
ANALISIS DAN OPTIMASI DESAIN JARING PENGAMATAN DEFORMASI DI KOTA SURABAYA

Ira Mutiara Anjasmara¹, Yan Adrian Sidharta²

^{1,2}Departemen Teknik Geomatika, FTSLK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia
e-mail: ¹ira@geodesy.its.ac.id, ²adridharta@gmail.com

Abstrak

Berdasarkan Provinsi Jawa Timur Dalam Angka tahun 2017, jumlah penduduk di Kota Surabaya menduduki peringkat pertama di Provinsi Jawa Timur. Dengan jumlah penduduk yang besar, dibutuhkan pembangunan kota yang sesuai. Pembangunan ini akan memberikan beban secara fisik terhadap permukaan tanah sehingga menyebabkan deformasi. Adanya deformasi dapat diketahui dengan melakukan pengamatan selama dua atau lebih periode pada beberapa titik di wilayah tersebut. Perencanaan titik pengamatan deformasi harus dibuat sebaik mungkin agar parameter deformasi dapat dihitung secara akurat. Oleh karena itu, optimasi desain jaring pengamatan dibutuhkan. Kegiatan desain dan optimasi dapat diselesaikan melalui perhitungan matematis. Dengan dasar tersebut maka dalam penelitian ini, dilakukan optimasi desain jaring pengamatan deformasi di Kota Surabaya. Hal yang dioptimasi adalah presisi. Selain itu, faktor lain seperti reliabilitas dan biaya menjadi faktor yang harus dikontrol pada proses pembuatan jaring. Dari hasil optimasi jaring, didapatkan desain III sebagai desain yang optimal dibandingkan dengan desain lainnya. Desain III memiliki presisi maksimum pada titik BM16 sebesar 0.605 mm dan presisi maksimum pada titik BM02 sebesar 1.619 mm. Kekuatan geometri jaring desain III sebesar 0.145. Desain III mampu meminimalisir biaya sebesar 44% jika dibandingkan terhadap desain jaring dengan maksimum pengamatan.

Kata Kunci: Desain Jaring, Optimasi, Metode Analitis, Kualitas Jaring

Abstract

According to publication on East Java in numbers 2017 the population in Surabaya City was ranked first in East Java Province. With a large population, the development of Surabaya are required. This process will provide an increasing load that may cause deformation. Deformation can be examine by observing for two or more periods at some point in the area. The need of good plan for estimating deformation parameters can be fulfilled by determining a good network. Therefore, it is necessary to establish an observation network carefully. Design and optimization activities can be used through mathematical calculations. With these circumstances, this research aims to optimize design of deformation monitoring network in Surabaya. The optimization process includes precision of the network. In addition, the reliability and cost factor becomes a factor that must be done in the process of making networks. The result from optimization shown that the optimum network is illustrated with design III. This design has a maximum precision at point BM16 with 0.605 mm and minimum precision at point BM02 with 1.619 mm. The strength of figure of design III is 0.145. Compared with network that include maksimum observation, design III network can reduce the cost for about 44%.

Keywords: Network Design, Optimization, Analytical Methode, network quality

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir GPS telah digunakan sebagai perangkat utama dalam melakukan pengamatan untuk mendapatkan hasil dengan presisi yang tinggi. Untuk mendapatkan presisi yang tinggi dan dengan biaya yang minimum, desain jaring pengamatan GPS tersebut harus dioptimasi agar memenuhi kriteria kualitas yang telah ditentukan (Mehrabi dan Voosoghi 2014). Kriteria kualitas dapat disesuaikan menurut keinginan atau permintaan dari pihak pemberi pekerjaan. Ketentuan kriteria kualitas suatu jaring GPS juga diatur Badan Informasi Geospasial (BIG) dalam Standar Nasional Indonesia tahun 2002 mengenai jaring kontrol horizontal (SNI 2002). Menurut ketentuan tersebut, jaring GPS dikelompokkan kedalam orde-orde mulai dari 00 hingga 4. Pengelompokan tersebut dibagi berdasarkan fungsi, jarak antar titik, dan ketelitian titik minimal yang harus didapatkan pada pengamatan jaring yang telah didesain. Maka dari itu, optimasi desain jaring menjadi satu hal penting dalam pelaksanaan survei GPS.

Optimasi desain jaring geodetik adalah bagaimana mencari nilai presisi, reliabilitas, dan biaya yang optimal (Kuang 1996). Desain dan optimasi jaring dikategorikan kedalam empat kategori, yakni *zero order design* (ZOD), *first order design* (FOD), *second order design* (SOD), dan *third order design* (THOD) (Kuang 1996). Pada *zero order design* (ZOD), datum yang terbaik untuk digunakan pada jaring ditentukan. Dalam *first order design* (FOD), konfigurasi titik dari jaring yang akan digunakan dioptimasi dengan hasil posisi yang terbaik dari setiap titik. *Second order design* (SOD) mencari pengamatan terbaik berdasarkan nilai bobot sehingga tidak semua kemungkinan pengamatan dari semua titik dapat digunakan. *Third order design* (THOD) menambah jumlah pengamatan yang bertujuan untuk meningkatkan jaring yang sudah ada (Khameneh dkk. 2016).

Permasalahan dalam optimasi dapat diselesaikan dengan tiga metode, yakni *trial and error*, *analitis*, dan *intelligent methods* (Mehrabi dan Voosoghi 2014). Metode *trial and error* dan *analitis* merupakan metode konvensional sedangkan *intelligent methods* adalah hasil algoritma dari kedua metode sebelumnya dengan keuntungan dan kerugiannya masing-masing (Kuang 1991). *Trial and error* memberikan solusi

bagaimana kualitas desain yang direncanakan. Ketika kualitas ini tidak sesuai dengan kriteria maka desain tersebut ditolak dan solusi baru dibuat. langkah ini diulang hingga didapatkan desain yang sesuai. *Analitis* memberikan solusi melalui perhitungan matematis sehingga desain sesuai dengan kriteria (Kaplan dan Ayan 2004).

