



GNSS Monitoring Network Optimization Case Study: Opak Fault Deformation, Yogyakarta

Nurrohmat Widjajanti¹, Sherly Shinta Emalia², Parseno¹

¹ Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM

² Alumni Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM

Article History:

Received 31 Aug 2018

Received in revised form 4 Sep 2018

Accepted 4 September 2018

Available online 25 September 2018

Keywords:

optimasi, akurasi, reliabiliti, jaring GNSS, Patahan Opak

Corresponding Author:

Nurrohmat Widjajanti

Email: nwidjajanti@ugm.ac.id

ABSTRACT. *Opak fault is a fault located in Opak River area, Bantul. The existence of the fault is one of the biggest causes of earthquake in Yogyakarta in 2006. The seismic potential caused by the active fault requires continuous geodynamic monitoring. The GNSS network (TGD, SGY, and OPK) have been developed since 2013 consists of 17 stations and in 2016 there was an additional number of four monitoring stations. Several high-precision monitoring stations distributed at the fault location are needed to monitor the fault movement. Optimal observation network is one of the factors to obtain high precision station coordinates. The GNSS network optimization has been carried out in the previous research partially on each network; namely the segment of TGD, SGY, and OPK. Therefore, this research conducts a thoroughly optimization for 17 monitoring stations either use old or new stations to obtain an optimal network based on the criteria of accuracy and reliability. The network is designed widely from simple to complex combination and to combination between network segments. The computation uses least squares adjustment with parameter method. The value of the cofactor matrix parameter of the adjustment is applied to analyze the network based on the function of the accuracy criteria, namely A-Optimality, D-Optimality, E-Optimality, S-Optimality, and I-Optimality. Meanwhile, the value of the residual cofactor matrix is used for network configuration analysis based on the reliability objective function, namely the individual redundancy, external and internal reliabilities criteria. The result showed that the design of TGD, SGY and OPK network segments are optimized based on the criteria of accuracy and reliability if they use a network design with a complex baseline. The criteria for accuracy and reliability in the design with a combination of segments such as TGD and SGY, TGD and OPK, as well as TGD, SGY, and OPK are not much different from the optimization results performed by each segment. Therefore, if the measurements are carried out with a limited receiver, it is better to use each of segment designs.*

© Author(s) 2018. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Patahan Opak adalah patahan yang terletak di kawasan Sungai Opak, Bantul. Keberadaan Patahan Opak merupakan salah satu penyebab terbesar terjadinya gempa bumi di Yogyakarta pada tahun 2006. Potensi kegempaan yang disebabkan oleh masih aktifnya Patahan Opak mengakibatkan perlu dilakukan pemantauan geodinamika secara kontinyu (Abidin, dkk., 2009).

Dalam kegiatan pemantauan diperlukan beberapa titik pantau yang tersebar pada lokasi patahan untuk melihat gerakan mikro dan sekitar patahan untuk melihat gerakan makro (Widjajanti, dkk., 2013). Pengadaan titik pantau telah dilakukan oleh

Laboratorium Geodesi Departemen Teknik Geodesi FT UGM sejak tahun 2013 yang terdiri atas 17 titik pantau, yaitu Teknik Geodesi (TGD), Segoroyoso (SGY), dan Opak (OPK). Pada tahun 2016 dilakukan penambahan titik pantau sejumlah empat sehingga menjadi 21 titik pantau (Widjajanti, dkk., 2016).

Penelitian terhadap optimasi titik pantau Patahan Opak telah dilakukan sebelumnya, yaitu optimasi jaring pemantauan Patahan Opak tiga dimensi segmen jaring TGD (Widjajanti dan Parseno, 2013), optimasi jaring pemantauan dua dimensi segmen jaring SGY (Atunggal dan Fahrurazi, 2013), dan optimasi jaring pemantauan Patahan Opak dua dimensi jaring OPK (Lestari dan Yulaikhah, 2013). Perbedaan ketiga penelitian tersebut adalah kriteria optimal, metode perhitungan serta jaring yang dianalisis.

Tujuan optimasi jaring pemantauan Patahan Opak tiga dimensi segmen jaring TGD untuk mengetahui bentuk jaring yang optimum untuk pemantauan geodinamik secara makro. Orientasi lapangan dilakukan untuk menentukan lokasi titik-titik pantau. Lokasi awal yang dipilih kemudian diukur dengan GPS *handheld*. Hasil orientasi lapangan dilakukan desain jaring di atas peta geologi. Jaring yang dibentuk meliputi empat jaring dari kombinasi titik TGD1, TGD2, TGD3, TGD4, TGD5, TGD6, dan TGD7. Konfigurasi jaring optimum ditinjau dari nilai kofaktor koordinat hasil hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter terhadap kriteria optimum dari segi akurasi dan dari segi kehandalan. Hasil penelitian menunjukkan geometri jaring yang optimum berdasarkan kriteria akurasi global dan lokal adalah desain jaring tiga, yang terdiri atas titik TGD1 (*fixed point*), TGD2, TGD3, TGD5, TGD6, dan TGD7 (Widjajanti dan Parseno, 2013). Geometri jaring yang optimum berdasarkan kriteria kehandalan belum dilakukan analisis pada penelitian tersebut.

