

ANALISIS DEFORMASI SEISMIK SESAR MATANO MENGUNAKAN GNSS DAN INTERFEROMETRIK SAR

Adnan Khairi^{*}), Moehammad Awaluddin, Bambang Sudarsono

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

ABSTRAK

Pulau Sulawesi merupakan bagian dari wilayah Indonesia bagian timur yang memiliki tatanan tektonik yang rumit. Berdasarkan sumber-sumber gempa yang terbentuk akibat proses tektonik sebelumnya, sumber gempa di darat bersumber dari beberapa sesar aktif di daratan Sulawesi Tengah. Salah satunya adalah Sesar Matano. Sesar Matano merupakan perpanjangan Sesar Palu Koro dari arah barat laut ke tenggara yang memotong Danau Matano. Akumulasi Energi (*Locking*) terbesar terdapat pada Sesar Matano yang mengindikasikan bahwa sesar aktif dan berpotensi untuk menghasilkan gempa yang besar. Tujuan penelitian ini adalah untuk memodelkan deformasi Sesar Matano berdasarkan vektor pergeseran dari pengamatan GNSS periodik pada Stasiun Titik Pantau Geodiamika (TPG) BIG dan pengolahan *Multi-Temporal InSAR Persistent Scatter* (PS) dan *Small Baselines* (SB) menggunakan citra SAR Sentinel-1 dengan rentang pengamatan Tahun 2016 sampai Tahun 2019. Hasil pengamatan vektor pergeseran stasiun digunakan untuk mengkaji *Strain-rate* dan pola pola geser Sesar Matano. Estimasi model *slip-rate* dihitung dari vektor kecepatan *line of sight* (LOS) InSAR dan kecepatan stasiun. Hasil penelitian menunjukkan, pola pergeseran Sesar Matano menunjukkan pola geser mengiri (*left-lateral strike-slip*). Vektor pergeseran pada bagian utara sesar bergeser pada arah barat-barat laut dengan rentang nilai 9,865 - 15,059 mm/tahun, sedangkan vektor pergeseran pada bagian selatan sesar bergerak ke arah timur-tenggara dengan rentang nilai 9,590 - 16,483 mm/tahun. Vektor laju rotasi pada Sesar Matano cenderung menunjukkan rotasi berlawanan dari arah jarum jam. Pola laju rotasi semakin berkurang dari bagian utara sesar sebesar 14,6 deg/Mtahun menuju ke arah selatan menjadi 8,8 deg/Mtahun. Vektor laju regangan pada Sesar Matano menunjukkan pola laju regangan ekstensi pada bagian utara yang seiring berubah menjadi pola laju kompresi ke arah selatan. Hasil estimasi model *slip-rate* menunjukkan besar laju geser pada segmen Sesar Sesar Matano-Pewusai memiliki rentang nilai slip optimal 17 – 28 mm/tahun dengan kedalaman 10 km dan pada segmen Sesar Matano didapatkan rentang nilai slip optimal 20 -24 mm/tahun pada kedalaman 10 km.

Kata Kunci : Deformasi, GNSS, MT-InSAR, Sesar Matano

ABSTRACT

Sulawesi Island is part of the eastern part of Indonesia which has a complex tectonic order. Based on the sources of the earthquake formed by the previous tectonic process, the source of the earthquake on land originated from several active faults on the mainland of Central Sulawesi. One of them is the Matano Fault. Matano Fault is an extension of the Palu Koro Fault from northwest to southeast which cuts across Lake Matano. The Energy accumulation (Locking) is in the Matano Fault which indicates that the fault is active and has the potential to produce large earthquake. The purpose of this study is to model the deformation of the Matano Fault based on a movement vector from periodic GNSS observations at Titik Pantau Geodiamika (TPG) Station from BIG and Multi-Temporal InSAR Persistent Scatter (PS) and Small Baselines (SB) using Sentinel-1 images with a range of observations in 2016 to 2019. The results of observations of the station movement vector are used to study the strain rate and shear patterns of the Matano Fault. The slip-rate model estimate is calculated from the InSAR line of sight (LOS) velocity vector and the station movement. The results showed that the Matano Fault shear pattern showed a left-lateral strike-slip pattern. The movement vector in the north section of the fault moves in the west-northwest direction with a range of values 9,865-15,059 mm/year, while the movement vector in the south fault moves east-southeast with a range of values 9,590-16,483 mm/year. The rotation rate on the Matano Fault tends to show counterclockwise rotation. The rotation rate pattern decreases from the north of the fault from 14.6 deg/Myear to the south becomes 8.8 deg/Myear. The strain rate on the Matano Fault shows the extension strain rate pattern in the north which corresponds to a southward compression rate pattern. The slip-rate model estimation results show in the Matano-Pewusai Fault Segment has an optimal slip value range of 17-28 mm/ year with a depth of 10 km and in the Matano Fault segment the optimal slip value range of 20-24 mm/ year at depth 10 km.

Key Words : Deformation, GNSS, Matano Fault, MT-InSAR

*)Penulis Utama, Penanggung Jawab

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Peristiwa gempa sering kali terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia. Hal ini disebabkan oleh kondisi tektonik Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng besar dunia dan sejumlah lempeng kecil atau *microblocks* (Bird, 2003). Indonesia dikelilingi oleh empat lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik serta lempeng kecil, yaitu Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Kepala Burung, Maoke, dan Woodlark.

Zona subduksi aktif yang tersebar di bagian barat hingga timur Indonesia merupakan salah satu indikasi yang jelas sebagai penyebab sumber gempa. Selain itu, sisa energi dari proses tumbukan antar lempeng tersebut akan mengakibatkan adanya sesar di daratan atau lautan pada beberapa pulau dan laut Indonesia. Dari deretan wilayah Indonesia, salah satunya Kepulauan Halmahera dan Sulawesi Utara telah terindikasi subduksi aktif (Gunawan dkk., 2016).

Daerah Sulawesi merupakan bagian dari wilayah Indonesia bagian timur yang memiliki tatanan tektonik yang rumit. Berdasarkan sumber-sumber gempa yang terbentuk akibat proses tektonik sebelumnya, sumber gempa bumi di laut berasal dari penunjaman Sulawesi Utara yang terletak di sebelah utara Pulau Sulawesi, sedangkan sumber gempa bumi di darat bersumber dari beberapa sesar aktif di daratan Sulawesi Tengah, salah satunya adalah Sesar Matano. Sesar tersebut merupakan perpanjangan Sesar Palu Koro dari arah barat laut ke tenggara yang memotong Danau Matano. *Locking* terbesar terdapat pada Sesar Matano yang mengidentifikasi bahwa sesar ini aktif dan berpotensi untuk menghasilkan gempa yang besar (Sarsito, 2010).

Kontribusi geodesi dalam pemutakhiran peta gempa adalah kecepatan dan strain tektonik dari observasi GPS/GNSS, estimasi geodetik dari *sliprate*, dan identifikasi segmentasi subduksi. *Sliprate* dan segmentasi merupakan input parameter dalam *Seismic Hazard Analysis*. Beberapa teknologi geodetik terkini yang dapat digunakan untuk menghitung deformasi permukaan diantaranya adalah metode *leveling*, *Global Positioning System/ Global Navigation Satellite System* (GPS/GNSS), serta metode *satellite Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) yang merupakan salah satu metode pencitraan radar yang dapat melakukan pengukuran deformasi berdasarkan perubahan *Line of Sight* (LOS) dari data jarak jauh dengan resolusi spasial yang tinggi.

Teknik *Multi-Temporal InSAR* (MT-InSAR) yang melibatkan beberapa pemrosesan akuisisi terhadap waktu dapat mengatasi masalah pada pengukuran sinyal seperti yang disebabkan oleh sifat hamburan balik, gangguan variasi atmosfer, ketidaktepatan orbit dan penentuan tinggi permukaan. MT-InSAR terdiri dari metode *persistent scatter* (PS), yang mengacu pada penyebaran persisten jenis piksel yang diidentifikasi, dan *small baselines* (SB),

yang mengacu pada pembentukan interferogram (Hooper, 2008).

Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan deformasi dari pengamatan GPS/ GNSS yang berupa stasiun pengamatan episodik Titik Pantau Geodinamika (TPG) dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang tersebar pada wilayah Sesar Matano dengan rentang pengamatan Tahun 2016 hingga Tahun 2019. Pengolahan MT-InSAR dilakukan dengan menggabungkan metode PS dan SB menggunakan citra Sentinel-1 untuk mendapatkan nilai vektor kecepatan LOS pada wilayah sesar. Pola pergeseran sesar diamati berdasarkan vektor arah kecepatan dan laju *strain* dari hasil nilai pergeseran horizontal pada stasiun pengamatan. Kecepatan LOS InSAR bersama dengan vektor pergeseran stasiun digunakan dalam perhitungan model estimasi laju geser pada segmen Sesar Matano.

