



Model Sesar Pati di Jawa Tengah Berdasarkan Data GPS ***Pati Fault Model in Central Java Based on GPS Data***

Cecep Sulaeman, Pandu Adi Minarno, Imam Priambodo, dan Haunan Afif

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi
Jalan Diponegoro No. 57 Bandung, e-mail: cecepsula@gmail.com

Naskah diterima : 14 Maret 2019, Revisi terakhir : 18 Februari 2020 Disetujui : 19 Februari 2020, Online : 19 Februari 2020
DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.21.9-15p>

Abstrak- Survei GPS secara periodik telah dilakukan dalam tahun 2017 hingga 2018 oleh PVMBG, Badan Geologi untuk mengetahui karakteristik Sesar Pati. Pengolahan dan analisis data GPS memakai perangkat lunak Gamit/Globk versi 10.7. Secara horizontal, pola pergeseran titik ukur GPS umumnya ke baratdaya dan selatan dengan kecepatan 3,04 mm/th hingga 19,49 mm/th. Sementara itu, pergeseran vertikal bervariasi, ada yang turun dan naik dengan kecepatan berkisar antara -125,6 mm/th hingga +4,07 mm/th. Berdasarkan pola pergeseran horizontal titik ukur GPS dengan memakai perangkat lunak Coulomb 3.3, diperoleh model Sesar Pati terdiri dari tiga segmen yang berpotensi menimbulkan gempa bumi dengan momen magnitudo masing-masing Mw 6,2; Mw 6,2; dan Mw 6,4.

Katakunci: Survei GPS, Sesar Pati, pergeseran, model sesar.

Abstract- The campaign GPS survey was conducted in the 2017 - 2018 by Centre for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Geological Agency for the purpose of studying the characteristic of the Pati Fault. The complete processing and analysis of the GPS observations were performed using Gamit/Globk software version 10.6. Horizontally, displacement of GPS stations generally to the southwest and to the south with a velocity of 3.04 mm/yr up to 19.49 mm/yr. While the vertical displacement up and down with values varying from -125.60 mm/yr to 4.07 mm/yr. Base on displacement pattern of GPS stations by using Coulomb 3.3 software, a Pati Fault model consist of three segments that have potential produce earthquakes with moment magnitude Mw 6.2, Mw 6.2, and Mw 6.4 respectively.

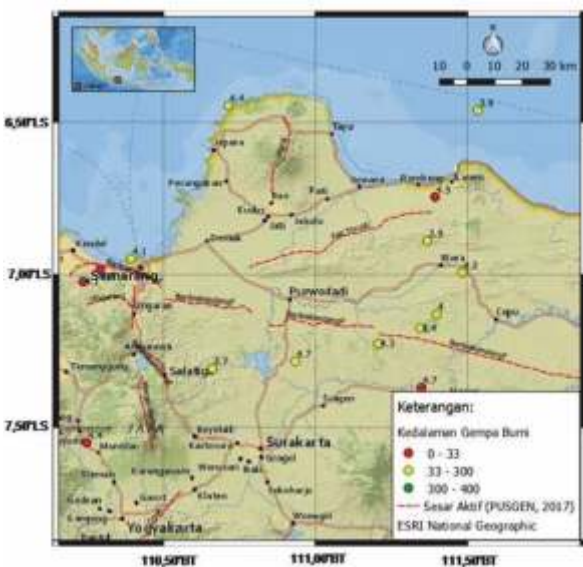
Keywords: GPS survey, Pati Fault, displacement, fault model.

PENDAHULUAN

Di daerah Pati hingga Lasem terdapat kelurusan sinklin berarah baratdaya - timurlaut (Kadar dan Sudijono, 1993). Pusat Studi Gempa Nasional (Anonim, 2017), telah mengkategorikan Sesar Lasem sebagai sesar aktif bertipe naik dengan arah timurlaut - baratdaya. Pada bagian lainnya, Sesar Lasem disebut Sesar naik Pati dengan laju geser 0,1 mm/th (Gambar 1). Pada studi ini sesar yang dibahas disebut Sesar Pati karena sebagian besar bentangannya berada di daerah Pati.

