

# DESAIN KONFIGURASI JARING GPS UNTUK PEMANTAUAN DEFORMASI SESAR SERMO

(GPS Network Configuration Design for Deformation Monitoring of Sermo Fault)

Yulaikhah<sup>1,3</sup>, Subagyo Pramumijoyo<sup>2</sup>, Nurrohmat Widjajanti<sup>3</sup>, Purnama Budi Santosa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ilmu Teknik Geomatika Departemen Teknik Geodesi FT UGM, Indonesia

<sup>2</sup> Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik UGM, Indonesia

<sup>3</sup> Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM, Indonesia

Jl. Grafika No. 2 Bulaksumur, Yogyakarta, Indonesia 55281

E-mail: [yulaikhah@ugm.ac.id](mailto:yulaikhah@ugm.ac.id)

Diterima: 18 November 2020; Direvisi: 23 November 2020; Disetujui untuk Dipublikasikan: 28 Januari 2021

## ABSTRAK

Jaring pemantauan deformasi Sesar Sermo telah dibangun menyebar sepanjang jalur sesar sebanyak 15 titik. Namun demikian, pada saat pengukuran lapangan dengan menggunakan GPS secara simultan masih terdapat kendala dalam hal ketersediaan alat GPS. Penyediaan alat dalam jumlah banyak tidak mudah untuk dilakukan serta membutuhkan biaya yang besar. Oleh karena itu diperlukan pembuatan desain jaring pemantauan deformasi yang efisien namun tetap sensitif terhadap deformasi yang terjadi. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mendesain konfigurasi jaring pemantauan deformasi Sesar Sermo yang optimum berdasarkan kriteria sensitivitas jaringan. Desain jaringan dilakukan terhadap dua jaring yang berbeda, yaitu jaring GPS makro yang terdiri atas 5 titik, dan jaring GPS makro dan mikro yang terdiri atas 15 titik. Jaringan didesain untuk dapat mendeteksi pergeseran sebesar 5 mm dan 10 mm. Selanjutnya analisis sensitivitas jaring dilakukan dengan uji pergeseran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jaring GPS makro (terdiri 10 *baseline*) belum cukup sensitif untuk mendeteksi pergeseran sebesar 5 mm. Namun untuk mendeteksi deformasi 10 mm, cukup digunakan 4 *baseline* dengan kontribusi yang paling signifikan terhadap sensitivitas jaring. Demikian juga jaring GPS makro dan mikro belum cukup sensitif untuk mendeteksi pergeseran 5 mm pada satu sisi blok sesar. Untuk bisa mendeteksi pergeseran 10 mm cukup dengan 26 *baseline*. Dengan demikian pengukuran tidak perlu dilakukan secara simultan di semua titik. Pengukuran dapat didesain dalam beberapa sesi sehingga jumlah alat GPS yang diperlukan dapat dikurangi dan biaya dapat direduksi.

**Kata kunci:** Optimasi jaring, GPS, Sesar Sermo, *baseline*, deformasi

## ABSTRACT

*Sermo Fault deformation monitoring networks have been established along the faults consists of 15-monitoring points. There are obstacles during the simultaneous measurement with GPS, such as the lack of availability of GPS devices as well as the high cost needed for this purpose. Therefore it is necessary to design an efficient deformation monitoring network but remain sensitive to the deformation. This study aims to design the optimum configuration of the Sermo Fault deformation monitoring network based on network sensitivity criteria. The network design is carried out on two different networks, the macro GPS network consisting of five points, and the combined macro and micro GPS network consists of 15 points. The network has designed to detect shifts of 5 to 10 mm. Sensitivity analysis has conducted by applying a displacement test to the resulted configuration. The results show that the macro GPS network (consisting of 10 baselines) is not sensitive enough to detect a 5 mm displacement. However, to detects a 10 mm deformation, only four baselines with the most significant contribution to network sensitivity had used. Likewise, macro and micro GPS networks are not sensitive enough to detect displacement of 5 mm on one side of the fault block. The configuration of 26 baselines is good enough to detect a 10 mm displacement. Therefore, it is suggested that there is no need to carry out simultaneous measurements at all points. Measurements can be designed in several sessions so that the number of GPS devices and costs can be reduced.*

**Keywords:** network optimization, GPS, Sermo Fault, *baseline*, deformation

## PENDAHULUAN

Struktur geologi di sekitar Waduk Sermo, Kulon Progo, DI. Yogyakarta menunjukkan adanya sesar utama dengan arah NW-SE melewati Kali Ngrancah

dan genangan waduk (Departemen Pekerjaan Umum, 1996; Widagdo, Paramumijono, Harijoko, & Setiawan, 2016). Sesar ini merupakan sesar *strike-slip* (Widagdo, 2020). Di daerah yang lembab

seperti di dekat area genangan waduk, sesar bisa tertutup oleh sedimen tebal di atasnya sehingga ekspresi sesar di permukaan lemah dan kemungkinan tidak terdeteksi (Marliyani, Arrowsmith, & Whipple, 2016). Keberadaan sesar ini (untuk selanjutnya disebut dengan Sesar Sermo) bisa berpotensi menyebabkan terjadinya deformasi pada tubuh Bendungan Sermo. Untuk keperluan pemantauan deformasi Sesar Sermo, telah dibangun jaring pemantauan sebanyak 15 titik dan terdistribusi menyebar sepanjang sesar. Survei pemantauan deformasi sesar telah dilakukan dengan pengamatan GPS secara simultan pada 15 titik kontrol tersebut (Waljiyanto, Nugroho, Yulaikhah, & Cahyono, 2016). Pengamatan telah dilakukan pada tiga kala yaitu tahun 2016, 2017 dan 2018 (Yulaikhah & Santosa, 2017; Yulaikhah, Waljiyanto, & Santosa, 2018). Teknologi GPS sering digunakan dalam pemantauan deformasi, baik yang bersifat lokal maupun regional, diantaranya pada pemantauan deformasi Pulau Sangihe (Ulinnuha et al., 2019) dan Sesar Opak (Widjajanti et al., 2020). Namun demikian, karena pengamatan dilakukan secara simultan maka terdapat kendala yaitu dalam hal penyediaan alat GPS. Tidak mudah untuk menyediakan alat dalam jumlah banyak dan dalam waktu yang bersamaan, sehingga biaya yang dibutuhkanpun menjadi besar. Oleh karena itu, pengamatan berikutnya perlu didesain agar lebih efisien namun tetap memenuhi kriteria presisi dan sensitif terhadap pergerakan yang terjadi.