Dari sudut pandang praktis, dalam pengamatan GPS, titik datum dan titik lain yang akan diukur telah dimonumentasi dalam bentuk *benchmark* sehingga konsep optimasi *second order design* (SOD) digunakan untuk mendapatkan hasil pengamatan dengan presisi tinggi. Penggunaan metode *trial and error* dan *analitis* dapat digunakan dengan mudah melalui perangkat lunak perhitungan matematis sehingga memudahkan proses optimasi. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode optimasi sehingga dapat menghasilkan desain jaring yang optimal sesuai dengan kualitas yang diinginkan. Optimasi menurut *second order design* (SOD) dengan menggunakan metode *analitis* diterapkan pada titik-titik pengamatan yang sudah ditentukan.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kota Surabaya dengan rincian koordinat geografis sebagai berikut: $7^{\circ} 9' - 7^{\circ} 21' \text{ LS}$ dan $112^{\circ} 36' - 112^{\circ} 54' \text{ BT}$.



Gambar 1. Kota Surabaya (Google Earth 2018)

Data

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Data titik pengamatan deformasi di Kota Surabaya tahun 2018.
- Informasi deformasi yang terjadi di Kota Surabaya.

Pengolahan Data

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan utama yang harus dilakukan untuk melakukan optimasi desain jaring. Tahap yang pertama adalah pendefinisian titik hingga bentuk matriks yang digunakan. Langkah awal yang perlu dilakukan adalah menentukan titik-titik yang akan digunakan. Data awal yang diperoleh adalah data titik-titik pengamatan di Kota Surabaya dengan jumlah titik sebanyak 21. Data tersebut sudah memiliki nilai koordinat x, y, dan z dalam sistem referensi UTM 49 S.

Langkah berikutnya menentukan datum atau disebut *constraint* pada jaring yang akan dibuat. *Constraint* dibagi menjadi dua jenis umum, *minimum constraint* (terkendala minimum) dan *inner constraint* atau *free network adjustment* (terkendala bebas). *Constraint* yang akan dipakai pada jaring adalah *minimum constraint*, yakni menetapkan paling sedikit satu titik sebagai titik acuan terhadap titik lainnya dimana nilai koordinat titik ini tidak akan berubah bahkan setelah perhitungan (Al zubaidy dkk. 2012). Bentuk matriks *minimum constraint* (*D*) dan *inner constraint* (*H*) adalah (Kaplan dan Ayan 2004)

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3 \times m}^T \quad (1)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3 \times m}^T \quad (2)$$

kolom matriks *D* dan *H* menunjukkan jumlah titik yang digunakan (*m*) dan baris menunjukkan *constraint* yakni parameter datum translasi x, y, dan z. Pada matriks *D*, bernilai satu berarti origin (titik pusat/ titik nol) dari koordinat titik tersebut tidak mengalami translasi, sedangkan pada matriks *H* pada semua titik dianggap memiliki kesalahan (mengalami translasi), sehingga diberi nilai satu pada setiap komponen titik.

Langkah selanjutnya, menentukan persamaan pengamatan jaring GPS. Persamaan

yang digunakan adalah membuat persamaan *baseline* dengan seluruh kemungkinan *baseline* antar titik. Persamaan *baseline* yang merupakan fungsi nonlinier dilinierisasikan menjadi 3 vektor persamaan $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ mengacu pada Gauss-Markov Model II (Mehrabi dan Voosoghi 2014).

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{12} \\ \Delta y_{12} \\ \Delta z_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2 dan 1 menunjukkan titik pengamatan. Dari persamaan akan didapatkan matriks desain atau matriks *A* (Mehrabi dan Voosoghi 2014)

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Selanjutnya, membentuk matriks bobot pengamatan atau matriks *P*. Pada tahap perencanaan matriks *P* yang dibuat menyesuaikan dari ketelitian alat. Matriks *P* dapat dicari melalui persamaan berikut (Kuang 1991)

$$\sigma_s^2 = a^2 + b^2 \times S^2 \quad (5)$$

Nilai *S* adalah panjang dari baseline, *a* dan *b* adalah nilai ketelitian alat yang digunakan (contoh 5 mm + 0.5 ppm) (Lichten 1990). Pada tahap desain, bobot dari komponen $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ adalah sama.

$$P = \sigma_0^2 (\text{diag}(\sigma_s^2))^{-1} \quad (6)$$

σ_0^2 adalah faktor variansi apriori, pada tahap rencana nilainya adalah 1 sedangkan *diag* merupakan diagonal dari matriks. Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai presisi awal dari jaring tersebut. Nilai presisi dapat diketahui melalui matriks variansi-kovariansi (*C_x*). rumus presisi secara umum adalah (Kuang 1996)

$$C_x = \sigma_0^2 Q_x = \sigma_0^2 [(A^T P A + D^T D)^{-1} - H^T (H D^T D H^T)^{-1} H] \quad (7)$$

Jika persamaan datum telah dieliminasi pada persamaan pengamatan maka matriks variansi-kovariansi dapat dihitung dengan rumus (Kuang 1996):

$$C_x = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (8)$$

Perlu diketahui bahwa rumus presisi tersebut berbentuk nonlinear terhadap matriks *P*,

sehingga persamaan (8) perlu dilinierisasikan mengikuti deret Taylor menjadi (Kuang 1996)

$$C_x = C_x^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_x}{\partial P_i} \Delta P_i \quad (9)$$

keterangan:

$$C_x^0 = \sigma_0^2 [(A^T P A + D^T D)^{-1} - H^T (H D^T D H^T)^{-1} H]_{x^0, y^0, z^0, P^0}$$

