



Optimasi Geometri Jaringan GNSS dan RTS untuk Pemantauan Deformasi Kontinu Saluran Induk Kalibawang di Jembatan Talang Bowong, Kabupaten Kulon Progo

(Geometric Optimization of GNSS and RTS Network for Continuous Deformation Monitoring of Kalibawang Irrigation Channel in the Talang Bowong Bridge, Kulon Progo District)

Ghea Ayunda Siami¹, Bilal Ma'ruf², Dedi Atunggal²

¹ Alumni Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

² Dosen Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Penulis Korespondensi: Bilal Ma'ruf | **Email:** bilal.maruf@ugm.ac.id

Diterima (*Received*): 21/07/2021 Direvisi (*Revised*): 26/11/2021 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 30/11/2021

ABSTRAK

Kegiatan rehabilitasi dan pemeliharaan di Jembatan Talang Bowong membutuhkan pemantauan gerakan massa tanah secara *real-time* dan kontinu. Penelitian ini berusaha mendesain jaringan kontrol pemantauan gerakan massa tanah secara geometrik dengan data simulasi yang diturunkan dari data *orthophoto* sebagai langkah awal untuk pembangunan jaringan kontrol pemantauan. Data simulasi yang didapatkan berupa koordinat distribusi titik kontrol kemudian diturunkan menjadi vektor *baseline*. Nilai ketelitian pada penelitian ini didapatkan dari alat yang digunakan pada saat pemantauan berlangsung yaitu GNSS Leica seri GM30 dan RTS Leica seri TS16 1". Jaringan kontrol pemantauan didesain berdasarkan integrasi antara GNSS dan RTS. Pembuatan desain jaringan kontrol GNSS dilakukan dengan membentuk jaringan dengan *baseline* yang sederhana hingga kompleks. Sedangkan, pembuatan desain jaringan kontrol RTS dilakukan berdasarkan variasi jarak antar titik prisma target. Nilai matriks varian-kovarian pengamatan dari estimasi hitung kuadrat terkecil digunakan untuk pemilihan desain geometri jaringan terbaik berdasarkan hasil perhitungan kriteria presisi yang terdiri atas kriteria *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality*. Nilai matriks kofaktor residu digunakan untuk pemilihan desain geometri jaringan terbaik berdasarkan kriteria keandalan yang terdiri atas aspek redundansi individu, keandalan dalam, dan keandalan luar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain jaringan GNSS yang paling optimal yaitu jaringan DG04. Hal ini ditunjukkan dari nilai kriteria presisi dan keandalan luar paling kecil serta nilai kriteria redundansi individu paling besar. Desain jaringan RTS yang paling optimal yaitu jaringan *rts01*. Hal ini ditunjukkan dari nilai kriteria presisi, keandalan dalam, dan keandalan luar paling kecil serta nilai kriteria redundansi individu paling besar.

Kata Kunci: optimasi geometri, presisi, keandalan, jaringan GNSS, jaringan RTS, Jembatan Talang Bowong

ABSTRACT

Rehabilitation and maintenance activities at the Talang Bowong Bridge require real-time and continuous monitoring of soil mass movements. This research attempts to design a control network for monitoring the soil mass movements geometrically using simulation data derived from orthophoto data as a first step for building a monitoring control network. The simulation data obtained in the form of the distribution coordinates of the control points are then reduced to a baseline vector. The accuracy value in this study was obtained from the tools to be used during monitoring, namely the Leica GNSS GM30 and RTS Leica TS16 1" series. The monitoring control network is designed based on the integration between GNSS and RTS. The design of the GNSS control network is made by forming a network with a simple to complex baseline. While the design of the RTS control network is carried out based on variations in the distance between the target prism points. The value of the observed covariance-variance matrix from the estimated least-squares calculation is used to select the optimal geometry design based on the computation results of precision criteria consisting of the A-Optimality, D-Optimality, E-Optimality, S-Optimality, and I-Optimality criteria. In addition, the residual cofactor matrix value is used to select the optimal geometry design based on reliability criteria consisting of redundancy criteria, internal reliability, and external reliability. The results showed that the most optimal GNSS network design was the DG04 network. This is indicated by the smallest precision, external reliability criteria values, and the largest redundancy criteria values. On the other hand, the most optimal RTS network design was the rts01 network. This is indicated by the smallest precision, internal reliability, external reliability criteria values and the largest redundancy criteria values.

Keywords: *geometric optimization, precision, reliability, GNSS network, RTS network, Talang Bowong Bridge*

© Author(s) 2021. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Menurut Dinas Pekerjaan Umum Perumahan dan Kawasan Permukiman (DPUPKP) Kabupaten Kulon Progo, Saluran Induk Kalibawang merupakan saluran utama dalam penyediaan air irigasi di Kabupaten Kulon Progo yang memiliki fungsi untuk mengalirkan air dari bangunan utama ke saluran sekunder. Berdasarkan kondisi geologi, Saluran Induk Kalibawang memiliki kondisi tanah yang tergolong tidak stabil, sehingga mempengaruhi stabilitas bangunan yang berada di sekitar saluran tersebut (DPUPKP, 2020). Segmen km 15,9 merupakan salah satu segmen saluran yang rawan mengalami kerusakan (Ma'ruf, 2015). Kerusakan di segmen km 15,9 ditandai dengan rusaknya bangunan sekolah dasar, jembatan, saluran, dan retaknya talang irigasi (Dwidjaka, 2006). Kerusakan ini diduga diakibatkan adanya pergerakan massa tanah (deformasi) di sekitar segmen km 15,9. Jembatan Talang Bowong merupakan salah satu bangunan vital yang berada di segmen km 15,9 Saluran Induk Kalibawang. Kegiatan pemantauan diperlukan untuk kepentingan rehabilitasi dan pemeliharaan Jembatan Talang Bowong. Hal ini untuk memprediksi adanya fenomena-fenomena yang terjadi serta meminimalkan adanya kerusakan jembatan akibat pergerakan massa tanah di sekitar segmen km 15,9.

