



Analysis of Sangihe Islands Movements derived from Recent GPS Observation

Krishna Fitranto Nugroho¹, Leni S. Heliani²,

¹ Alumni Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

² Staf Pengajar Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

ARTICLE INFO

Article History:

Received 4 November 2019

Received in revised form 19 December 2019

Accepted 20 December 2019

Available online 30 December 2019

Keywords:

Sangihe Island, Geodynamics, Deformation, Velocity, Strain

Corresponding Author:

Leni S. Heliani

Email: lheliani@ugm.ac.id

ABSTRACT

Sangihe Islands is one of the districts in Republic of Indonesia, located in North Sulawesi Province which borders with the Philippines. Sangihe subduction zone is a subduction between the Sangihe plate and the Maluku sea plate. (Di Leo, et al., 2012). This situation causes the Sangihe Islands region to be very prone to earthquake, so mitigation efforts are needed to minimize the impact of disasters. One of the mitigation efforts is mapping the potential of earthquakes through Geodynamic studies with GNSS technology which are represented at the point of deformation control. This Geodynamic study were using four times GNSS observations epoch 2015, 2016, 2017 and 2018 tied to ITRF 2014. The multiepoch method is used to calculate the movement velocity of the Sangihe plate and simultaneous tectonic plate strain observation for 3D deformation analysis. The results of this study are the coordinates and accuracy values of monitoring point also the plate movement velocity and annual tectonic plate strain values. The movement velocity of the Sangihe plate is SGH1 point is having horizontal deformation of 9.88 mm / year to the southeast and vertical deformation descend by 58.66 mm/year. SGH3 point is having horizontal deformation of 12.74 mm/year to the southeast and vertical deformation descend by 18.51 mm/year. SGH4 point is having horizontal deformation of 19.04 mm/year to the southeast and vertical deformation descend by 5.27 mm/year. This research also proves the hypothesis of a change in the volume of the Sangihe Islands tectonic plate based on the values of normal strain parameters and shear strain in the fraction of 10^{-6} to 10^{-4} strains.

© Author(s) 2019. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Kepulauan Sangihe merupakan salah satu kabupaten yang berada di wilayah perbatasan Republik Indonesia tepatnya berada di Provinsi Sulawesi Utara yang berbatasan dengan Filipina. Kepulauan Sangihe terletak di Lempeng Sangihe yang merupakan salah satu lempeng tektonik mikro dari Lempeng Eurasia dan menjadi bagian dari kompleks wilayah tektonik Sulawesi-Filipina. Zona Sangihe merupakan zona subduksi aktif tertua di wilayah Indonesia-Filipina yang terbentuk \pm 25 juta tahun yang lalu (Jaffe, dkk, 2004). Zona tersebut memanjang dari 10°

Lintang Utara di selatan Filipina sampai 1° Lintang Selatan di utara Provinsi Sulawesi Utara. Pada bagian timur Lempeng Sangihe mengalami subduksi dengan Lempeng Laut Maluku dan Lempeng Laut Filipina ke arah timur dengan kedalaman 40 s.d. 45 derajat dengan kedalaman sekitar 200 s.d. 300 km (Tatsumi, dkk, 1991). Hal ini menyebabkan wilayah Kepulauan Sangihe sering mengalami gempa tektonik baik dengan skala besar maupun kecil. Menurut data BMKG, dalam rentang waktu bulan Januari s.d. November 2018 telah terjadi lebih dari 10 kali gempa bumi dengan kekuatan lebih dari 5 SR yang

mengguncang wilayah di sekitar Kepulauan Sangihe dan Talaud Provinsi Sulawesi Utara. Gempa terbesar terjadi pada tanggal 12 Februari 2009 dengan kekuatan gempa sebesar 7,4 SR yang menimbulkan banyak kerusakan serta korban jiwa. Oleh karena itu, diperlukan mitigasi untuk meminimalisasi dampak bencana.

Upaya mitigasi yang dapat dilakukan yaitu memprediksi dan memetakan daerah - daerah di wilayah Kepulauan Sangihe yang berpotensi terjadi gempa tektonik melalui studi geodinamika. Studi geodinamika bertujuan untuk mengetahui informasi mengenai besar dan arah pergeseran lempeng tektonik. Metode yang efisien untuk mendapatkan informasi tersebut yaitu metode akuisisi data berdasarkan pemanfaatan teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Penggunaan teknologi GNSS untuk studi geodinamika sudah dilakukan dalam pengamatan kondisi tektonik lempeng-lempeng aktif di beberapa wilayah di Indonesia seperti pada Pulau Sumatera dan Pulau Jawa (Anugrah, dkk, 2015 ; Koulali, dkk, 2016 ; Gunawan, E dan Widiyantoro, S, 2019).