Pada penelitian optimasi jaring pemantauan Patahan Opak berdasarkan persyaratan matriks kriteria, desain jaring juga dilakukan di atas peta geologi untuk melihat kondisi geologi di sekitar Patahan Opak. Orientasi lapangan dilakukan untuk menunjang penempatan titik pantau. Berdasarkan orientasi lapangan, jaring SGY dibentuk oleh enam buah titik yaitu SGY1, SGY2, SGY3, TGD2, SGY5, SGY6 dan jaring OPK dibentuk oleh enam buah titik yaitu TGD2, OPK4, OPK5, OPK6, OPK7, OPK8. Akuisisi data penelitian dilakukan dengan GPS *handheld*, sehingga data yang didapatkan dalam (ϕ , λ , h). Data yang didapat dari pengukuran GPS tipe navigasi kemudian dikonversi menjadi koordinat kartesian pada bidang datar dengan sistem proyeksi UTM (X, Y). Pada penelitian tersebut optimasi dilakukan dengan evaluasi persyaratan matriks kriteria metode Baarda pada jaring segmen SGY dan segmen OPK. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jaring SGY dan OPK telah memenuhi syarat matriks kriteria maksimum, dengan ketelitian estimasi posisi titik-titik pada jaring di bawah fraksi 1 mm, serta berdasarkan matriks varian kovarian parameter menunjukkan bentuk jaring SGY dan OPK memiliki kekuatan geometri yang bagus (Lestari dan Yulaikhah, 2013).

Pada tahun 2016 telah dilakukan pengembangan jaring GNSS dengan menambah sejumlah empat titik pantau. Penambahan titik baru dilakukan karena lokasi titik yang lama telah terjadi perubahan kondisi lapangan, sehingga tidak memungkinkan untuk dilakukan pengukuran GNSS. Pengadaan titik pantau di daerah sekitar Patahan Opak menuntut posisi dengan ketelitian yang tinggi untuk bisa digunakan sebagai studi geodinamika. Menurut Abidin, dkk., (2002), ketelitian posisi yang didapat dari pengukuran GPS secara umum bergantung pada empat faktor yaitu ketelitian data yang digunakan, geometri pengamatan, strategi pengamatan, dan strategi pengolahan data yang diterapkan. Geometri pengamatan merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan agar didapatkan

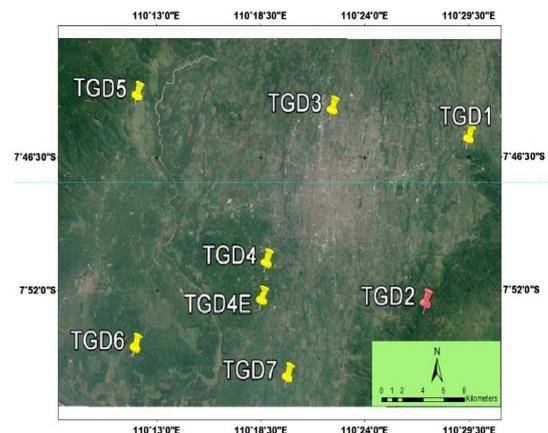
hasil dengan ketelitian koordinat yang tinggi untuk bisa digunakan sebagai studi geodinamika (Widjajanti, dkk., 2016). Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi jaring sebelum dilakukan pemasangan titik pantaunya. Optimasi jaring GNSS telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, namun optimasi hanya dilakukan secara parsial terhadap masing-masing jaring; yaitu segmen jaring TGD, segmen jaring SGY, dan segmen jaring OPK. Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi jaring GNSS secara menyeluruh untuk jaring GNSS dengan sejumlah 17 titik pantau pada saat menggunakan titik yang lama ataupun ketika menggunakan titik pantau tambahan yang baru. Tujuannya adalah memperoleh desain jaring GNSS pada titik pemantauan Patahan Opak yang optimal berdasarkan fungsi tujuan akurasi dan kehandalan.

2. Data dan Metodologi

Jaring merupakan sekumpulan titik-titik yang telah diketahui koordinatnya dan titik-titik yang ditentukan posisinya yang satu sama lain saling terhubung membentuk *baseline*, dan koordinatnya ditentukan dengan metode pengamatan tertentu dalam suatu referensi sistem koordinat tertentu (Anonim, 2002). Jaring GNSS pada dasarnya sekumpulan titik kontrol yang diukur dengan metode diferensial GNSS, sehingga titik-titik yang ditentukan posisinya satu sama lain saling terhubung membentuk *baseline*, dan koordinatnya ditentukan dengan metode pengolahan data GNSS tertentu (Even-Tzur, 2001).

2.1. Data dan Lokasi Penelitian

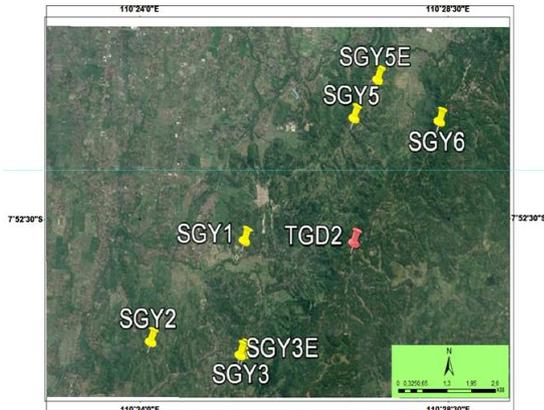
Pada penelitian ini digunakan data pengamatan citra satelit Google Earth daerah kawasan Patahan Opak, Daerah Istimewa Yogyakarta, daftar koordinat pendekatan dalam sistem koordinat geodetik (ϕ , λ , h) yang diperoleh dari penelitian Studi Geodinamik Patahan Opak untuk Keperluan Mitigasi Bencana tahun 2016. Lokasi penelitian dilakukan pada kawasan Patahan Opak, Daerah Istimewa Yogyakarta.