Ma'ruf (2015) melakukan pemodelan analisis deformasi dinamis berdasarkan koordinat titik kontrol pemantauan dengan data infiltrasi hujan yang diselesaikan dengan teknik *Kalman Filtering* untuk memprediksi gerakan rayapan tanah di segmen km 15,9 Saluran Induk Kalibawang. Penelitian tersebut dilakukan dengan GNSS statik secara periodik dengan interval waktu tertentu. Kegiatan pemantauan gerakan massa tanah dibutuhkan jaring kontrol pemantauan *real-time* dan kontinu supaya didapatkan data titik koordinat dengan ketelitian yang tinggi di setiap waktu (Leick dkk., 2012). Hal itu berarti dalam kegiatan pemantauan gerakan massa tanah di segmen km 15,9 perlu dilakukan secara *real-time* dan kontinu untuk mendapatkan data dengan ketelitian yang tinggi. Penelitian ini menggunakan titik kontrol yang digunakan untuk pengambilan data orthophoto serta tinggi titik yang digunakan yaitu tinggi titik di permukaan objek. Titik kontrol tersebut selanjutnya dilakukan optimasi geometri jaring dan mengabaikan optimasi efisiensi alat dan biaya serta sensitivitas jaring. Optimasi geometri jaring kontrol pemantauan gerakan massa tanah merupakan langkah awal pembangunan jaring kontrol pemantauan secara *real-time* dan kontinu. Optimasi tersebut dilakukan untuk memberikan gambaran ketelitian koordinat saat melakukan pengukuran untuk pemantauan gerakan massa tanah di segmen km 15,9. Jaring kontrol pemantauan didesain secara geometrik dengan kombinasi dari teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan *Robotic Total Station* (RTS). Teknologi GNSS digunakan karena memiliki tingkat ketelitian dan kepresisian yang tinggi serta tidak memerlukan intervisibilitas antar titik (Erol dkk., 2002). Teknologi RTS digunakan untuk memantau pergerakan struktur jembatan akibat pergerakan massa tanah di sekitar segmen km 15,9 Saluran Induk Kalibawang. Optimasi jaring GNSS dilakukan berdasarkan variasi jumlah

baseline. Optimasi jaring RTS dilakukan berdasarkan variasi jarak antar titik prisma target. Optimasi geometri jaring kontrol ini dilakukan dengan data simulasi yang diturunkan dari data *orthophoto* dengan kriteria optimal yang terdiri atas kriteria presisi dan keandalan. Hasil perhitungan optimasi geometri jaring digunakan untuk memantau gerakan massa tanah secara *real-time* dan kontinu dengan gabungan teknologi GNSS dan RTS.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian dilakukan di Jembatan Talang Bowong, Saluran Induk Kalibawang, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dengan data *orthophoto* daerah Saluran Induk Kalibawang. Lokasi penelitian Saluran Induk Kalibawang segmen km 15,9, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data *orthophoto* tahun 2020 daerah segmen km 15,9 Saluran Induk Kalibawang, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta serta data spesifikasi ketelitian alat GNSS Leica seri GM30 dan RTS Leica seri TS16 1".



Gambar 1 *Orthophoto* Saluran Induk Kalibawang segmen km 15,9

2.2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan data simulasi yang diturunkan dari *orthophoto*. Data yang didapatkan berupa data koordinat dalam sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Optimasi jaring GNSS dan RTS dilakukan secara terpisah karena pembuatan desain jaring GNSS dilakukan berdasarkan variasi jumlah *baseline* dan tidak melakukan pemindahan titik kontrol sedangkan pembuatan desain jaring RTS dilakukan berdasarkan variasi jarak antar titik prisma target dan dengan metode pengikatan ke muka. Proses estimasi nilai-nilai parameter dilakukan dengan perataan hitung kuadrat terkecil metode parameter. Prinsip perhitungan ini yaitu menghitung jumlah kuadrat dari koreksi yang diberikan pada ukuran adalah minimum dengan nilai besaran pengamatan pada persamaan tersebut merupakan fungsi parameter (Ghilani, 2010). Proses estimasi dengan hitung kuadrat terkecil

metode parameter dilakukan penyusunan matriks konfigurasi (A), matriks bobot (P), matriks parameter (X), dan matriks pengamatan (L). Setiap *baseline* memiliki tiga komponen vektor *baseline* yaitu ΔE , ΔN , dan Δh . Komponen vektor *baseline* jaring GNSS disajikan pada persamaan (1) s.d. (3). Jumlah persamaan ditentukan berdasarkan jumlah komponen vektor *baseline* dalam suatu jaring.

$$\Delta E_{ij} + V_{ij} = E_j - E_i \quad (1)$$

$$\Delta N_{ij} + V_{ij} = N_j - N_i \quad (2)$$

$$\Delta h_{ij} + V_{ij} = h_j - h_i \quad (3)$$

Dalam hal ini:

