



Comparison of Horizontal Displacement from Horizontal Control Network Adjustment Result Using Observation Model and Time-Variant Methods (Case Study: Horizontal Control Network of Borobudur Temple, Epoch 2002, 2003 and 2012)

¹Een Lujainatul Isnaini, ²Dwi Lestari

¹ Alumni Departemen Teknik Geodesi FT-UGM, Yogyakarta, Indonesia

² Staf Pengajar Departemen Teknik Geodesi FT-UGM, Yogyakarta, Indonesia

Article History:

Received 31 August 2018

Received in revised form 19 September 2018

Accepted 19 September 2018

Available online 25

September 2018

Keywords:

Borobudur, least square adjustment, observation model, time-variant method, 2D horizontal displacement.

Corresponding Author:

Dwi Lestari

Email: dwilestari@ugm.ac.id

ABSTRACT. Borobudur Temple is the biggest Buddhist Temple in the world protected by UNESCO. Therefore, the periodical maintenance of Borobudur temple become important, deformation study through displacement analysis can be applied for it, by conducting Geodetic observation periodically. The design for Borobudur horizontal monitoring network is a relative one, the control point and monitoring points are in the deformation area. Therefore, the effect of position changes of the control point used in the horizontal network for displacement analysis of Borobudur needs to be considered, as it affects the result for the least square adjustment of the monitoring points. Two different adjustment methods used to overcome this problem, Least square adjustment using observation model and time-variant methods. This research aims to compare the horizontal displacement analysis of Borobudur resulted from these two adjustment methods. First by giving position correction for the control point at each epoch according to its displacement in least square adjustment using observation model. The second by computing position and velocity vector directly using time-variant method. The comparison of 2D horizontal displacement vector analysis was done by using vector velocity of 2D horizontal displacement from the analysis of the two adjustment methods on the interval displacement epochs between 2002 and 2003 and between 2002 and 2012. This research showed the vector magnitude and the accuration of the displacement from the analysis resulted from the two adjustment methods was different. The resulted of least square adjustment using observation model with correction of control point showed that there was significant increase in magnitude of displacement vector of the monitoring points. Displacement analysis between 2002 and 2003 the magnitude in average were 7.97 mm and the analysis between 2002 and 2012 were 37.78 mm with consistent displacement direction of the both interval displacement to the northwest. The Time-Variant adjustment method showed an increase in the vector velocity of 2D horizontal displacement from 0.29 mm/year to 0.32 mm/year with different displacement direction. The vector magnitude of the displacement from time variant method was smaller than observation model and the standard deviation for the horizontal displacement from time variant method was slightly bigger about 0.5 mm compared to the observation model.

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

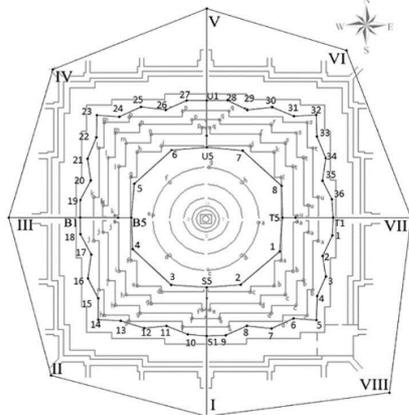
1. Pendahuluan

Candi Borobudur merupakan candi Buddha terbesar di dunia dan telah dijadikan sebagai cagar budaya warisan dunia yang dilindungi oleh UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). Untuk itu perlu adanya upaya pelestarian dan pemantauan Candi Borobudur secara berkala, salah satunya dengan studi deformasi berupa analisis pergeseran dengan melakukan pengamatan geodetik secara berkala pada jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur yang telah dipasang oleh Balai Konservasi Borobudur (BKB). Analisis deformasi bertujuan untuk menentukan kuantifikasi pergeseran dan parameter-parameter deformasi, yang mempunyai karakteristik dalam ruang dan waktu (Kuang, 1996)

Desain jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur dilakukan pada kerangka dasar berjenis kerangka dasar relatif, dimana titik ikat dan titik pantau berada pada area terdeformasi. Titik-titik objek terletak pada area pengamatan yang tidak stabil dan dapat mengalami perubahan posisi (Kuang, 1996). Untuk itu perlu adanya perhatian khusus terhadap pengaruh perubahan posisi dari titik ikat yang digunakan pada analisis pergeseran jaring pantau horizontal Candi Borobudur, karena akan mempengaruhi hasil perataan Hitung Kuadrat Terkecil (HKT) metode parameter untuk titik pantau. Desain jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur diilustrasikan pada Gambar 1.1.