Gambar 2.1 Konfigurasi titik pantau segmen TGD

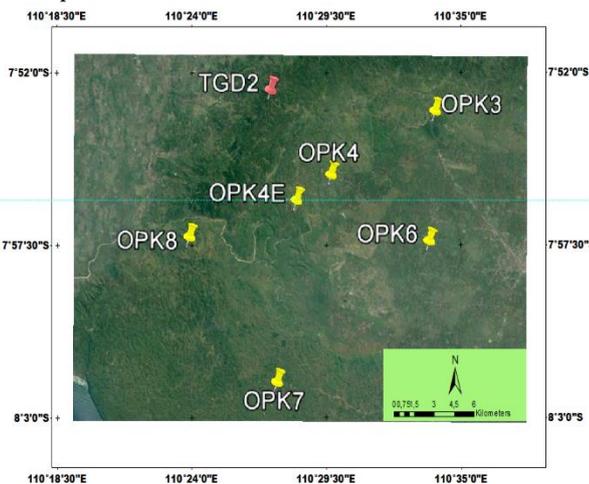
Berdasarkan Gambar 2.1, jarak *baseline* paling pendek terdapat antara titik TGD3 sampai TGD 4 dengan jarak sekitar 13 km, sedangkan jarak *baseline*

paling panjang terdapat pada titik pantau TGD1 sampai TGD6 dengan jarak sekitar 36 km. Segmen SGY tersusun atas enam buah titik yaitu SGY1, SGY2, SGY3, SGY5, SGY6, dan TGD2. Konfigurasi titik pantau segmen SGY dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Konfigurasi titik pantau segmen SGY

Berdasarkan Gambar 2.2, jarak *baseline* paling pendek terdapat antara titik SGY6 sampai SGY5 dengan jarak sekitar 2,3 km, sedangkan jarak *baseline* paling panjang terdapat pada titik pantau SGY6 sampai SGY2 dengan jarak sekitar 9,2 km. Segmen OPK dibentuk oleh enam buah titik yaitu OPK4, OPK5, OPK6, OPK7, OPK8, dan TGD2. Konfigurasi titik pantau segmen OPK dapat dilihat pada Gambar 2.3.



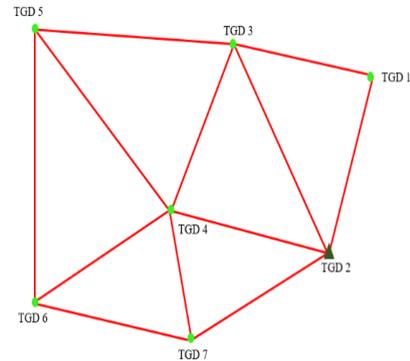
Gambar 2.3 Konfigurasi titik pantau segmen OPK

Berdasarkan Gambar 2.3, jarak *baseline* paling pendek terdapat antara titik TGD2 sampai OPK4 dengan jarak sekitar 6,4 km, sedangkan jarak *baseline* paling panjang terdapat pada titik pantau OPK3 sampai OPK7 dengan jarak sekitar 19 km.

2.2. Membuat Desain Jaringan GNSS

Desain jaringan GNSS dibentuk dengan cara menghubungkan antar titik pantau yang ada pada masing-masing segmen atau dengan segmen yang lain. Pada penelitian ini, karena optimasi dilakukan setelah pengukuran maka desain jaringan dibentuk berdasarkan *Day of Year* (DOY) skenario pengukuran. Setelah jaringan dibentuk berdasarkan DOY kemudian dari desain jaringan

tersebut dibentuk secara kombinasi dengan desain jaringan segmen lain, dimulai dari desain yang paling sederhana hingga desain jaringan yang paling kompleks. Desain jaringan paling sederhana dari segmen TGD disajikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Desain jaringan paling sederhana dari segmen TGD

2.3. Menghitung Komponen Vektor *Baseline*

Komponen vektor *baseline* dihitung dengan mengurangi nilai koordinat antar titik dalam sistem koordinat geosentris X, Y, Z. Nilai komponen vektor *baseline* digunakan sebagai nilai ukuran dalam perhitungan perataan kuadrat terkecil yaitu dalam perhitungan bobot ukuran. Setiap satu buah *baseline* menghasilkan tiga buah vektor *baseline* yaitu ΔX , ΔY , dan ΔZ . Oleh karena itu, banyaknya komponen vektor tiap desain adalah tiga kali dari jumlah *baseline* yang dimiliki oleh sebuah desain jaringan.

2.4. Menghitung Nilai Tujuan Akurasi

Akurasi adalah kedekatan nilai hasil ukuran dengan nilai sebenarnya, sehingga suatu pengukuran dikatakan akurat apabila rata-rata dari kesalahannya setelah dihitung dengan metode hitung kuadrat terkecil nilainya mendekati nol atau sama dengan nol (Wolf dan Charles, 1997).

Tabel 2.1 Kriteria akurasi optimasi jaringan GNSS (Yalcinkaya dan Teke, 2012)

		Fungsi tujuan akurasi
Lokal	Kesalahan titik Helmert	$Z = m_{p1} = \sqrt{m_{x1}^2 + m_{y1}^2 + m_{z1}^2}$
	Kesalahan titik Werkmeister	$Z = w_{p1} = m_x, m_y, m_z$
	Kesalahan titik Helmert, elips kesalahan	$Z = A_H = m_0 \sqrt{\lambda_1}; B_H = m_0 \sqrt{\lambda_2}; C_H = m_0 \sqrt{\lambda_3}$
Global	Kesalahan koordinat rata-rata	$Z = m_x, m_y, m_z = m_0 \sqrt{\text{tr}(Q_{xx})} / 3p$
	Fungsi tujuan untuk kriteria A-Optimality	$Z = \text{tr}(Q_{xx}) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{3p} = \sum \lambda_i$
	Fungsi tujuan untuk kriteria D-Optimality	$Z = \det(Q_{xx}) = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_{3p} = \prod \lambda_i$
	Fungsi tujuan untuk kriteria E-Optimality	$Z = \lambda_{\max}$

Fungsi tujuan untuk kriteria <i>S-Optimality</i>	$Z = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$
Fungsi tujuan untuk kriteria <i>I-Optimality</i>	$Z = 1 - \lambda_{\min} / \lambda_{\max}$

Dalam hal ini,

- λ_{\max} : *eigenvalue* maksimum setiap desain jaring titik kontrol
- λ_{\min} : *eigenvalue* minimum setiap desain jaring titik kontrol
- m_x, m_y, m_z : simpangan baku koordinat yang dicari
- λ_i : *eigenvalue* dari matriks kofaktor

Analisis optimasi fungsi skalar dari kriteria optimasi akurasi jaring yang digunakan yaitu *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality* dari *eigenvalue* masing-masing proses. Fungsi tujuan akurasi dihitung dari *eigenvalue* yang didapatkan dari matriks kofaktor parameter (Q_{xx}) hasil hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter.