ΔE_{ij} : komponen vektor *baseline* E_i ke E_j

ΔN_{ij} : komponen vektor *baseline* N_i ke N_j

Δh_{ij} : komponen vektor *baseline* h_i ke h_j

E_i, N_i, h_i : nilai koordinat titik referensi

E_j, N_j, h_j : nilai koordinat titik yang diamat

V_{ij} : nilai residu atau koreksi pengamatan

Komponen *baseline* jaring RTS disajikan pada persamaan (4) s.d. (6).

$$s_{ij} = \sqrt{(E_j - E_i)^2 + (N_j - N_i)^2 + (h_j - h_i)^2} \quad (4)$$

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{N_j - N_i}{E_j - E_i}\right) \quad (5)$$

$$Z_{ij} = \frac{\sqrt{(E_j - E_i)^2 + (N_j - N_i)^2}}{\tan(h_j - h_i + h_t)} \quad (6)$$

Dalam hal ini:

s_{ij} : jarak miring

α_{ij} : sudut azimuth

Z_{ij} : sudut zenit

E_j, N_j, h_j : koordinat titik kontrol RTS

E_i, N_i, h_i : koordinat titik prisma target

h_t : tinggi alat RTS

Komponen vektor *baseline* digunakan dalam perhitungan bobot ukuran. Perhitungan desain jaring GNSS pada penelitian ini menggunakan nilai varian sebesar $\pm (6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ dikalikan vektor *baseline*. Nilai varian ini didapatkan dari GNSS Leica seri GM30. Perhitungan desain jaring RTS pada penelitian ini menggunakan nilai varian jarak sebesar $\pm (1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$, nilai varian sudut horizontal dan vertikal sebesar 0,3 mgon. Nilai varian ini didapatkan dari RTS Leica seri TS16 1". Desain matriks P jaring GNSS sebagai berikut.

$${}_n P_n = \begin{bmatrix} C_{x1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_{xn}^{-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

C_x merupakan matriks varian-kovarian komponen vektor *baseline* GNSS.

$$C_x = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta E_n}^2 & \sigma_{\Delta E_n \Delta N_n} & \sigma_{\Delta E_n \Delta h_n} \\ \sigma_{\Delta E_n \Delta N_n} & \sigma_{\Delta N_n}^2 & \sigma_{\Delta N_n \Delta h_n} \\ \sigma_{\Delta E_n \Delta h_n} & \sigma_{\Delta N_n \Delta h_n} & \sigma_{\Delta h_n}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matriks A merupakan matriks turunan persamaan observasi terhadap parameter. Jumlah baris pada matriks A menunjukkan banyaknya persamaan observasi dan jumlah kolom pada matriks A menunjukkan jumlah parameter. Desain matriks A jaring GNSS sebagai berikut.

$${}_n A_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial E_1} & \frac{\partial l_1}{\partial N_1} & \frac{\partial l_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial E_u} & \frac{\partial l_n}{\partial N_u} & \frac{\partial l_n}{\partial h_u} \\ \frac{\partial l_2}{\partial E_1} & \frac{\partial l_2}{\partial N_1} & \frac{\partial l_2}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial E_u} & \frac{\partial l_n}{\partial N_u} & \frac{\partial l_n}{\partial h_u} \\ \vdots & & & & & & \\ \frac{\partial l_n}{\partial E_1} & \frac{\partial l_n}{\partial N_1} & \frac{\partial l_n}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial E_u} & \frac{\partial l_n}{\partial N_u} & \frac{\partial l_n}{\partial h_u} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dalam hal ini:

n : jumlah persamaan

u : jumlah parameter

Matriks matriks L didapatkan dari perhitungan selisih nilai pendekatan pengamatan dengan nilai pengamatan serta matriks X dapat dihitung dengan persamaan (9).

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (9)$$

Dalam hal ini:

X : matriks koreksi parameter

A : matriks turunan fungsi pengamatan terhadap parameter

P : matriks bobot

L : selisih nilai pengamatan dengan nilai pendekatan

Optimasi jaring 112 kontrol 112 bertujuan untuk mendapatkan jaring yang paling optimal dari pengukuran 112 titik antar stasiun. Penentuan desain jaring yang paling optimal bergantung pada parameter kriteria optimasi. Kriteria optimasi dapat dilihat dari segi presisi, keandalan, dan ekonomi (Kuang, 1996). Penelitian ini berfokus pada kriteria presisi dan keandalan. Kriteria presisi menjelaskan kepresisian pengukuran berpengaruh terhadap hasil estimasi melalui geometri dari jaring. Kriteria presisi suatu jaring kontrol didapatkan dari perataan dengan hitung kuadrat terkecil metode parameter yaitu dari nilai *eigen* matriks varian-kovarian. Analisis optimasi fungsi scalar dari kriteria optimasi presisi yang digunakan yaitu, *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality* dari nilai *eigen* masing-masing proses (Grafarend, 1974) dalam (Kuang, 1996). Menurut Kuang (1996), persamaan (10) s.d. (14) untuk mencari nilai kriteria presisi.

