *Buku*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology

Hidayat, MN., Meilano, I., dan Gumilar, I. 2012. Regangan Tektonik dan Estimasi Potensi Bahaya Gempa di Selat Sunda Berdasarkan Data Pengamatan GPS. *Widyariset*. Vol 15. No 3. Hal 623. Bandung

Kuncoro, H. 2013. Methodology of Euler Rotation Parameter Estimation Using GPS Observation Data. *Indonesian Journal Of Geospatial*. Vol 1. No 2. Hal 44, 47, 52. Bandung

Lail, MHN., Awaluddin, M., dan Sasmito, B. 2018. Hitungan Kecepatan Pergeseran Titik Pengamatan Deformasi Dengan GPS Menggunakan Titik Ikat Regional Dan Global. *Jurnal*. Vol 7. No 1. Hal 103, ISSN : 2337-845X. Departemen Teknik Geodesi Universitas Diponegoro Semarang.

Natawidjaja, DH., dan Triyoso, W. 2007. The Sumatran Fault Zone — From Source To Hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*. Vol 1. No 1. Hal 23, 31. Bandung

Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. *Buku*. Cetakan I. ISBN: 978-602-5489-01-3. Indonesia

Qiu, Q., Feng, L., Hermawan, I., dan Hill, EM. 2018. Coseismic and Postseismic Slip of the 2005 Mw 8.6 Nias- Simeulue Earthquake: Spatial Overlap and Localized Viscoelastic Flow. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2018JB017263. Singapura

Rino, Meilano, I., Gumilar, I., dan Natawidjaja, DH. 2013. Tectonic Strain in Sumatra Based on Continuous Sumatran GPS Array (SuGAR) Observation 2007-2008. *Indonesian Journal Of Geospatial*. Vol 2. No 1. Hal 66. Bandung

Sieh, K. dan Natawidjaja, DH. 2000, Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B12, Hal 28,295-28,326. Pasadena-Indonesia

Simons, WJF., Socquet, A., Vigny, C., dkk. 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries. *Jurnal*. Vol 112. Hal 7

Susilo, S., Abidin, HZ., Meilano, I., dan Sapiie, B. 2015. On the Development and Implementations of the New Semi-Dynamic Datum for Indonesia. *Jurnal*. Hal 6-9. Indonesia

USGS. 2020, USGS Magnitude 5+ Earthquakes. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>. Diunduh pada tanggal 22 Juli 2020