I.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana analisis deformasi dan pola pergeseran Sesar Matano berdasarkan hasil vektor pengamatan stasiun GNSS ?
2. Bagaimana analisis vektor kecepatan LOS rata rata dari pengolahan MT- InSAR pada wilayah Sesar Matano ?
3. Bagaimana hasil estimasi model laju *slip* pada Segmen Sesar Matano berdasarkan vektor pergeseran dari stasiun GNSS dan LOS MT-InSAR?

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Memperoleh nilai deformasi dan pola pergeseran Sesar Matano berdasarkan hasil vektor pengamatan stasiun GNSS.
2. Memperoleh vektor kecepatan LOS rata rata dari pengolahan MT- InSAR pada wilayah Sesar Matano.
3. Memperoleh hasil estimasi model laju *slip* pada Segmen Sesar Matano berdasarkan vektor pergeseran dari stasiun GNSS dan LOS MT-InSAR.

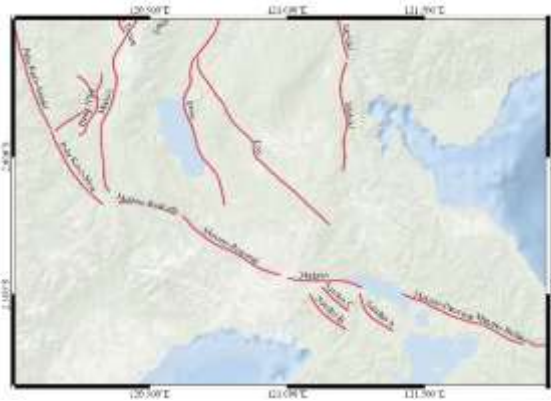
I.4 Batasan Masalah

Untuk mencegah pembahasan yang terlalu melebar maka penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut :

1. Komponen vektor pergeseran yang dianalisis pada penelitian ini adalah vektor pergeseran horizontal.
2. Perhitungan model estimasi *slip-rate* dilakukan dengan optimasi nilai *root means square* dari parameter *slip rate* (D) dan *locking depth* (W) yang telah ditentukan merujuk pada penelitian sebelumnya.
3. Nilai deformasi yang dihasilkan diasumsikan sebagai deformasi murni akibat aktivitas sesar tanpa mempertimbangkan pengaruh subduksi dan rotasi blok di Sulawesi.
4. Segmen sesar yang diamati adalah Sesar Matano-Pewusai dan Sesar Matano yang mengacu pada Peta Tektonik Indonesia tahun 2017 yang diterbitkan oleh Pusat Studi Gempa Nasional.

I.5 Lokasi Penelitian

Fokus penelitian ini berlokasi pada dua segmen bagian jalur Sesar Matano yaitu Segmen Sesar Matano-Pewusai dan Segmen Sesar. Lokasi ini berjarak 280 km ke arah selatan dari Kota Palu. Luasan batas penelitian berada pada bujur 120.460° bujur timur sampai 121.571° bujur timur dan lintang 2.758° lintang selatan sampai -1.906° lintang selatan. Denah lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar I-1.



Gambar I-1. Lokasi penelitian

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Gambaran Umum

Pulau Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang kompleks. Struktur- struktur yang teridentifikasi di Sulawesi hingga saat ini masih aktif bergerak dan sering menghasilkan gempa. Pulau Sulawesi ini tersusun atas tatanan struktur geologi yang aktif bergerak dengan kecepatan pergeseran yang berbeda-beda. Di sebelah utara Pulau Sulawesi terdapat *North Sulawesi Subduction* dengan kecepatan pergeseran geodetik 42-50 mm/tahun (Socquet dkk., 2006). Di darat terdapat Sesar Gorontalo yang memiliki kecepatan pergeseran 11 mm/ tahun (Rangin dkk., 1999). Dari arah timur bergerak mendekati kemenerusan Sesar Sorong dengan besar pergeseran 32 mm/ tahun (Rangin dkk., 1999). Di bagian tengah Pulau Sulawesi adalah Sesar Palukoro yang aktif bergerak dengan besar pergeseran geodetik 41-45 mm/ tahun (Socquet dkk., 2006), 34 mm/ tahun (Sarsito, 2010) dan pergeseran geologi 29 mm/ tahun (Bellier dkk., 2001). Bellier dkk. (2001) mengelompokkan Sesar Palukoro sebagai sesar dengan besar pergeseran tinggi dengan kegempaan yang rendah. Kemenerusan ke arah timur adalah Sesar Matano dengan besar pergeseran sekitar 20 mm/ tahun (Socquet dkk., 2006). Sebaran sumber gempa mengelompok di bagian subduksi utara Sulawesi yang terlihat dengan pengelompokan kedalaman katalog relokasi (Engdahl dkk., 2007). Di bagian tengah Pulau Sulawesi, sebaran gempa dangkal bersifat acak.

Sesar Matano merupakan salah satu sesar geser mengiri atau *left lateral strike slip* yang terletak di Sulawesi bagian Tengah. Sesar tersebut merupakan perpanjangan Sesar Palu Koro dari arah barat laut ke tenggara yang memotong Danau Matano. Menurut morfologi Sesar Matano ini terbagi menjadi enam segmen yaitu segmen Kuleana, Pewusai, Matano, Pamsosa,

Ballawai, dan terakhir segmen Geressa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sarsito dkk (2012) diperkirakan bahwa nilai laju geser Sesar Matano berkisar antara 4-32 mm/tahun. Secara keseluruhan di dekat Sesar Matano ini merupakan regime transpresif. *Locking* terbesar terdapat pada Sesar Matano yang mengidentifikasi bahwa Sesar ini aktif dan berpotensi untuk menghasilkan gempa yang besar (Sarsito, 2010). Nilai laju geser sesar Matano menurut estimasi geodetik adalah 14-44 mm/tahun (Sarsito dkk, 2012).

II.2 Deformasi pada Kerak Bumi

Deformasi pada kerak bumi secara umum terbagi sebagai akibat dari tiga jenis tekanan: kompresional, tensional dan geser. Tegangan kompresional yang terkait dengan batas lempeng konvergen cenderung memperpendek dan menebal kerak bumi dengan melipat, mengalirkan, dan membentuk patahan. Sedangkan tegangan tensional di sepanjang batas lempeng divergen cenderung memanjang badan batuan dengan perpindahan sepanjang sesar di permukaan kerak dan oleh aliran ulet di kedalaman. Tekanan geser, sering dikaitkan dengan batas lempeng transformasi, cenderung menghasilkan zona patahan pada permukaan kerak dan aliran ulet pada kedalaman. Fraktur deformasi rapuh dan patahan mendominasi permukaan kerak, di mana suhunya relatif dingin. Sebaliknya, pada kedalaman yang lebih besar di mana suhu dan tekanan tinggi, batuan menunjukkan perilaku ulet dan berubah bentuk dengan melipat atau mengalir (Tarbuck dan Lutgens, 2017) . Ilustrasi ketiga jenis deformasi ditunjukkan pada Gambar II-1.



Gambar II-1. Jenis Deformasi Kerak Bumi (Tarbuck dan Lutgens, 2017)

II.3 Penentuan Posisi GNSS

Sinyal GNSS adalah gelombang elektromagnetik yang merambat dengan kecepatan cahaya. frekuensi sinyal dalam spektrum radio pada rentang 1: 2 dan 1: 6 GHz (L-band). Sebuah fitur yang berbeda dari semua sinyal GNSS adalah modulasi dari gelombang radio harmonik (yang disebut *carrier*) dengan karakteristik kode *pseudo random noise* (PRN). Kode ini pada dasarnya adalah urutan biner nol dan satu tanpa pola atau keteraturan yang jelas. Urutan dikirimkan biasanya pada tingkat 1-10 MHz, di mana pada tingkat yang lebih tinggi menyiratkan upaya pengolahan yang lebih tinggi dengan hasil pengukuran yang lebih presisi. Kode PRN terus diulang dalam interval beberapa milidetik sampai detik untuk memudahkan pengukuran waktu transmisi sinyal. Dalam kebanyakan GNSS, urutan PRN juga berfungsi sebagai ciri khas, yang

memungkinkan receiver untuk membedakan transmisi masing-masing satelit pada frekuensi yang sama.