2.5. Menghitung Nilai Tujuan Kehandalan

Kehandalan suatu jaring ditentukan oleh geometri jaring dari konfigurasi matriks dan bobot matriks pengamatan yang bukan pengamatan sebenarnya. Pada tahap desain jaring harus mempertimbangkan permasalahan kehandalan, agar kesalahan kasar pada jaring dibuat seminimal mungkin dan untuk meminimalkan efek dari ketidaktepatan dalam mengestimasi parameter.

Kehandalan jaring ada dua jenis, yaitu kehandalan dalam dan kehandalan luar (Kuang, 1996). Kehandalan dalam dari jaring kontrol menunjukkan kemampuan jaring untuk mendeteksi kesalahan kecil pada jaring yang tak terdeteksi di dalam pengukuran. Kehandalan luar menunjukkan efek dari sebuah kesalahan besar yang tak terdeteksi pada estimasi parameter. Kehandalan dari suatu jaring dianggap tinggi ketika jaring dapat mengidentifikasi kesalahan kasar yang kecil. Kesalahan kasar pada pengukuran berdampak pada parameter perataan, oleh karena itu kehandalan dari jaring berguna sebagai kriteria desain.

Nilai tujuan kehandalan dihitung dari matriks kofaktor residu (Q_{vv}). Nilai Q_{vv} hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter (Mikhail dan Gordon, 1981). Sebelum perhitungan mencari nilai kehandalan dalam dan kehandalan luar, terlebih dahulu harus mencari nilai redudansi individu setiap data ukuran. Nilai redudansi individu didapatkan dari perkalian antara matriks kofaktor residu (Q_{vv}) dengan matriks bobot pengamatan (P). Setelah nilai redudansi individu setiap data ukuran diketahui, kemudian dilakukan perhitungan mencari nilai kehandalan dalam dan kehandalan luar.

2.6. Analisis Optimasi Jaring GNSS

Analisis akurasi jaring dilakukan dengan cara membandingkan nilai kriteria akurasi dari semua jaring

yang telah dibuat. Jaring dengan nilai kriteria akurasi *A-Optimality* minimum menunjukkan jaring paling homogen, yang berarti jaring tersebut memiliki panjang *baseline* yang cenderung sama. Jaring dengan nilai *E-Optimality* minimum menunjukkan jaring tersebut isotropik, yang berarti jaring tersebut memiliki sifat fisik yang sama ke segala arah.

Analisis optimasi jaring ditinjau dari fungsi tujuan kehandalan dilakukan dengan cara membandingkan nilai redudansi individu, kehandalan dalam, dan kehandalan luar suatu desain jaring dengan desain jaring yang lain. Nilai redudansi individu, nilai kehandalan dalam dan nilai kehandalan luar diterima jika tidak melebihi nilai kritis yang telah ditentukan, yaitu nilai redudansi individu lebih kecil 0,5 atau 0,3 dan nilai kehandalan dalam dan kehandalan luar lebih kecil 6 atau 8 (Yalçinkaya, M. dan Teke, K., 2012).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Koordinat dalam Sistem Koordinat Geosentris

Koordinat pendekatan dalam penelitian ini adalah daftar koordinat penelitian sebelumnya, yaitu koordinat titik pantau dalam sistem koordinat geodetik dengan datum WGS 1984. Dalam proses hitungan, koordinat yang digunakan adalah dalam sistem korodinat geosentris (X, Y, Z) sesuai dengan sistem koordinat yang digunakan GNSS.

Tabel 3.1 Nilai koordinat hasil transformasi

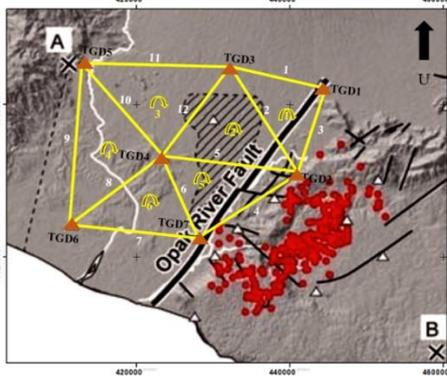
Titik	Sistem Koordinat Geosentris		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
TGD1	-2212362,106	5920381,060	-856466,349
TGD2	-2207853,523	5920392,845	-868872,707
TGD3	-2199936,235	5925208,066	-854352,318
TGD4	-2193463,174	5925904,542	-865823,707
TGD4E	-2192883,436	5925661,979	-868648,707
TGD5	-2182148,022	5931880,819	-853248,757
TGD6	-2181208,992	5929505,629	-872186,168
TGD7	-2194949,122	5924007,397	-874363,870
OPK3	-2217765,098	5916200,538	-870019,191
OPK4	-2211273,257	5918167,267	-873774,020
OPK4E	-2209085,724	5918788,260	-875268,366
OPK6	-2217088,268	5915442,044	-877610,724
OPK7	-2207432,568	5917879,393	-885829,729
OPK8	-2202447,855	5920973,700	-877433,133
SGY1	-2204965,096	5921151,187	-868800,435
SGY2	-2202512,353	5921788,473	-870988,429
SGY3	-2204865,857	5920884,694	-871242,234
SGY3E	-2204774,360	5920902,311	-871271,110
SGY5	-2207944,074	5920635,660	-866148,229
SGY5	-2208557,798	5920440,190	-865284,191
SGY6	-2210161,615	5919918,638	-866224,532

Berdasarkan Tabel 3.1, hasil transformasi didapatkan nilai ordinat (X) pada sistem koordinat geosentris bernilai negatif. Hal tersebut dikarenakan titik bernilai lebih dari 900 dan berada di sebelah timur dari meridian sentral. Nilai absis (Y) pada sistem koordinat geosentris bernilai positif, dan nilai tinggi (Z) pada sistem koordinat geosentris bernilai negatif karena titik berada di selatan akuator.