A-Optimality

$$f = \text{trace}(C_x) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \min \quad (10)$$

D-Optimality

$$f = \text{Det}(C_x) = \lambda_1 * \lambda_2 * \dots * \lambda_n = \min \quad (11)$$

E-Optimality

$$\lambda_{maks} = \min \quad (12)$$

S-Optimality

$$(\lambda_{maks} - \lambda_{min}) = \min \quad (13)$$

I-Optimality

$$\frac{1-\lambda_{min}}{\lambda_{min}} = \min \quad (14)$$

Dalam hal ini:

C_x : matriks varian-kovarian pengamatan

λ : nilai *eigen* matriks C_x

Matriks varian-kovarian pengamatan dapat dihitung menggunakan persamaan (15).

$$C_x = (A^T P A)^{-1} \quad (15)$$

Dalam hal ini:

P : matriks bobot

A : matriks turunan fungsi pengamatan terhadap parameter

Kriteria keandalan digunakan untuk menentukan jaring yang optimal selain kriteria presisi (Amiri-Simkooei, dkk., 2001). Kriteria keandalan menjelaskan jaring bereaksi terhadap bias yang kecil dari pengukuran. Kriteria keandalan pada jaring kontrol bergantung pada geometri suatu jaring, yaitu matriks konfigurasi dan matriks bobot suatu pengukuran. Kriteria keandalan bertujuan untuk mereduksi kesalahan kasar dari suatu pengamatan serta untuk memperkecil efek dari ketidaktepatan dalam melakukan estimasi parameter. Kriteria keandalan terbagi menjadi dua jenis, yaitu keandalan dalam dan keandalan luar. Keandalan luar dari jaring kontrol berkaitan dengan efek dari kesalahan yang tidak terdeteksi pada parameter terestimasi. Keandalan dalam dari jaring kontrol merepresentasikan kualitas jaring yang mengacu pada batas minimal dari kesalahan kasar yang dapat dideteksi pada sejumlah pengamatan untuk nilai probabilitas yang diberikan terhadap kesalahan (Kuang, 1991). Nilai kriteria keandalan didapatkan dari perataan dengan hitung kuadrat terkecil metode parameter yaitu dari matriks kofaktor residu. Menurut Yalçinkaya and Teke (2006) persamaan (16) s.d. (18) untuk mencari nilai kriteria keandalan.

Redundansi Individu

$$Z = r_j = (Q_{vv})P_j \quad (16)$$

Keandalan Dalam

$$Z = |\Delta_{oj}| = m_0 \sqrt{w_0/P_j r_j} \quad (17)$$

Keandalan Luar

$$Z = \delta_{oj^2} = \left(\frac{1-r_j}{r_j}\right) \cdot w_0 \quad (18)$$

Dalam hal ini:

P_j : matriks bobot dari persamaan

Q_{vv} : matriks kofaktor residu

A : matriks turunan fungsi pengamatan terhadap parameter

m_0 : simpangan baku dari unit bobot

w_0 : standar batas bawah untuk parameter

Matriks kofaktor residu dapat dihitung dengan persamaan (19).

$$Q_{vv} = P^{-1} - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (19)$$

Dalam hal ini:

P : matriks bobot

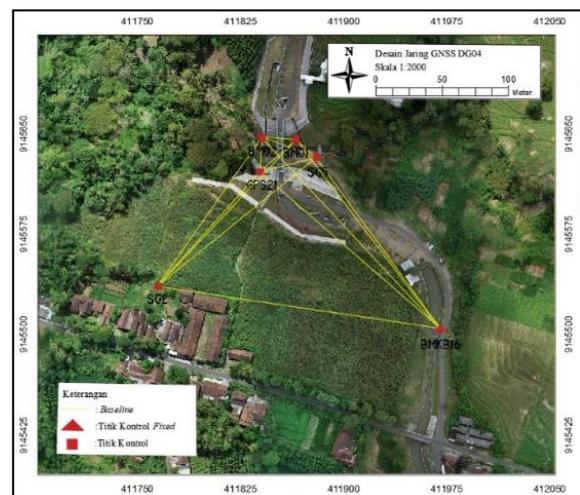
A : matriks turunan fungsi pengamatan terhadap parameter

Jaring GNSS dan RTS didesain dengan perangkat lunak *Autocad Civil 3D 2020*. Proses estimasi dengan perataan hitung kuadrat terkecil metode parameter serta perhitungan kriteria optimasi jaring GNSS dan RTS menggunakan perangkat lunak *Matlab 2017b*. Pemilihan jaring yang optimal dilakukan dengan membandingkan nilai hasil perhitungan kriteria presisi dan kriteria keandalan jaring GNSS dan RTS. Desain jaring dikatakan sudah optimal jika ditinjau dari kriteria presisi nilai *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality* memiliki nilai paling minimal jika dibandingkan dengan desain jaring lainnya. Selain itu, desain jaring dikatakan optimal apabila ditinjau dari kriteria keandalan yang terdiri atas nilai keandalan dalam dan keandalan luar memiliki nilai yang tidak melebihi nilai kritis yang telah ditentukan (Yalçinkaya and Teke, 2006).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Desain jaring GNSS

Pembuatan desain jaring GNSS dilakukan dengan membuat *baseline* yang menghubungkan antara satu titik kontrol dengan titik kontrol lainnya. Desain jaring GNSS pada penelitian ini dibentuk dari jaring yang paling sederhana hingga jaring yang paling kompleks. Jaring GNSS yang paling sederhana yaitu jaring yang memiliki jumlah *baseline* paling sedikit sedangkan jaring GNSS yang paling kompleks yaitu jaring yang memiliki jumlah *baseline* yang paling banyak. Setiap desain jaring memiliki variasi jumlah *baseline* yang berbeda. Hal ini dikarenakan alat yang digunakan dalam penelitian selanjutnya berjumlah enam sehingga dalam penelitian ini hanya dapat melakukan penambahan jumlah ukuran *baseline*. Jumlah desain jaring GNSS yang dibentuk sebanyak empat jaring dengan enam titik kontrol GNSS dimana terdapat satu titik kontrol *fixed* (titik ikat).