Gempa bumi yang diduga bersumber dari Sesar Pati pernah terjadi pada tahun 1880 dengan magnitudo M 6,8 (McBirney *et al.*, 2003 dalam Anonim, 2017). Menurut katalog gempa bumi merusak (Supartoyo dkk., 2014), wilayah Pati pernah terlanda gempa bumi merusak pada tahun 1890 yang mengakibatkan beberapa orang meninggal dan beberapa bangunan roboh di Juana. Sementara, Lasem pernah terlanda gempa bumi pada tahun 1939 yang mengakibatkan kerusakan bangunan hingga wilayah Cirebon.

Berdasarkan episenter gempa bumi periode tahun 1960 - 2018 dari *United State Geological Survey* (USGS, 2018), menunjukkan terdapat episenter gempa bumi yang berlokasi di ujung Sesar Pati yaitu di Rembang (Gambar 1). Gempa bumi tersebut terjadi pada 12 September 1996 dengan magnitudo M 4,5 pada kedalaman 33 km.



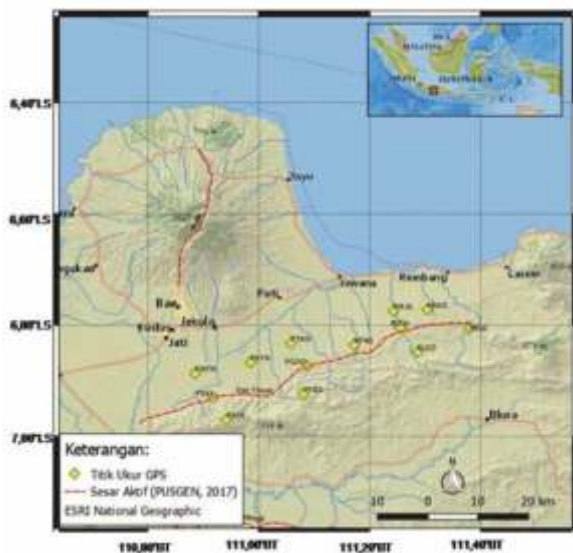
Gambar 1. Episenter gempa bumi tahun 1960 - 2018 di wilayah Pati dan sekitarnya dengan magnitudo M 3,7 - 4,8 (USGS, 2018).

Untuk mengetahui karakteristik Sesar Pati, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, telah melakukan survei *Global Positioning System* (GPS), yaitu pada Januari 2017, September 2017 dan Juli 2018. Dalam tulisan ini akan dibahas hasil survei tersebut. Karakteristik sesar diperoleh melalui pemodelan antara lain lokasi sesar, jenis sesar, dan potensi magnitudo maksimum gempa bumi yang mungkin dihasilkan oleh sesar. Parameter ini dapat dipakai sebagai bahan analisis bahaya gempa bumi atau peta bahaya gempa bumi di wilayah Pati dan sekitarnya sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi.

Jumlah titik ukur GPS sebanyak tiga belas (Gambar 2) yang dibangun masing-masing 9 titik ukur pada Januari 2017 dan empat titik ukur pada September 2017. Sebaran titik ukur sebagian besar berada di utara garis sesar, sementara 4 titik ukur berada di selatannya. Model resiver GPS geodetik yang digunakan adalah Trimble R8 frekuensi ganda (Gambar 3). Lama pengamatan bervariasi antara sehari hingga dua hari dalam setiap periode survei. Jumlah jam pengamatan antara 6 jam hingga 24 jam per hari pengamatan setiap titik ukurnya. Pengolahan data memakai perangkat lunak Gamit/Globk versi 10.7. Perangkat lunak ini bekerja berdasarkan sistem operasi Linux. Data pengamatan yang diperlukan dalam format *Receiver Independent Exchange* (RINEX) per hari pengamatan. Data lain yang dibutuhkan dalam pengolahan ini adalah orbit satelit dalam format sp3, dan navigasi serta waktu dalam format brdc (Herring *et al.*, 2017). Dalam studi ini data tersebut diperoleh secara otomatis saat proses pengolahan berlangsung yang terhubung dengan internet. Dalam pengolahan data ini memakai 10 titik referensi global *International GNSS Service* (IGS). Titik referensi IGS tersebut, yaitu BAKO (Cibinong), COCO (Cocos), DARW (Darwin), NTUS (Nanyang), PIMO (Manila), DGAR (Deigo Garsia), HYDE (Hyderabad), IISC (Bangalore), KARR (Karratha), dan LAE (Lae). Referensi tersebut memakai sistem *International Terrestrial Reference Frame* 2008 (ITRF 2008). ITRF merupakan realisasi dari sistem referensi *International Terrestrial Reference System* (ITRS) yang titik pusatnya di pusat massa bumi (geosentrik) dengan sumbu-sumbunya berorientasi secara konsisten terhadap *the Bureau International de l'Heure* (BIH) pada epok 1984,0 dan besar panjang sumbu-sumbunya dalam meter (Kuncoro, 2013). Untuk mendapatkan perubahan posisi lokal stasiun GPS di permukaan bumi, selanjutnya koordinat titik ukur di dalam sistem koordinat geosentrik ditransformasikan ke dalam sistem koordinat toposentrik yang mengacu ke suatu epok referensi tertentu. Dalam hal ini, digunakan koordinat pendekatan titik awal pengukuran di setiap titik ukur GPS. Nilai posisi ditampilkan dalam sistem