$i = (1, \dots, \text{jumlah pengamatan})$

$P^0 = \text{bobot awal}$

$\Delta p_j = \text{besar perbaikan bobot yang dibutuhkan jaring untuk menjadi optimal (j : 1, \dots, m)}$

Langkah berikutnya adalah membuat matriks kriteria. Ukuran matriks kriteria sama dengan matriks presisi. Matriks kriteria berisi nilai ketelitian yang ingin dicapai pangkat dua (σ_c^2) atau nilai variansi tiap titik sehingga (Kuang 1991)

$$C_c = \text{diag}(\sigma_c^2) \quad (10)$$

Setelah semua matriks terdefinisi, dilanjutkan ke tahap kedua yakni proses optimasi. Proses optimasi yang dilakukan adalah optimasi presisi. Optimasi ini mengikuti *objective function* (OF) kriteria presisi yakni (Kuang 1991)

$$\|Gw - u\| = \min \quad (11)$$

dengan kondisi penyelesaian

$$w^T G^T G w - 2 u^T G w + u^T u = \min \quad (12)$$

mengacu pada syarat

$$G_1 w - u_1 \leq 0 \quad (13)$$

$$A_{00} w \leq b_{00} \quad (14)$$

keterangan:

$$G = [\text{vec} \left(\frac{\partial C_x}{\partial P_1} \right) \dots \text{vec} \left(\frac{\partial C_x}{\partial P_i} \right)] \quad (15)$$

$$u = \text{vec}(C_c) - \text{vec}(C_x^0) \quad (16)$$

$$w = (\Delta p_1 \dots \Delta p_i)^T \quad (17)$$

$$G_1 = (I_u \theta I_u)^T G \quad (18)$$

$$u_1 = (I_u \theta I_u)^T u \quad (19)$$

dimana “vec” menghasilkan vektor dengan menumpuk kolom matriks kuadrat satu dengan yang lainnya. Matriks I adalah matriks identitas dan θ menunjukkan *Khatri-Rao product*

(Khameneh 2015). Proses penyelesaian *Objective Function* di atas sangat krusial untuk memperoleh nilai perubahan koordinat dan bobot optimasi. Kondisi penyelesaian tersebut dapat diselesaikan menggunakan *quadratic programming* (Kuang 1996).

Setelah melalui kedua tahapan di atas, nilai bobot pengamatan akhir didapatkan melalui penambahan nilai perbaikan bobot dengan nilai bobot pengamatan awal. Nilai presisi dapat dihitung kembali dengan adanya nilai perbaikan bobot pengamatan. Tahap ketiga yakni menentukan *baseline* yang digunakan. *Baseline* yang dihilangkan dari rencana dapat dilihat dari nilai optimasi bobotnya, yang mana nilai optimasinya bernilai negatif (Mehrabi dan Voosoghi 2014). Penentuan *baseline* yang dihilangkan juga dapat melalui nilai bobot akhir setelah optimasi. Nilai bobot yang kecil atau nol dapat dihapus dari rencana pengamatan (Kuang 1991). Pemilihan *baseline* ini dimaksudkan untuk mengurangi biaya pengamatan dengan tetap memperhatikan kualitas presisi jaringnya. Perbaikan nilai bobot ditampilkan dalam bentuk tabel untuk dianalisa.

Desain jaring dengan semua kemungkinan *baseline* dan desain jaring hasil optimasi ditampilkan dalam bentuk gambar dan diberi *error ellipse* per titik yang dapat dihitung melalui matriks variansi-kovariansi yakni matriks C_x . Untuk mengetahui apakah jaring optimasi merupakan jaring yang optimal, maka selain kriteria presisi juga dihitung nilai kriteria reliabilitas dan biayanya. Kriteria reliabilitas berkaitan dengan nilai ukuran lebih atau *redundant* dari pengamatan untuk menghindari adanya kesalahan (Seemkoeei 2001). Desain jaring baru dengan *baseline* pilihan juga dibuat untuk digunakan sebagai pembandingan dengan jaring hasil optimasi. Desain jaring ini juga dihitung nilai presisi, reliabilitas, dan biayanya. Untuk menghitung nilai reliabilitas pada jaring dapat digunakan rumus berikut (Kuang 1996):

$$R = I - A(A^T P A)^{-1} A^T P \quad (20)$$

Nilai reliabilitas untuk setiap *baseline* didapatkan dari nilai pada diagonal matriks R . Untuk mengetahui kualitas *baseline* dari segi reliabilitas maka dapat mengacu pada nilai kritis reliabilitas berikut

Tabel 1. Nilai Kritis Reliabilitas Jaring (Kürec dan Konak 2014)

Redundant	Tingkat Kontrol
$0.00 \leq r_i \leq 0.01$	Tidak Terkontrol
$0.01 \leq r_i \leq 0.10$	Lemah
$0.10 \leq r_i \leq 0.30$	Cukup
$0.30 \leq r_i \leq 1.00$	Sangat Baik

Untuk melakukan perhitungan biaya desain jaring, Penelitian ini mengasumsikan bahwa jenis biaya yang harus dihitung adalah jumlah personel, alat, dan transportasi yang disesuaikan dengan lama pengamatan yang dibutuhkan. Karena pengamatan yang dilakukan tidak selalu dalam satu kali sesi, maka biaya juga dihitung mengacu pada jumlah sesi pengamatannya. Nominal dari jenis biaya ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis dan Nominal Biaya (INKINDO 2017)