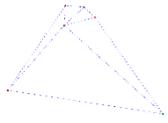
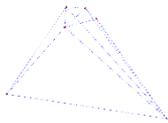
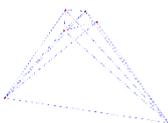
Gambar 2 Desain jaring GNSS DG04

Gambar 2 menunjukkan desain jaring GNSS paling kompleks yang terbentuk dari enam titik kontrol yaitu BMKB16, SG2, GPS21, SG5, BM01, dan BM02. BMKB16 merupakan titik kontrol *fixed* (titik ikat) karena lokasi titik tersebut berada di luar area yang terdeformasi.

3.2. Kepresisian jaring GNSS

Kriteria presisi menjelaskan kepresisian pengukuran berpengaruh terhadap hasil estimasi melalui geometri dari jaring. Kriteria presisi suatu jaring kontrol diperoleh dari nilai *eigen* pada matriks varian-kovarian parameter koordinat titik. Analisis optimasi fungsi 114 skalar dari kriteria optimasi presisi yang digunakan yaitu, *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality* dari nilai *eigen* masing-masing proses. Kualitas jaring kontrol yang terbaik memiliki nilai hasil perhitungan kriteria presisi yang paling kecil atau minimum. Desain jaring GNSS pada penelitian ini dibentuk dengan enam titik yaitu BMKB16, SG2, SG5, GPS21, BM01, dan BM02. Titik BMKB16 merupakan titik kontrol *fixed* (titik ikat). Perbandingan hasil perhitungan kriteria presisi pada desain jaring GNSS DG01, DG02, DG03, dan DG04 ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Kriteria presisi jaring GNSS

	Desain jaring GNSS DG01	
	Jumlah baseline : 10	<i>A-Optimality</i>
<i>D-Optimality</i>		2,86E-40
<i>E-Optimality</i>		0,012
<i>S-Optimality</i>		0,011
<i>I-Optimality</i>		988,272
	Desain jaring GNSS DG02	
	Jumlah baseline : 12	<i>A-Optimality</i>
<i>D-Optimality</i>		1,36E-41
<i>E-Optimality</i>		0,006
<i>S-Optimality</i>		0,005
<i>I-Optimality</i>		1000,377
	Desain jaring GNSS DG03	
	Jumlah baseline : 14	<i>A-Optimality</i>
<i>D-Optimality</i>		7,89E-43
<i>E-Optimality</i>		0,006
<i>S-Optimality</i>		0,005
<i>I-Optimality</i>		1006,155
	Desain jaring GNSS DG04	
	Jumlah baseline : 15	<i>A-Optimality</i>
<i>D-Optimality</i>		2,16E-43
<i>E-Optimality</i>		0,006
<i>S-Optimality</i>		0,005
<i>I-Optimality</i>		1009,117

Tabel 1 dapat dilihat bahwa mayoritas nilai kriteria presisi minimum terdapat pada desain jaring GNSS DG04 dengan nilai *A-Optimality* sebesar 0,030, nilai *D-Optimality* sebesar 2,16E-43, nilai *E-Optimality* sebesar 0,006, dan nilai *S-Optimality* sebesar 0,005. Sedangkan, nilai *I-Optimality* minimum terdapat pada jaring DG01 dengan nilai sebesar 988,272. Mayoritas nilai kriteria presisi maksimum terdapat pada jaring DG01 dengan nilai *A-Optimality* sebesar 0,055, nilai *D-Optimality* sebesar 2,86E-40, nilai *E-Optimality* sebesar 0,012, dan nilai *S-Optimality*

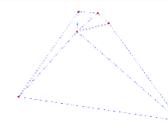
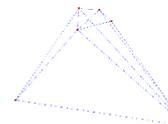
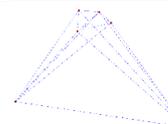
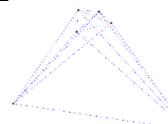
sebesar 0,011. Sedangkan, nilai *I-Optimality* maksimum terdapat pada jaring DG04 dengan nilai sebesar 1009,117.

Jaring DG04 merupakan jaring yang memiliki panjang *baseline* yang cenderung sama (homogen) dan memiliki sifat isotropi terbaik dibandingkan dengan jaring DG01, DG02, dan DG03. Nilai kriteria presisi juga dipengaruhi oleh penambahan jumlah *baseline* dalam suatu jaring, semakin banyak jumlah *baseline* maka nilai kriteria presisi minimum dan sebaliknya. Jaring DG04 memiliki jumlah *baseline* paling banyak dibandingkan dengan jaring lainnya. Oleh karena itu, desain jaring GNSS DG04 merupakan desain jaring yang optimal karena memiliki nilai kriteria presisi yang minimum dibandingkan dengan desain jaring lainnya.

3.3. Keandalan jaring GNSS

Kriteria keandalan bertujuan untuk mereduksi kesalahan kasar dari suatu pengamatan serta untuk memperkecil efek dari ketidaktepatan dalam melakukan estimasi parameter. Kriteria keandalan pada jaring kontrol bergantung pada geometri suatu jaring yaitu matriks konfigurasi dan matriks bobot suatu pengukuran. Analisis kriteria keandalan menggunakan hasil perhitungan redundansi individu, keandalan dalam, dan keandalan luar pada setiap desain jaring GNSS.