Penyelesaian HKT dapat menghasilkan estimasi nilai parameter dan meminimalkan kesalahan acak secara sekaligus, dengan cara tertentu sehingga jumlah kuadrat

residualnya (V^{TPV}) minimum, dan tidak ada nilai hasil perataan lain yang jumlah kuadrat residualnya lebih kecil (Apriyanti, 2014). Salah satu metode perataan yaitu dengan metode parameter. Perataan HKT metode parameter terkendala minimum (*minimum constrain*) membutuhkan titik ikat yang dijadikan sebagai referensi dalam penentuan posisi/koordinat dari setiap titik pantau, serta untuk memenuhi kekurangan *rank* nya.



Gambar 1.1 Desain jaring pemantauan deformasi horizontal Candi Borobudur (Sumarno, 2012, dalam Iskandar, 2013)

HKT terkendala minimum adalah hitung perataan dengan jumlah unsur diketahui (referensi) sebanyak kekurangan *rank* nya (Caspary, 2000). Pengasumsian titik ikat sebagai titik yang stabil/*fixed* (tidak mengandung kesalahan dan tidak mengalami perubahan) tidak sesuai dengan desain jaring pemantauan horizontal yang digunakan yaitu kerangka dasar relatif. Seperti pada penelitian yang telah dilakukan oleh Lestari (2015) pada disertasinya yang dapat mendeteksi adanya pergeseran horizontal internal jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur pada tahun 2002 dan 2012 pada titik BOR1 berdasarkan data *Global Positioning System* (GPS) sebesar 12,0 mm dengan arah pergeseran sebesar 188,5359 derajat atau ke arah barat daya, ketika titik tersebut BOR1 (disebut titik I pada jaring terestris) dijadikan sebagai titik ikat yang dianggap *fixed*.

Perataan HKT metode parameter terkendala minimum yang umum digunakan belum cukup untuk menyelesaikan permasalahan dalam mempertimbangkan pergeseran dari titik ikat. Agar perataan HKT metode parameter terkendala minimum dapat digunakan dalam pendefinisian titik pantau pada setiap kala, perlu adanya evaluasi stabilitas titik ikat, dengan memberikan koreksi pada titik ikat yang mengalami pergeseran posisi berupa kecepatan pergeseran posisi horizontal dua dimensi.

Perataan HKT dengan model *time-variant* menggunakan kecepatan pergeseran dari titik terhadap perubahan waktu (Han, dkk., 2014). Hitung perataan *time-variant* adalah metode perataan dengan memasukan kecepatan pergeseran pada interval waktu tertentu sebagai parameternya, selain parameter koordinat titik pantau yang akan ditentukan, termasuk juga titik ikat yang digunakan. Hitung perataan metode *time-variant* merupakan salah satu metode perataan yang menerapkan koreksi pada titik ikat yang digunakan. Metode *time-variant* didasarkan pada asumsi bahwa titik ikat dan titik pantau mengalami pergerakan dengan kecepatan yang

berbeda pada pengukuran setiap kalinya (Han, dkk., 2014). Prinsip perhitungan HKT *time-variant* sama dengan prinsip HKT metode parameter berbobot, dengan memperhitungkan bobot untuk setiap parameter yang ditentukan. Dengan menggunakan pendekatan terpadu untuk perhitungan kuadrat terkecil, maka pergerakan titik ikat dan titik pantau terhadap waktu tertentu dapat ditentukan secara bersamaan (Han, dkk., 2014).