koordinat *World Geodetic System* 1984 (WGS 84). WGS 84 adalah sistem koordinat Kartesian Terikat Bumi yang pusatnya berimpit dengan massa bumi, sumbu Z berimpit dengan sumbu putar bumi melalui *Conventional Terrestrial Pole* (CTP), sumbu X terletak di bidang meridian nol (Greenwich), dan sumbu Y tegak lurus sumbu X dan Z, serta membentuk sistem tangan kanan (Abidin, 2000). Nilai kecepatan pergeseran setiap stasiun GPS dapat diestimasi dari perubahan posisi terhadap waktu pengamatan.

Untuk memperoleh nilai kecepatan lokal, maka komponen kecepatan horisontal stasiun GPS dikoreksi dengan kecepatan pergerakan Blok Sunda. Hal tersebut karena berdasarkan tektonik global, Pulau Jawa termasuk ke dalam Blok Sunda (Bird, 2003).



Gambar 2. Peta titik ukur GPS di sekitar Sesar Pati.



Gambar 3. Resiver GPS model Trimble R8 di titik ukur PSSK.

Nilai komponen kecepatan Horizontal Blok Sunda di setiap titik GPS dihitung dengan perangkat lunak *Plate-Motion-Calculator* dengan memilih model Morvel 2010 yang diakses melalui situs <https://www.unavco.org>. Parameter rotasi *Euler* Blok Sunda yang dipakai dalam perhitungan ini adalah lintang kutub *Euler* $46,202^{\circ}U$, bujur kutub *Euler* $-85,899^{\circ}T$, dan kecepatan sudut $0,370$ derajat/juta-tahun (Kuncoro, 2013). Nilai pergeseran di setiap titik ukur diperoleh dari nilai kecepatan terkoreksi dikali lama pengamatan, yaitu 1,5 tahun.

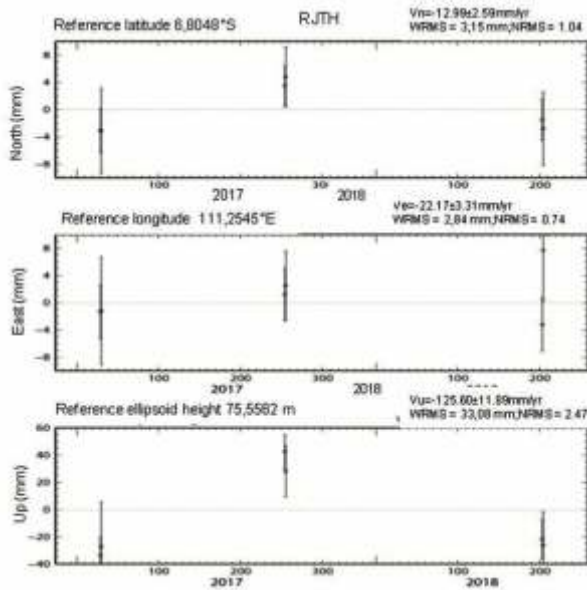
Selanjutnya, pola pergeseran titik ukur tersebut dianalisis untuk memperoleh penyebabnya dalam hal ini sesar dengan menggunakan perangkat lunak Coulomb Versi 3.3 (Shinji *et al.*, 2011). Coulomb dirancang untuk menghitung pergeseran statis, regangan, dan tegangan pada suatu kedalaman yang disebabkan oleh sesar atau intrusi magmatik. Perhitungan dilakukan dalam media bersifat isotropik elastik rumusan Okada (1992).