Tabel 2 Nilai rata-rata kriteria keandalan jaring GNSS

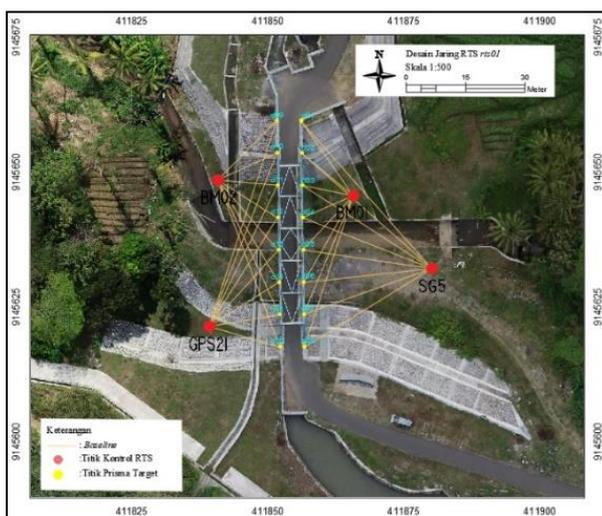
	Desain jaring GNSS DG01	
	Jumlah baseline : 10	Redundansi individu
Keandalan dalam		0,551
Keandalan luar		5,020
	Desain jaring GNSS DG02	
	Jumlah baseline : 12	Redundansi individu
Keandalan dalam		0,554
Keandalan luar		4,606
	Desain jaring GNSS DG03	
	Jumlah baseline : 14	Redundansi individu
Keandalan dalam		0,555
Keandalan luar		4,274
	Desain jaring GNSS DG04	
	Jumlah baseline : 15	Redundansi individu
Keandalan dalam		0,557
Keandalan luar		4,153

Tabel 2 merupakan nilai rata-rata kriteria keandalan jaring GNSS yang terdiri dari kriteria redundansi individu, keandalan dalam, dan keandalan luar. Tabel 2 menunjukkan semua desain jaring GNSS memiliki nilai hasil perhitungan yang memenuhi semua kriteria keandalan. Hal itu berarti semua desain jaring GNSS yang dibentuk dapat mendeteksi adanya kesalahan kasar, mempunyai sensitivitas tinggi adanya kesalahan tidak acak, dan mempunyai pengaruh terhadap adanya kesalahan tidak acak yang terdeteksi. Jaring DG04 merupakan jaring yang

paling handal jika ditinjau dari kriteria redundansi individu dan keandalan luar. Jaringan DG04 memiliki kemampuan yang paling tinggi untuk mendeteksi adanya kesalahan kasar serta memiliki pengaruh yang paling rendah terhadap adanya kesalahan tidak acak yang terdeteksi dalam jaringan. Sedangkan, jaringan DG01 merupakan jaringan yang paling handal jika ditinjau dari kriteria keandalan dalam, sehingga jaringan DG01 memiliki sensitivitas yang paling tinggi terhadap kesalahan tidak acak. Tabel 2 juga dapat dilihat bahwa penambahan *baseline* pada desain jaringan GNSS memiliki pengaruh dari kriteria keandalan jaringan. Desain jaringan GNSS yang memiliki *baseline* yang kompleks lebih handal daripada desain jaringan GNSS yang paling sederhana.

3.4. Desain jaringan RTS

Pembuatan desain jaringan RTS dilakukan dengan *baseline* yang menghubungkan antara satu titik kontrol dengan titik prisma target. Titik kontrol RTS berada di sebelah kanan dan kiri Jembatan Talang Bowong. Hal ini dikarenakan adanya faktor intervisibilitas antar titik kontrol dan titik prisma target. Desain jaringan RTS dibentuk dengan metode pengikatan ke muka dengan empat titik yang sudah diketahui koordinatnya melalui GNSS yang terintegrasi dengan RTS. Titik tersebut digunakan sebagai titik berdirinya RTS. Jumlah desain jaringan RTS dibentuk sebanyak empat jaringan dengan variasi jarak antar titik prisma target sehingga jumlah titik prisma target pada setiap desain jaringan RTS berbeda. Penentuan jarak antar titik prisma target mempertimbangkan panjang jembatan karena RTS digunakan untuk memantau pergerakan struktur jembatan. Hal itu berarti jumlah *baseline* yang terbentuk pada setiap desain jaringan RTS berbeda. Tinggi titik yang digunakan yaitu tinggi titik di permukaan objek. Desain jaringan RTS terbentuk dari empat titik kontrol RTS yaitu SG5, GPS21, BM01, dan BM02.



Gambar 3 Desain jaringan RTS *rts01*

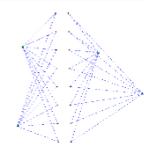
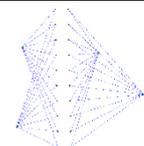
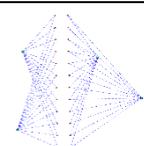
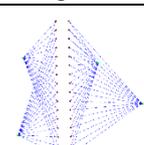
Gambar 3 menunjukkan desain jaringan RTS dengan jarak antar titik prisma target paling jauh yaitu sebesar 6 m. Setiap jaringan RTS memiliki perbedaan jarak antar prisma target sebesar 1 m. Jaringan *rts01* memiliki jarak antar prisma

target sebesar 6 m, jaringan *rts02* sebesar 5 m, jaringan *rts03* sebesar 4 m, dan jaringan *rts04* sebesar 3 m. Apabila pemantauan secara kontinu dilakukan selama 24 jam per-hari, tujuh hari per-minggu maka desain jaringan RTS dengan jumlah titik prisma target paling sedikit menghasilkan lebih banyak data pengukuran berulang dibandingkan dengan desain jaringan RTS dengan jumlah titik prisma target paling banyak.