Berbagai penelitian tentang perataan menggunakan metode *time-variant* diantaranya dilakukan oleh Han, dkk., (2014) dan Sari (2016). Penelitian yang dilakukan oleh Han, dkk., (2014) menggabungkan model *time-variant* dengan metode hitung kuadrat terkecil dalam perataan jaring beda tinggi, menunjukkan adanya pergeseran secara vertikal pada titik ikat jaring pantau yang digunakan, dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa ketelitian dari tinggi titik ikat pada studi kasus yang dilakukan menggunakan perataan model *time-variant* lima kali lebih tinggi dari hasil perataan dengan model statis tanpa koreksi ketinggian. Penelitian yang dilakukan oleh Sari (2016) dengan studi kasus jaring pemantauan Candi Borobudur. Model persamaan *time-variant* dari pengamatan beda tinggi memuat tinggi dan kecepatan pergeseran titik pada kala tertentu, dengan hasil nilai simpangan baku pergeseran vertikal hasil hitung perataan kuadrat terkecil metode *time-variant* lebih kecil 1,5 kali dari simpangan baku pergeseran hasil hitungan dengan metode parameter dengan koreksi titik ikat.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum ada suatu penelitian yang menerapkan HKT metode *time-variant* untuk jaring pemantauan horizontal. Untuk mengetahui tingkat ketelitian dari hitungan perataan HKT metode parameter terkendala minimum dengan koreksi posisi horizontal titik ikat yang mengalami pergeseran dan perataan HKT metode *time-variant*, perlu dilakukannya penelitian tentang perbandingan dari hasil kedua hitung perataan tersebut. Penelitian ini membandingkan besar dan arah vektor pergeseran horizontal beserta ketelitiannya antara hasil perataan kedua metode pada jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

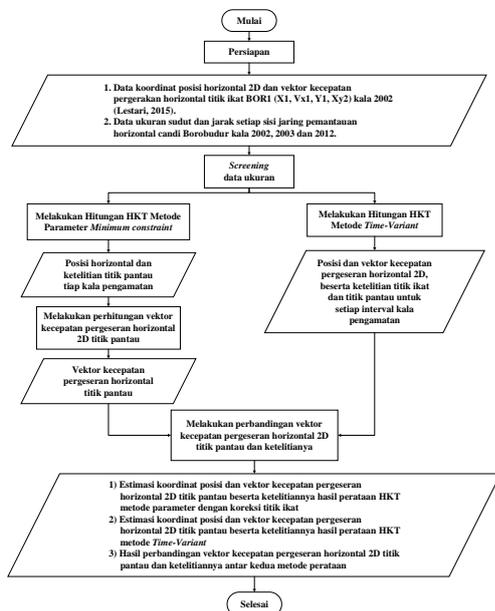
Data yang digunakan pada penelitian ini berupa data titik ikat dan data pengamatan terestris metode poligon kala pengamatan tahun 2002, 2003 dan 2012, yang didapatkan dari hasil pengukuran oleh Balai Konservasi Borobudur dan Lestari (2015). Data titik ikat ini berupa data koordinat posisi horizontal 2D beserta kecepatan pergeseran dari titik ikat BOR1 kala 2002, yang didapatkan dari hasil penelitian Lestari (2015). Koordinat posisi horizontal 2D titik BOR1 dalam sistem koordinat kartesi 2D, dengan sistem proyeksi *Universal Traverse Mercator* (UTM) Zona 49S.

Objek dari penelitian ini berupa Jaring Pemantauan Horizontal Candi Borobudur yang berlokasi di Kabupaten Magelang, Jawa Tengah, Indonesia.

2.2. Metodologi

Penelitian ini terdiri atas tiga tahapan utama yaitu

persiapan, tahap pengolahan data dan tahap perbandingan pergeseran horizontal. Tahap pengolahan data terbagi atas perhitungan perataan jaringan pantau horizontal Candi Borobudur dengan metode HKT metode parameter dan metode *Time-Variant*. Tahapan penelitian dijelaskan lebih rinci yang ditampilkan dalam diagram alir pelaksanaan penelitian pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