Beberapa penelitian mengenai analisis pergerakan lempeng tektonik telah dilakukan, antara lain analisis pergerakan lempeng tektonik berdasarkan dua kala pengamatan GNSS *epoch* 2014 dan 2015 yang di ikatkan pada ITRF 2008 (Kurniawan, 2016). Kemudian, analisis pergerakan berdasarkan tiga kala pengamatan GNSS *epoch* 2014, 2015, dan 2016 yang diikatkan dengan ITRF 2014 (Nugraha, 2017) dan analisis pergerakan dan regangan lempeng tektonik berdasarkan empat kala pengamatan GNSS *epoch* 2014, 2015, 2016 dan 2017 (Ladivanov, 2018). Pada penelitian ini telah dilakukan analisis deformasi *multiepoch* menggunakan empat kala pengamatan GNSS, yaitu *epoch* 2015, 2016, 2017 dan 2018 yang diikatkan terhadap ITRF 2014, karena telah dilakukan pengukuran tambahan pada tahun 2018. Analisis deformasi 3D yang dilakukan berupa perhitungan kecepatan pergerakan lempeng Sangihe dan pengamatan regangan lempeng tektonik tahunan secara simultan.

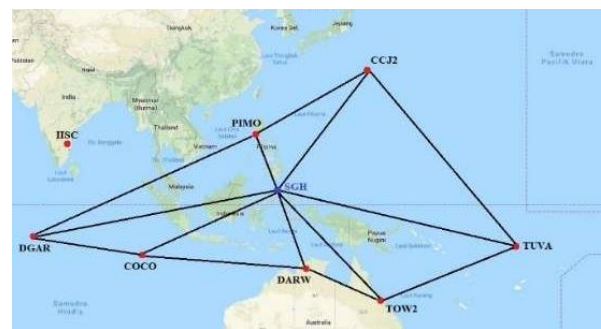
Berdasarkan hal tersebut, maka lingkup dari penelitian ini yaitu:

- a. Pengukuran di tiga titik pantau deformasi (SGH1, SGH3, dan SGH4) pada epoch 2018 dengan metode GNSS.
- b. Pengolahan data pengamatan epoch 2015, 2016, 2017, dan 2018 dengan perangkat ilmiah GAMIT/GLOBK yang diikatkan terhadap ITRF 2014 untuk mendapatkan nilai serta ketelitian koordinat titik-titik pantau deformasi menggunakan metode *multiepoch*.
- c. Analisis pergeseran 3D titik-titik pantau deformasi sebagai representasi pergerakan lempeng tektonik Kepulauan Sangihe.

- d. Analisis regangan 3D titik-titik pantau deformasi sebagai representasi perubahan volume lempeng tektonik Kepulauan Sangihe.
- e. Analisis deformasi dilakukan tanpa mempertimbangkan kondisi aktifitas vulkanik, gempa bumi serta kondisi geologi Kepulauan Sangihe, sehingga hanya mempertimbangkan aspek geometrik.

2. Data dan Metodologi

Data utama merupakan data hasil pengamatan GNSS *epoch* 2018 pada tiga titik pantau yaitu titik SGH1, titik SGH3, dan titik SGH4 dengan *day of year (doy)* 222 s.d. 228. Data sekunder menggunakan data pengamatan sebelumnya yaitu *epoch* 2015, 2016, dan 2017. Titik ikat global digunakan data rinex dari stasiun IGS yaitu stasiun CCJ2, PIMO, DGAR, COCO, DARW, TOW2, dan TUVA. Desain jaring titik ikat global yang digunakan merupakan desain jaring yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Ladivanov (2018).



Gambar 2.1 Desain jaring titik ikat global (Ladivanov, 2018)

Pengolahan empat *epoch* data dilakukan secara simultan dengan GAMIT-GLOBK, diawali dengan pengecekan kualitas data ukuran dengan TEQC. Hasil evaluasi kualitas data, selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk pengolahan data harian menggunakan GAMIT dan data *multiepoch* dengan GLOBK.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil yang dibahas meliputi empat bagian, yaitu:

- a. Kualitas data dan kualitas hasil pengolahan data.
- b. Nilai dan ketelitian koordinat dari data pengukuran *epoch* 2018.
- c. Vektor kecepatan pergerakan 3D Lempeng Sangihe *epoch* 2015 s.d. 2018.
- d. Nilai parameter regangan Lempeng Sangihe *epoch* 2015 s.d. 2018.