No	Jenis Biaya	Nominal Biaya (Rp)	Keterangan
1	Surveyor	9,000,000	Per Bulan
2	Kendaraan Roda-4	14,000,000	Termasuk O&M saja, Per Bulan
3	Kendaraan Roda-2	1,750,000	Termasuk O&M, Per Bulan
4	GPS Dual Frequency	500,000	Per Hari, Satu set

Biaya yang ada pada Tabel 2 merupakan biaya pendekatan secara umum di wilayah Indonesia. Nominal tersebut dapat berubah-ubah sesuai dengan harga yang berlaku di wilayah pengamatan. Satuan dari nominal tersebut berbeda-beda. Nominal tersebut dapat dikonversi menjadi biaya harian dan jam melalui persamaan (INKINDO 2017):

$$SBOH = \left(\frac{SBOB}{22} \right) \times 1.1 \quad (21)$$

dimana SBOH adalah satuan biaya orang hari dan SBOB adalah satuan biaya orang bulan. Pada penelitian ini, pengamatan deformasi yang dilakukan untuk satu sesi adalah 12 jam. Untuk perhitungan biaya, jumlah sesi ini diubah kedalam satuan hari dan apabila nilainya tidak bulat maka akan dibulatkan ke atas (misal 6.7 dibulatkan menjadi 7). Selain itu, nilai *strength of figure* (SOF) dari ketiga jaring dihitung untuk dilihat perbandingannya. Rumus untuk menghitung SOF adalah

$$SOF = \frac{\text{trace}(A^T A)^{-1}}{\text{jumlah parameter}} \quad (22)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari optimasi adalah besar perubahan nilai bobot pada setiap *baseline*. Penentuan bobot awal berdasarkan ketelitian alat yang akan digunakan yakni 5 mm + 0.5 ppm. Nilai bobot *baseline* sebelum dan sesudah optimasi dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 3. Nilai Bobot Pengamatan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Pengamatan		P_{awal}	P_{baru}	Perbaikan Bobot
Dari	Ke			
1	2	0.008	0.046	0.039
1	3	0.009	0.046	0.037
1	4	0.018	0.053	0.035
1	5	0.028	0.062	0.035
1	6	0.010	0.047	0.037
1	7	0.014	0.049	0.035
1	8	0.037	0.071	0.034
1	9	0.029	0.064	0.035
1	10	0.017	0.053	0.036
1	11	0.020	0.056	0.036
1	12	0.032	0.067	0.035
1	13	0.027	0.061	0.035
1	14	0.020	0.054	0.035
1	15	0.028	0.063	0.035
1	16	0.028	0.062	0.035
1	17	0.013	0.049	0.036
1	18	0.013	0.048	0.036
1	19	0.025	0.060	0.035
1	20	0.040	0.075	0.035
1	21	0.040	0.075	0.035
2	3	0.019	0.018	-0.001
2	4	0.017	0.017	0.000
2	5	0.011	0.009	-0.002
2	6	0.032	0.037	0.005
2	7	0.014	0.012	-0.002
2	8	0.010	0.007	-0.003
2	9	0.007	0.003	-0.004
2	10	0.021	0.021	0.000
2	11	0.014	0.012	-0.001
2	12	0.008	0.005	-0.003
2	13	0.007	0.002	-0.004
2	14	0.009	0.005	-0.004
2	15	0.008	0.005	-0.003
2	16	0.010	0.007	-0.003
2	17	0.028	0.032	0.004
2	18	0.021	0.022	0.001

Pengamatan		P_{awal}	P_{baru}	Perbaikan Bobot	Pengamatan		P_{awal}	P_{baru}	Perbaikan Bobot
Dari	Ke				Dari	Ke			
2	19	0.015	0.014	-0.001	5	14	0.032	0.023	-0.009
2	20	0.008	0.004	-0.004	5	15	0.035	0.013	-0.022
2	21	0.008	0.004	-0.004	5	16	0.021	0.022	0.002
3	4	0.012	0.010	-0.002	5	17	0.019	0.020	0.000
3	5	0.017	0.017	0.000	5	18	0.024	0.021	-0.003
3	6	0.030	0.037	0.007	5	19	0.030	0.011	-0.019
3	7	0.032	0.038	0.007	5	20	0.028	0.022	-0.006
3	8	0.011	0.010	-0.002	5	21	0.028	0.021	-0.007
3	9	0.011	0.009	-0.002	6	7	0.022	0.026	0.003
3	10	0.023	0.025	0.002	6	8	0.012	0.011	-0.001
3	11	0.024	0.024	0.001	6	9	0.010	0.006	-0.003
3	12	0.008	0.003	-0.005	6	10	0.028	0.029	0.001
3	13	0.011	0.009	-0.003	6	11	0.021	0.022	0.001
3	14	0.018	0.019	0.001	6	12	0.009	0.006	-0.004
3	15	0.014	0.014	-0.001	6	13	0.009	0.006	-0.004
3	16	0.009	0.004	-0.004	6	14	0.013	0.013	-0.001
3	17	0.018	0.020	0.001	6	15	0.012	0.010	-0.001
3	18	0.035	0.041	0.007	6	16	0.011	0.008	-0.003
3	19	0.015	0.015	0.000	6	17	0.028	0.034	0.006
3	20	0.009	0.006	-0.003	6	18	0.033	0.039	0.006
3	21	0.009	0.006	-0.003	6	19	0.018	0.019	0.000
4	5	0.020	0.021	0.001	6	20	0.010	0.006	-0.003
4	6	0.017	0.019	0.001	6	21	0.010	0.007	-0.003
4	7	0.014	0.013	0.000	7	8	0.016	0.018	0.002
4	8	0.024	0.024	0.000	7	9	0.018	0.021	0.003
4	9	0.013	0.012	0.000	7	10	0.026	0.027	0.001
4	10	0.027	0.028	0.000	7	11	0.034	0.027	-0.007
4	11	0.019	0.021	0.002	7	12	0.011	0.008	-0.002
4	12	0.024	0.029	0.005	7	13	0.018	0.021	0.003
4	13	0.012	0.010	-0.001	7	14	0.030	0.034	0.004
4	14	0.012	0.012	-0.001	7	15	0.023	0.025	0.002
4	15	0.014	0.016	0.001	7	16	0.011	0.009	-0.002
4	16	0.029	0.035	0.006	7	17	0.018	0.019	0.002
4	17	0.032	0.038	0.006	7	18	0.033	0.037	0.004
4	18	0.018	0.020	0.002	7	19	0.019	0.021	0.002
4	19	0.034	0.028	-0.006	7	20	0.014	0.015	0.001
4	20	0.018	0.021	0.003	7	21	0.014	0.015	0.001
4	21	0.018	0.021	0.003	8	9	0.027	0.027	0.000
5	6	0.016	0.016	0.000	8	10	0.023	0.020	-0.003
5	7	0.026	0.023	-0.004	8	11	0.024	0.020	-0.004
5	8	0.032	0.009	-0.022	8	12	0.033	0.029	-0.004
5	9	0.030	0.024	-0.006	8	13	0.024	0.027	0.003
5	10	0.029	0.014	-0.014	8	14	0.021	0.024	0.004
5	11	0.036	0.003	-0.033	8	15	0.028	0.023	-0.004
5	12	0.021	0.023	0.002	8	16	0.032	0.028	-0.003
5	13	0.029	0.026	-0.003	8	17	0.018	0.019	0.001