2.2.1. Hitung Perataan HKT Metode Parameter dengan Koreksi Titik Ikat Kala Terpisah

Perataan HKT metode parameter dilakukan secara terpisah untuk setiap kala pengukuran. Titik ikat yang digunakan pada perataan ini yaitu titik BOR1. Koordinat posisi titik BOR1 kala 2002 didapat dari hasil penelitian Lestari (2015). Koordinat posisi titik BOR1 kala 2003 dan 2012 didapat dari hasil koreksi titik BOR1 kala 2002 terhadap kecepatan pergeseran horizontal interval kala 2002 dan 2012 yang disesuaikan dengan kala yang ditentukan. Koordinat posisi horizontal 2D titik BOR1 beserta besar pergeserannya ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Koordinat titik BOR1 beserta kecepatan pergeserannya kala 2002 (Lestari, 2015)

Titik	Koordinat GPS (sistem UTM) 2D		Pergeseran horizontal internal data GPS tahun 2002 dan 2012		
	E (m)	N (m)	dE (mm)	dN (mm)	d (mm)
BOR1	412178,20908	9158892,23992	-11,8	-1,8	12,0

Salah satu upaya untuk menghilangkan kesalahan yang terkandung dalam data pengamatan adalah dengan memberikan bobot pada setiap data pengamatan yang digunakan dalam hitung perataan. Bobot pengamatan merupakan suatu besaran dari pengukuran presisi yang relatif antar besaran ukuran pengamatan, dengan nilai yang berbanding terbalik dari nilai varian ukuran (Mikhail & Gracie, 1981). Nilai varian ukuran pengamatan jarak dan sudut yang digunakan untuk bobot pengamatan

ditentukan menggunakan model varian (Mikhail & Gracie, 1981).

Pada perataan HKT metode parameter, nilai parameter ditentukan dengan memiliki hubungan linier. Untuk itu jika tidak linier, maka harus dilinierkan. Proses linierisasi dengan menggunakan deret *Taylor* (Ghilani, 2010). Hubungan linier dari parameter dan ukuran pengamatan ditunjukkan pada model persamaan pengamatan. Jumlah persamaan pengamatan sama dengan jumlah pengukuran yang dilakukan, dengan jumlah pengamatan harus melebihi jumlah parameter yang akan ditentukan nilainya. Hal ini sesuai dengan karakteristik dari hitung perataan, dimana mengharuskan adanya ukuran lebih (Ghilani, 2010). Pada tahapan ini akan ditentukan estimasi nilai koordinat posisi horizontal 2D titik-titik pantau jaringan pemantauan horizontal Candi Borobudur beserta ketelitiannya yang merujuk pada Ghilani (2010). Hasil dari perataan HKT metode parameter ini digunakan untuk menghitung pergeseran horizontal 2D titik pantau dari jaringan pemantauan Candi Borobudur.

Setelah proses hitung perataan, kemudian dilakukan uji statistik terhadap data ukuran pengamatan yang digunakan setiap kala pengamatan berupa uji global. Uji global menggunakan nilai varian aposteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) dan membandingkannya dengan nilai varian apriori estimasi (σ_0^2), menggunakan fungsi distribusi tabel *Fisher* (*Fisher test*) dengan derajat kepercayaan 95%. Kriteria penolakan hipotesis nol mengikuti persamaan (1) berikut.

$$\frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} > F_{1-\alpha_0/2, \infty, r} \quad (1)$$

2.2.2. Penentuan Vektor Kecepatan Pergeseran Horizontal 2D Titik Pantau

Tahapan penentuan vektor pergeseran horizontal dilakukan setelah tahap HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat pada setiap interval kala pengamatan 2002 dan 2003 serta 2002 dan 2012. Tahap ini terdiri atas dua tahapan pokok yaitu perhitungan vektor pergeseran horizontal antara dua kala pengamatan dan uji signifikansi pergeseran horizontal 2D untuk mengetahui signifikansi pergeseran titik pantau yang terindikasi pada setiap interval kala pengamatan. Vektor pergeseran horizontal 2D titik pantau (d) beserta ketelitiannya yang ditunjukkan dalam nilai varian kovarian pergeseran (\sum_{dd}) didapat dari perhitungan menggunakan persamaan (2) dan (3).