3.5. Kepresisian jaringan RTS

Menurut Kuang, 1996, ukuran kualitas jaringan geodesi dapat diketahui dengan ukuran presisi berupa fungsi skalar yang didapatkan dari elemen matriks varian-kovarian koordinat. Hal itu berarti bahwa perhitungan nilai kriteria presisi tidak hanya dapat dilakukan pada jaringan GNSS, namun dapat diterapkan pada jaringan RTS. Analisis optimasi fungsi skalar dari kriteria optimasi presisi pada penelitian ini yaitu, *A-Optimality*, *D-Optimality*, *E-Optimality*, *S-Optimality*, dan *I-Optimality* dari nilai *eigen* masing-masing proses. Kualitas jaringan yang terbaik memiliki nilai hasil perhitungan kriteria presisi yang paling kecil atau minimum. Perbandingan nilai hasil perhitungan kriteria presisi pada desain jaringan RTS *rts01*, *rts02*, *rts03*, dan *rts04* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Kriteria presisi jaringan RTS

	Desain jaringan RTS	<i>rts01</i>
 Jumlah prisma target : 16	<i>A-Optimality</i>	0,037
	<i>D-Optimality</i>	0
	<i>E-Optimality</i>	0,002
	<i>S-Optimality</i>	0,002
	<i>I-Optimality</i>	2730,323
 Jumlah prisma target : 20	Desain jaringan RTS	<i>rts02</i>
	<i>A-Optimality</i>	0,047
	<i>D-Optimality</i>	0
	<i>E-Optimality</i>	0,002
	<i>S-Optimality</i>	0,002
 Jumlah prisma target : 24	Desain jaringan RTS	<i>rts03</i>
	<i>A-Optimality</i>	0,056
	<i>D-Optimality</i>	0
	<i>E-Optimality</i>	0,002
	<i>S-Optimality</i>	0,002
 Jumlah prisma target : 32	Desain jaringan RTS	<i>rts04</i>
	<i>A-Optimality</i>	0,074
	<i>D-Optimality</i>	0
	<i>E-Optimality</i>	0,002
	<i>S-Optimality</i>	0,002
	<i>I-Optimality</i>	2830,547

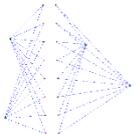
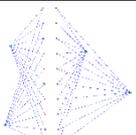
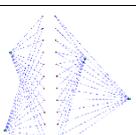
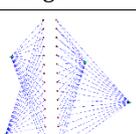
Tabel 3 menunjukkan mayoritas nilai kriteria presisi minimum terdapat pada desain jaringan RTS *rts01* dengan nilai *A-Optimality* sebesar 0,037, nilai *E-Optimality* sebesar

0,002, nilai *S-Optimality* sebesar 0,002, dan nilai *I-Optimality* sebesar 2730,323. Mayoritas nilai kriteria presisi maksimum terdapat pada jaring *rts01* dengan dengan nilai *A-Optimality* sebesar 0,074, nilai *E-Optimality* sebesar 0,002, nilai *S-Optimality* sebesar 0,002, dan nilai *I-Optimality* sebesar 2830,323. Nilai kriteria presisi yang paling mencerminkan keoptimalan suatu jaring RTS yaitu nilai *A-Optimality* dan *D-Optimality* karena dalam perhitungannya melibatkan seluruh nilai *eigen* matriks varian-kovarian pengamatan. Jaring *rts01* merupakan jaring yang memiliki panjang *baseline* yang cenderung sama (homogen) serta memiliki sifat fisik yang sama ke semua arah (isotropi) terbaik dibandingkan jaring *rts02*, *rts03*, dan *rts04*.

3.6. Keandalan jaring RTS

Kriteria keandalan seperti redundansi individu, keandalan dalam, dan keandalan luar dapat digunakan untuk memilih desain jaring geodetik optimal yang melibatkan pemilihan lokasi dan jumlah titik jaring, serta pemilihan jumlah dan bobot pengamatan. Oleh karena itu, perhitungan kriteria keandalan tidak hanya dilakukan pada jaring GNSS, namun dapat dilakukan pada jaring RTS. Tabel 4 merupakan nilai rata-rata kriteria keandalan jaring RTS yang terdiri atas kriteria redundansi individu, keandalan dalam, dan keandalan luar.

Tabel 4 Nilai rata-rata kriteria keandalan jaring GNSS

	Desain jaring RTS	
	<i>rts01</i>	
Jumlah prisma target : 16	Redundansi individu	0,500
	Keandalan dalam	0,122
	Keandalan luar	2,292
	Desain jaring RTS	
	<i>rts02</i>	
Jumlah prisma target : 20	Redundansi individu	0,500
	Keandalan dalam	0,127
	Keandalan luar	2,371
	Desain jaring RTS	
	<i>rts03</i>	
Jumlah prisma target : 24	Redundansi individu	0,500
	Keandalan dalam	0,130
	Keandalan luar	2,444
	Desain jaring RTS	
	<i>rts04</i>	
Jumlah prisma target : 32	Redundansi individu	0,500
	Keandalan dalam	0,135
	Keandalan luar	2,520