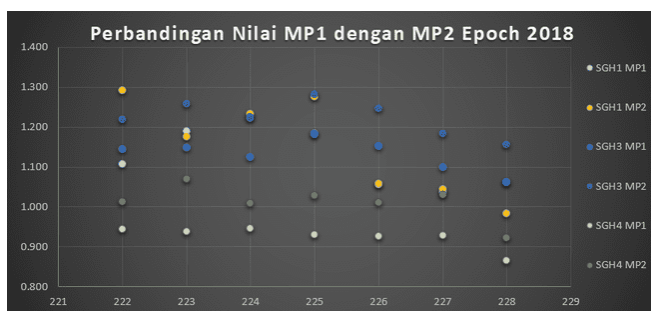
3.1. Kualitas Data Pengukuran *Epoch* 2018

Pengukuran *epoch* 2018 dilakukan pada tiga titik pantau deformasi yaitu SGH1, SGH3 dan SGH4. Masing-masing titik terdiri atas tujuh *doy* pengamatan yaitu *doy* 222, 223, 224, 225, 226, 227, dan 228. Hasil pengecekan kualitas data pengukuran *epoch* 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hasil pengecekan kualitas data pada *epoch* 2018

| Titik Pantau | <i>doy</i> | Parameter Kualitas Data Pengamatan | | | |
|--------------|------------|------------------------------------|-------|------------------|------------------------|
| | | MP1 | MP2 | IOD <i>slips</i> | IOD or MP <i>slips</i> |
| SGH1 | 222 | 1,107 | 1,292 | 20 | 39 |
| | 223 | 1,190 | 1,176 | 16 | 43 |
| | 224 | 1,222 | 1,232 | 18 | 41 |
| | 225 | 1,184 | 1,275 | 17 | 51 |
| | 226 | 1,056 | 1,058 | 12 | 39 |
| | 227 | 1,035 | 1,045 | 13 | 23 |
| | 228 | 1,063 | 0,983 | 4 | 9 |
| SGH3 | 222 | 1,143 | 1,220 | 1 | 1 |
| | 223 | 1,147 | 1,258 | 2 | 2 |
| | 224 | 1,124 | 1,225 | 2 | 2 |
| | 225 | 1,181 | 1,281 | 2 | 2 |
| | 226 | 1,152 | 1,246 | 2 | 2 |
| | 227 | 1,099 | 1,183 | 2 | 2 |
| | 228 | 1,061 | 1,156 | 0 | 0 |
| SGH4 | 222 | 0,945 | 1,012 | 3 | 9 |
| | 223 | 0,939 | 1,070 | 11 | 12 |
| | 224 | 0,945 | 1,009 | 11 | 14 |
| | 225 | 0,930 | 1,028 | 10 | 16 |
| | 226 | 0,927 | 1,012 | 12 | 13 |
| | 227 | 0,928 | 1,030 | 10 | 13 |
| | 228 | 0,866 | 0,922 | 1 | 1 |

Tabel 3.1. menunjukkan hasil pengecekan kualitas data rinex dengan TEQC berdasarkan parameter MP1, MP2, IOD *slips* dan IOD or MP *slips*. Data pengukuran dengan kualitas data yang baik harus memenuhi persyaratan nilai *moving average* kurang dari 0,5 m. Visualisasi dari nilai *moving average* ditunjukkan dalam Gambar 3.1.

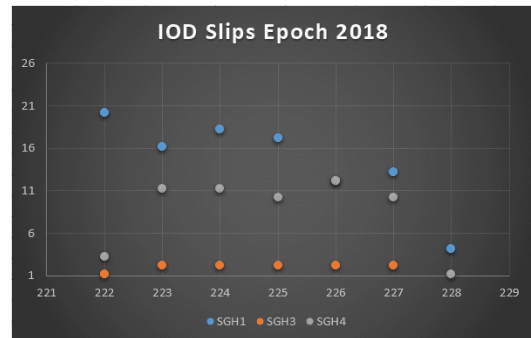


Gambar 3.1 Visualisasi nilai *moving average epoch* 2018

Berdasarkan Gambar 3.1, perbandingan nilai *moving average* dari pengamatan harian *epoch* 2018 menunjukkan tingkat konsistensi yang cukup baik pada titik SGH3 dan

SGH4 karena kondisi *obstruksi* di sekitar titik - titik tersebut yang menunjukkan perekaman data *multipath* kode MP1 dan MP2 memiliki nilai yang hampir sama, sedangkan pada titik SGH1 terjadi inkonsistensi antara nilai MP1 dan MP2. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat pohon yang cukup besar di sebelah utara titik SGH1 dan gedung sekolah yang cukup dekat dengan titik, sehingga mengakibatkan penerimaan sinyal *multipath* yang berbeda antara kode MP1 dan MP2.

Data pengukuran dengan kualitas yang baik harus memenuhi persyaratan nilai IOD *slips* kurang dari 100. Visualisasi dari nilai IOD *slips* ditunjukkan Gambar 3.2.