3.2. Hasil Desain Jaringan GNSS

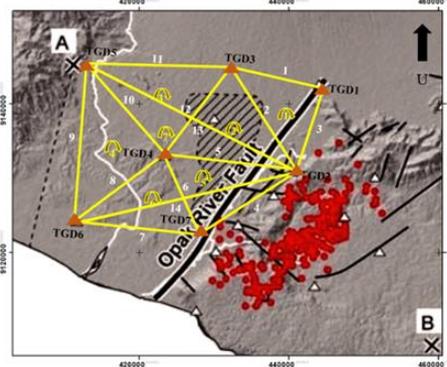
Desain jaring yang dibentuk sebanyak 36 jaring, yaitu 18 jaring dengan titik lama dan 18 jaring dengan titik baru. Desain jaring yang telah dibentuk dibedakan berdasarkan jumlah *baseline*. Seperti diketahui jika pengukuran GNSS dilakukan secara bersamaan di semua titik, pada setiap titik dapat terbentuk *baseline* sehingga semua dapat terhubung dengan *baseline* satu sama lain. Oleh karena itu, pada penelitian ini dikaji apabila alat yang digunakan terbatas, yaitu sebanyak tiga *receiver* sehingga jumlah *baseline* yang dibentuk dapat mempengaruhi banyaknya sesi pengukuran.

Desain jaring yang dibentuk sebanyak 36 jaring, yaitu 18 jaring dengan titik lama dan 18 jaring dengan titik baru. Desain jaring yang telah dibentuk dibedakan berdasarkan jumlah *baseline*. Seperti diketahui jika pengukuran GNSS dilakukan secara bersamaan di semua titik, pada setiap titik dapat terbentuk *baseline* sehingga semua dapat terhubung dengan *baseline* satu sama lain. Oleh karena itu, pada penelitian ini dikaji apabila alat yang digunakan terbatas, yaitu sebanyak tiga *receiver* sehingga jumlah *baseline* yang dibentuk dapat mempengaruhi banyaknya sesi pengukuran.



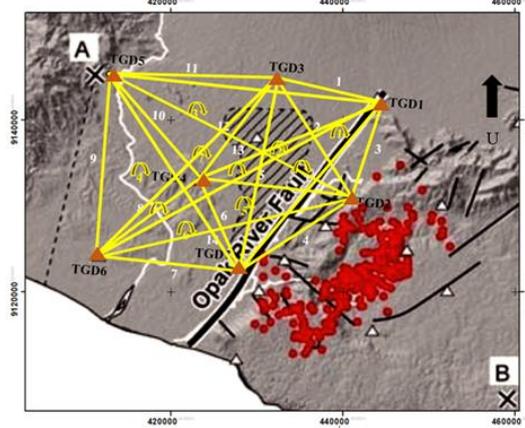
Gambar 3.1 Desain jaring TGD_1 (modifikasi Walter, dkk., 2008)

Berdasarkan Gambar 3.1. desain jaring TGD_1 merupakan desain jaring paling sederhana. Desain jaring TGD_1 mempunyai 12 *baseline*, sehingga mempunyai 36 vektor *baseline*. Jika dilakukan pengukuran GNSS dengan tiga *receiver* jaring ini membutuhkan enam sesi pengukuran.



Gambar 3.2 Desain jaring TGD_2 (modifikasi Walter, dkk., 2008)

Berdasarkan Gambar 3.2 desain jaring TGD_2 merupakan desain jaring pengembangan dari desain TGD_1. Jaringan TGD_2 mempunyai *baseline* lebih banyak yaitu sebanyak 14 *baseline* sehingga komponen yang terbentuk pada desain jaring ini sebanyak 42 vektor *baseline*. Penambahan *baseline* dilakukan antara titik TGD2 dengan TGD5 dan TGD2 dengan TGD6, sehingga semua titik terhubung dengan titik ikat yaitu TGD2. Jika dilakukan pengukuran GNSS dengan tiga *receiver* maka jaring ini membutuhkan tujuh sesi pengukuran.

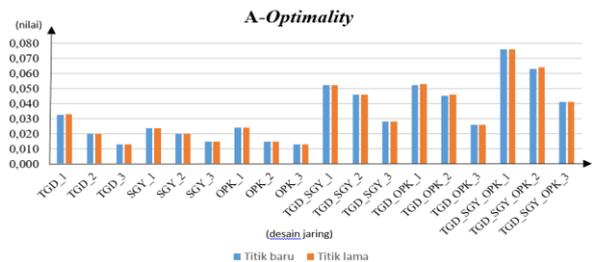


Gambar 3.3 Desain jaring TGD_3 (modifikasi Walter, dkk., 2008)

Berdasarkan Gambar 3.3 desain jaring TGD_3 merupakan desain jaring segmen TGD dengan jumlah *baseline* yang paling kompleks. Jaringan TGD_3 mempunyai 21 *baseline*, sehingga komponen vektor yang terbentuk sebanyak 63 vektor *baseline*. Tujuh buah *baseline* baru ditambahkan pada desain jaring ini. Penambahan *baseline* baru dilakukan antara titik TGD1 dengan TGD5, TGD1 dengan TGD4, TGD1 dengan TGD7, TGD5 dengan TGD7, TGD6 dengan TGD3, TGD3 dengan TGD7, TGD6 dengan TGD1. Jika dilakukan pengukuran GNSS dengan tiga *receiver*, jaring TGD_3 membutuhkan sebanyak 10 sesi pengukuran.