Input yang diperlukan dalam pemodelan memakai perangkat lunak Coulomb Versi 3.3 adalah posisi bidang sesar, panjang dan lebar bidang sesar, kedalaman, jurus, dip, dan nilai slip. Berdasarkan luas bidang sesar dan slip dapat diketahui nilai momen magnitudo, kemudian dihitung nilai pergeseran horisontal dan vertikal di titik tertentu di permukaan (Shinji *et al.*, 2011).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data GPS berupa nilai komponen posisi (utara, timur dan vertikal) untuk setiap periode survei. Berdasarkan perubahan komponen posisi terhadap waktu survei diperoleh nilai komponen kecepatan titik ukur GPS. Sebagai contoh, komponen posisi untuk titik ukur RJTH dalam tiga periode survei diperlihatkan pada Gambar 4. RJTH dipilih sebagai contoh karena datanya paling lengkap. Pada koordinat geodetik, nilai *reference latitude* (nilai referensi) komponen utara titik ukur RJTH tercatat $6,8048^{\circ} LS$, dan terjadi perubahan posisi sehingga diperoleh komponen kecepatan sebesar $-12,99 \pm 2,59$ mm/th. Tercatat pula nilai *normalised root mean square* (nrms) yaitu nilai estimasi perbedaan antara fase pengamatan dengan pemodelan, dan nilai *weighted root mean square residual* (wrms) yang merepresentasikan korelasi jangka pendek antar data, yaitu masing-masing 3,15 mm dan 1,04 mm. Dengan penjelasan yang sama diperoleh posisi komponen timur titik ukur RJTH $111,2545^{\circ} BT$ dengan nilai komponen kecepatan $22,17 \pm 3,31$ mm/th, dan vertikal (*up*) pada elevasi 75,5562 m dengan kecepatan $125,60 \pm 11,89$ mm/th.

Nilai komponen kecepatan untuk 13 titik ukur di sekitar



Gambar 4. Contoh komponen kecepatan untuk titik ukur RJTH periode Januari 2017- Juli 2018.

Sesar Pati diperlihatkan pada Tabel 1. Semua komponen utara titik ukur GPS bernilai negatif yang artinya bergeser ke selatan dengan nilai antara -9,60 mm/th hingga -26,00 mm/th. Sementara komponen timur semua titik ukur GPS bernilai positif yang artinya bergeser ke timur dengan nilai antara 13,63 mm/th hingga 26,84 mm/th. Nilai standar deviasi komponen horizontal bervariasi antara ±1,94 mm/th hingga ±10,15 mm/th. Nilai standar deviasi terbesar untuk komponen horizontal terjadi di RSLG yaitu ±10,15 mm/th. Hal ini mungkin karena jumlah data lebih sedikit dibanding di titik lainnya. Berdasarkan nilai tersebut maka secara horizontal titik ukur GPS

umumnya bergerak ke arah tenggara dengan referensi global ITRF 2008 (Gambar 5). Nilai kecepatan terkecil tercatat di titik ukur PMJG sebesar 9,27 mm/th, dan tertinggi di RSLG sebesar 27,29 mm/th. Sementara komponen vertikal (*up*) umumnya bervariasi ada yang positif (naik) dan negatif (turun) dengan nilai berkisar antara -125,6 mm/th hingga +4,07 mm/th. Standar deviasi komponen vertikal lebih besar, yaitu antara ±9,57 mm/th hingga ±35,60 mm/th. Komponen vertikal untuk titik ukur RSLG, PPWI, dan PKYN memiliki standar deviasi yang besar yaitu masing-masing 35,60 mm/th, 25,50 mm/th, dan 22,90 mm/th. Hal ini kemungkinan karena jumlah data pengukuran di titik ukur tersebut lebih sedikit dibanding dengan titik ukur lainnya. Data pergeseran vertikal tidak dipakai sebagai pembanding dalam pemodelan sumber gempa bumi karena memiliki standar deviasi lebih besar dibanding pergeseran horizontal.