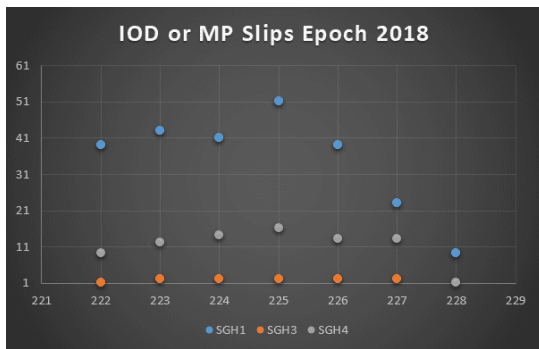


Gambar 3.2 Visualisasi nilai IOD *slips epoch* 2018

Berdasarkan Gambar 3.2, nilai IOD *slips* pada semua titik pantau memiliki nilai dengan kecenderungan stabil di tengah pengukuran tepatnya pada *doy* 223, 224, 225, 226, 227 dan akan mengalami perubahan di awal dan akhir pengukuran. Hal ini disebabkan oleh cuaca saat pengukuran dan posisi titik pantau.

Faktor lain yang mempengaruhi nilai IOD *slips* adalah posisi titik pengamatan. Titik SGH3 memiliki rata-rata nilai IOD *slips* yang lebih rendah dibandingkan titik SGH1 dan SGH4. Hal ini disebabkan karena posisi titik SGH3 yang lebih tinggi dibandingkan dengan SGH1 dan SGH4. Posisi titik yang semakin tinggi mereduksi kesalahan yang terjadi yang diakibatkan perlambatan pengiriman sinyal.

Nilai IOD or MP *slips* merupakan hitungan dari jumlah keterlambatan ionosfer dan atau *multipath slips*, yang merupakan gabungan dari MP1 dan MP2 yang memiliki persyaratan nilai IOD or MP *slips* kurang dari 100. Visualisasi dari nilai IOD or MP *slips* ditunjukkan dalam Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Visualisasi nilai IOD or MP slips epoch 2018

Berdasarkan Gambar 3.3 nilai IOD or MP slips titik SGH1 memiliki nilai yang lebih tinggi daripada titik pantau yang lain dikarenakan posisi titik yang berada di daerah yang tidak tinggi dan terdapat banyak obstruksi seperti pohon dan bangunan sekolah.

3.2. Kualitas Hasil Pengolahan Data Gamit

Nilai *fract* merupakan hasil perbandingan antara nilai *adjust* dengan nilai formal pada masing-masing komponen koordinat geografis. Nilai *fract* diperoleh dari pengembangan konsep *residual*, dimana nilai *adjust* diperoleh dari selisih antara nilai koordinat pendekatan dengan hasil koordinat perataan. Nilai *fract* digunakan untuk mendeteksi adanya kesalahan kasar maupun sistematis yang terdapat pada pengolahan GAMIT. Nilai *fract* dinyatakan diterima apabila nilainya kurang dari 10. Nilai *fract* data pengukuran epoch 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Nilai *fract* data pengukuran epoch 2018

| Titik | Label | Unit | Nilai <i>Fract</i> per <i>day</i> | | | | | | |
|-------|---------|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 |
| SGH1 | Lintang | dms | -0,2 | 0,2 | -0,3 | 0,0 | -0,2 | -0,5 | -0,1 |
| | Bujur | dms | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | 0,8 | 0,2 |
| | Radius | km | 0,4 | -0,3 | -0,3 | 0,1 | -0,5 | -0,4 | 0,2 |
| SGH3 | Lintang | dms | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,4 | -0,5 | -0,4 | -0,2 |
| | Bujur | dms | -0,6 | -0,4 | 0,2 | -0,7 | -0,6 | -0,7 | -0,4 |
| | Radius | km | -0,2 | -0,1 | 0,2 | -0,4 | -0,4 | 0,0 | -0,5 |
| SGH4 | Lintang | dms | -0,1 | -0,4 | -0,3 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,2 |
| | Bujur | dms | -0,7 | -0,9 | -0,5 | -1,6 | -1,0 | -1,3 | -0,8 |
| | Radius | km | -0,6 | -0,5 | -0,6 | -1,0 | -0,7 | -0,6 | 0,2 |

Pada Tabel 3.2. nilai *fract* hasil pengolahan GAMIT memiliki nilai *fract* yang bervariasi. Secara keseluruhan, hasil pengolahan GAMIT untuk semua titik memenuhi persyaratan nilai *fract* yaitu bernilai di bawah 10. Hal ini menunjukkan bahwa dalam pengolahan GAMIT data pengukuran epoch 2018 tidak terdapat kesalahan kasar maupun sistematis.