Pengamatan *Pseudorange*, *carrier phase*, dan Doppler menyediakan pengukuran dasar untuk posisi dan kecepatan komputasi serta selisih waktu penerima sehubungan dengan skala waktu sistem GNSS. Sinyal ini dilengkapi dengan informasi mengenai orbit dan selisih jam pada masing-masing satelit GNSS, yang dikirimkan sebagai bagian dari *broadcast navigation message* dan memungkinkan receiver untuk menghitung posisi dan kecepatan transmisi satelit pada saat transmisi sinyal (Peter dan Oliver, 2017).

Penentuan posisi dengan *pseudorange* memerlukan setidaknya empat pengukuran simultan untuk memperkirakan tiga koordinat receiver dan *offset* jam receiver (diukur dalam satuan jarak). Dengan $x = (x_r, y_r, z_r, dt_r)$ dan desain matriks empat kali empat. Bila kesalahan yang tidak dimodelkan (mis., penundaan atmosfer) serta kesalahan residual dalam istilah yang dimodelkan, sebaiknya pengukuran *pseudorange* simultan dilakukan pada n seluruh satelit yang tersedia untuk memperkirakan koordinat receiver dan *offset* jam. Hal ini membutuhkan penggunaan prosedur estimasi non-linear kuadrat (atau *Kalman filter*).

$$\Delta x = (A^T W A)^{-1} A^T W \Delta \rho \quad (1)$$

di mana A sekarang memiliki dimensi $m \times 4$ dan W adalah matriks bobot, yang mencerminkan ketidakpastian dalam pengamatan dan korelasi yang mungkin ada. matriks bobot ini dapat ditulis sebagai,

$$w = Q_{pp}^{-1} \quad (2)$$

di mana Q_{pp} adalah matriks kovarians dari kesalahan *pseudorange*. Secara umum, solusi dari masalah nonlinier harus dilakukan literasi untuk mendapatkan hasilnya.

II.4 GAMIT dan GLOBK

GAMIT (*GNSS Analysis Software of Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institution of Oceanography*) adalah program yang memasukan algoritma hitung kuadrat terkecil dengan parameter berbobot untuk mengestimasi posisi relatif dari sekumpulan stasiun, parameter orbit, rotasi bumi, zenith delay dan ambiguitas fase melalui pengamatan *double difference* tetapi pada saat editing GAMIT menggunakan *triple difference*. Kelebihan Software ini adalah bisa melakukan data koreksi atmosfer, pasang surut air laut, dan pemodelan cuaca. Pembobotan stasiun pengamatan, informasi stasiun, koordinat pendekatan, edit sesi pengamatan bisa dimasukan dalam pengolahan data dengan software ilmiah ini (Herring dkk., 2010).

GLOBK adalah satu paket program yang mengkombinasikan hasil pemrosesan data survei terestris atau data survei ekstra terestris. Kunci dari data input pada GLOBK adalah matriks kovarian dari data koordinat stasiun, parameter rotasi bumi, parameter orbit, dan hasil

pengamatan lapangan (Herring dkk., 2015). GLOBK adalah singkatan dari *Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*. Sama seperti GAMIT program ini didesain untuk running di Sistem Operasi berbasis UNIX. Tujuan utama dari GBLOK adalah untuk mengkombinasikan solusi data dari hasil pengolahan GAMIT dengan pengamatan *space geodesy* yaitu dengan sistem *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) sehingga estimasi penentuan posisi jika terjadi pergeseran titik sedikit saja dapat diketahui pergeserannya dan kecepatannya.

II.5 SAR Interferometrik

Citra SAR dan pengukuran fase dapat digunakan sebagai alat yang sangat sensitif untuk mendeteksi/memantau fenomena deformasi permukaan atau untuk mengambil informasi topografi lokal, diperkirakan *Digital Elevation Model* (DEM) dari suatu daerah tertentu. Kedua aplikasi yang berbeda ini berasal dari ide dasar yang sama yaitu mengukur variasi fase dengan membandingkan dua citra SAR yang diperoleh atas area yang sama (Ferretti, 2014).

II.6 Multi-Temporal InSAR

Perkembangan terbaru dalam metode dan sensor *multi-temporal* InSAR (MTI), meningkatkan kualitas pemantauan deformasi tanah secara presisi hingga dalam milimeter. Beberapa metode analisis penginderaan jauh, terutama yang menggunakan data radar, mengandalkan informasi pengolahan dari waktu ke waktu. Analisis deret waktu data InSAR memiliki fungsi penting untuk memantau dan mengukur pergeseran dari permukaan bumi.

Metode PSI dan SBAS berfokus pada target dengan koherensi dan stabilitas fase selama periode waktu. TS-InSAR dikelaskan menjadi *persistent scatterers* (PS InSAR) dan *Small Baseline Subset* (SBAS). Kedua metode dapat memberikan solusi temporal terhadap fenomena tak terkorelasi berdasarkan pada prinsip dari pantulan dominan di pusat dari *persistent scatterer* (Ferretti, 2014).

II.7 Sentinel-1

Misi satelit Sentinel-1 adalah sebagai observatorium radar eropa untuk program Copernicus bersama Komisi Eropa dan *European Space Agency* (ESA). Sentinel-1A diluncurkan pada April 2015 dan diikuti oleh Sentinel-1B yang diluncurkan pada April 2016 kemudian. Sentinel-1 bekerja sebagai satelit yang mengorbit kutub, bekerja di seluruh cuaca, dan melakukan pencitraan radar pada siang dan malam. Informasi misi Sentinel-1 dapat digunakan untuk studi pengamatan es laut, gunung es, tumpahan minyak, angin laut, gelombang dan arus, perubahan penggunaan lahan, deformasi tanah serta untuk merespon keadaan darurat seperti banjir dan gempa bumi. Satelit S-1A dan S-1B dibangun pada orbit dengan roket Soyuz dari *Spaceport* Eropa di Guyana Perancis. Instrumen S-1 adalah C-band sintesis aperture radar (SAR) pada 5,405 GHz. Mode pencitraan pada S-1 memiliki resolusi yang berbeda dari 5 m hingga cakupan 400 km. Kombinasi S-1A dan S-1B memiliki

resolusi temporal selama 6 hari. Masa hidup S-1 diperkirakan lebih dari 7 tahun (EO-College, 2015).

II.8 Perhitungan Strain-Tensor

Shen, dkk. (1996) memperkenalkan analisis strain sebagai fungsi kontinu menggunakan metode kuadrat-terkecil yang dimodifikasi. Algoritma ini diulang pada ruang 2D dengan penambahan kecil bobot bobot untuk menjamin kontinuitas solusi. Pada masing-masing koordinat interpolasi R, medan kecepatan horizontal diperlukan untuk mendapatkan turunan orde pertama, untuk diwakili oleh model pada gerak lempeng kaku (translasi dan rotasi) dan medan regangan seragam (Shen dkk., 1996). Data pergeseran kemudian dihubungkan ke parameter deformasi oleh relasi linier,

$$d = Am + \epsilon \tag{3}$$

di mana d adalah distribusi vektor, m adalah vektor yang belum diketahui dari translasi, rotasi, dan regangan, A adalah matriks turunan parsial, dan ϵ adalah vektor kesalahan. Pada kasus regangan horizontal saja, $m = (U_x U_y \omega \tau_{xx} \tau_{yy} \tau_{xy})^T$ dalam sistem koordinat Cartesian, U_x dan U_y adalah komponen translasi dalam masing-masing arah x dan y , ω adalah rotasi, dan τ_{xx} , τ_{xy} , and τ_{yy} adalah komponen masing masing regangan horizontal. Persamaan 1 juga dapat ditulis sebagai,

$$\begin{bmatrix} V_{x_1} \\ V_{y_1} \\ V_{x_2} \\ V_{y_2} \\ \dots \\ V_{x_n} \\ V_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_1 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta x_1 & 0 & \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ 1 & 0 & \Delta y_2 & \Delta x_2 & \Delta y_2 & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta x_2 & 0 & \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \Delta y_n & \Delta x_n & \Delta y_n & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta x_n & 0 & \Delta x_n & \Delta y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ \omega \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{x_1} \\ \epsilon_{y_1} \\ \epsilon_{x_2} \\ \epsilon_{y_2} \\ \dots \\ \epsilon_{x_n} \\ \epsilon_{y_n} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Dimana V_{x_i} dan V_{y_i} adalah komponen deformasi dari stasiun i pada lokasi r_i . Δx_i dan Δy_i adalah komponen vector dari $\Delta R_i = r_i - R$. Jika diberikan $\epsilon \sim N(0, C)$ dan C menjadi matriks kovarian dari data kecepatan, solusi least-squares dapat didapatkan sebagai berikut,

$$m = (A^T C^{-1} A)^{-1} A^T C^{-1} d \tag{5}$$

Tanpa modifikasi data dan / atau kesalahannya, solusi di atas digunakan untuk bidang regangan rata-rata seluruh wilayah (Shen dkk., 2015).