Selanjutnya nilai kecepatan horizontal di setiap titik ukur dikoreksi dengan nilai kecepatan Blok Sunda seperti dipelihatkan pada Tabel 2 dan Gambar 5. Sementara untuk nilai vertikal tidak dikoreksi karena tidak tersedia model koreksinya. Terdapat dua kelompok pergeseran, dua titik ukur paling barat dan empat titik ukur di timur bergeser hampir ke arah baratdaya, dan empat titik ukur di tengah bergeser ke selatan. Sementara satu titik ukur RRAG bergeser ke tenggara yang berbeda arahnya dengan titik ukur lainnya, sehingga tidak disertakan dalam pemodelan. Nilai kecepatan setelah dikoreksi menjadi relatif kecil, yaitu berkisar antara 3,04 mm/th hingga 19,49 mm/th.

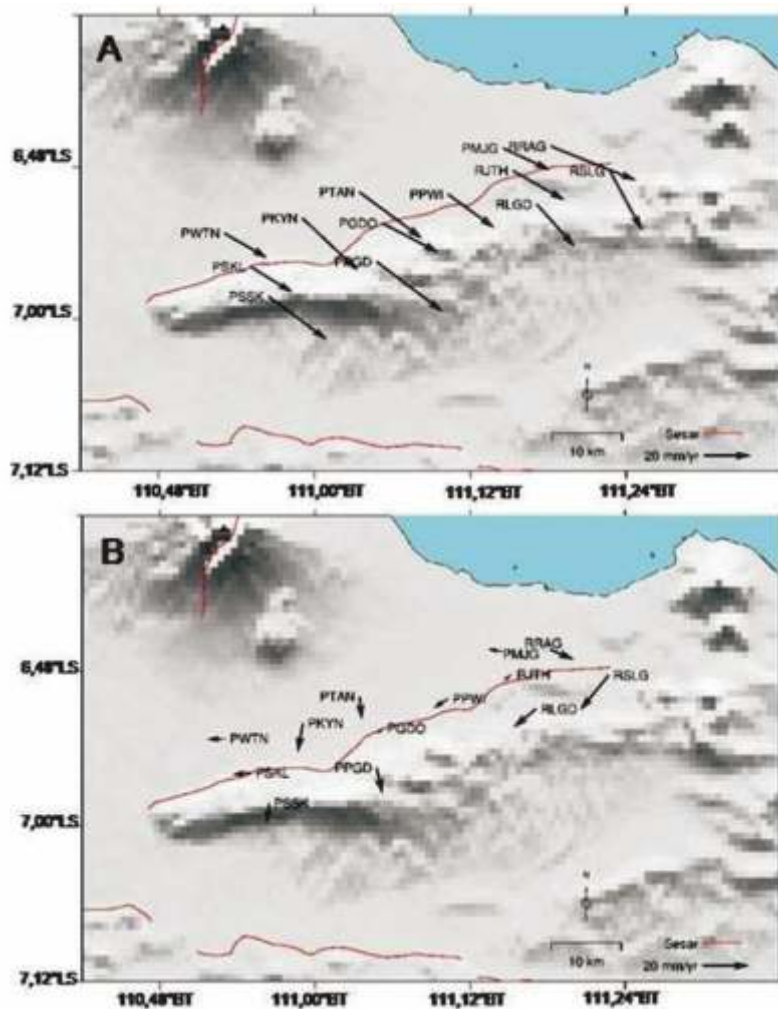
Nilai pergeseran titik ukur GPS dijadikan pembanding