Secara umum jaring geodesi perlu didesain agar memenuhi kriteria akurasi, kehandalan, dan biaya rendah (Grafarend dan Sanso, 1985; Kuang, 1996; Wu, Tang, dan Chen, 2003). Namun, khusus untuk jaring pemantauan deformasi, harus memenuhi satu kriteria lagi, yaitu sensitif terhadap deformasi yang terjadi (Benzao & Shaorong, 1995; Even-Tzur, 2002). Akurasi menggambarkan kualitas jaring terkait dengan kesalahan acak. Kehandalan menunjukkan kemampuan jaring dalam mendeteksi kesalahan besar.

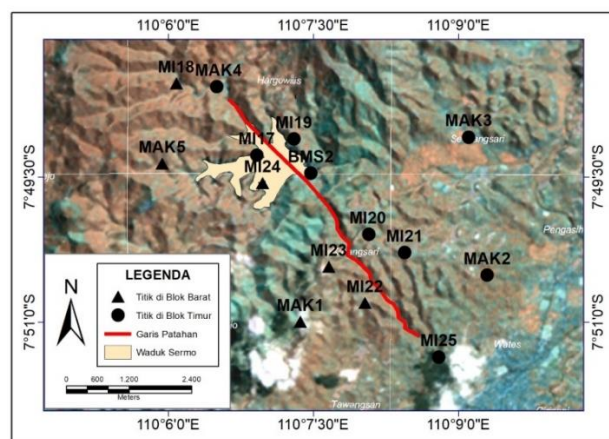
Dalam desain jaring untuk pemantauan pergerakan sesar perlu mempertimbangkan beberapa parameter, salah satunya adalah geometri patahan. Data dan informasi geologi yang ada perlu dilibatkan untuk mendapatkan jaring yang sensitif. Oleh karena itu Halicioglu & Ozener (2008), mengintegrasikan antara geoscience dan geodesi dalam studi pemantauan deformasi di area sesar aktif Tuzla (Izmir, Turki). Dalam membuat desain jaring geodetik, kondisi geologi daerah penelitian dikaji secara mendalam. Selanjutnya, model sesar satu dimensi dengan dua parameter standard *strike-slip* digunakan dalam desain jaring tersebut.

Even-Tzur (2002) telah mengembangkan desain optimasi jaring pemantauan deformasi melalui analisis sensitivitas jaring untuk mendapatkan jaring GPS yang optimum. Pada penelitian Even-Tzur (2002), desain konfigurasi

jaring GPS (optimasi jaring) dikembangkan dengan melibatkan parameter-parameter geologi, seperti kecepatan deformasi yang dapat diketahui dari penelitian sebelumnya dan model deformasi (terkait dengan tipe sesar). Dengan desain tersebut tidak semua *baseline* harus dilakukan pengamatan sehingga biaya survei dapat ditekan. Oleh karena itu, rumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mengetahui sensitivitas jaring dalam mendeteksi deformasi yang terjadi apabila terdapat pengurangan jumlah *baseline* yang diamati. Penelitian ini bermaksud mendesain konfigurasi jaring GPS untuk pemantauan deformasi Sesar Sermo berdasarkan kriteria sensitivitas. Desain optimasi jaring dilakukan dengan mengadopsi algoritma yang dikembangkan oleh Even-Tzur (2002). Selanjutnya konfigurasi jaring hasil desain diimplementasikan untuk mengevaluasi sensitivitas jaring melalui uji pergeseran.

## METODE

Jaring pemantauan deformasi Sesar Sermo dibangun pada tahun 2015. Pada awalnya hanya terdiri atas 5 titik yang terdistribusi di sekeliling Waduk Sermo namun berjarak agak jauh dari waduk. 5 titik tersebut disebut dengan jaring makro, yang terdiri atas titik MAK1 sampai MAK5. Selanjutnya jaring dikembangkan dengan menambahkan 9 titik di sepanjang sesar dan diberi nama MI17 sampai MI25. Titik BMS2 merupakan Titik Dasar Teknik (TDT) yang sudah ada dan dijadikan sebagai bagian jaring pemantauan. 10 titik tersebut disebut dengan jaring mikro. Distribusi jaring makro dan mikro digambarkan melalui **Gambar 1**. Notasi MAK# dan MI# berturut-turut menunjukkan titik pada jaring makro dan mikro.



Sumber: Yulaikhah, Pramumijoyo, & Widjajanti, (2019)

**Gambar 1.** Distribusi jaring pemantauan deformasi Sesar Sermo.

### Desain Optimasi Jaring Pemantauan Deformasi

Even-Tzur (2002) telah mengembangkan desain optimasi jaring pemantauan deformasi menggunakan kriteria sensitivitas untuk

mendapatkan jaring GPS yang optimum. Desain optimasi jaring GPS dilakukan dengan melibatkan data deformasi yang telah diketahui sebelumnya dan parameter-parameter geologi, seperti kecepatan deformasi yang sudah diketahui dan model deformasi yang terkait dengan tipe sesar.