Nilai *postfit nrms* digunakan untuk mengetahui kualitas model pengamatan hasil pengolahan GAMIT. Nilai *postfit nrms* merupakan pengembangan dari penggunaan

parameter uji global yang digunakan untuk mengindikasikan adanya bias atau kesalahan yang disebabkan oleh efek *cycle slip*. Nilai *postfit nrms* dinyatakan diterima apabila nilainya kurang dari 0,25. Nilai *postfit nrms* data pengukuran epoch 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai *postfit nrms* data pengukuran epoch 2018

| day | <i>Postfit Nrms</i> | | | |
|-----|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| | <i>Constrained</i> | | <i>Loose</i> | |
| | <i>Free</i> | <i>Fixed</i> | <i>Free</i> | <i>Fixed</i> |
| 222 | 0,2041 | 0,2086 | 0,1933 | 0,1977 |
| 223 | 0,2030 | 0,2071 | 0,1946 | 0,1989 |
| 224 | 0,1944 | 0,1985 | 0,1866 | 0,1905 |
| 225 | 0,1970 | 0,2021 | 0,1902 | 0,1946 |
| 226 | 0,1993 | 0,2044 | 0,1917 | 0,1962 |
| 227 | 0,2043 | 0,2084 | 0,1961 | 0,2004 |
| 228 | 0,1991 | 0,2023 | 0,1878 | 0,1915 |

Pada Tabel 3.3. dapat diketahui nilai *postfit nrms* hasil pengolahan GAMIT tidak memiliki perbedaan yang signifikan baik pada kondisi *constrained* maupun *loose*. Secara keseluruhan, dari nilai *postfit nrms* tersebut tidak terdapat satu pun nilai *postfit nrms* yang memiliki nilai lebih dari 0,25. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian bobot apriori benar dan tidak terdapat kesalahan dalam pemodelan sehingga hasil pengolahan GAMIT pada data pengukuran epoch 2018 diterima.

3.3. Kualitas Hasil Pengolahan Data GLOBK

Setelah melakukan pengecekan kualitas data hasil pengolahan GAMIT dan memastikan hasil pengolahan dapat diterima, pengolahan dapat dilanjutkan ke tahapan pengolahan GLOBK dan analisis hasil pengolahan GLOBK tersebut. Analisis ini dilakukan dengan memperhatikan nilai statistik X^2/f dan nilai *wrms* yang terdapat pada file *globk_final.log*. Nilai statistik X^2/f atau *chi square increment per degree of freedom* digunakan untuk menentukan konsistensi dari solusi GAMIT terhadap parameter GLOBK yang ditetapkan. Menurut Lestari (2006), nilai X^2/f tidak boleh lebih dari 10. Nilai X^2/f data pengukuran epoch 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai X^2/f data pengukuran epoch 2018

| day | Nilai X^2/f |
|-----|---------------|
| 222 | 0,001 |
| 223 | 0,944 |
| 224 | 1,378 |
| 225 | 0,761 |
| 226 | 1,193 |
| 227 | 2,260 |
| 228 | 1,801 |

Tabel 3.4 menunjukkan nilai statistik X^2/f hasil pengolahan GLOBK epoch 2018 berada di antara 0,001 s.d. 2,260 sehingga tidak terdapat nilai yang melebihi nilai 10.

Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan GLOBK untuk data pengukuran *epoch* 2018 dianggap konsisten.

Tabel 3.5 Nilai *wrms* data pengukuran *epoch* 2018

| Komponen | Nilai <i>wrms</i> |
|----------|-------------------|
| N | 3,13 |
| E | 3,00 |
| U | 10,73 |

Pada Tabel 3.5 menunjukkan nilai *wrms* hasil pengolahan GLOBK *epoch* 2018 pada komponen N dan E memiliki nilai dibawah nilai syarat sehingga dapat ditentukan bahwa pada komponen tersebut tidak ada data *outlier*, sedangkan pada komponen U terdapat data *outlier* yang ditunjukkan dengan nilai komponen yang lebih besar daripada nilai syarat. Hal ini terjadi karena adanya data *outlier* pada komponen U titik SGH 1 yang ditunjukkan dengan nilai *wrms* yang berbeda signifikan pada plot *time series* titik SGH1 yang disebabkan oleh kondisi *obstruksi* di sekitar titik SGH1.

3.4. Nilai Dan Ketelitian Koordinat Titik Pantau *Epoch* 2018

Koordinat dan simpangan baku data pengukuran *epoch* 2018 diperoleh dari pengukuran GNSS pada 3 titik pantau yaitu SGH1, SGH3 dan SGH4, dimana masing-masing titik dilakukan pengukuran GNSS metode static selama tujuh hari yaitu *day* 222, 223, 224, 225, 226, 227, dan 228. Koordinat dan simpangan baku titik pantau deformasi pada *epoch* 2018 ditampilkan pada Tabel 3.6. dengan sistem koordinat toposentrik dan pada Tabel 3.7. dengan sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM).