Tabel 1. Komponen kecepatan titik ukur GPS di Pati periode Januari 2017 - September 2018 dengan referensi ITRF 2008

| No. | Nama Titik Ukur | Koordinat referensi | | | kecepatan (mm/th) | | | | | |
|-----|-----------------|---------------------|-----------|-------------|-------------------|---------|-----------|---------|--------------|---------|
| | | Lintang (°) | Bujur (°) | elevasi (m) | N (utara) | Sd. +/- | E (timur) | Sd. +/- | U (vertikal) | Sd. +/- |
| 1 | RSLG | -6.8055 | 111.3792 | 80.3447 | -26.00 | 8.32 | 13.63 | 10.15 | 36.94 | 35.60 |
| 2 | RLGD | -6.8492 | 111.2854 | 112.9800 | -19.00 | 3.09 | 16.22 | 3.77 | -9.31 | 16.70 |
| 3 | RJTH | -6.8048 | 111.2545 | 75.5562 | -13.00 | 2.89 | 22.17 | 3.31 | -125.6 | 11.90 |
| 4 | PWTN | -6.8874 | 110.8847 | 40.1103 | -11.00 | 3.02 | 18.4 | 3.52 | 4.07 | 12.70 |
| 5 | PTAN | -6.8331 | 111.0577 | 52.2095 | -20.00 | 2.32 | 26.84 | 2.83 | 4.23 | 10.10 |
| 6 | PSSK | -6.9705 | 110.9413 | 346.0020 | -19.00 | 1.94 | 24.79 | 2.38 | 28.85 | 8.99 |
| 7 | PSKL | -6.9311 | 110.9179 | 61.2986 | -11.00 | 2.78 | 18.03 | 3.34 | 9.92 | 12.40 |
| 8 | PPWI | -6.8361 | 111.1716 | 90.1297 | -15.00 | 4.96 | 19.81 | 6.56 | -107.5 | 25.50 |
| 9 | PPGD | -6.9247 | 111.0797 | 310.9637 | -22.00 | 2.69 | 28.33 | 3.20 | -14.38 | 13.30 |
| 10 | PMJG | -6.7751 | 111.2421 | 58.2579 | -9.60 | 2.33 | 19.94 | 2.86 | 5.90 | 11.60 |
| 11 | PKYN | -6.8675 | 110.9847 | 37.8077 | -23.00 | 5.35 | 23.70 | 6.32 | -131.00 | 22.90 |
| 12 | PGDO | -6.8741 | 111.08717 | 77.24863 | -13.00 | 2.05 | 23.93 | 2.46 | 9.07 | 9.57 |
| 13 | RRAG | -6.7727 | 111.30354 | 71.46187 | -15.00 | 4.68 | 36.26 | 5.27 | -287 | 21.50 |

Tabel 2. Komponen kecepatan titik ukur GPS di Pati periode Januari 2017-September 2018 berdasarkan referensi Blok Sunda

| No. | Nama Titik ukur | Kecepatan berdasarkan referensi ITRF 2008 (mm/th), | | Kecepatan Blok Sunda (mm/th) | | Kecepatan berdasarkan referensi Blok Sunda (mm/th) | | Resultan (mm/th) |
|-----|-----------------|--|-----------|------------------------------|-----------|--|-----------|------------------|
| | | N (utara) | E (timur) | N (utara) | E (timur) | N (utara) | E (timur) | |
| 1 | RSLG | -25.76 | 13.63 | -10.7 | 26.01 | -15.06 | -12.38 | 19.49 |
| 2 | RLGD | -18.55 | 16.22 | -10.67 | 25.98 | -7.88 | -9.76 | 12.54 |
| 3 | RJTH | -12.99 | 22.17 | -10.66 | 26 | -2.33 | -3.83 | 4.483 |
| 4 | PWTN | -10.87 | 18.4 | -10.52 | 25.96 | -0.35 | -7.56 | 7.568 |
| 5 | PTAN | -20.34 | 26.84 | -10.58 | 25.99 | 9.76 | 0.85 | 9.79 |
| 6 | PSSK | -18.86 | 24.79 | -10.54 | 25.93 | -8.32 | -1.14 | 8.39 |
| 7 | PSKL | -11.42 | 18.03 | -10.53 | 25.94 | -0.89 | -7.91 | 7.95 |
| 8 | PPWI | -14.7 | 19.81 | -10.62 | 25.99 | -4.08 | -6.18 | 7.40 |
| 9 | PPGD | -21.93 | 28.33 | -10.59 | 25.95 | -11.34 | 2.38 | 11.58 |
| 10 | PMJG | -9.58 | 19.94 | -10.65 | 26.02 | 1.07 | -6.08 | 6.17 |
| 11 | PKYN | -22.97 | 23.7 | -10.55 | 25.97 | -12.42 | -2.27 | 12.62 |
| 12 | PGDO | -12.85 | 23.93 | -10.59 | 25.97 | -2.26 | -2.04 | 3.04 |
| 13 | BRAG | -14.98 | 36.26 | -10.67 | 26.02 | -4.31 | 10.24 | 11.11 |