Pengamatan		P_{awal}	P_{baru}	Perbaikan Bobot	Pengamatan		P_{awal}	P_{baru}	Perbaikan Bobot
Dari	Ke				Dari	Ke			
8	18	0.016	0.018	0.002	13	14	0.032	0.037	0.005
8	19	0.032	0.014	-0.019	13	15	0.038	0.035	-0.002
8	20	0.037	0.020	-0.016	13	16	0.015	0.016	0.001
8	21	0.037	0.020	-0.017	13	17	0.011	0.008	-0.002
9	10	0.016	0.019	0.003	13	18	0.014	0.014	0.001
9	11	0.024	0.026	0.002	13	19	0.018	0.022	0.004
9	12	0.018	0.022	0.004	13	20	0.027	0.031	0.004
9	13	0.040	0.043	0.003	13	21	0.027	0.031	0.004
9	14	0.030	0.035	0.005	14	15	0.035	0.032	-0.003
9	15	0.038	0.033	-0.005	14	16	0.013	0.012	0.000
9	16	0.016	0.019	0.003	14	17	0.013	0.013	0.000
9	17	0.011	0.010	-0.002	14	18	0.021	0.024	0.003
9	18	0.014	0.015	0.001	14	19	0.019	0.022	0.004
9	19	0.019	0.023	0.004	14	20	0.020	0.024	0.005
9	20	0.029	0.031	0.002	14	21	0.020	0.025	0.005
9	21	0.030	0.031	0.001	15	16	0.017	0.020	0.003
10	11	0.032	0.017	-0.015	15	17	0.013	0.014	0.000
10	12	0.017	0.019	0.002	15	18	0.018	0.020	0.002
10	13	0.016	0.018	0.003	15	19	0.022	0.023	0.002
10	14	0.020	0.023	0.003	15	20	0.028	0.028	0.000
10	15	0.020	0.022	0.002	15	21	0.028	0.028	0.000
10	16	0.019	0.021	0.002	16	17	0.018	0.021	0.002
10	17	0.033	0.031	-0.003	16	18	0.012	0.012	-0.001
10	18	0.033	0.028	-0.005	16	19	0.030	0.028	-0.002
10	19	0.033	0.016	-0.017	16	20	0.028	0.032	0.004
10	20	0.017	0.020	0.003	16	21	0.027	0.031	0.004
10	21	0.017	0.020	0.003	17	18	0.026	0.030	0.004
11	12	0.016	0.019	0.003	17	19	0.029	0.026	-0.003
11	13	0.024	0.026	0.003	17	20	0.013	0.014	0.000
11	14	0.032	0.027	-0.006	17	21	0.013	0.014	0.001
11	15	0.030	0.022	-0.008	18	19	0.022	0.022	0.000
11	16	0.016	0.019	0.002	18	20	0.013	0.013	0.000
11	17	0.021	0.022	0.001	18	21	0.013	0.013	0.001
11	18	0.031	0.025	-0.006	19	20	0.025	0.025	0.000
11	19	0.027	0.019	-0.009	19	21	0.025	0.024	0.000
11	20	0.020	0.023	0.003	20	21	0.040	0.029	-0.011
11	21	0.020	0.023	0.003					
12	13	0.017	0.019	0.003					
12	14	0.013	0.014	0.000					
12	15	0.018	0.022	0.004					
12	16	0.038	0.046	0.008					
12	17	0.015	0.016	0.001					
12	18	0.011	0.010	-0.002					
12	19	0.026	0.027	0.001					
12	20	0.032	0.035	0.003					
12	21	0.032	0.035	0.003					

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa setelah melalui proses optimasi, dari total 210 *baseline*, bobot dari beberapa *baseline* pengamatan mengalami perubahan. Peningkatan terbesar terdapat pada pengamatan 1-2 dengan nilai sebesar 0.039 sedangkan penurunan bobot terkecil terdapat pada pengamatan 5-11 dengan nilai sebesar -0.033. Jika dikaitkan dengan rumus perhitungan bobot, bobot pengamatan yang memiliki nilai yang tinggi/besar memiliki jarak *baseline* yang pendek

sehingga kesalahan yang terjadi pada *baseline* tersebut kecil. Oleh karena itu, *baseline* tersebut harus digunakan pada rencana pengamatan. Untuk mendapatkan desain jaring yang optimal, *Baseline* dengan bobot yang relatif kecil akan dihilangkan dari rencana pengamatan.