II.9 Perhitungan Laju Geser

Metode *simple screw dislocation* (Savage & Burford, 1973) merupakan metode yang paling sederhana untuk menggambarkan gerak sesar geser baik pada fase interseismik maupun co-seismik yang terjadi pada wilayah sesar tersebut. Untuk melakukan perhitungan laju geser sesar dengan menggunakan metode ini, kecepatan titik GPS dihitung menggunakan referensi relatif terhadap sesar yang akan dimodelkan, yang memenuhi prinsip elastis pada dislokasi sesar geser dan mengakomodasi pergerakan dalam arah horizontal dari sesar geser yang bersangkutan pada kedalaman tertentu. Persamaan di bawah ini menggambarkan besarnya kecepatan titik GPS secara teoretis yang diamati di permukaan, sebagai fungsi jarak Y

dari dislokasi (dalam hal ini, sesar geser yang akan dihitung laju gesernya).

$$s(y) = \frac{D}{\pi} \arctan\left(\frac{Y}{W}\right) \tag{6}$$

Parameter D mengontrol amplitudo arctangent, sedangkan kelengkungan sebanding dengan $1/W$.

III. Metodologi Penelitian

Data pengamatan GPS/GNSS yang digunakan merupakan hasil pengamatan stasiun episodik Titik Pantau Geodinamika (TPG) yang disediakan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) selama rentang empat tahun dengan tiga epok yaitu Tahun 2016, 2018 dan Tahun 2019. Gambar III-1 menunjukkan sebaran stasiun yang digunakan pada penelitian ini yang berjumlah 12 titik dan tersebar di sepanjang jalur Segmen Sesar Matano. Pengolahan menggunakan perangkat lunak GAMIT/ GLOBK untuk didapatkan koordinat secara temporal dan dihitung perubahan serta *velocity rate*-nya. Titik ikat referensi digunakan pada pengolahan stasiun menggunakan pengamatan stasiun CORS BIG dan stasiun IGS Global. Tiga titik stasiun CORS yaitu CKEN (Kendari), CMLI (Malili) dan CPRE (Pare-Pare) serta enam titik IGS yaitu BAKO, COCO, DARW, HYDE, PIMO dan XMIS.



Gambar III-1. Sebaran Stasiun Pengamatan GPS/ GNSS

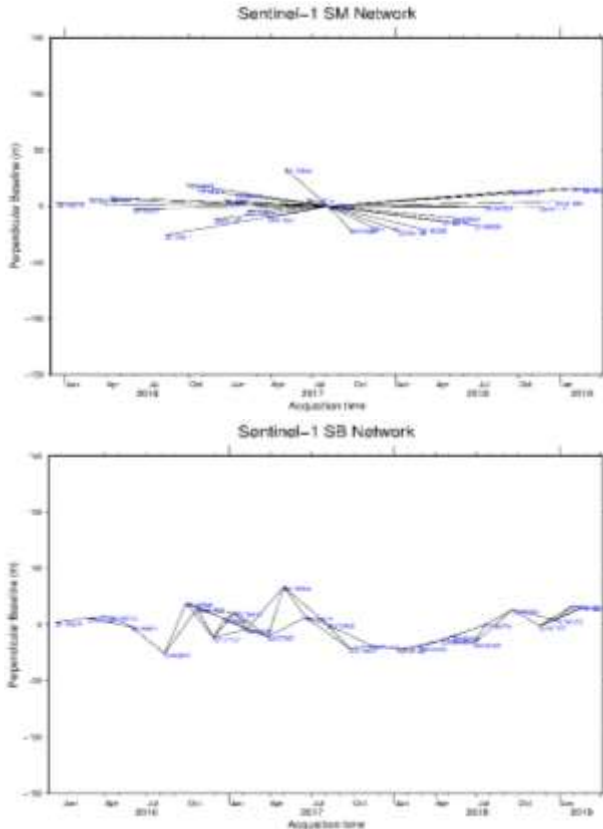
Citra SAR Sentinel-1 dihimpun dari kumpulan beberapa tempo waktu citra dengan arah geometri penyiaran secara *descending*, yang mencakup wilayah Segmen Sesar Matano. Deskripsi citra pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel III-1. Citra Sentinel 1 dapat diunduh secara terbuka pada *website Copernicus Open Acces Hub* dari ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>) atau *ASF Search Data* dari NASA *Earth Data* (<https://search.asf.alaska.edu/>).

Tabel IV-1. Deskripsi citra Sentinel-1 pada penelitian

Orbita (Poli)	Direction	Start Date	End Date	Master Date	Number of Images	Satellite Heading	Mean Incidence Angle
41	Descending	December 15, 2019	February 21, 2019	Augustus 04, 2017	28	-168,93°	43,9°

Pengolahan *interferogram* citra Sentinel-1 pada penelitian ini menggunakan progam pengolahan InSAR GMTSAR (Sandwell dkk., 2011), sebuah sistem pemrosesan InSAR *open source* (GNU General Public Licence) yang dirancang untuk pengguna yang telah

familiar dengan General Mapping Tools (GMT) (Wessel dkk., 2013). Kemudian dilanjutkan dengan tahap pemilihan kandidat *persistent scatter* (PS) dengan algoritma Slowly Decorellating Filter Phase (SDFP) pada StaMPS/MTI (Hooper dkk., 2012), sebuah perangkat lunak InSAR statistik non-komersial. Tahapan pengolahan merujuk pada scripts analisis InSAR *times series* GMTSAR2StaMPS (Isya dkk., 2018) yang merupakan sebuah pengembangan scripts dari Xiaopeng.



Gambar III-2. Diagram *Perpendicular Baseline Network* MT-InSAR, PS (atas) dan SB (bawah)

Konfigurasi pasangan terbagi menjadi pasangan *Persistent Scatter* (PS) dan *Small Baselines* (SB) yang dapat dilihat pada Gambar III.2. Pada penelitian ini digunakan pasangan *master-slave* dengan baseline temporal kurang dari 100 hari dan panjang *baseline perpendicular* kurang dari 100 meter. Data DEM yang digunakan menggunakan adalah SRTM 1 sec.

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Vektor Pergeseran pada Stasiun Titik Pantau Geodinamika pada Sesar Matano

Perhitungan vektor kecepatan pada Stasiun TPG dilakukan menggunakan hasil nilai pergeseran yang merujuk pada kerangka referensi ITRF2008. Kecepatan pergeseran diperoleh dengan melakukan *linear fitting* terhadap data deret waktu menggunakan persamaan linear. Perolehan perhitungan vektor pergeseran dari Tahun 2016 sampai 2019 pada setiap stasiun titik pantau geodinamika beserta simpangan bakunya ditunjukkan pada Tabel IV-1.

Tabel IV-1. Vektor Pergeseran Titik Pantau Geodinamika

TPG	vn (mm/tahun)	ve (mm/tahun)	vu (mm/tahun)	sid vn (mm/tahun)	sid ve (mm/tahun)	sid vu (mm/tahun)
4107	2,184	9,338	8,526	0,102	0,106	2,601
4108	3,020	13,634	-3,857	0,123	3,769	2,608
4109	3,953	11,772	9,091	0,259	1,300	0,235
4110	0,493	15,701	7,196	0,158	0,857	1,016
4111	4,571	13,390	-9,693	0,392	0,760	7,105
4112	2,429	10,334	-2,461	0,036	0,542	3,308
4113	0,585	10,880	-5,047	0,098	4,648	1,391
4114	104,244	-82,214	-97,073	25,230	40,737	0,325
4115	9,400	-2,991	10,594	0,563	0,815	1,792
4116	9,029	-5,596	-03,390	0,710	2,044	20,488
4120	14,957	-1,747	89,648	0,267	2,261	15,841
4121	12,980	1,640	20,713	0,035	1,373	0,006
4123	0,596	11,925	2,382	0,154	3,311	0,006
4124	3,132	11,940	7,357	0,436	1,033	0,071
4125	0,338	16,479	3,842	0,107	2,642	0,003

Pada tabel diatas vektor pergeseran dinyatakan menjadi tiga sumbu komponen berbeda yaitu vn (*north-south*) yang menyatakan vektor pergeseran pada arah utara-selatan, ve (*east-west*) menyatakan vektor pergeseran pada arah timur-barat dan vu (*up-down*) menyatakan vektor pergeseran pada arah naik-turun. Pada nilai simpangan baku pergerakan setiap stasiun, didapatkan nilai untuk komponen vn terbaik pada stasiun 4121 dengan nilai 0,035 mm/tahun, komponen ve terdapat pada stasiun 4107 dengan nilai 0,106 mm/tahun dan komponen vu pada stasiun 4125 dengan nilai 0,003 mm/tahun. Nilai rata – rata simpangan baku pada masing masing komponen pada stasiun diperoleh sebesar 1,332 mm/tahun pada komponen vn, 3,24 mm/tahun pada komponen ve dan 3,757 mm/tahun pada komponen vu. Untuk mengetahui stasiun mengalami pergeseran secara signifikan atau tidak, pada tahap selanjutnya uji signifikansi secara statistik perlu dilakukan.