Tabel 3.6 Nilai koordinat dan simpangan baku *epoch* 2018 (toposentrik)

| Epoch | Titik | Koordinat (m) | | | Simpangan Baku (mm) | | |
|-------|-------|---------------|----------------|-----------|---------------------|------|-------|
| | | N | E | U | N | E | U |
| 2018 | SGH1 | 415703,30463 | 13934663,17969 | 93,05206 | 2,30 | 3,15 | 10,98 |
| | SGH3 | 371708,33269 | 13954900,17966 | 146,96550 | 0,85 | 1,09 | 3,15 |
| | SGH4 | 403326,18388 | 13936373,03824 | 89,43167 | 0,88 | 1,14 | 3,60 |

Pada Tabel 3.6 dapat dilihat komponen N dan E merupakan koordinat horizontal sedangkan komponen U merupakan koordinat vertikal (ketinggian). Nilai simpangan baku pada titik SGH1 sebesar 2,30 s.d. 10,98 mm, pada titik SGH3 sebesar 0,85 s.d. 3,15 mm, dan pada titik SGH4 sebesar 0,88 s.d. 3,60 mm.

3.5. Vektor Kecepatan Pergerakan 3d Lempeng Sangihe

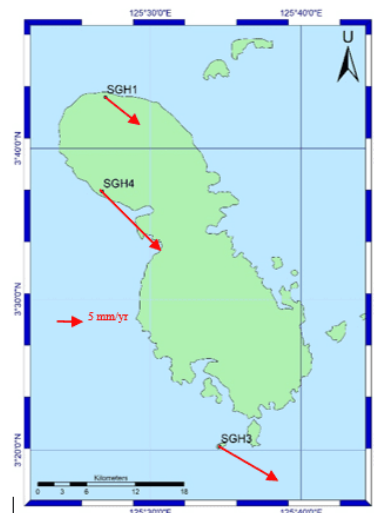
Hasil analisis perhitungan kecepatan diestimasi dengan *Kalman Filtering* dari koordinat harian titik hasil *loosely constraint*. Perhitungan dihitung secara simultan dengan hasil pengamatan GNSS *epoch* 2015 s.d. 2018 yang

diolah dengan GLOBK. Hasil perhitungan kecepatan pergerakan ditampilkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Kecepatan pergerakan 3D *epoch* 2015 ke 2018

| Titik | Kecepatan (mm/tahun) | | | | Simpangan Baku (mm) | | | Azimuth | Arah |
|-------|----------------------|-------|--------|-------|---------------------|------|------|-----------------|----------|
| | N | E | U | Hz | N | E | U | | |
| SGH1 | -6,12 | 7,75 | -58,66 | 9,88 | 1,76 | 2,25 | 8,29 | 128° 17' 50,47" | Tenggara |
| SGH3 | -6,51 | 10,95 | -18,51 | 12,74 | 0,95 | 1,20 | 3,70 | 120° 43' 56,47" | Tenggara |
| SGH4 | -12,23 | 14,59 | -5,27 | 19,04 | 1,06 | 1,34 | 4,66 | 129° 58' 16,56" | Tenggara |

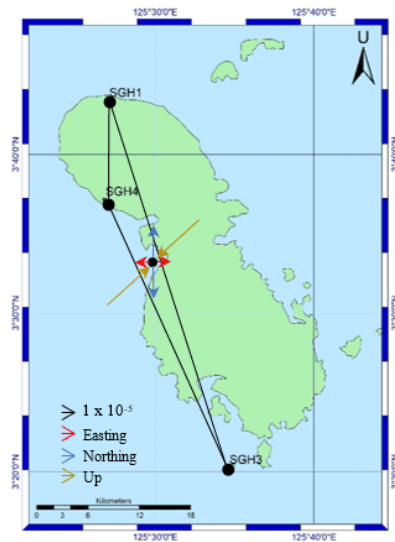
Pada Tabel 3.7 dapat diketahui nilai kecepatan pergerakan terkecil terdapat pada komponen U SGH4 sebesar 5,27 mm/tahun, dan nilai kecepatan pergerakan terbesar terdapat pada komponen U SGH1 sebesar 58,66 mm/tahun. Arah pergeseran titik pantau diketahui bahwa semua titik mengalami pergeseran ke arah yang sama yaitu ke arah tenggara dengan *azimuth* yang berbeda - beda. Jika dirata - rata nilai kecepatan pergerakan horizontal Lempeng Sangihe sebesar 13,884 mm/tahun ke arah tenggara. Visualisasi arah pergeseran horizontal dan vertikal ditampilkan pada Gambar 3.4 dan 3.5.



Gambar 3.4 *Plotting* kecepatan horizontal dari *epoch* 2015 ke 2018



Gambar 3.5 Plotting kecepatan vertikal dari epoch 2015 ke 2018



Gambar 3.6 Visualisasi regangan normal 3D dari epoch 2015 ke 2018

3.6. Hasil Perhitungan Parameter Regangan

Parameter regangan dihitung secara simultan dengan hasil pengolahan data GNSS epoch 2015 ke 2018 dari tiga titik pantau yaitu SGH1, SGH3 dan SGH4. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui besar nilai parameter regangan pada Lempeng Sangihe. Tabel 3.8 menunjukkan nilai regangan beserta simpangan baku.