Dalam analisis deformasi, diperlukan data minimal dua kala, yaitu estimasi koordinat kala 1 ( $\hat{x}_1$ ) dan kala 2 ( $\hat{x}_2$ ), beserta matriks kofaktor masing-masing kala ( $Q_{\hat{x}_1}$ ) dan ( $Q_{\hat{x}_2}$ ). Data dua kala tersebut digunakan untuk menentukan kecepatan deformasi  $V_x$  dengan **Persamaan 1:**

$$V_x = \frac{(\hat{x}_2 - \hat{x}_1)}{\Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

Dalam hal ini  $\Delta t$  adalah selang waktu antara dua kala. Selanjutnya Even-Tzur (2002) menggunakan parameter tingkat ketidaksimetrisan distribusi F ( $\lambda$ ) untuk mengetahui tingkat sensitivitas jaring GPS. Adapun parameter  $\lambda$  diperoleh dengan **Persamaan 2:**

$$\lambda = \frac{V_x^T Q_{V_x} V_x}{\sigma_0^2} \dots\dots\dots (2)$$

$Q_{V_x}$  adalah matriks kofaktor kecepatan deformasi, pada kasus dimana pengukuran dua kala tersebut identik maka  $Q_{V_x}$  dinyatakan dengan

**Persamaan 3:**

$$Q_{V_x} = \frac{2Q_{\hat{x}}}{(\Delta t)^2} = \frac{2(N)^+}{(\Delta t)^2} \dots\dots\dots (3)$$

*Pseudoinvers*  $Q_{V_x}$  dinyatakan dengan **Persamaan 4:**

$$Q_{V_x}^+ = \left( \frac{2(N)^+}{(\Delta t)^2} \right)^+ = \frac{\Delta t^2}{2} N = \frac{\Delta t^2}{2} (A^T P A) \dots\dots\dots (4)$$

Substitusi **Persamaan 4** ke **Persamaan 2** menghasilkan **Persamaan 5:**

$$\lambda = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T N V_x) = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T A^T P A V_x) \dots\dots\dots (5)$$

Pada prinsipnya desain jaring pemantauan deformasi dilakukan untuk mendapatkan konfigurasi jaring yang sensitif terhadap nilai besaran deformasi tertentu. Dengan menambahkan vektor *baseline* GPS, maka dapat meningkatkan sensitivitas jaring yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai  $\lambda$ . Optimasi dilakukan dengan mengidentifikasi vektor *baseline* yang mampu memberikan kontribusi terbesar terhadap peningkatan nilai  $\lambda$ .

Analisis sensitivitas jaring GPS dilakukan dengan membandingkan nilai batas  $\lambda_0$ . Nilai batas tersebut dapat diperoleh dari tabel dengan menggunakan variabel  $1-\beta$ , tingkat signifikansi  $\alpha$  dan derajat kebebasan (Baarda, 1968). Jika nilai  $\lambda < \lambda_0$  maka perlu ditambahkan *baseline* baru untuk meningkatkan nilai  $\lambda$ . Penambahan *baseline* dilakukan berulang sampai mencapai nilai  $\lambda > \lambda_0$ . Apabila  $p$  dan  $a$  adalah bobot dan matriks koefisien

*baseline* baru yang akan ditambahkan (**Persamaan 6**).

$$\bar{N} = (A^T \ a^T) \begin{pmatrix} P \\ p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ a \end{pmatrix}$$

$$\bar{N} = A^T P A + a^T p \ a = N + \Delta N \dots\dots\dots(6)$$

Dengan demikian nilai  $\lambda$  setelah ditambahkan *baseline* baru sebagaimana **Persamaan 7** dan **Persamaan 8:**

$$\bar{\lambda} = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T \bar{N} V_x) = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T (N + \Delta N) V_x)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T N V_x) + \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T \Delta N V_x) \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{\lambda} = \lambda + \Delta \lambda$$

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T \Delta N V_x) = \frac{\Delta t^2}{2 \sigma_0^2} (V_x^T a^T p \ a V_x) \dots\dots\dots (8)$$

Dapat dikatakan bahwa nilai  $\Delta \lambda$  merupakan kontribusi setiap *baseline* terhadap sensitivitas jaring. Oleh karena itu perhitungan nilai  $\Delta \lambda$  dilakukan untuk setiap vektor *baseline*. Selanjutnya dipilih vektor *baseline* dengan nilai  $\Delta \lambda$  besar. Jika jumlah akumulasi  $\Delta \lambda$  dari beberapa *baseline* ( $\sum \Delta \lambda_i$ ) telah mencapai  $\lambda_0$  atau lebih, maka dapat dikatakan bahwa jaring tersebut sensitif terhadap deformasi yang terjadi dengan kecepatan tertentu. Pada penelitian ini, desain optimasi jaring dilakukan terhadap dua jaring yang berbeda. Jaring pertama yaitu jaring makro yang terdiri atas lima titik dan jaring kedua menyertakan semua titik pantau yang terdiri atas 15 titik pantau.

*Desain Jaring Makro*

Langkah pertama yaitu menyusun matriks  $A$  dan  $P$  untuk setiap *baseline*. Matriks  $A$  disusun untuk masing-masing *baseline* dengan asumsi bahwa 1 titik diantara 5 titik pada jaring makro sebagai titik referensi. Dalam hal ini titik MAK2 sebagai titik referensi. Matriks  $P$  diperoleh dengan menghitung varian masing-masing komponen *baseline* berdasarkan nilai varian koordinat yang diperoleh dari hasil pengukuran pada tahun 2016 dengan konsep perambatan kesalahan (Ghilani, 2010; Ogundare, 2016). Baik pada jaring makro maupun jaring keseluruhan, sebagian besar komponen *baseline* memiliki ketelitian yang ditunjukkan dengan nilai simpangan baku kurang dari 10 mm, hanya pada *baseline* yang terikat pada titik MI25 simpangan bakunya mencapai 23 mm, hal ini disebabkan karena titik MI25 memiliki ketelitian yang kurang baik.