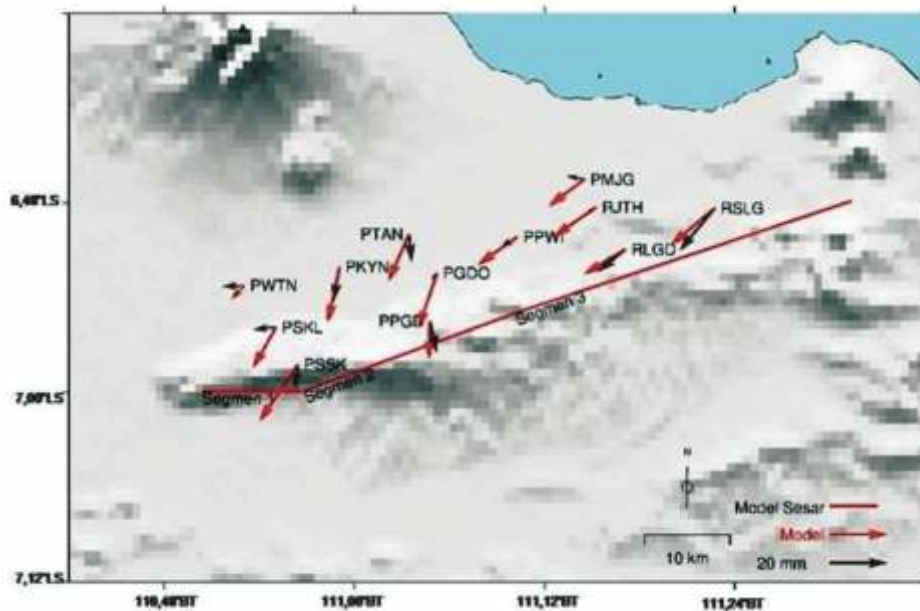
Gambar 5. Kecepatan horizontal titik ukur GPS periode Januari 2017 – September 2018 berdasarkan referensi ITRF 2008 (A), dan referensi Blok Sunda (B).

dalam pemodelan sesar memakai perangkat lunak Coulomb Versi 3.3. Model sesar dengan tiga segmen menghasilkan model pergeseran yang mirip dengan data dibanding dengan satu dan dua segmen. Selisih nilai komponen pergeseran model dengan data untuk komponen horizontal berkisar antara 0,0004 m hingga 0,029 m. Nilai selisih pergeseran tersebut adalah terkecil dari hasil lainnya setelah dicoba-coba dengan berbagai parameter input. Segmen 1 berarah barat - timur dengan jenis sesar mendatar mengiri dengan momen magnitudo Mw 6,2. Segmen 2 berarah barat daya - timur laut dengan jenis sesar naik dengan komponen mendatar mengiri dengan momen

magnitudo Mw 6,2. Segmen 3 berarah barat daya - timur laut dengan jenis sesar mendatar mengiri dengan komponen naik dengan momen magnitudo Mw 6,4. Parameter model sesar selengkapnya diperlihatkan pada Tabel 3 dan Gambar 6. Dalam pemodelan sesar tersebut, awalnya lokasi model sesar berimpit dengan lokasi sesar menurut Pusgen dengan memperhatikan morfologi setempat. Lokasi model sesar dan parameter lainnya kemudian dimodifikasi dengan cara coba-coba untuk memperoleh selisih terkecil antara nilai model pergeseran dengan data pergeseran titik ukur GPS.