$$d = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{(X_{t+\Delta t} - X_t)^2 + (Y_{t+\Delta t} - Y_t)^2} \quad (2)$$

$$\sum_{dd} = J_d \cdot \sum_{T_t, T_{t+\Delta t}} \cdot J_d^T \quad (3)$$

Uji signifikansi pergeseran dilakukan dengan menggunakan tabel distribusi tabel *t-student* dengan derajat kepercayaan 95%. Kriteria penolakan hipotesis nol mengikuti persamaan (4) berikut.

$$\frac{d_i}{\sigma_{d_i}} > T_{(\alpha_0/2; r)} \quad (4)$$

2.2.3. Hitung Perataan HKT Metode *Time-Variant*

Salah satu metode hitung kuadrat terkecil (HKT) adalah hitung perataan *time-variant*. Model *Time-variant* merupakan model dengan menggunakan kecepatan pergeseran dari titik terhadap perubahan waktu (Han, dkk.,

2014). Hitung perataan *time-variant* adalah metode perataan dengan memasukan kecepatan pergeseran pada interval waktu tertentu sebagai parameternya, selain parameter koordinat titik pantau yang akan ditentukan, termasuk juga titik ikat yang digunakan. Metode *time-variant* didasarkan pada asumsi bahwa titik ikat dan titik pantau mengalami pergerakan dengan kecepatan yang berbeda pada pengukuran setiap kalanya (Han, dkk., 2014).

Persamaan pengamatan yang digunakan pada perataan dengan metode ini berupa persamaan jarak dan sudut, yang memuat parameter yang ditentukan yaitu estimasi koordinat posisi horizontal 2D dan kecepatan pergeserannya sesuai dengan interval waktu yang digunakan. Persamaan jarak (7) dan sudut (8) dibentuk dari persamaan (5) dan (6).

$$\Delta X_{ij,t_k} = [X_{j,t_j} + V_j(t_k - t_j)] - [X_{i,t_i} + V_i(t_k - t_i)] \quad (5)$$

$$\Delta Y_{ij,t_k} = [Y_{j,t_j} + V_j(t_k - t_j)] - [Y_{i,t_i} + V_i(t_k - t_i)] \quad (6)$$

$$d_{ij,t_k} = \sqrt{\Delta X_{ij,t_k}^2 + \Delta Y_{ij,t_k}^2} \quad (7)$$

$$\beta_{ij,t_k} = \Delta \alpha_{ij,t_k} - \Delta \alpha_{ik,t_k} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta X_{ij,t_k}}{\Delta Y_{ij,t_k}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\Delta X_{ik,t_k}}{\Delta Y_{ik,t_k}} \right) \quad (8)$$

Keterangan:

$\Delta X_{ii,t_k}$: beda absis titik pantau i dan j hasil ukuran kala t_k

$\Delta Y_{ii,t_k}$: beda ordinat titik pantau i dan j hasil ukuran kala t_k

$X_{i,t}$ dan $X_{j,t}$: absis titik pantau i dan j,

$Y_{i,t}$ dan $Y_{j,t}$: ordinat titik pantau i dan j,

V_i dan V_j : kecepatan pergeseran horisontal titik pantau i dan j,

t_i dan t_j : kala pendefinisian titik pantau i dan j,

t_k : kala pengukuran beda absis ΔX_{ij} dan beda ordinat ΔY_{ij} ,

Prinsip perhitungan HKT *time-variant* sama dengan prinsip HKT metode parameter berbobot, dengan memperhitungkan bobot untuk setiap parameter yang ditentukan. Penentuan estimasi parameter beserta ketelitiannya untuk hitung perataan metode *time-variant* merujuk pada penentuan estimasi parameter beserta ketelitian dari metode parameter berbobot menurut Ghilani (2010). Dengan menggunakan pendekatan terpadu untuk perhitungan kuadrat terkecil, maka pergerakan titik ikat dan titik pantau terhadap waktu tertentu dapat ditentukan secara bersamaan (Han, dkk., 2014).

Pendekatan koordinat posisi horizontal 2D dan kecepatan pergeseran horizontal untuk titik ikat kedua interval kala pengamatan menggunakan koordinat posisi horizontal 2D dan kecepatan pergeseran horizontal titik ikat dari penelitian Lestari (2015) yang ditampilkan pada Tabel 2.1. Pendekatan koordinat posisi horizontal 2D titik pantau untuk kedua interval kala pengamatan ditentukan menggunakan hasil HKT metode parameter kala pengamatan 2002, dan untuk pendekatan kecepatan pergeseran horizontalnya menggunakan nilai sebesar 0 m/tahun dengan asumsi belum terjadi pergeseran horizontal pada titik pantau.