Selanjutnya kontribusi masing-masing *baseline* terhadap sensitivitas jaring dihitung dengan **Persamaan 8**. Desain perhitungan sensitivitas dilakukan dengan 4 skema, dengan nilai kecepatan deformasi yang berbeda yaitu sebesar 5 mm dan 10 mm, dan dengan 2 macam matriks bobot  $P$  yaitu berkorelasi dengan asumsi korelasi sebesar 7% (Even-Tzur, 2002) dan tidak berkorelasi. Dengan

demikian matriks kecepatan deformasi merupakan matriks kolom yang terdiri atas 8 baris dengan nilai setiap elemennya adalah 5 untuk 2 skema pertama dan 10 untuk 2 skema yang kedua. Skema analisis yang dilakukan seperti pada **Tabel 1**.

Semua *baseline* disusun berdasarkan nilai  $\Delta\lambda$  dan diurutkan dari yang terbesar. Susunan ini digunakan untuk menentukan *baseline* mana saja yang digunakan. *Baseline* yang memberikan kontribusi besar terhadap sensitivitas jaring yaitu *baseline* yang memberikan peningkatan yang besar terhadap nilai  $\bar{\lambda}$  atau dengan kata lain yang memiliki nilai  $\Delta\lambda$  besar. Oleh karena itu, *baseline* yang memberikan kontribusi besar dipilih sehingga diperoleh  $\Sigma\Delta\lambda_i > \lambda_o$ . Nilai batas  $\lambda_o$  ditentukan dengan melihat pada tabel dengan argumen  $1-\beta = 0,8$ , tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  dan derajat kebebasan  $r = 4$ . Dengan argumen tersebut diperoleh nilai  $\lambda_o = \lambda_{(\alpha, 1-\beta, r, \infty)} = \lambda_{(0,05, 0,8, 4, \infty)} = 12,5$ .

**Tabel 1.** Skema analisis sensitivitas jaring makro.

Skema	Kecepatan Pergeseran (mm)	Matriks Bobot P
1	5	Berkorelasi
2	5	Tidak berkorelasi
3	10	Berkorelasi
4	10	Tidak berkorelasi

*Desain Jaring Makro Dan Mikro*

Prosedur yang dilakukan tidak berbeda dengan jaring makro. Hanya saja pada jaring ini jumlah titik pantau yang terlibat dalam analisis lebih banyak yaitu sejumlah 15 titik, yang meliputi 5 titik jaring makro dan 10 titik jaring mikro. Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengasumsikan bahwa satu sisi blok bergerak relatif terhadap blok lainnya, sehingga titik-titik pantau di sebelah barat yaitu titik MI22, MI23, MI24, MI18, MAK1, dan MAK5 diasumsikan sebagai titik (blok) yang stabil. Desain jaring dibuat dalam dua skema, yaitu dengan asumsi kecepatan pergeseran sebesar 5 dan 10 mm. Nilai batas  $\lambda_o$  ditentukan dengan melihat pada tabel dengan argumen  $1-\beta = 0,8$ , tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  dan derajat kebebasan  $r = 26$ . Dengan menggunakan argumen tersebut diperoleh nilai  $\lambda_o = \lambda_{(\alpha, 1-\beta, r, \infty)} = \lambda_{(0,05, 0,8, 26, \infty)} = 23,5$ .

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas jaring seperti yang diuraikan sebelumnya diperoleh konfigurasi jaring GPS dengan *baseline* yang sudah terpilih. Konfigurasi jaring tersebut diimplementasikan dengan memberikan simulasi pergeseran pada titik tertentu. Berbagai variasi pergeseran disimulasikan pada titik pantau yang memiliki kontribusi maksimal dan minimal. Selanjutnya uji pergeseran dilakukan dengan uji statistic. Nilai uji statistik dihitung dengan **Persamaan 9**.

$H_o: V_x = 0$

$H_a: V_x \neq 0$

$t = \frac{V_x^T Q_{Vx} + v_x}{r\sigma_o^2} \sim F_{r,\infty}$  ..... (9)

Dalam hal ini r adalah derajat kebebasan,  $\sigma_o^2$  adalah varian apriori,  $V_x$  adalah kecepatan pergeseran dan  $Q_{Vx}^+$  adalah *pseudoinvers* dari matriks kofaktor kecepatan yang bisa diperoleh dengan **Persamaan 4**. Jika  $t \geq F_{r,\infty}$  maka  $H_o$  ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya pergeseran jaring, paling tidak terdapat satu titik terdeteksi mengalami pergeseran secara signifikan.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

*Desain Optimasi Jaring Pemantauan Deformasi*

Untuk jaring makro, analisis sensitivitas dilakukan dengan membuat 4 skema seperti pada **Tabel 1**. Hasil perhitungan kontribusi setiap *baseline* yang ditunjukkan dengan nilai  $\lambda$  pada skema 1 dan skema 2 dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Sepuluh *baseline* dengan kontribusinya terhadap sensitivitas jaring (kecepatan pergeseran 5 mm).

<i>Baseline</i>		Skema 1		Skema 2	
		$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$	$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$
MAK2	MAK3	1,4975	1,4975	1,6038	1,6038
MAK2	MAK4	1,2271	2,7246	1,3172	2,9210
MAK1	MAK2	1,0531	3,7777	1,1292	4,0502
MAK2	MAK5	0,8298	4,6075	0,8906	4,9407
MAK1	MAK3	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407
MAK1	MAK4	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407
MAK1	MAK5	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407
MAK3	MAK4	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407
MAK3	MAK5	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407
MAK4	MAK5	0,0000	4,6075	0,0000	4,9407

Meskipun Maisyaroh (2019) mengatakan bahwa bobot berpengaruh terhadap sensitivitas jaring, namun berdasarkan **Tabel 2** dapat dilihat bahwa penggunaan korelasi 0,7 pada matriks bobot hanya meningkatkan sedikit nilai  $\Sigma\Delta\lambda$  dan tidak berpengaruh terhadap jumlah *baseline* yang dihasilkan. Dengan kata lain, korelasi pada matriks bobot tidak berpengaruh terhadap konfigurasi jaring yang dihasilkan pada jaring makro ini. Korelasi juga tidak berpengaruh terhadap sensitivitas jaring (Yulaikhah & Santosa, 2018). Kedua skema ini menggunakan kecepatan pergeseran sebesar 5 mm menghasilkan nilai  $\Sigma\Delta\lambda$  kurang dari 5. Nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan standar  $\lambda_o = 12,5$ . Dengan demikian dapat dikatakan bahwa jaring GPS makro dengan melibatkan semua (10) *baseline* tidak sensitif terhadap pergeseran 5 mm. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh ketelitian komponen *baseline* yang dalam skema ini berkisar 3 mm sampai 6 mm.