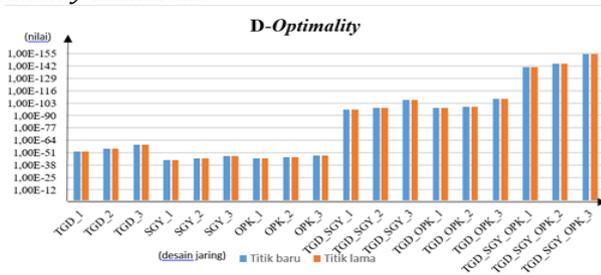
3.3. Optimasi Jaringan Berdasarkan Fungsi Tujuan Akurasi

Optimasi menggunakan fungsi tujuan akurasi, nilai yang paling merepresentasikan jaring tersebut optimum adalah nilai *A-Optimality* dan *D-Optimality*. Hal ini disebabkan karena perhitungan nilai *A-Optimality* yaitu *trace* matriks kofaktor parameter dan nilai *D-Optimality* yaitu determinan matriks kofaktor parameter melibatkan semua nilai *eigenvalue* dalam suatu matriks, sehingga hasil yang didapat merepresentasikan ketelitian jaringan keseluruhan.



Gambar 3.4 Grafik nilai *A-Optimality* semua jaring

Berdasarkan Gambar 3.4, jaring dengan titik lama (berwarna oranye) memiliki nilai *A-Optimality* sama dengan ketika menggunakan titik baru (berwarna biru). *A-Optimality* konsisten menurun dari jaring yang pertama hingga jaring yang ketiga pada setiap segmennya. Jaring dengan *baseline* yang kompleks memiliki nilai *A-Optimality* minimum, oleh karena itu jaring dengan *baseline* yang kompleks memiliki panjang *baseline* yang relatif sama karena mempunyai nilai *A-Optimality* minimum.



Gambar 3.5 Grafik nilai *D-Optimality* semua jarring

Berdasarkan Gambar 3.5 sebagian besar jaring dengan titik lama memiliki nilai *D-Optimality* sama dengan ketika menggunakan titik baru, dan beberapa desain memiliki nilai yang berbeda namun dengan selisih yang tidak besar. Nilai *D-Optimality* konsisten minimum pada desain jaring dengan *baseline* yang kompleks yaitu yang memiliki *baseline* paling banyak diantara desain jaring yang lain.

Berdasarkan pembahasan tersebut diperoleh hasil bahwa:

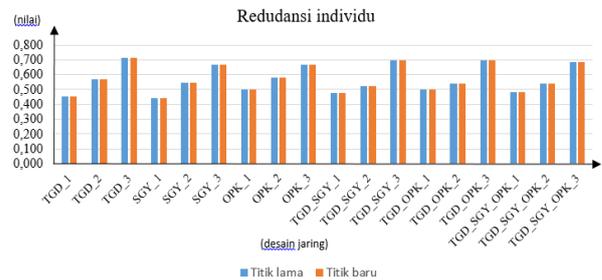
1. Bentuk segitiga jaring dalam suatu desain jaring GNSS tidak mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan akurasi. Hal ini ditunjukkan dengan jaring ketiga memiliki nilai *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, dan *S-Optimality* minimum, meskipun jaring tersusun atas segitiga dengan banyak sudut lancip.
2. Jumlah titik dalam suatu jaring GNSS mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan akurasi yaitu pada nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality*. Hal ini dibuktikan dengan nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* pada segmen parsial minimum pada desain jaring kedua dan ketiga, sedangkan pada segmen kombinasi dengan jumlah titik lebih banyak nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* minimum pada desain jaring ketiga.
3. Panjang *baseline* dalam suatu desain jaring GNSS tidak mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan akurasi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality* dan *S-Optimality* semakin menurun dari desain pertama hingga desain ketiga, meskipun jaring ketiga tersusun atas segitiga dengan panjang *baseline* yang bervariasi.
4. Jumlah *baseline* dalam suatu jaring GNSS mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan akurasi. Nilai *A-Optimality* dan *D-Optimality* minimum pada desain ketiga untuk semua segmen jaring. Nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* minimum pada desain

kedua dan ketiga untuk segmen parsial, sedangkan pada segmen kombinasi nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* minimum pada desain jaring ketiga. Semua segmen memiliki nilai *I-Optimality* minimum pada desain jaring pertama. Desain jaring pertama adalah desain jaring dengan jumlah *baseline* yang sederhana dan desain jaring ketiga adalah desain jaring dengan jumlah *baseline* yang kompleks.

5. Nilai minimum *A-Optimality*, *D-Optimality*, dan *I-Optimality* diperoleh pada jaring yang sama meskipun menggunakan titik lama dan titik baru, yaitu *A-Optimality* dan *D-Optimality* pada jaring ketiga, dan *I-Optimality* pada jaring pertama. Sedangkan *E-Optimality* dan *S-Optimality* diperoleh pada jaring yang berbeda, pada segmen parsial nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* minimum pada jaring kedua dan ketiga, dan pada segmen kombinasi nilai *E-Optimality* dan *S-Optimality* minimum pada desain jaring ketiga.