Berdasarkan Tabel 4, semua desain jaring RTS memiliki nilai hasil perhitungan yang memenuhi semua kriteria keandalan. Hal itu berarti semua desain jaring RTS dapat mendeteksi adanya kesalahan kasar, mempunyai sensitivitas tinggi adanya kesalahan tidak acak, dan mempunyai pengaruh terhadap adanya kesalahan tidak acak yang terdeteksi. Semua desain jaring RTS yang dibentuk memiliki nilai redundansi yang sama sehingga semua desain jaring RTS memiliki kemampuan yang sama tinggi untuk mendeteksi adanya kesalahan kasar. Jaring *rts01* merupakan jaring yang paling handal jika ditinjau dari kriteria keandalan dalam dan keandalan luar. Hal itu berarti jaring *rts01* memiliki sensitivitas yang paling tinggi terhadap kesalahan tidak acak serta memiliki pengaruh yang paling rendah terhadap adanya kesalahan tidak acak yang tidak terdeteksi dalam jaring. Tabel III.21 juga dapat dilihat bahwa penambahan jumlah titik prisma target pada desain jaring RTS berpengaruh terhadap kriteria keandalan jaring. Desain jaring RTS yang memiliki jumlah titik prisma target paling sedikit lebih handal daripada desain jaring RTS yang banyak. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Bergkvist, 2015) yang mengatakan bahwa jaring RTS paling optimal memiliki jumlah titik prisma target paling banyak. Pemantauan gerakan massa tanah secara kontinu dilakukan selama 24 jam per-hari, tujuh hari per-minggu sehingga desain jaring RTS dengan jumlah titik prisma target paling sedikit menghasilkan lebih banyak data pengukuran berulang dibandingkan dengan desain jaring RTS dengan jumlah titik prisma target paling banyak.

4. Kesimpulan

Desain jaring GNSS yang paling optimal yaitu jaring DG04. Hal ini ditunjukkan dari nilai kriteria presisi dan keandalan luar paling kecil serta nilai kriteria redundansi individu paling besar. Jaring DG04 memiliki *baseline* paling kompleks dibandingkan dengan desain jaring GNSS lainnya. Desain jaring RTS yang paling optimal yaitu jaring *rts01*. Hal ini ditunjukkan dari nilai kriteria presisi, keandalan dalam, dan keandalan luar paling kecil serta nilai kriteria redundansi individu paling besar. Jaring *rts01* memiliki jumlah titik prisma target paling banyak dibandingkan dengan desain jaring RTS lainnya. Hal itu berarti implementasi instalasi jaring pemantauan deformasi kontinu dengan kombinasi alat GNSS dan RTS di segmen km 15,9 sebaiknya menggunakan desain jaring GNSS DG04 dan desain jaring RTS *rts01*.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

6. Referensi

- Amiri-Simkooei, A. R., (2001). Strategy for Designing Geodetic Network with High Reliability and Geometrical Strength Criteria. *J. Surv. Eng.*, 127(3), 104-117.
- Amiri-Simkooei, A. R.; Asgari, J.; Zangeneh-Nejad, F.; dan Zaminpardaz, S., (2012). Basic Concepts of

- Optimization and Design of Geodetic Networks.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000081)
- Anonim, (2020). Leica TS16 Total Station – Survey it.
<https://leica-geosystems.com/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-ts16> (akses tanggal 20 November 2020).
- Bergkvist, J., (2015). Optimal Design of Network for Control of Total Station Instruments.
- DPUPKP, (2020). Sistem Irigasi Kalibawang, Penyedia Irigasi Utama Kulon Progo.
<https://dpu.kulonprogokab.go.id/detil/379/sistem-irigasi-kalibawang-penyedia-irigasi-utama-kulon-progo> (akses tanggal 30 November 2020).
- Dwidjaka, A., (2006). *Pengaruh Variasi Kadar Air terhadap Deformasi*. Disertasi, Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.
- Erol, S., Erol, B., dan Ayan, T., (2002), A General Review of the Deformation Monitoring Techniques and a Case Study: Analysing Deformations using GPS/Levelling, ISPRS Congress.
- Ghilani, C.D., (2010). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*: 5th Edition,
<https://doi.org/10.1002/9780470586266>.
- Grafarend, E.W., (1974), Optimization of Geodetic Networks, Bolletino di Geodesia a Science Affini, 351-406.
- Kuang, S., (1991). *Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes*. PhD. dissertation. Tech. Rep. 157, Dept. of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.
- Kuang, S., (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications*. Ann Arbor Press, Chelsea Michigan.
- Leick, A., (2004), *GPS Satellite Surveying*, 3rd Edition, John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey.
- Ma'ruf, B., (2015). *Pola Geometri Rayapan Tanah di Segmen Km 15,9 Saluran Irigasi Kalibawang Kulon Progo dengan Metode Kalman Filtering*. Disertasi, Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada.
- Sanjaya, M.D.A., (2017). Evaluasi Aspek Geometrik Jaring Kontrol GNSS dan RTS pada Pemantauan Deformasi di Kawasan Bendungan Jatigede. Tesis, Teknik Geodesi, Universitas Gadjah Mada.
- Sasongko, R., (2018). Survey Rekayasa Konstruksi: Survey Rekayasa Konstruksi. Vol. 1. Malang: Polinema Press.
- Song, Z., Zhao, C., Pu, H., dan Li, X., (2016). Configuration Analysis of Two-Dimensional Resection Networks.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.19435428.00003](https://doi.org/10.1061/(asce)su.19435428.00003).
- Wolf, P.R. dan Ghilani C.D., (2010). *Adjustment Computations Statistics and Least Squares in Surveying and GIS*, Jhon Wiley and Son Inc., New York.
- Yalçinkaya, M. dan Teke, K., (2006). *Optimization of GPS Networks with Respect to Accuracy and Reliability Criteria*, 3.