Pengaruh ketelitian komponen *baseline* terlihat lebih jelas pada desain jaring gabungan makro dan mikro yang dijelaskan berikutnya. Terlihat pula pada *baseline* kelima sampai kesepuluh memiliki nilai  $\Delta\lambda = 0$ . Hal ini sangat menarik, mengingat keenam *baseline* tersebut menghubungkan antar dua titik pantau dan tidak terikat langsung dengan titik referensi, dalam hal ini titik 2 diasumsikan sebagai titik referensi (Yulaikhah & Santosa, 2018). *Baseline* yang menghubungkan antara dua titik pantau tidak berkontribusi terhadap sensitivitas jaring disebabkan karena asumsi yang digunakan, yaitu pergeseran diasumsikan sama besar untuk semua titik sehingga seolah-olah titik-titik pantau bergerak dengan besar dan arah yang sama dalam satu blok. Informasi awal yang lebih detil, misalnya prediksi pergeseran tiap titik, sangat penting dan diperlukan untuk memberikan hasil analisis yang lebih realistis (Yulaikhah et al., 2019). **Tabel 3** menunjukkan hasil perhitungan nilai  $\Delta\lambda$  pada skema 3 dan 4, dimana kedua skema ini menggunakan nilai kecepatan pergeseran yang diasumsikan sebesar 10 mm.

**Tabel 3.** Sepuluh *baseline* dengan kontribusinya terhadap sensitivitas jaring (kecepatan pergeseran 10 mm).

		Skema 3		Skema 4	
<i>Baseline</i>		$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$	$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$
MAK2	MAK3	5,9898	5,9898	6,4152	6,4152
MAK2	MAK4	4,9086	10,8984	5,2687	11,6839
MAK1	MAK2	4,2123	15,1107	4,5167	16,2006
MAK2	MAK5	3,3192	18,4299	3,5623	19,7629
MAK1	MAK3	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629
MAK1	MAK4	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629
MAK1	MAK5	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629
MAK3	MAK4	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629
MAK3	MAK5	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629
MAK4	MAK5	0,0000	18,4299	0,0000	19,7629

Meskipun nilai  $\Delta\lambda$  yang dihasilkan berbeda dengan 2 skema sebelumnya, namun secara garis besar memiliki pola yang sama, yaitu 6 *baseline* yang tidak berkaitan langsung dengan titik referensi menghasilkan nilai  $\Delta\lambda = 0$ . Adapun nilai  $\Delta\lambda$  yang dihasilkan 4 *baseline* lainnya relatif lebih besar dibandingkan dengan hasil skema 1 dan 2. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa dari 3 *baseline* pertama menghasilkan nilai total  $\Sigma\Delta\lambda > 12,5$  sehingga dapat dikatakan jaring GPS dengan 3 *baseline* tersebut sudah cukup sensitif. Namun demikian mengingat jumlah titik pengamatan ada 4, maka dengan 3 *baseline* tersebut tidak dapat diperoleh solusi, oleh karena itu perlu digunakan minimal 4 *baseline*.

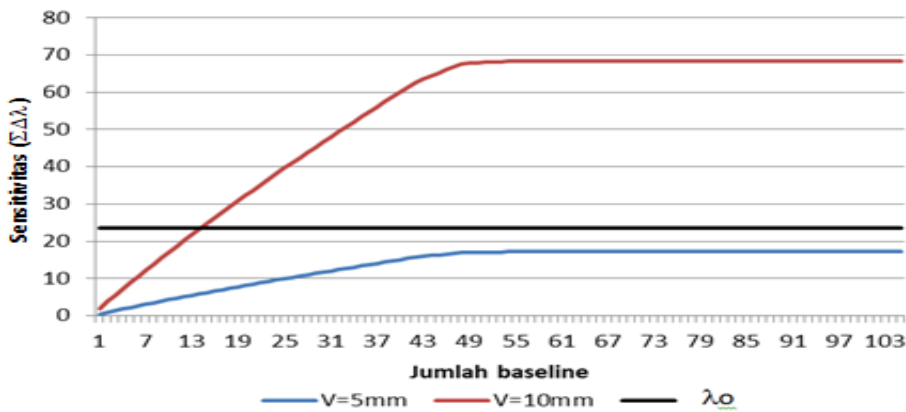
Keseluruhan jaring makro dan mikro yang meliputi 105 *baseline*. Hasil perhitungan kontribusi

masing-masing *baseline* tidak ditampilkan secara lengkap, namun 20 *baseline* pertama yang memiliki kontribusi terbesar disajikan pada **Tabel 4**. Mengingat pada desain jaring makro korelasi pada matriks bobot tidak berpengaruh terhadap hasil konfigurasi, maka pada desain gabungan mikro dan makro ini matriks bobot diasumsikan tidak berkorelasi. Dalam desain ini juga digunakan asumsi bahwa satu sisi blok bergerak relatif terhadap blok lainnya, sehingga titik-titik pantau di sebelah barat yaitu titik MI22, MI23, MI24, MI18, MAK1, dan MAK5 diasumsikan sebagai titik (blok) yang stabil.

**Tabel 4** menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pergeseran dari 5 mm menjadi 10 mm membuat nilai  $\Delta\lambda$  juga meningkat, namun demikian tidak merubah urutan *baseline*. *Baseline* paling besar kontribusinya yaitu *baseline* 5 (MAK1-BMS2), sedangkan yang paling kecil yaitu *baseline* 60 (MAK5-MI25), dan 102 (MI22-MI25). Meskipun titik yang berketelitian tinggi tidak selalu memiliki kontribusi yang besar terhadap sensitivitas jaring atau sebaliknya (Benzao & Shaorong, 1995), pada kenyataannya dalam jaring ini yaitu pada titik MI25 memiliki ketelitian paling rendah.