Tabel 4. Bobot Hasil Seleksi

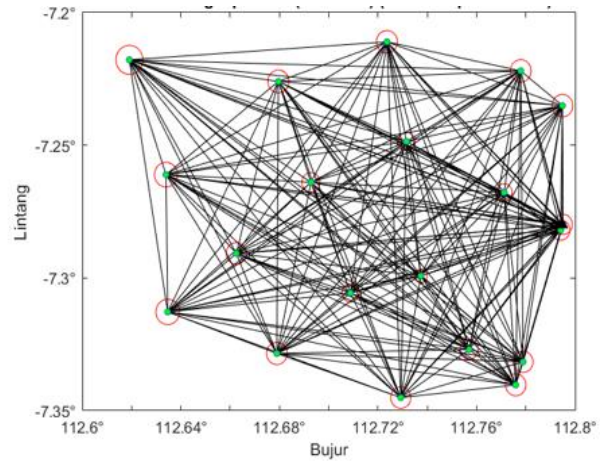
Pengamatan		P_{baru}
Dari	Dari	
1	2	0.046
1	3	0.046
1	4	0.053
1	5	0.062
1	6	0.047
1	7	0.049
1	8	0.071
1	9	0.064
1	10	0.053
1	11	0.056
1	12	0.067
1	13	0.061
1	14	0.054
1	15	0.063
1	16	0.062
1	17	0.049
1	18	0.048
1	19	0.060
1	20	0.075
1	21	0.075
2	6	0.037
2	10	0.021
2	17	0.032
2	18	0.022
3	6	0.037
3	7	0.038
3	10	0.025
3	11	0.024
3	18	0.041
4	5	0.021
4	8	0.024
4	10	0.028
4	11	0.021
4	12	0.029
4	16	0.035
4	17	0.038
4	19	0.028
4	20	0.021

Pengamatan		P_{baru}
Dari	Dari	
4	21	0.021
5	7	0.023
5	9	0.024
5	12	0.023
5	13	0.026
5	14	0.023
5	16	0.022
5	18	0.021
5	20	0.022
5	21	0.021
6	7	0.026
6	10	0.029
6	11	0.022
6	17	0.034
6	18	0.039
7	9	0.021
7	10	0.027
7	11	0.027
7	13	0.021
7	14	0.034
7	15	0.025
7	18	0.037
7	19	0.021
8	9	0.027
8	11	0.020
8	12	0.029
8	13	0.027
8	14	0.024
8	15	0.023
8	16	0.028
8	20	0.020
9	11	0.026
9	12	0.022
9	13	0.043
9	14	0.035
9	15	0.033
9	19	0.023
9	20	0.031
9	21	0.031
10	14	0.023
10	15	0.022
10	16	0.021
10	17	0.031
10	18	0.028
10	20	0.020
10	21	0.020

Pengamatan		P_{baru}
Dari	Dari	
11	13	0.026
11	14	0.027
11	15	0.022
11	17	0.022
11	18	0.025
11	20	0.023
11	21	0.023
12	15	0.022
12	16	0.046
12	19	0.027
12	20	0.035
12	21	0.035
13	14	0.037
13	15	0.035
13	19	0.022
13	20	0.031
13	21	0.031
14	15	0.032
14	18	0.024
14	19	0.022
14	20	0.024
14	21	0.025
15	19	0.023
15	20	0.028
15	21	0.028
16	17	0.021
16	19	0.028
16	20	0.032
16	21	0.031
17	18	0.030
17	19	0.026
18	19	0.022
19	20	0.025
19	21	0.024
20	21	0.029

Seleksi *baseline* dilakukan dengan menghilangkan *baseline* dengan nilai bobot yang lebih kecil dari 0.02. Dari total 210 *baseline* yang ada, sebanyak 91 *baseline* memiliki nilai bobot yang lebih kecil dari nilai kriteria 0.02. *Baseline* tersebut dapat dihilangkan dari rencana pengamatan. *Baseline* yang tersisa, sebanyak 119 *baseline* digunakan untuk membentuk desain jaring hasil optimasi. Nilai presisi desain jaring dengan semua *baseline* dan hasil optimasi selanjutnya dapat dihitung dengan menggunakan

nilai bobot yang terdapat pada Tabel 3 dan 4. Desain jaring dengan semua *baseline* diberi nama desain jaring maksimum sedangkan desain jaring hasil optimasi diberi nama desain jaring optimasi.