IV.2 Uji Statistik Vektor Pergeseran

Validasi terhadap vektor pergeseran stasiun titik pantau geodinamika dilakukan dengan melakukan uji signifikansi statistik terhadap vektor pergeseran dan simpangan bakunya. Uji statistik yang dilakukan yaitu menggunakan Tabel distribusi T dengan tingkat kepercayaan 95% (T-tabel = 2,776). Apabila T hitungan < dari T-tabel maka dianggap tidak bergeser. Namun bila nilai T hitungan > T-tabel maka dianggap terjadi pergeseran. Pada penelitian ini hanya komponen pergeseran horizontal yang digunakan pada pengamatan pergeseran sesar matano.

Tabel IV-2. Uji Statistik Komponen Kecepatan Horizontal

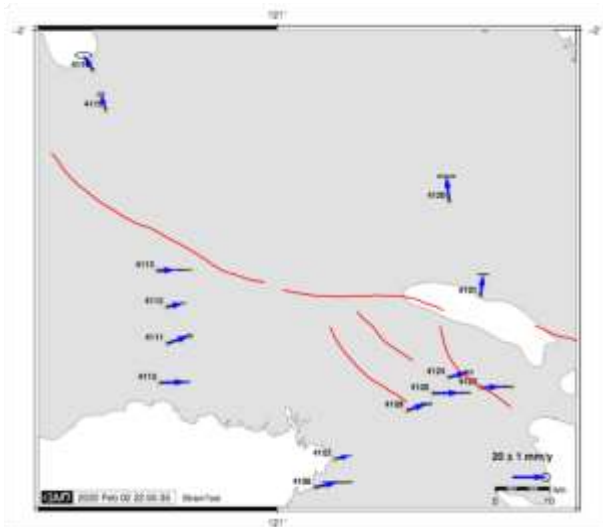
TPG	vn (mm/tahun)	ve (mm/tahun)	sid vn (mm/tahun)	sid ve (mm/tahun)	P	sid P	T hitung	T tabel	Pergeseran	
4107	2,184	9,338	0,102	0,106	9,590	0,147	65,095	2,776	Ya	
4108	3,020	13,634	0,123	3,769	13,964	3,771	3,703	2,776	Ya	
4109	3,953	11,772	0,259	1,300	12,418	1,384	8,971	2,776	Ya	
4110	0,493	15,701	0,158	0,857	15,709	0,872	18,019	2,776	Ya	
4111	4,571	13,390	0,392	0,760	14,348	0,855	16,533	2,776	Ya	
4112	2,429	10,334	0,036	0,542	10,616	0,543	19,543	2,776	Ya	
4113	0,585	10,880	0,098	1,097	10,895	1,102	0,889	2,776	Ya	
4114	104,244	-82,214	25,230	40,737	332,763	47,918	2,771	2,776	Tidak	
4115	9,400	-2,991	0,563	0,815	9,835	0,863	9,900	9,961	2,776	Ya
4116	9,029	-5,596	0,710	2,044	10,622	2,163	4,910	2,776	Ya	
4120	14,957	-1,747	0,267	2,261	15,059	2,277	6,614	2,776	Ya	
4121	12,980	1,640	0,035	1,373	13,083	1,374	9,525	2,776	Ya	
4123	0,596	11,925	0,154	3,311	12,940	3,315	3,602	2,776	Ya	
4124	3,132	11,940	0,436	1,033	12,344	1,121	11,011	2,776	Ya	
4125	0,338	16,479	0,107	2,642	16,483	2,645	6,235	2,776	Ya	

Tabel IV-2 menunjukkan hasil pengujian statistik komponen horizontal vektor pergeseran stasiun titik pantau geodinamika. Pada stasiun TPG 4114 nilai T hitung cenderung lebih kecil dari T tabel, sehingga vektor pergeseran pada stasiun tersebut dianggap tidak signifikan. Sedangkan seluruh stasiun lainnya memiliki nilai T hitung lebih besar dari T tabel, sehingga dapat disimpulkan

mengalami pergeseran. Vektor pergeseran yang telah memenuhi uji statistik kemudian digunakan untuk perhitungan parameter *strain-tensor* untuk menganalisa pola pergeseran Sesar Matano.

IV.3 Analisis Laju Kecepatan dan *Strain* Stasiun Titik Pantau Geodinamika pada Sesar Matano

Gambar IV-1 menunjukkan peta persebaran vektor kecepatan Stasiun TPG. Warna abu abu hitam pada peta menunjukkan wilayah daratan sedangkan warna abu abu putih menunjukkan wilayah perairan. Stasiun titik pantau geodinamika ditunjukkan oleh titik warna kuning sedangkan vektor pergeseran horizontal ditunjukkan oleh anak panah berwarna biru serta elips simpangan baku pada ujungnya.

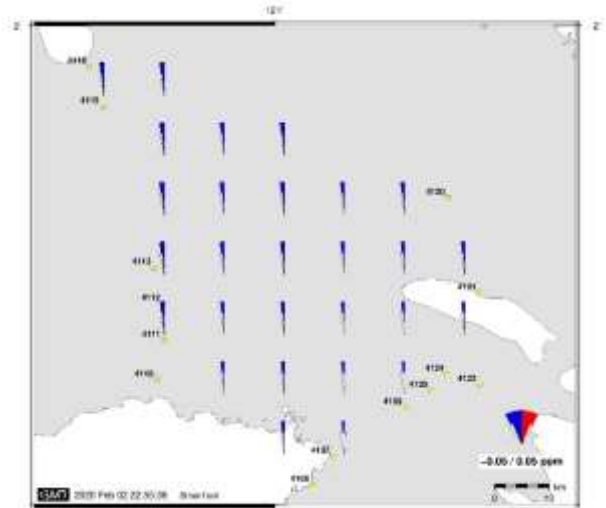


Gambar IV-1. Vektor Kecepatan Horizontal Stasiun

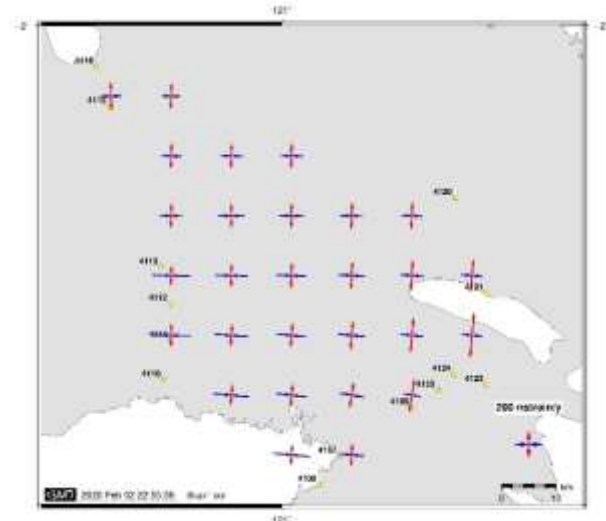
Pada bagian tengah Sulawesi terdapat struktur aktif utama di Pulau Sulawesi yaitu Sesar Palu-Koro kemudian ke arah tenggara menuju Sesar Matano dan Lawapono. Aktifitas pergeseran pada struktur ini sangat dipengaruhi oleh bagian utara Pulau Sulawesi yang merupakan lokasi terjadinya subduksi dengan Lempeg Sunda (Socquet dkk., 2006). Hal ini menimbulkan terjadinya pergeseran relatif yang diakomodir oleh adanya pergeseran mengiri (*left-lateral strike-slip*) sepanjang Sesar Matano/ Lawapono yang menyambung pada arah barat menuju Sesar Sorong. Pada perpanjangan Sesar Palu-Koro menuju Sesar Matano/ Lawapono Pulau Sulawesi terbagi menjadi dua bagian, yaitu Blok Makasar pada bagian barat daya dan Blok Sula Utara pada bagian timur laut. Gambar IV-1 menunjukkan vektor pergeseran stasiun TPG pada bagian selatan Sesar Matano cenderung dominan bergeser menuju ke arah timur laut. Sedangkan vektor pergeseran stasiun pada bagian utara Sesar Matano, arah pergeseran lebih cenderung dominan ke arah barat laut.