Sama halnya dengan jaring makro, pada jaring ini *baseline* yang menghubungkan dua titik referensi atau dua titik pantau memiliki nilai  $\Delta\lambda = 0$ , dengan kata lain tidak berkontribusi terhadap sensitivitas jaring. Dengan demikian untuk efisiensi dalam pelaksanaan pengamatan di lapangan, pengabaian *baseline* tersebut tidak mengurangi sensitivitas jaring. **Gambar 2** menunjukkan nilai akumulasi sensitivitas 105 *baseline* untuk kecepatan pergeseran 5 mm dan 10 mm. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa sensitivitas jaring meningkat berbanding lurus dengan peningkatan jumlah *baseline* yang digunakan. Sampai dengan *baseline* ke-54, tingkat sensitivitas jaring meningkat hingga mencapai  $\Sigma\Delta\lambda = 17,1$  dan  $\Sigma\Delta\lambda = 68,2$  untuk kecepatan pergeseran 5 mm dan 10 mm. Penambahan *baseline* ke-55 sampai 105 tidak menambah sensitivitas jaring.

Nilai batas  $\lambda_0$  ditentukan dengan melihat pada tabel dengan argumen  $1-\beta = 0,8$ , tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  dan derajat kebebasan  $r = 26$ . Dengan menggunakan argumen tersebut diperoleh nilai  $\lambda_0 = \lambda_{(\alpha, 1-\beta, r, \infty)} = \lambda_{(0,05, 0,8, 26, \infty)} = 23.5$ . Dengan tingkat sensitivitas  $\Sigma\Delta\lambda = 17,1$ , lebih kecil dibandingkan nilai  $\lambda_0$ , maka dapat dikatakan bahwa jaring ini belum cukup sensitif terhadap pergeseran sebesar 5 mm pada satu sisi blok meskipun semua *baseline* digunakan, namun untuk mendeteksi pergeseran 10 mm cukup digunakan 15 *baseline* terbesar kontribusinya. *Baseline* tersebut seperti pada **Tabel 4**.



Gambar 2. Sensitivitas jaring mikro dan makro.

Tabel 4. Dua puluh baseline pertama dengan kontribusi terbesar terhadap sensitivitas jaring.

Kecepatan Pergeseran 5 mm					Kecepatan Pergeseran 10 mm				
NO	Baseline	$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$	NO	Baseline	$\Delta\lambda$	$\Sigma\Delta\lambda$		
1	MAK1 BMS2	5	0,4764	0,4764	1	MAK1 BMS2	5	1.8963	1.8963
2	BMS2 MI24	68	0,4749	0,9513	2	BMS2 MI24	68	1.8901	3.7865
3	BMS2 MI18	62	0,4337	1,3850	3	BMS2 MI18	62	1.7264	5.5129
4	BMS2 MI23	67	0,4255	1,8105	4	BMS2 MI23	67	1.6938	7.2066
5	MAK1 MAK3	2	0,4182	2,2287	5	MAK1 MAK3	2	1.6645	8.8712
6	MAK3 MI24	38	0,4170	2,6457	6	MAK3 MI24	38	1.6597	10.5309
7	MAK1 MAK2	1	0,4117	3,0574	7	MAK1 MAK2	1	1.6386	12.1695
8	MAK2 MI24	26	0,4105	3,4679	8	MAK2 MI24	26	1.6340	13.8035
9	BMS2 MI22	66	0,4085	3,8763	9	BMS2 MI22	66	1.6258	15.4293
10	MAK1 MAK4	3	0,4016	4,2779	10	MAK1 MAK4	3	1.5984	17.0277
11	MAK4 MI24	49	0,4005	4,6784	11	MAK4 MI24	49	1.5940	18.6218
12	MAK5 BMS2	51	0,3899	5,0682	12	MAK5 BMS2	51	1.5519	20.1736
13	MAK1 MI21	10	0,3881	5,4564	13	MAK1 MI21	10	1.5449	21.7185
14	MI21 MI24	98	0,3871	5,8434	14	MI21 MI24	98	1.5408	23.2593
15	MAK3 MI18	32	0,3849	6,2284	15	MAK3 MI18	32	1.5321	24.7914
16	MAK2 MI18	20	0,3794	6,6078	16	MAK2 MI18	20	1.5101	26.3016
17	MAK3 MI23	37	0,3785	6,9862	17	MAK3 MI23	37	1.5064	27.8079
18	MAK2 MI23	25	0,3731	7,3593	18	MAK2 MI23	25	1.4851	29.2931
19	MAK4 MI18	43	0,3708	7,7301	19	MAK4 MI18	43	1.4760	30.7690
20	MAK1 MI17	6	0,3708	8,1009	20	MAK1 MI17	6	1.4758	32.2448

Uji Pergeseran Jaring Pemantauan Deformasi

Uji pergeseran diterapkan terhadap konfigurasi jaring hasil desain seperti dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Skema uji pergeseran seperti pada Tabel 5. Skema 1 menggunakan semua baseline pada jaring makro untuk mengetahui berapa pergeseran yang dapat terdeteksi. Meskipun berdasarkan hasil desain, jaring makro cukup sensitif mendeteksi pergeseran 10 mm hanya dengan menggunakan tiga baseline, dalam uji pergeseran digunakan empat baseline agar tercapai penyelesaian estimasi 4 titik. Demikian juga pada skema 4, meskipun desain jaring gabungan makro dan mikro dapat mendeteksi pergeseran 10 mm cukup dengan menggunakan 15 baseline, namun dari 15 baseline terpilih tidak ada baseline yang

menghubungkan ke titik MI17, MI19, MI20, MI21, dan MI25, oleh karena itu dalam uji pergeseran ditambahkan 5 baseline yang menghubungkan kelima titik tersebut.