Gambar 2. Desain Jaring Maksimum

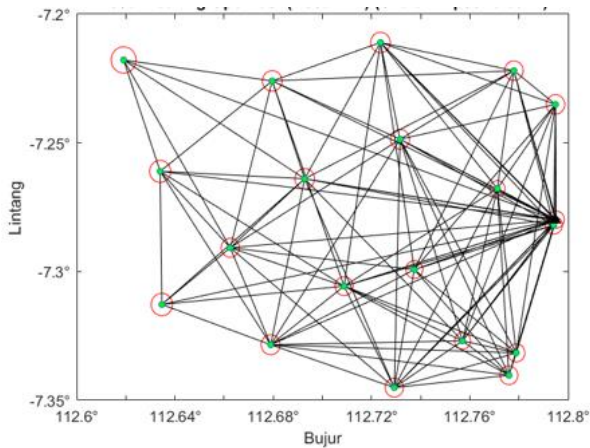
Desain jaring maksimum memiliki nilai SOF sebesar 0.095. Secara visual, besar dari *error ellipse* pada setiap titik memiliki ukuran yang kecil. *Error ellipse* yang kecil ini mengindikasikan bahwa titik tersebut memiliki nilai kesalahan yang kecil. Besar kesalahan pada setiap titik dapat diketahui dari nilai presisi jaring tersebut. Nilai presisi jaring maksimum dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. Presisi Desain Jaring Maksimum

Titik	Presisi		
	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
1	0.000	0.000	0.000
2	1.863	1.863	1.863
3	1.433	1.433	1.433
4	1.137	1.137	1.137
5	0.405	0.405	0.405
6	1.355	1.355	1.355
7	1.097	1.097	1.097
8	0.669	0.669	0.669
9	1.002	1.002	1.002
10	0.834	0.834	0.834
11	0.732	0.732	0.732
12	1.111	1.111	1.111
13	1.067	1.067	1.067
14	1.030	1.030	1.030
15	0.851	0.851	0.851
16	1.119	1.119	1.119
17	1.149	1.149	1.149
18	1.046	1.046	1.046

19	0.750	0.750	0.750
20	0.894	0.894	0.894
21	0.883	0.883	0.883

Nilai presisi maksimum pada desain jaring maksimum terletak pada titik 4 dengan nilai standar deviasi sebesar 0.405 mm sedangkan presisi minimum terletak pada titik 2 dengan nilai sebesar 1.863 mm.



Gambar 3. Desain Jaring Optimasi

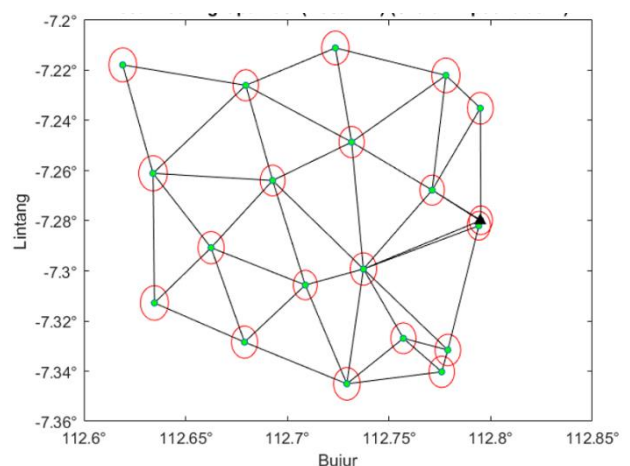
Desain jaring optimasi memiliki nilai SOF sebesar 0.145. Secara visual, besar dari *error ellipse* pada setiap titik memiliki ukuran yang kecil. *Error ellipse* yang kecil ini mengindikasikan bahwa titik tersebut memiliki nilai kesalahan yang kecil. Besar kesalahan pada setiap titik dapat diketahui dari nilai presisi jaring tersebut. Nilai presisi jaring optimasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. Presisi Desain Jaring Optimasi

Titik	Presisi		
	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
1	0.000	0.000	0.000
2	1.619	1.619	1.619
3	1.177	1.177	1.177
4	0.986	0.986	0.986
5	0.737	0.737	0.737
6	1.145	1.145	1.145
7	0.940	0.940	0.940
8	0.605	0.605	0.605
9	0.769	0.769	0.769
10	0.994	0.994	0.994
11	0.828	0.828	0.828
12	0.886	0.886	0.886
13	0.819	0.819	0.819
14	0.852	0.852	0.852

Titik	Presisi		
	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
15	0.652	0.652	0.652
16	0.887	0.887	0.887
17	0.992	0.992	0.992
18	0.857	0.857	0.857
19	0.915	0.915	0.915
20	0.689	0.689	0.689
21	0.760	0.760	0.760

Nilai presisi maksimum pada desain jaring optimasi terletak pada titik 8 dengan nilai standar deviasi sebesar 0.605 mm sedangkan presisi minimum terletak pada titik 2 dengan nilai standar deviasi sebesar 1.619 mm. Jika dibandingkan dengan desain jaring maksimum, nilai presisi desain jaring optimasi memiliki nilai presisi yang lebih baik dibandingkan dengan desain jaring maksimum. Meskipun nilai presisi maksimum desain jaring optimasi tidak lebih baik daripada desain jaring maksimum, tetapi secara keseluruhan pada setiap titik, nilai presisi pada desain jaring optimasi lebih baik. Dari 21 titik pengamatan, terdapat 16 titik mengalami kenaikan nilai presisi. Berdasarkan hal tersebut dapat dikatakan desain jaring optimasi merupakan desain jaring yang optimal. Kemudian, untuk membuktikan desain jaring optimasi merupakan jaring yang optimal maka dibuat desain baru sebagai pembandingan. Adapun bentuk dari desain baru ini seperti pada gambar berikut



Gambar 4. Desain Jaring Baru

Desain jaring optimasi memiliki nilai SOF sebesar 0.704. Presisi desain jaring ini dihitung untuk dapat dibandingkan dengan desain jaring optimasi. Nilai presisi jaring baru dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 6. Presisi Desain Jaring Baru

Titik	Presisi		
	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
1	0.000	0.000	0.000
2	2.733	2.733	2.733
3	3.306	3.306	3.306
4	2.876	2.876	2.876
5	1.248	1.248	1.248
6	3.080	3.080	3.080
7	3.470	3.470	3.470
8	1.090	1.090	1.090
9	2.010	2.010	2.010
10	3.527	3.527	3.527
11	4.744	4.744	4.744
12	1.704	1.704	1.704
13	2.847	2.847	2.847
14	2.790	2.790	2.790
15	3.332	3.332	3.332
16	2.072	2.072	2.072
17	2.981	2.981	2.981
18	3.536	3.536	3.536
19	3.295	3.295	3.295
20	1.240	1.240	1.240
21	1.435	1.435	1.435