Tabel 3.8 Nilai Parameter Regangan

| Parameter dan satuannya | Multiepoch (2015-2018) | | |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Nilai Parameter | Simpangan Baku | |
| U_0 | M | -0,0797 | 0,0012 |
| V_0 | M | -0,0067 | 0,0016 |
| W_0 | M | -0,0058 | 0,0054 |
| ω_{ne} | rad | $1,25 \times 10^{-5}$ | $5,14 \times 10^{-7}$ |
| ω_{nu} | rad | $-4,15 \times 10^{-3}$ | $6,49 \times 10^{-5}$ |
| ω_{eu} | rad | $-3,47 \times 10^{-4}$ | $8,32 \times 10^{-5}$ |
| e_{nn} | S | $1,05 \times 10^{-4}$ | $7,61 \times 10^{-7}$ |
| e_{ee} | S | $3,63 \times 10^{-6}$ | $4,33 \times 10^{-7}$ |
| e_{uu} | S | $-3,02 \times 10^{-4}$ | $2,81 \times 10^{-4}$ |
| γ_{ne} | S | $2,48 \times 10^{-5}$ | $4,97 \times 10^{-7}$ |
| γ_{nu} | S | $-4,15 \times 10^{-4}$ | $6,46 \times 10^{-5}$ |
| γ_{eu} | S | $-3,48 \times 10^{-4}$ | $8,32 \times 10^{-5}$ |

Tabel 3.8. menunjukkan nilai parameter regangan beserta simpangan baku yang dapat dijelaskan bahwa titik pantau pada epoch 2015 ke 2018 mengalami regangan normal dan geser pada fraksi 10^{-6} s.d. 10^{-4} strain dengan nilai translasi antara 5,8 s.d. 7,9 mm dan nilai rotasi antara $1,25 \times 10^{-5}$ rad s.d. $-4,15 \times 10^{-3}$ rad. Visualisasi regangan normal antar epoch 2015 ke 2018 ditampilkan pada Gambar 3.6.

Tabel 3.9 Nilai ekstensi dan kompresi jaring

| Parameter | Nilai |
|------------------------------|--|
| Nilai Ekstensi (e_{max}) | $1,06 \times 10^{-4}$ |
| Nilai Kompresi (e_{min}) | $2,14 \times 10^{-6}$ |
| Sudut Regangan (θ) | $13,73116$ $13^{\circ} 43' 52,18''$ |

Tabel 3.9 menunjukkan nilai ekstensi dan kompresi pada bidang 2D yang terjadi pada jaring titik pantau. Nilai ekstensi ditunjukkan pada nilai e_{max} sedangkan nilai kompresi ditunjukkan pada nilai e_{min} . Nilai θ merupakan nilai sudut regangan. Visualisasi regangan 2D antar epoch 2015 ke 2018 ditampilkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Visualisasi nilai parameter regangan 2D dari epoch 2015 ke 2018

3.7. Hasil Uji Parameter Regangan

Uji parameter regangan dilakukan dengan uji kesamaan ($T_{similarity}$) dan uji kesebangunan ($T_{congruency}$). Uji kesamaan untuk *epoch* 2015 ke 2018 dilakukan dengan sebaran Chi Square χ^2 pada tingkat kepercayaan 95% dan enam derajat kebebasan. Berdasarkan argumen tersebut, nilai $\chi^2_{6,1-0,05}$ adalah 12,592. Jika $T_{similarity} < \chi^2_{6,1-0,05}$ maka uji kesamaan diterima. Hasil uji kesamaan dapat dilihat pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Hasil uji kesamaan jaring titik pantau

| <i>Epoch</i> | $T_{similarity}$ | $\chi^2_{6,1-0,05}$ | Hasil uji |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------|
| 2015 ke 2018 | $7,7664 \times 10^{-14}$ | 12,592 | Diterima |

Berdasarkan Tabel 3.10 hasil pada uji tersebut menunjukkan bahwa nilai uji kesamaan diterima karena hasil hitungan lebih kecil dari nilai tabel Chi Square. Hasil tersebut membuktikan bahwa titik pantau yang digunakan dalam pengamatan masih sama dengan titik pada *epoch* 2015. Selanjutnya karena hasil uji kesamaan dinyatakan diterima maka dilakukan uji kesebangunan jaring untuk mengetahui ada tidaknya deformasi dalam jaring. Uji kesebangunan dilakukan dengan argumen yang sama seperti uji kesamaan, sehingga uji kesebangunan diterima apabila $T_{congruency} < \chi^2_{6,1-0,05}$. Hasil uji kesebangunan dapat dilihat pada Tabel 3.12.