Tabel 5. Skema uji pergeseran.

Skema	Desain Jaring	Jumlah Baseline
Skema 1	Makro	10
Skema 2	Makro	4
Skema 3	Makro dan mikro	105
Skema 4	Makro dan mikro	20

### Hasil Uji Pergeseran Jaring Makro

Uji pergeseran dilakukan dengan mensimulasikan berbagai nilai kecepatan pergeseran pada 1 titik atau lebih. Hasilnya menunjukkan bahwa jaring makro dengan konfigurasi 10 *baseline* memang tidak sensitif terhadap kecepatan pergeseran sebesar 5 mm pada titik manapun, bahkan di semua titik. Konfigurasi jaring ini baru mampu mendeteksi pergeseran sebesar 8 mm pada titik MAK3, atau 10 mm pada titik MAK5, atau 7 mm pada kedua titik MAK3 dan MAK5 sekaligus. Titik MAK3 memiliki *baseline* yang berkontribusi terbesar sedangkan titik MAK5 memiliki *baseline* dengan kontribusi terkecil. Terbukti bahwa *baseline* yang berkontribusi besar lebih sensitif dibandingkan dengan *baseline* berkontribusi kecil.

Jaring makro dengan konfigurasi 4 *baseline* yang diharapkan mampu mendeteksi pergeseran 10 mm ternyata baru mampu mendeteksi pergeseran 15 mm di titik MAK3, atau 19 mm di titik MAK5, atau 12 mm di kedua titik tersebut. Jumlah titik ikat yang hanya 1 dan konfigurasi jaring yang berbentuk radial dimungkinkan menjadi salah satu faktor penyebabnya, namun demikian jaring ini mampu mendeteksi pergeseran 8 mm yang disimulasikan ke semua titik pantau. Ringkasan hasil uji pergeseran pada jaring makro seperti pada **Tabel 6**.

**Tabel 6.** Hasil uji pergeseran pada jaring makro.

Letak Pergeseran	Pergeseran Minimum Terdeteksi (mm)	
	Konfigurasi 10 <i>Baseline</i>	Konfigurasi 4 <i>Baseline</i>
MAK3	8	15
MAK5	10	19
MAK3 dan MAK5	7	12
Semua titik makro	8	8

### Hasil Uji Pergeseran Jaring Makro Dan Mikro

Jaring ini terdiri atas 15 titik dan dapat membentuk maksimal 105 *baseline*. Simulasi pergeseran diberikan pada setiap titik pantau yang berada di sisi timur sesar. Ringkasan hasil uji pergeseran seperti terlihat pada **Tabel 7**. Jaring dengan konfigurasi 105 *baseline* tidak sensitif terhadap pergeseran 5 mm, dimanapun letaknya. Hal ini terbukti berdasarkan **Tabel 7**, dimana konfigurasi jaring ini mendeteksi pergeseran minimum 13 mm di titik BMS2 dan pergeseran lebih besar lagi di titik lainnya. Adapun konfigurasi jaring dengan 20 *baseline*, yang diharapkan mampu mendeteksi pergeseran 10 mm, pada kenyataannya hanya mampu mendeteksi minimum 12 mm pergeseran di semua titik kecuali MI25. Untuk dapat mendeteksi pergeseran 10 mm konfigurasi jaring 20 *baseline* perlu ditambahkan 6 *baseline* pada urutan berikutnya sehingga total 26 *baseline*. Dengan

demikian pada pengukuran di lapangan tidak perlu dilakukan secara simultan di semua titik. Pengukuran dapat didesain dalam beberapa sesi sehingga jumlah alat yang diperlukan dapat dikurangi dan biaya dapat direduksi.

**Tabel 7.** Hasil uji pergeseran pada jaring makro dan mikro.

Letak Pergeseran	Pergeseran Minimum Terdeteksi (mm)	
	Konfigurasi 105 <i>Baseline</i>	Konfigurasi 20 <i>Baseline</i>
BMS2	13	20
MAK2	14	35
MAK3	14	29
MAK4	14	35
MI17	14	52
MI19	18	66
MI20	14	52
MI21	14	30
MI25	33	206
Semua titik di blok timur (kecuali MI25)	8	12

Baik jaring dengan konfigurasi 105 maupun 20 *baseline* tidak cukup sensitif untuk mendeteksi pergeseran di titik MI25, pergeseran sebesar 33 bahkan 206 mm baru bisa terdeteksi. Hal ini dimungkinkan berkaitan dengan ketelitian titik, mengingat ketelitian titik MI25 paling rendah dibandingkan titik lainnya. Sementara bobot *baseline* diturunkan dari ketelitian koordinat titik menggunakan perambatan kesalahan. *Baseline* yang menghubungkan titik ini juga memiliki kontribusi kecil sehingga pengabaian *baseline* ini tidak begitu mempengaruhi hasil desain optimasi.

### KESIMPULAN

Jaring GPS yang terdiri atas 15 titik telah dibangun di sekitar Waduk Sermo. Jaring ini terdistribusi menyebar di sepanjang Sesar Sermo dan dibangun untuk keperluan pemantauan deformasi sesar tersebut. Survei pemantauan deformasi telah dilakukan melalui pengamatan GPS sebanyak 3 kala. Pengamatan dilakukan secara simultan pada 15 titik kontrol tersebut sehingga dibutuhkan alat GPS yang cukup banyak jumlahnya dan memakan biaya yang tidak sedikit. Dengan didesain yang lebih baik, diharapkan pada pengamatan kala berikutnya biaya dapat ditekan namun tetap diperoleh konfigurasi jaring yang sensitif terhadap pergeseran. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jaring makro dengan konfigurasi 10 *baseline* tidak cukup sensitif terhadap pergeseran 5 mm. Hal ini dibuktikan dari hasil uji pergeseran bahwa konfigurasi ini baru bisa mendeteksi pergeseran minimal 8 mm di titik MAK3 atau di semua titik makro. Demikian juga jaring makro dengan konfigurasi 4 *baseline* yang didesain untuk dapat mendeteksi 10 mm pergeseran terbukti dapat mendeteksi pergeseran 8 mm di semua titik.