Nilai presisi maksimum pada desain jaring optimasi terletak pada titik 8 dengan nilai standar deviasi sebesar 1.090 mm sedangkan presisi minimum terletak pada titik 11 dengan nilai standar deviasi sebesar 4.744 mm. Jika dibandingkan dengan nilai presisi desain jaring optimasi, nilai presisi desain jaring baru memiliki nilai yang kurang baik. Dengan hasil ini, maka didapatkan desain jaring optimasi sebagai desain jaring yang optimal. Selain dari segi presisi, jaring optimal juga harus memiliki nilai reliabilitas yang baik.

Tabel 7. Perbandingan Reliabilitas Desain Jaring

Desain	Reliabilitas Minimum	Reliabilitas Maksimum	Reliabilitas Rata-Rata
Desain Jaring Maksimum	0.795	0.987	0.905
Desain Jaring Optimasi	0.632	0.928	0.832
Desain Jaring Baru	0.266	0.875	0.574

Nilai reliabilitas berada pada rentang 0 sampai 1. Dari Tabel 7, desain jaring maksimum memiliki nilai yang tertinggi dengan nilai rata-rata sebesar 0.905. nilai reliabilitas yang besar menandakan bahwa jaring tersebut dapat menghindari kesalahan dengan baik. Desain jaring optimasi, yang merupakan desain jaring yang optimal dari segi presisi, memiliki nilai yang baik juga sehingga dari segi reliabilitas, desain jaring ini dianggap baik. Terakhir, dilakukan perbandingan berdasarkan total biaya yang dibutuhkan untuk merealisasi desain jaring.

Tabel 8. Total Biaya Desain Jaring

Desain	Total Biaya (Rp)
Desain Jaring Maksimum	113,062,500
Desain Jaring Optimasi	62,812,500
Desain Jaring Baru	25,125,000

Berdasarkan perhitungan biaya, desain jaring baru memiliki biaya realisasi yang paling kecil diantara ketiga desain jaring. Desain jaring optimasi berada di urutan berikutnya dengan perbedaan biaya mencapai 3x lipat. Mengacu pada presisi dan reliabilitas desain jaring, maka didapatkan desain jaring optimasi sebagai desain jaring yang optimal dari segi presisi, reliabilitas, dan biaya. Jika diasumsikan biaya desain jaring maksimum adalah biaya maksimum, desain jaring optimasi dapat menghemat biaya sebesar 44%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis, desain optimal dari segi presisi, reliabilitas, dan biaya ditunjukkan pada desain jaring optimasi. Desain ini merupakan desain hasil eliminasi beberapa pengamatan yang tidak berdampak signifikan pada presisi jaring. Nilai presisi maksimum dari desain jaring optimasi terletak pada titik 8 sebesar 0.605 mm dan presisi minimum pada titik 2 sebesar 1.619 mm. Kekuatan geometri desain jaring optimasi sebesar 0.145 dengan biaya realisasi desain ini mencapai 62,812,500 Rupiah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis YAS mengucapkan terima kasih kepada Ibu Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil Ph.D sebagai dosen pembimbing sekaligus penyedia data yang telah membantu terlaksananya penelitian ini,

terutama perihal ketersediaan data yang diperlukan serta bimbingan selama proses pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Al zubaidy, Riyadh Z, Hussien A. Mahdi, dan Hind Sabah Hanooka. 2012. *Optimized Zero and First Order Design of Micro Geodetic Networks*. Journal of Engineering, Vol. 18 No. 12.
- Ikatan Nasional Konsultan Indonesia. 2017. Pedoman Standar Minimal. Jakarta: Dewan Pengurus Nasional.
- Kaplan, M. O., dan Ayan, T. 2004. *The Effects of Geodetic Configuration of the Network in Deformation Analysis*. FIG Working Week, Vol. 29 No. 6:1–15.
- Khameneh, M. 2015. *On Optimisation and Design of Geodetic Networks*.: Royal Institute of Technology.
- Khameneh, Lars E. Sjöberg, dan Anna B. O. Jensen. 2016. *Optimization of GNSS Deformation Monitoring Networks by Considering Baseline Correlations*. New Zealand: FIG Working Week 2016.
- Kuang, Shan-long. 1991. *Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes*. Department of Surveying Engineering Technical Report No. 157. University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Kanada, 179 pp.
- Kuang, Shanlong. *Geodetic Network Analysis and Optimal Design : Concepts and Applications*. Michigan : Ann Arbor Press .Inc (1996).
- Küreç, P. dan H. Konak. 2014. *A Priori Sensitivity Analysis for Densification GPS Networks and Their Capacities of Crustal Deformation Monitoring: A Real GPS Network Application*. Natural Hazards and Earth System Science, Vol 14.
- Lichten, Stephen M. 1990. *High Accuracy Global Positioning System Orbit Determination: Progress and Prospects*. California Institute of Technology: Amerika Serikat.
- Mehrabi dan H, B. Voosoghi. 2014. *Optimal Observational Planning of Local GPS Networks : assessing an analitis method*. Journal of geodetic science Vol.4 :87-97.
- Seemkooei, A. A. 2001. *Comparison of Reliability and Geometrical Strength Criteria in Geodetic Networks*. Journal of Geodesy, Vol. 75 No. 4:227–233.
- Standar Nasional Indonesia. 2002. Jaring Kontrol Horizontal. Jakarta.