Pada Gambar IV-2 menunjukkan bahwa pola vektor laju rotasi yang terjadi pada Stasiun TPG berotasi berlawanan arah jarum jam. Laju rotasi cenderung meningkat dibagian bagian utara sebesar $16,5 \text{ deg/Myr}$ dan cenderung mengecil seiring menuju ke arah selatan sebesar $7,4 \text{ deg/Myr}$. Sarsito, dkk (2016) menyebutkan bahwa pola

laju rotasi di bagian barat Sulawesi tengah sangat dipengaruhi oleh pergerakan Sesar Palu-Koro yang didominasi oleh pola rotasi berlawanan arah jarum jam. Dimana laju rotasi di Sulawesi Tengah terbagi menjadi dua bagian, yaitu pada bagian utara berputar lebih cepat dari pada bagian selatannya (120 deg/Myr menjadi 2.50 deg/Myr).



Gambar IV-2. Vektor Laju Rotasi Stasiun



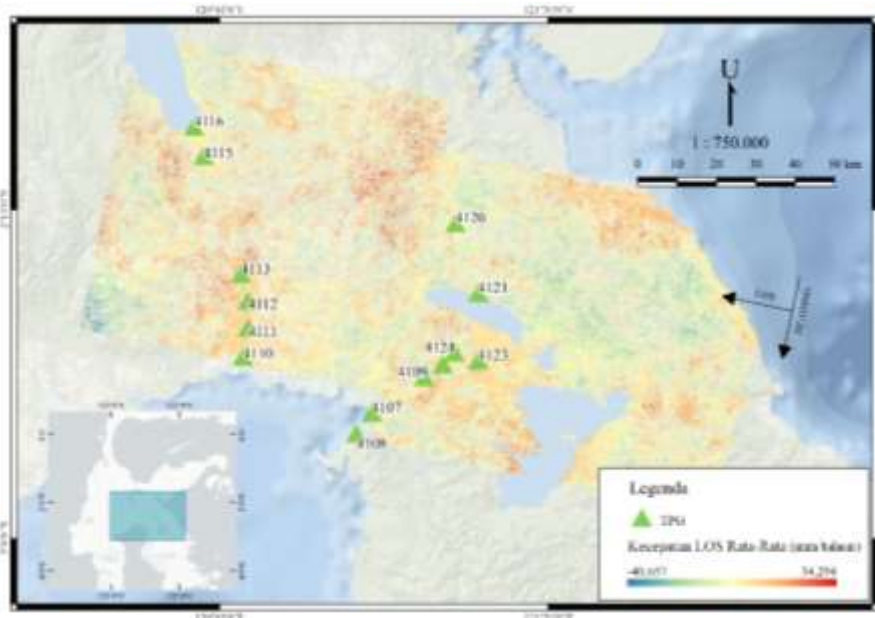
Gambar IV-3. Vektor Laju Regangan Stasiun

Dominasi aktivitas pada Sulawesi Tengah disebabkan oleh aktivitas sesar lateral pada Sesar Palu-Koro dan Sesar Tomini. Hal ini mengakibatkan terjadinya pola ekstensi terbesar Sulawesi terletak pada bagian Sulawesi tengah (Sarsito dkk., 2016). Gambar IV-3 menunjukkan Vektor laju regangan pada TPG penelitian ini. Pola laju regangan pada wilayah Sesar matano dan Lawapono menunjukkan pola laju ekstensi pada bagian utara dan bertambahnya pola laju kompresi pada bagian selatan. Pola ini merupakan perpanjangan dari zona Sulawesi Tengah. Dimana pola ekstensi berkurang pada Sesar Palu-Koro bagian selatan ke arah timur menuju Sesar Matano, dan pada bagian utara akan menyusut seiring menuju arah zona subduksi minahasa.

IV.4 LOS Mean Velocity MT-InSAR

Pada pengolahan MT-InSAR penelitian ini menggunakan citra Sentinel-1 sejumlah 28 citra dengan rentang waktu dari Bulan Desember 2015 hingga Februari 2019. Pasangan interferogram yang terbentuk pada pengolahan PS berjumlah 27 pasang dan pengolahan SBAS berjumlah 54 pasang. Pengolahan dilakukan pada

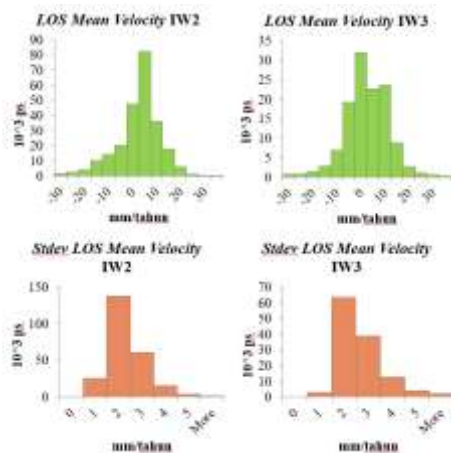
gelombang pancaran balik di tiap koreksi maupun dari hasil pengolahan deformasi rata-rata tiap tahunnya yang diolah. Rata-rata amplitudo dijadikan acuan karena dianggap merupakan data yang memiliki korelasi dengan beda fasa, beda fasa yang merupakan data utama dalam pengolahan SAR (Hooper dkk., 2012).



Gambar IV-5. Mean LOS Velocity MT-InSAR

dua sub petak (*sub-swath*) dan empat *burst* dengan luasan masing masing sekitar 75 x 80 km. Vektor kecepatan pada distribusi titik *persistent scatterers* (ps) dinyatakan dalam dengan arah vektor LOS InSAR yang tegak lurus dengan geometri sudut penyiaran satelit sebesar $-168,029^\circ$ dari arah utara. Pengolahan MTInSAR StaMPS menghasilkan vektor kecepatan LOS rata rata dari citra SAR. Hasil vektor kecepatan LOS rata rata yang pada penelitian ini telah terkoreksi oleh kesalahan tofografi dan orbital. Distribusi histogram nilai pengolahan MT-InSAR ditunjukkan pada Gambar IV.4.

Gambar IV-5 menunjukkan persebaran vektor kecepatan rata rata LOS. Vektor kecepatan LOS negatif menunjukkan pergerakan titik ps menjauhi arah satelit. Sebaliknya pada vektor kecepatan LOS positif menunjukkan pergerakan titik ps mendekati arah satelit. Rentang vektor kecepatan LOS rata rata hasil pengolahan penelitian ini berkisar antara $-40,657$ mm/tahun hingga $34,294$ mm/tahun. Nilai simpangan baku pada hasil pengolahan penelitian ini didapatkan dengan rentang $\pm 0,6$ mm/tahun hingga $\pm 6,9$ mm/tahun.