Adapun jaring makro dan mikro dengan konfigurasi 105 *baseline* juga tidak cukup sensitif terhadap pergeseran 5 mm. Jaring dengan konfigurasi 20 *baseline* hanya mampu mendeteksi pergeseran 12 mm di titik blok timur. Untuk bisa mendeteksi pergeseran 10 mm perlu ditambahkan 6 *baseline* lagi. Dengan demikian pada pengukuran di lapangan tidak perlu dilakukan pengukuran secara simultan di semua titik. Pengukuran dapat didesain dalam beberapa sesi sehingga jumlah alat yang diperlukan dapat dikurangi dan biaya dapat direduksi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara dengan sumber pendanaan dari Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM. Terimakasih kepada Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM atas pendanaan, sarana, dan prasarana yang mendukung lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baarda, W. (1968). *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. Publications on Geodesy* (New Series, Vol. 2). Netherlands Geodetic Commission: Publ Geodesy.
- Benzao, T., & Shaorong, Z. (1995). Optimal Design of Monitoring Networks with Prior Deformation Information. *Survey Review*, 33(258), 231–246. <https://doi.org/10.1179/sre.1995.33.258.231>
- Departemen Pekerjaan Umum. (1996). *Laporan Kajian Pelaksanaan Pembangunan Waduk Sermo*. Yogyakarta.
- Even-Tzur, G. (2002). GPS Vector Configuration Design for Monitoring Deformation Networks. *Journal of Geodesy*, 76(8), 455–461. <https://doi.org/10.1007/s00190-002-0274-5>
- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment Computation Spatial Data Analysis* (Fifth). New Jersey: John Wiley & Son, Inc.
- Grafarend, E. W., & Sanso, F. (1985). *Optimization and Design of Geodetic Networks*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Halicioglu, K., & Ozener, H. (2008). Geodetic Network Design and Optimization on the Active Tuzla Fault (Izmir, Turkey) for Disaster Management. *Sensors*, 8(8), 4742–4757. <https://doi.org/10.3390/s8084742>
- Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design Concept and Applications*. Michigan: Ann Arbor Press. Inc.
- Maisyaroh, F. A. (2019). *Pengaruh Bobot terhadap Jaring Pemantauan Deformasi*. Skripsi. Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Marliyani, G. I., Arrowsmith, J. R., & Whipple, K. X. (2016). Characterization of Slow Slip Rate Faults in Humid Areas: Cimandiri Fault Zone, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(12), 2287–2308. <https://doi.org/10.1002/2016JF003846>
- Ogundare, J. O. (2016). *Precision Surveying the Principles and Geomatics Practice*. New Jersey: John Wiley & Son, Inc.
- Ulinuha, H., Lestari, D., Heliani, L. S., Widjajanti, N., Pratama, C., Parseno, & Nugroho, K. F. (2019). GPS Technology Implementation for Sangihe Islands ' Movement Monitoring in 2017-2019. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 2(2), 206–211. Retrieved from <https://jurnal.ugm.ac.id/jgise/article/view/51033>
- Waljiyanto, Nugroho, P., Yulaikhah, & Cahyono, B. K. (2016). *Mitigasi Bencana Bendungan Sermo melalui Pemantauan Sedimentasi dan Deformasi Menggunakan Teknologi Satelit GPS*. Laporan Penelitian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Widagdo, A. (2020). *Perkembangan Struktur Geologi pada Batuan Berumur Paleogen hingga Neogen di Pegunungan Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah*. Disertasi, Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Widagdo, A., Paramumijono, S., Harijoko, A., & Setiawan, A. (2016). Kajian Pendahuluan Kontrol Struktur Geologi terhadap Sebaran Batuan-batuan di Daerah Pegunungan Kulonprogo Yogyakarta. In *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke-9*. Yogyakarta.
- Widjajanti, N., Pratama, C., Parseno, Sunantyo, T. A., Heliani, L. S., Ma'ruf, B., ... Ummi, R. F. (2020). Present-day Crustal Deformation Revealed Active Tectonics in Yogyakarta , Indonesia Inferred from GPS Observations. *Geodesy and Geodynamics*, 11, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.02.001>
- Wu, J., Tang, C., & Chen, Y. Q. (2003). First-order Optimization for GPS Crustal Deformation Monitoring. In *Proceedings of the 7th South East Asian Surveying Congress, Hong Kong, China, 3-7 November* (pp. 1–11). Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/228757510\\_First-order\\_Optimization\\_for\\_GPS\\_Crustal\\_Deformation\\_Monitoring/citations](https://www.researchgate.net/publication/228757510_First-order_Optimization_for_GPS_Crustal_Deformation_Monitoring/citations)
- Yulaikhah, Pramumijoyo, S., & Widjajanti, N. (2019). The Effect of Baseline Component Correlation on the Design of GNSS Network Configuration for Sermo Reservoir Deformation Monitoring. *Indonesian Journal of Geography*, 51(2), 199–205.
- Yulaikhah, & Santosa, P. B. (2017). *Realisasi Pengukuran Jaring Pemantauan Deformasi Sesar Sermo Kala Kedua Menggunakan Teknologi GNSS*. penelitian, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Yulaikhah, & Santosa, P. B. (2018). Analisis Sensitifitas Jaring GPS untuk Keperluan Pemantauan Deformasi. In *Forum Ilmiah Tahunan Ikatan Surveyor Indonesia 2018* (pp. 258–262). Padang. Retrieved from <http://www.isi.or.id/papermakalah/>
- Yulaikhah, Waljiyanto, & Santosa, P. B. (2018). *Implementasi Desain Konfigurasi Jaring GPS pada Pemantauan Sesar Sermo*. Laporan Penelitian, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.