Pembobotan yang digunakan pada hitung perataan metode ini terdapat dua jenis yaitu bobot untuk ukuran pengamatan (P) dan bobot untuk parameter (W_{xx}). Bobot

ukuran pengamatan ditentukan dengan cara yang sama pada hitung perataan metode parameter pada umumnya. Bobot untuk parameter (W_{xx}) terdiri atas elemen W_1 , W_2 dan W_3 yang merupakan matriks bobot untuk komponen posisi horizontal 2D (X, Y) dan kecepatan pergeseran (V_x , V_y) horizontal titik ikat dan titik pantau untuk setiap kala pengamatan. W_1 adalah bobot untuk komponen posisi horizontal 2D (X, Y) dan kecepatan pergeseran (V_x , V_y) horizontal titik ikat, sedangkan W_2 dan W_3 adalah bobot untuk komponen posisi horizontal 2D (X, Y) dan kecepatan pergeseran (V_x , V_y) horizontal setiap titik pantau. Penyusunan matriks W_{xx} dapat dituliskan pada persamaan (9) dan (10) berikut.

$$W_{xx} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 \\ 0 & 0 & W_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$W_1 = \sigma_0^2 \Sigma_{XX}^{-1} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \sigma_{X_1}^2 & \sigma_{X_1 Y_1} & \dots & \sigma_{X_n Y_n} \\ \vdots & \sigma_{Y_1}^2 & \dots & \sigma_{Y_1 Y_n} \\ \text{symm.} & \dots & \ddots & \vdots \\ & & & \sigma_{Y_n}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

Sama seperti hitung perataan pada umumnya, setelah proses hitung perataan metode ini dilakukan uji statistik terhadap data ukuran pengamatan yang digunakan setiap kala pengamatan berupa uji global. Uji global menggunakan nilai varian aposteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) dan membandingkannya dengan nilai varian apriori estimasi (σ_0^2), menggunakan fungsi distribusi tabel Fisher (*Fisher test*) dengan derajat kepercayaan 95%, dengan kriteria penolakan hipotesis nol mengikuti persamaan (1).

2.2.4. Perbandingan Vektor Pergeseran Horizontal 2D Titik Pantau Hasil Analisis Pergeseran Kedua Metode Perataan

Analisis perbandingan pergeseran horizontal 2D titik pantau dari kedua metode dilakukan untuk mengetahui perbedaan hasil pergeseran dari kedua metode yang meliputi besar pergeseran beserta ketelitiannya dan pola arah pergeseran dari kedua metode. Analisis perbandingan yang dilakukan berdasarkan interval kala pergeseran dari kedua metode yaitu pada interval kala tahun 2002 dan 2003 serta tahun 2002 dan 2012. Perbandingan kecepatan pergeseran dan simpangan bakunya diilustrasikan dalam bentuk grafik untuk setiap titik pantau. Berdasarkan grafik perbandingan kecepatan pergeseran dan nilai simpangan baku tiap titik pantau pada setiap interval kala pergeseran, kemudian dilakukan analisis terhadap pola dari nilai setiap titik pantau untuk kedua interval kala pergeseran.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari penelitian ini terdiri atas tiga topik utama yaitu hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat, hasil perataan HKT metode *time-variant* dan perbandingan vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D hasil analisis pergeseran kedua metode perataan.