Tabel 3. Parameter model Sesar Pati yang menghasilkan model pergeseran horizontal pada Gambar 6 memakai perangkat lunak Coulomb versi 3.3 (Shinji *et al.*, 2011)

| Segmen | Koordinat awal | Koordinat akhir | Lateral slip (m) | Dip slip (m) | Dip (°) | Kedalaman atas (m) | Kedalaman bawah (m) | Momen magnitudo (Mw) |
|--------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|---------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 110,840°BT;69°99'LS | 110,946°BT;69°99'LS | -0,40 | 0 | 35 | 1 | 11 | 6,2 |
| 2 | 110,946°BT;69°99'LS | 111,168°BT;69°17'LS | -0,10 | 0,14 | 35 | 1 | 11 | 6,2 |
| 3 | 111,168°BT;69°17'LS | 111,523°BT;69°17'LS | -0,2 | 0,03 | 35 | 1 | 11 | 6,4 |



Gambar 6. Model sesar dan pergeseran horizontal titik ukur GPS.

KESIMPULAN

Berdasarkan arahnya, pola pergeseran titik ukur GPS dibagi dua kelompok, yaitu di barat dan timur ke baratdaya, sementara di tengah ke selatan. Pola pergeseran ini berkaitan dengan tiga segmen Sesar Pati, yaitu segmen 1 berarah barat - timur dengan jenis sesar mendatar mengiri, segmen 2 berarah baratdaya - timurlaut dengan jenis sesar naik dengan komponen mendatar mengiri, dan segmen 3 berarah baratdaya - timurlaut dengan jenis sesar mendatar mengiri dengan komponen naik. Berdasarkan hasil pemodelan, tiga segmen sesar ini berpotensi menghasilkan gempa bumi dengan momen magnitudo (Mw) masing-masing Mw 6,2; Mw 6,2, dan Mw 6,4. Garis sesar berada di selatan - tenggara sebaran titik ukur GPS, oleh karena itu disarankan membangun titik ukur di selatan - tenggara garis sesar ini.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada Ir. Kasbani, M.Sc., sebagai Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Dr. Ir. Sri Hidayati, sebagai Kepala Bidang Mitigasi Bencana Gempa Bumi dan Tsunami, Dr. Ir. Akhmad Solikhin sebagai Kepala Sub Bidang Mitigasi Bencana Gempa Bumi dan Tsunami Wilayah Barat, Mohamad Arifin Joko Pradipto, S.T, M.T, sebagai Kepala Sub Bidang Mitigasi Bencana Gempa Bumi dan Tsunami Wilayah Timur, Yunara Dasa Triana, S.T.,M.T., Pemimpin Proyek yang telah memberi kesempatan melakukan survei GPS di Kabupaten Pati dan Rembang. Ucapan terimakasih disampaikan pula kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelidikan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin H. Z., 2000. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Pradnya Paramita, ISBN 979-408-377-1.
- Anonim, 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional, ISBN 978-602-5489-01-3.
- Bird P., 2003. An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *G3 an Electronic Journal of The Earth Sciences*, 4(3), ISSN: 1525-2027.
- Herring T.A., King R.W., Floyd, M.A., McClusky S.C., 2018. *Introduction to Gamit/Glokk*. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology. <http://geoweb.mit.edu/gg/docs.php>.
- Kadar D. dan Sudijono, 1993. *Peta Geologi Lembar Rembang Jawa Tengah, Skala 1 : 100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Kuncoro, H., 2013. Estimasi Parameter Rotasi Euler Blok Sunda Berdasarkan Data Pengamatan GPS Kontinyu dan Episodik di Regional Asia Tenggara. (Tesis Magister) Institut Teknologi Bandung.
- McBirney, A.R., Serva, L., Guerra, M., and Connor, C.B. 2003. Volcanic and Seismic Hazards at a Proposed Nuclear Power Site in Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 12(1): 11-30.
- Okada Y., 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half Space. *BSSA*, Vol.82, No. 2, April 1992.
- Shinji, T., Stein, R., Lian, J., and Sevilgen, V., 2011. *Coulomb 3.3., User guide, 2011*. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/of2011-1060.pdf>, diunduh Januari 2018.
- Supartoyo, Surono, dan Putranto, E.T., 2014. *Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1612 – 2014 (edisi kelima)*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- USGS, 2018, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
-