Tabel 3.11 Hasil uji kesebangunan jaring titik pantau

| <i>Epoch</i> | $T_{congruency}$ | $\chi^2_{6,1-0,05}$ | Hasil uji |
|--------------|----------------------|---------------------|-----------|
| 2015 ke 2018 | $1,9651 \times 10^4$ | 12,592 | Ditolak |

Berdasarkan Tabel 3.11 hasil uji menunjukkan bahwa nilai uji kesebangunan ditolak karena hasil hitungan lebih besar dari nilai tabel Chi Square. Hasil tersebut mengindikasikan adanya perubahan bentuk geometri jaring titik pantau dari *epoch* 2015 ke 2018.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diperoleh, maka kesimpulan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Ketelitian titik pantau *epoch* 2018 pada titik SGH1 sebesar 2,30 s.d. 10,98 mm, pada titik SGH3 sebesar 0,85 s.d. 3,15 mm, dan pada titik SGH4 sebesar 0,88 s.d. 3,60 mm. Nilai ketelitian titik SGH1 lebih besar dari nilai ketelitian titik lainnya. Lebih rendahnya nilai ketelitian titik SGH1 pada *epoch* 2018 disebabkan oleh kondisi obstruksi disekitar lokasi pengukuran titik SGH1.

2. Titik pantau deformasi di Kepulauan Sangihe mengalami pergerakan per tahunnya secara simultan dari pergerakan *epoch* 2015, 2016, 2017, dan 2018. Seluruh titik pantau deformasi bergerak ke arah tenggara dengan pergerakan horizontal terbesar 13,88 mm/tahun..
3. Perhitungan regangan dari *epoch* 2015 hingga 2018 menghasilkan nilai regangan normal dan regangan geser pada fraksi 10^{-6} s.d. 10^{-4} strain. Hasil perhitungan parameter regangan ini jika dibandingkan dengan kondisi regangan lempeng pada bagian Sulawesi Utara oleh Sarsito, dkk (2016) menunjukkan bahwa nilai regangan pada lempeng tersebut sebesar $2,5 \times 10^{-5}$ strain dengan arah dan sudut regangan yang hampir sama.
4. Pengolahan data pengamatan GNSS dengan metode *multiepoch* menunjukkan nilai pergerakan dan regangan Lempeng Sangihe konsisten terhadap penelitian - penelitian sebelumnya. Hal ini berbeda dengan pengolahan data dengan metode antar *epoch* yang digunakan oleh Nugraha (2017) dan Ladivanov (2018) yang menunjukkan adanya inkonsistensi pada hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan regangan Lempeng Sangihe.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (*The authors declare no competing interest*).

6. Referensi

- Anugrah, B., Meilano, I., Gunawan, E., Efendi, J., (2015). *Estimation of postseismic deformation parameters from continuous GPS data in northern Sumatra after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake*. Earthq. Sci. 28 (5-6), 347-352.
- Di Leo, J. F., Wookey, J., Hammond, J.O.S., Kendall, J.M., Kaneshima, S., Inoue, H., Yamashina, T., Harjadi, P. (2012). *Deformation and mantle flow beneath the Sangihe subduction zone from seismic anisotropy*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 194-195, 38-54.
- Gunawan, E dan Widiyantoro, S, (2019). *Active tectonic deformation in java, Indonesia inferred from a GPS-derived strain rate*. Journal of Geodynamics 123 (2019) 49-54.
- Jaffe, L. A., Hilton, D. R., Fischer, T. P., & Hartono, U. (2004). *Tracing magma sources in an arc-arc collision zone: Helium and carbon isotope and relative abundance systematics of the Sangihe Arc, Indonesia*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J., Syafi'i, M.A., (2016). *Crustal strain partitioning and the associated*

- earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. Geophys. Res. Lett.* 43 (5), 1943–1949.
- Kurniawan, G., (2016). *Analisis Deformasi Kepulauan Sangihe Berdasarkan data pengukuran GNSS Epoch 2014 dan Epoch 2015*. Universitas Gadjah Mada.
- Ladivanov, F., (2018). *Analisis Deformasi Kepulauan Sangihe Berdasarkan Data Pengukuran GNSS Epoch 2014, 2015, 2016, dan 2017*. Universitas Gadjah Mada.
- Nugraha, S., (2017). *Analisis Deformasi Kepulauan Sangihe Berdasarkan Tiga Kala Pengamatan Data Pengukuran GNSS Tahun 2014, 2015 dan 2016*. Universitas Gadjah Mada
- Tatsumi, Y., Murasaki, M., Arsadi, E.M., Nohda, S. (1991). *Geochemistry of Quaternary lavas from NE Sulawesi: transfer of subduction components into the mantle wedge*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2), 137–149.