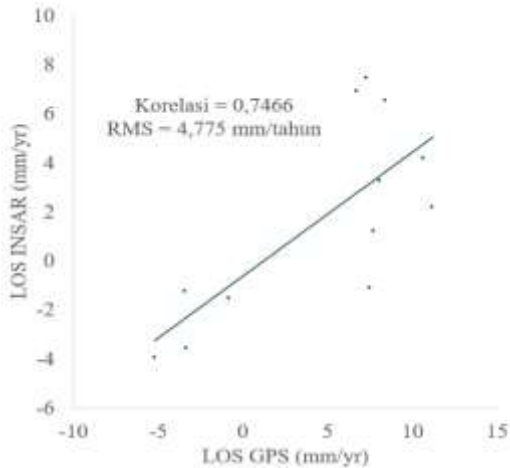
Gambar IV-4. Histogram LOS MT-InSAR

Simpangan baku dari pengolahan MTInSAR didapatkan dari hasil pengurangan rata-rata amplitudo

IV.5 Korelasi Pergeseran LOS InSAR

Hasil vektor kecepatan LOS rata rata InSAR selanjutnya akan digunakan untuk menganalisis deformasi interseismik. Namun sebelumnya, perlu dilakukan evaluasi dengan membandingkan vektor kecepatan LOS InSAR dengan pergeseran stasiun GPS/ GNSS. Hal ini juga berfungsi untuk melihat adanya kesalahan akibat dari efek delay troposfer pada pengolahan InSAR. Pada penelitian ini digunakan pengamatan GPS/ GNSS pada Stasiun TPG dengan tingkat kepercayaan 95%. Pengamatan stasiun merujuk pada kerangka referensi ITRF2008. Vektor pergeseran stasiun harus diproyeksikan terlebih dahulu ke arah LOS yang sesuai. Perbandingan vektor dilakukan sebatas pada resultan nilai vektornya saja, karena arah vektor dari stasiun akan dilakukan transformasi sesuai dengan arah dari LOS yang dibandingkan. Komponen vektor kecepatan pada stasiun yang akan diproyeksikan hanyalah komponen horizontalnya saja, mengingat

komponen vertikal pada GPS/GNSS memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah.



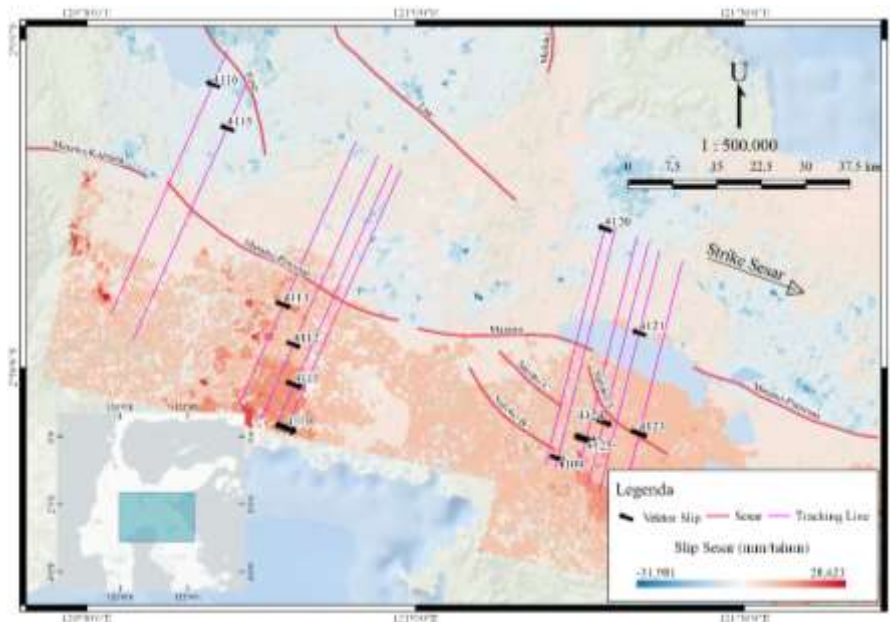
Gambar IV-6. Distribusi LOS InSAR dan LOS GPS/GNSS

Vektor LOS InSAR yang dibandingkan menggunakan nilai rata-rata piksel dengan radius 500 meter dari setiap stasiun titik pantau geodinamika. Grafik distribusi LOS GPS dengan LOS InSAR ditunjukkan pada Gambar IV-6. Nilai korelasi antara LOS InSAR dengan LOS GPS/GNSS menunjukkan adanya korelasi yang positif-kuat yaitu sebesar 0,7466. Perolehan perbandingan nilai vektor LOS InSAR dan LOS GPS dari dua belas stasiun TPG didapatkan nilai RMS sebesar 4,775 mm/tahun.

perhitungan laju sesar, vektor kecepatan stasiun TPG maupun LOS InSAR dihitung menggunakan referensi relatif terhadap sesar yang akan dimodelkan. Vektor pergeseran horizontal LOS InSAR diproyeksikan paralel terhadap segmen sesar. Segmen sesar yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu segmen Sesar Matano-Pewusai dan Segmen Sesar Matano. Untuk memudahkan dalam visualisasi vektor LOS InSAR, pergeseran sesar (*slip*) ditunjukkan dengan nilai positif menandakan slip bergerak ke arah timur-tenggara. Sedangkan apabila bernilai negatif, slip bergerak ke arah barat-barat laut.

Gambar IV-7 menunjukkan distribusi vektor slip dari vektor horizontal LOS InSAR dan Stasiun TPG. Garis transek digunakan sebagai simulasi model yang meliputi minimal satu stasiun titik pantau geodinamika. Garis transek atau *tracking line* digunakan sebagai referensi dalam pengambilan sampel vektor geser agar didapatkan jarak tegak lurus terhadap segmen sesar. Dua belas garis transek digunakan sepanjang segmen Sesar Matano-Pewusai dan Sesar Matano dimana masing-masing garis mewakili satu stasiun titik pantau geodinamika. Panjang garis transek pada penelitian ini berjarak berkisar antara 20 hingga 25 kilometer dari pusat segmen sesar.

Besarnya laju geser pada sesar dapat dihitung dengan menggunakan vektor kecepatan yang berada di sekitar sesar. Kemudian dimodelkan dalam lapisan seismogenik dengan kedalaman tertentu yang disatukan dengan lapisan dua buah blok yang saling bergeser satu sama lain dengan



Gambar IV-7. Vektor Slip Sesar Matano

IV.6 Laju Geser Sesar Matano

Pada penelitian ini dilakukan pengujian pengamatan deformasi interseismik pada sesar matano menggunakan model *simple screw dislocation* (Savage dan Burford, 1973), yaitu model dislokasi sederhana untuk menggambarkan gerak sesar geser baik pada fase interseismik yang terjadi di wilayah sesar tersebut. Pada

besar laju geser. Pada penelitian estimasi dilakukan dengan optimasi nilai antara RMS dan parameter pada kedalaman 1 km, 5 km, dan 10 km serta rentang laju geser 1 sampai 40 mm/tahun.

Pada model estimasi laju geser segmen Sesar Matano-Pewusai di representasikan oleh garis transek pada stasiun TPG 4110, 4111, 4112, 4113, 41115 dan 4116.

Berdasarkan perhitungan model estimasi, laju geser pada segmen Sesar Matano-Pewusai semakin tinggi bila diperhatikan dari arah barat ke timur. Pada bagian timur sesar besar nilai laju geser berkisar 17 mm/tahun. Kemudian meningkat seiring menuju arah barat menjadi berkisar 28 mm/tahun.

Model estimasi laju geser segmen Sesar Matano di representasikan oleh garis transek pada stasiun TPG 4109, 4120, 4121, 4123, 4124 dan 4125. Laju geser pada model estimasi yang dilakukan menunjukkan pola geser segmen Sesar Matano cenderung relatif sama sepanjang jalur sesar. Besar model estimasi laju geser pada sesar berkisar antara 20-24 mm/ tahun.

Dari hasil simulasi 12 *tracking line* didapatkan nilai slip (s) dan kedalaman (W) optimal pada masing masing jalurnya. Segmen Sesar Matano-Pewusai didapatkan rentang nilai slip optimal 17 – 28 mm/tahun dengan kedalaman 10 km dan pada segmen Sesar Matano didapatkan rentang nilai slip optimal 20 -24 mm/ tahun pada kedalaman 10 km. Adapun nilai *slip-rate* model pada penelitian sebelumnya dilakukan oleh Sarsito, dkk. (2012) sebesar 14 – 44 mm/tahun pada seluruh segmen Sesar Matano (Tabel IV-3).