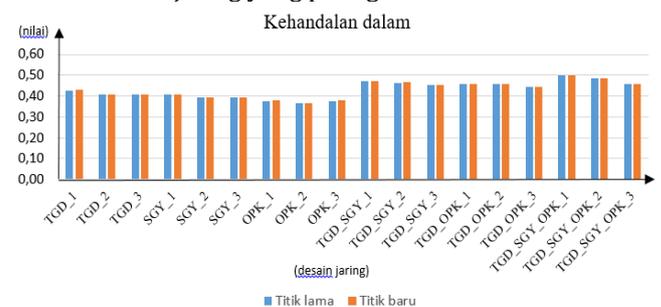
3.4. Optimasi Jaring Berdasarkan Fungsi Tujuan Kehandalan

Berdasarkan Gambar 3.6, dapat dilihat jika nilai rata-rata redudansi individu jaring dengan titik lama memiliki nilai yang sama seperti ketika menggunakan titik yang baru. Nilai rata-rata redudansi individu minimum konsisten pada jaring pertama tiap segmennya, yaitu desain jaring dengan *baseline* yang sederhana.

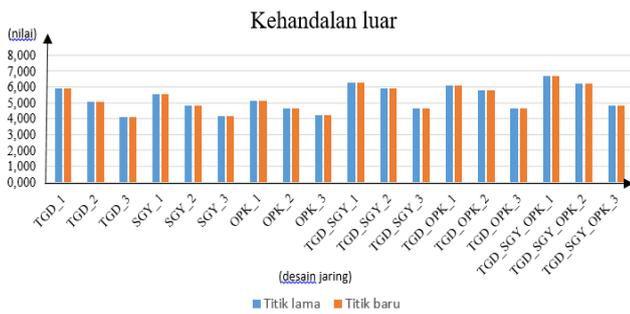


Gambar 3.6 Nilai rata-rata redudandi individu semua jaring

Berdasarkan Gambar 3.7, dapat dilihat jika nilai rata-rata kehandalan dalam jaring dengan titik lama memiliki nilai yang sama seperti ketika menggunakan titik yang baru. Nilai rata-rata kehandalan dalam semua desain minimum pada desain jaring dengan jumlah *baseline* yang kompleks. Hal ini menunjukkan jika desain jaring dengan jumlah *baseline* paling kompleks adalah desain jaring yang paling handal.



Gambar 3.7 Nilai rata-rata kehandalan dalam semua jarring



Gambar 3.8 Nilai rata-rata kehandalan luar semua jaring

Berdasarkan Gambar 3.8, dapat dilihat jika nilai rata-rata kehandalan luar jaring dengan titik lama memiliki nilai sama besar dengan ketika menggunakan titik yang baru. Nilai rata-rata kehandalan luar minimum konsisten pada jaring ketiga tiap segmennya, yaitu pada segmen minimum pada desain dengan *baseline* yang kompleks. Hal ini menunjukkan bahwa jaring dengan *baseline* yang kompleks mempunyai pengaruh kesalahan tidak acak yang tidak terdeteksi lebih kecil. Berdasarkan pembahasan tersebut diperoleh hasil bahwa:

1. Bentuk segitiga jaring dalam suatu desain jaring GNSS tidak mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan kehandalan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai redundansi individu maksimum, dan nilai kehandalan luar minimum pada desain jaring ketiga yaitu jaring yang tersusun atas segitiga dengan banyak sudut lancip.
2. Jumlah titik dalam suatu jaring GNSS tidak mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan kehandalan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai redundansi individu maksimum, kehandalan dalam minimum, dan kehandalan luar minimum diperoleh pada jaring yang sama ketika menggunakan segmen parsial maupun segmen kombinasi.
3. Panjang *baseline* dalam suatu desain jaring GNSS tidak mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan kehandalan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai redundansi individu maksimum dan nilai kehandalan luar minimum pada desain jaring ketiga, meskipun jaring ketiga tersusun atas segitiga dengan panjang *baseline* yang bervariasi.
4. Jumlah *baseline* dalam suatu jaring GNSS mempengaruhi nilai optimasi fungsi tujuan kehandalan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai redundansi individu maksimum, nilai kehandalan luar dan nilai kehandalan dalam minimum pada desain jaring ketiga, yaitu jaring dengan jumlah *baseline* yang kompleks. Namun, pada segmen OPK nilai kehandalan dalam minimum pada desain jaring kedua, yaitu desain jaring yang semua titiknya terhubung dengan titik ikat.
5. Penggunaan titik pantau baru tidak mempengaruhi kehandalan suatu jaring, hal itu disebabkan karena lokasi titik pantau baru tidak jauh dengan lokasi titik pantau lama.

6. Nilai redundansi maksimum dan nilai kehandalan luar minimum pada desain ketiga untuk segmen parsial dan segmen kombinasi. Desain jaring ketiga adalah desain jaring dengan jumlah *baseline* yang kompleks. Sedangkan pada segmen OPK nilai kehandalan dalam minimum pada desain jaring kedua, yaitu desain jaring yang semua titiknya terhubung dengan titik ikat.

3.5. Elips Kesalahan Absolut

Berdasarkan perhitungan elips kesalahan absolut diperoleh hasil bahwa:

1. Jumlah titik dalam suatu jaring GNSS mempengaruhi ukuran elips kesalahan absolut suatu titik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai setengah sumbu panjang dan setengah sumbu pendek. Elips kesalahan pada segmen kombinasi memiliki nilai yang lebih minimum daripada nilai setengah sumbu panjang dan setengah sumbu pendek elips kesalahan pada segmen parsialnya. Namun perbedaan nilainya tidak begitu besar, tergantung dengan panjang jarak antar titik tiap segmen. Seperti pada segmen parsial TGD dengan segmen kombinasi TGD_SGY nilai perbedaan setengah sumbu panjang elips sekitar 0,1 mm.
2. Jumlah *baseline* jaring GNSS mempengaruhi bentuk dan ukuran elips kesalahan absolut setiap titik. Hal ini ditunjukkan dengan jaring yang mempunyai *baseline* sedikit memiliki bentuk dan ukuran elips kesalahan yang bervariasi besarnya, sedangkan jaring dengan jumlah *baseline* yang kompleks memiliki bentuk elips kesalahan yang seragam dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan elips kesalahan pada desain jaring dengan *baseline* yang sedikit.
3. Titik pantau yang jauh dari titik ikat dan tidak terhubung *baseline* dengan titik ikat memiliki nilai setengah sumbu panjang dan setengah sumbu pendek yang relatif lebih besar, dan titik yang dekat dengan titik ikat serta terhubung *baseline* memiliki nilai setengah sumbu panjang dan setengah sumbu pendek yang relatif lebih minimum.
4. Menghubungkan semua titik terhadap titik ikat dapat mempengaruhi bentuk dan ukuran elips kesalahan absolut setiap titik. Hal ini ditunjukkan dengan desain jaring yang semua titiknya terhubung dengan titik ikat memiliki bentuk dan ukuran elips kesalahan yang relatif lebih kecil.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain jaring GNSS yang paling optimal berdasarkan fungsi tujuan akurasi adalah desain jaring yang memiliki *baseline* kompleks karena memiliki nilai fungsi tujuan akurasi minimum, yaitu :
2. Desain jaring GNSS yang paling optimal berdasarkan fungsi tujuan kehandalan, yaitu:

- a. Segmen TGD adalah desain jaring TGD_3, dengan nilai redudansi individu = 0,71; kehandalan dalam = 0,71; dan kehandalan luar = 4,08.
 - b. Segmen SGY adalah desain jaring SGY_3, dengan nilai redudansi individu = 0,67; kehandalan dalam = 0,39; dan kehandalan luar = 4,15.
 - c. Segmen OPK adalah desain jaring OPK_3, dengan nilai redudansi individu = 0,67; kehandalan dalam = 0,37; dan kehandalan luar = 4,2.
 - d. Kombinasi segmen TGD dan SGY adalah desain TGD_SGY_3, dengan nilai redudansi individu = 0,69; kehandalan dalam = 0,45; dan kehandalan luar = 4,62.
 - e. Kombinasi segmen TGD dan OPK adalah desain TGD_OPK_3, dengan nilai redudansi individu = 0,69; kehandalan dalam = 0,44; dan kehandalan luar = 4,62.
 - f. Kombinasi segmen TGD, SGY, dan OPK adalah desain TGD_SGY_OPK_3, dengan nilai redudansi individu = 0,69; kehandalan dalam = 0,46; dan kehandalan luar = 4,81.
3. Kombinasi antar segmen seperti TGD dan SGY, TGD dan OPK, dan TGD, SGY, OPK tidak membuat nilai kriteria akurasi dan kehandalan berbeda jauh dengan ketika optimasi dilakukan setiap segmen. Oleh karena itu, jika dilakukan pengukuran dengan jumlah alat yang terbatas, lebih baik menggunakan desain jaring masing-masing segmen karena lebih efisien biaya, namun tetap optimum meskipun tidak efisien tenaga.
4. Semua elips kesalahan desain jaring memiliki rotasi sebesar 0° dan kesalahan ke arah sumbu X dan Y yang berbeda nilainya, karena varian yang digunakan dalam pembobotan menggunakan vektor *baseline*.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

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

6. Referensi

Abidin, H.A., Andreas, H., Abdullah, C.I., Gamal, M., Gumilar, I., dan Meilano, I. (2009). Deformasi Koseismik dan Pascaseismik Gempa Yogyakarta 2006 dan Hasil Survei GPS. *Jurnal Geologi Indonesia* Vol. 4.

- Abidin, H.A., Jones, A., dan Kahar, J. (2002). *Survei dengan GPS*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Anonim. 2002. *Standar Nasional Indonesia-Jaring Kontrol Horizontal*. Badan Standardisasi Nasional.
- Atunggal, D. dan Fahrurazi D. (2013). Optimasi Jaring Kontrol Geodinamik dengan Menggunakan GPS di Kawasan Sesar Opak. Yogyakarta.
- Even-Tzur, G. (2001). GPS Vector Configuration Design for Monitoring Deformation Networks. *Journal of Geodesy*, 76(8), 455-461.
- Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications*. Ann Arbor Press Inc.
- Lestari, D. dan Yulaikhah. (2013). Optimasi Jaring Kontrol Horizontal Berdasarkan Persyaratan Matriks Kriteria untuk Studi Geodinamika di Patahan Opak. Yogyakarta.
- Mikhail, E.M. dan Gordon, G. (1981). *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Walter, T.R., Wang, R., Luehr, B.-G., Wassermann, J., Behr, Y., Parolai, S., Anggraini, A., Günther, E., Sobiesiak, M., Grosser, H., Wetzels, H.-U., Milkereit, C., Sri Brotospito, P.J.K., Harjadi, P., dan Zschau, J. (2008). The 26 May 2006 Magnitude 6.4 Yogyakarta Earthquake South of Mt. Merapi Volcano: Did Lahar Deposits Amplify Ground Shaking and Thus Lead to the Disaster.
- Widjajanti, N., Heliani, S.H., and Parseno. (2013). *Optimalisasi Laboratorium Geodesi Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik UGM dalam Penelitian Studi Geodinamik untuk Keperluan Mitigasi Bencana Multi Hazard di Yogyakarta*. Penelitian Unit Penyelenggara Riset UGM. Yogyakarta.
- Widjajanti, N. dan Parseno. (2013). *Strategi dalam Desain Jaring Kontrol GPS untuk Studi Geodinamik di Patahan Opak*. Yogyakarta.
- Widjajanti, N., Leni, S.H., Ruli, A., dan Parseno. (2016). *Studi Geodinamika Patahan Opak untuk Keperluan Mitigasi Bencana*. Yogyakarta.
- Wolf, P.R. dan Charles, D.G. (1997). *Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS*. New York: Wiley-Interscience.
- Yalçinkaya, M. dan Teke, K. (2012). *Strategy for Designing Geodetic GPS Networks with High Reliability and Accuracy*.