3.1. Hasil Hitung Kuadrat Terkecil Metode Parameter dengan Koreksi Titik Ikat

Hasil dari perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat berupa estimasi koordinat posisi horizontal 2D titik pantau beserta nilai simpangan bakunya. Estimasi koordinat posisi horizontal 2D titik pantau jaring

pantau horizontal 2D Candi Borobudur dari hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat berada dalam sistem koordinat kartesi 2D dengan sistem proyeksi *Universal Traverse Mercator* (UTM) Zona 49S. Nilai simpangan baku rata-rata estimasi koordinat posisi titik pantau untuk komponen *Easting* (E) dan *Northing* (N) berturut-turut pada kala 2002 sebesar 0,022 mm dan 0,018 mm, pada kala 2003 sebesar 0,002 mm dan 0,002 mm, dan pada kala 2012 sebesar 0,001 mm dan 0,0004 mm. Berdasarkan nilai simpangan baku dari ketiga kala pengamatan, pada kala 2002 memiliki nilai simpangan baku yang lebih besar dari kedua kala lainnya. Nilai simpangan baku yang kecil dari koordinat estimasi titik pantau pada kala 2003 dan 2012 karena dipengaruhi oleh nilai varian aposteori yang lebih kecil dibanding pada kala 2002, dan diduga karena adanya koreksi pada titik ikat yang digunakan. Hasil perataan yang dilakukan pada setiap kala pengamatan juga menghasilkan nilai varian aposteori jaring pemantauan horizontal 2D Candi Borobudur. Nilai varian aposteori pada kala 2002 sebesar $2,5374 \times 10^{-14}$, sedangkan pada kala 2003 sebesar $3,0431 \times 10^{-16}$ dan 2012 sebesar $2,3349 \times 10^{-17}$.

Setelah dilakukan hitung perataan, dilakukan evaluasi terhadap data pengamatan dengan melakukan uji statistik berupa uji global, untuk mendeteksi adanya pengaruh kesalahan tak acak pada data pengamatan hasil perataan setiap kala. Hasil dari ketiga pengujian pada setiap kala pengamatan disimpulkan bahwa hipotesis nol pengujian diterima. Hal ini mengindikasikan bahwa data pengamatan hasil perataan tidak mengandung kesalahan tak acak yang dapat mempengaruhi proses hitung perataan.

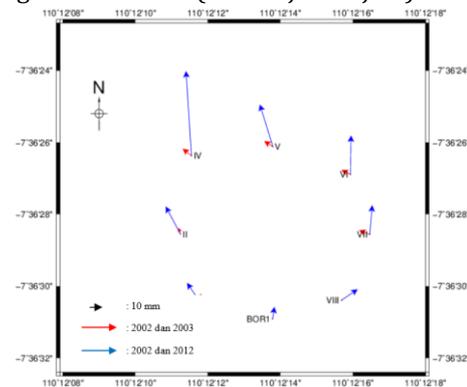
3.1.1. Hasil Analisis Pergeseran Horizontal 2D Titik Pantau

Hasil analisis pergeseran horizontal 2D titik pantau berupa vektor pergeseran horizontal 2D (d) dan nilai simpangan bakunya (σ_d) yang ditentukan dengan menggunakan data koordinat titik-titik pantau (parameter terkoreksi), matriks varian kovarian parameter dari hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat untuk tiap kala pengamatan. Penentuan vektor pergeseran horizontal dalam penelitian ini dilakukan pada interval kala pengamatan tahun 2002 dan 2003 serta 2002 dan 2012.

Pola pergeseran horizontal titik-titik pantau Candi Borobudur dari masing-masing periode pergeseran yang dikaji diilustrasikan pada Gambar 3.1. Pada gambar tersebut besar dan arah pergeseran horizontal masing-masing titik pantau untuk setiap periode yang dikaji digambarkan dalam bentuk vektor pergeseran. Pola pergeseran ini mengacu pada kala awal yaitu kala 2002.

Berdasarkan ilustrasi vektor pergeseran horizontal titik pantau pada setiap periode pergeseran 1 dan 10 tahun sejak kala 2002 dalam Gambar 3.1 terlihat bahwa pola pergeseran horizontal titik-titik pantau dominan bergerak ke arah barat laut dan timur laut untuk kedua periode. Pola pergeseran horizontal 2D titik pantau pada interval kala 2002 dan 2003 dominan ke arah barat laut, dengan besar vektor pergeseran yang relatif seragam. Pola pergeseran horizontal 2D titik pantau pada interval kala 2002 dan 2012 dominan ke arah barat laut, namun pada titik VI, VII, VIII dan BOR1 terjadi perubahan arah pergeseran ke arah

timur laut, dengan besar vektor pergeseran lebih bervariasi dibanding pada interval kala 2002 dan 2003. Jika diperhatikan, arah pergeseran horizontal setiap titik pantau pada interval kala 2002 dan 2012 mengalami perubahan arah searah jarum jam. Hal ini sesuai dengan hasil studi yang dilakukan Lestari (2015) bahwa pergerakan titik-titik pantau untuk selang waktu yang lama akan mengarah ke kanan (searah jarum jam).