Tabel IV-3. Perbandingan Model Penelitian Sebelumnya

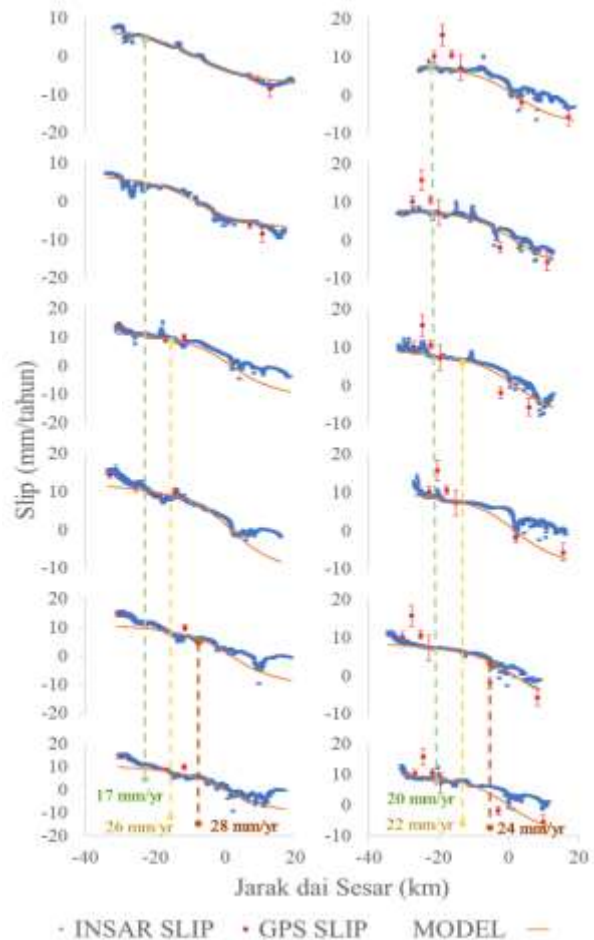
Segmen Sesar	Slip-rate (mm/tahun)	Metode	Studi
Sesar Matano	14-44	GPS	Sarsito, dkk (2012)
Sesar Matano-Pewusai	14-44	GPS	Sarsito, dkk (2012)
Sesar Matano	20-24	GPS+InSAR	Penelitian ini
Sesar Matano-Pewusai	17-28	GPS+InSAR	Penelitian ini

V. Penutup

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian ini, dapat dirangkum beberapa kesimpulan sebagai berikut,

1. Sebaran vektor pergeseran pada stasiun TPG di sekitar Sesar Matano menunjukkan pola geser mengiri (*left-lateral strike-slip*). Vektor pergeseran pada bagian utara sesar bergeser pada arah barat-barat laut. Sedangkan vektor pergeseran pada bagian selatan sesar bergerak ke arah timur-tenggara. Vektor laju rotasi pada Sesar Matano cenderung menunjukkan rotasi berlawanan arah jarum jam. Pola laju rotasi semakin berkurang dari bagian utara sesar menuju arah selatan. Vektor laju regangan pada sesar matano menunjukkan pola laju regangan ekstensi pada bagian utara yang seiring berubah menjadi pola laju kompresi ke arah selatan.
2. Hasil pengolahan Times Series InSAR menghasilkan vektor kecepatan LOS rata rata pada daerah Sesar Matano. Nilai vektor kecepatan LOS memiliki rentang antara -40,657 mm/tahun hingga 34,294 mm/tahun. Uji korelasi menunjukkan nilai yang positif-kuat saat dilakukan perbandingan antara vektor LOS InSAR dengan LOS stasiun TPG.



Gambar IV-8. Model Slip-Rate Segmen Sesar Matano-Pewusai (Kiri) dan Sesar Matano (Kanan)

3. Estimasi laju geser dilakukan menggunakan vektor pergeseran LOS InSAR dan stasiun TPG yang telah diproyeksikan paralel dengan segmen sesar. Dua belas garis transek digunakan dalam pengambilan sampel untuk perhitungan model estimasi laju geser pada segmen Sesar Matano-Pewusai dan Sesar-Matano. Hasil model menunjukkan besar laju geser pada segmen Sesar Sesar Matano-Pewusai memiliki rentang nilai slip optimal 17 – 28 mm/tahun dengan kedalaman 10 km dan pada segmen Sesar Matano didapatkan rentang nilai slip optimal 20 -24 mm/ tahun pada kedalaman 10 km.

V.2 Saran

Penelitian ini ditemukan beberapa saran sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya. Berikut adalah saran yang dapat disampaikan:

1. Data pengamatan stasiun GNSS akan lebih baik menggunakan pengamatan yang kontinu seperti stasiun CORS agar didapatkan pola pergerakan vektor kecepatan yang baik.

2. Sebaran jaring stasiun pengamatan GNSS dapat dilakukan uji kehandalan kekuatan jaring agar sesuai dengan pola laju sesar yang akan dipelajari.
3. Penggunaan data citra SAR pada pengolahan Multi Temporal dapat menggunakan gabungan dari geometri penyiaman yang berbeda sehingga dapat dilakukan perhitungan vektor pergerakan pada komponen tiga dimensi.
4. Perhitungan laju geser pada penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan pengaruh pergerakan subduksi lempeng dan rotasi blok di Sulawesi.

Daftar Pustaka

- Bellier, O., Saebrier, M., Beaudoin, T., Vileneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., & Pratomo, I. (2001). *High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in central Sulawesi (Indonesia)*. Terr. Nova, 463-470.
- Bird, P. (2003). *An Updated Digital Model of Plate Boundaries*. *Geochem, Geophys, Geosyst.*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Engdahl, E. R., Villasenor, A., DeShon, H. R., & Thurber, C. H. (2007). *Teleseismic Relocation and Assessment of Seismicity (1918-2005) in The Region of The 2004 Mw 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 Mw 8.6 Nias island Great Earthquakes*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, S 43-S61.
- EO-College. (2015). *EO College Learning ESA*. Friedrich-Schiller University in Jena, Germany. <https://eo-college.org/>
- Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space*. EAGE Publication.
- Gunawan, E., Kholi, M., & Meilano, I. (2016). *Splay-Fault Rupture during The 2014 Mw7. 1 Molucca Sea, Indonesia, Earthquake Determined from GPS Measurements*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 259, 29-33.
- Herring, T. A., King, R. W., Flyod, M. A., & McClusky, S. C. (2015). *GLOBK: Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program Release 10.6*. Internal Memorandum, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
- Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2010). *GAMIT Reference Manual*. Departement of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachussets Institute of Technology.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). *Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation*. *Tectonophysics*, 514-517, pp.1-13. doi : 10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- Isya, N. H., Riedel, A., Riedel, B., & Niemejer, W. (2018). *Comparison of Power Law Tropospheric Correction for Time Series InSAR Application* *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung in München*. Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie Fernerkundung und Geoinformation e.V., 2018 : 483-50.
- Peter, J. G. T., & Oliver, M. (2017). *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Gewerbestrasse : Spinger International Publishing AG.
- Rangin, C., Le Pichon, X., Mazzotti, S., Pubellier, M., Chamot-Rooke, N., Aurelio, M., Walpersdorf, A., & Quebral, R. (1999). *Plate Convergence Measured by GPS Across The Sundaland/Philippine Sea Plate Deformed Boundary: The Philippines and Eastern Indonesia*. *Geophysical Journal International*, 2, 296-316.
- Sandwell, D., Xiaohua, X., Rob, M., Matt, W., Xiaopeng, T., & Paul, W. (2011). *GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools*. UC San Diego : Scripps Institution of Oceanography.
- Sarsito, D. A. (2010). *Pemodelan Geometrik dan Kinematik Kawasan Sulawesi dan Kalimantan Bagian Timur berdasarkan Data GNSS-GPS dan Gaya Berat Global*. Disertasi. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Sarsito, D. A., Susilo, Simons, W. J. F., Abidin, H. Z., Sapiie, B., Triyoso, W., & Andreas, H. (2016). *Rotation and Strain Rate of Sulawesi from Geometrical Velocity Field*. *International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation (ISEDMD) 2016*. AIP Conf. Proc. 1857, 040006-1–040006-6; doi : AIP Publishing. 978-0-7354-1531-7 10.1063/1.4987070.
- Savage, J. C., & Burford, R. O. (1973). *Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California*. *Journal of Geophysical Research*, 78, 832-854. <http://dx.doi.org/10.1029/JB078i005p00832>.
- Shen, Z.-K., Jackson, D. D., & Gc, B. X. (1996). *Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angeles Basin from Geodetic Measurements*. *J. Geophys. Res.* 101, 27,957–27,980.
- Shen, Z.-K., Wang, M., Zeng, Y., & Wang, F. (2015). *Optimal Interpolation of Spatially Discretized Geodetic Data*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 4, pp. 2117–2127, August 2015, doi: 10.1785/0120140247.
- Socquet, A., Simons, W., & Vigny, C. (2006). *Microblock Rotations and Fault Coupling in SE Asia Triple Junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and Earthquake Slip Vector Data*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, B08409, doi:10.1029/2005JB003963.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2017). *Earth : An Introduction to Physical Geology*. Essex : Pearson Education Limited.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F. (2013). *Generic Mapping Tools: Improved Version Released*. *EOS Trans. AGU*, 94(45), p. 409-410, 2013. doi:10.1002/2013EO450001.