Gambar 3.1 Pola pergeseran horizontal titik pantau mengacu pada kala 2002 hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat

Adapun *magnitude* vektor pergeseran horizontal 2D rerata untuk interval kala 2002 dan 2003 sebesar 7,97 mm dengan vektor kecepatan pergeseran 7,97 mm/tahun, sementara *magnitude* vektor pergeseran horizontal 2D rerata untuk interval kala 2002 dan 2012 sebesar 37,78 mm dengan vektor kecepatan pergeseran 3,78 mm/tahun. Besar vektor pergeseran rerata dari titik pantau pada kedua interval kala pergeseran tidak linier dengan besar vektor pergeseran horizontal 2D pada interval kala 2002 dan 2012 bukan sepuluh kali dari besar vektor pergeseran pada interval kala 2002 dan 2003. Berdasarkan nilai *magnitude* pergeseran rerata tiap interval pengamatan didapatkan bahwa laju atau kecepatan pergeseran horizontal jaring pantau Candi Borobudur yang digunakan tidak mengalami peningkatan dan cenderung mengalami penurunan. Hal ini dimungkinkan bisa dikaitkan dengan peristiwa gempa bumi yang terjadi di Yogyakarta pada tahun 2006, namun perlu dikaji lebih lanjut (Lestari, 2015).

3.2. Hasil Hitung Kuadrat Terkecil Metode *Time-Variant*

Hasil dari perhitungan perataan metode *time-variant* adalah estimasi parameter beserta ketelitiannya. Parameter dalam metode ini adalah estimasi koordinat posisi horizontal 2D (E, N) dan vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D (V_E , V_N) beserta nilai simpangan baku masing-masing parameter. Estimasi koordinat posisi horizontal 2D titik ikat maupun titik pantau jaring pantau horizontal 2D Candi Borobudur dari hasil perataan HKT metode ini berada dalam sistem koordinat kartesi 2D dengan sistem proyeksi *Universal Traverse Mercator* (UTM) Zona 49S.

Penelitian ini melakukan penyusunan model matematis dengan interval kala pengamatan 2002 dan 2003 serta 2002 dan 2012. Hasil dari perataan HKT metode *time-variant* dengan menyusun model matematis pada interval

kala 2002 dan 2003 adalah estimasi koordinat posisi dan vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D titik pantau pada kala 2003, sementara hasil dari perataan HKT metode *time-variant* dengan menyusun model matematis pada interval kala 2002 dan 2012 adalah estimasi koordinat posisi dan vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D titik pantau pada kala 2012.

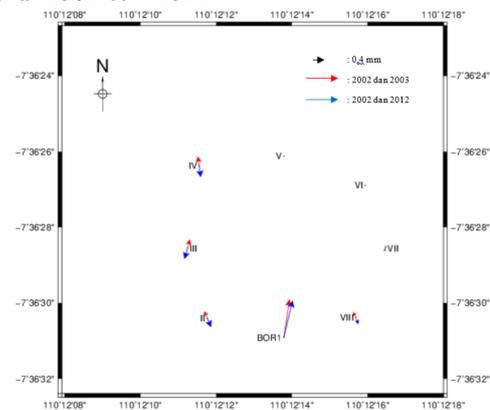
Setelah dilakukan hitung perataan, dilakukan evaluasi terhadap data pengamatan dengan melakukan uji global. Hasil dari kedua pengujian pada setiap kala pengamatan disimpulkan bahwa hipotesis nol pengujian diterima. Hal ini mengindikasikan bahwa data pengamatan hasil perataan tidak mengandung kesalahan tak acak yang dapat mempengaruhi proses hitung perataan dan model matematis yang digunakan pada HKT metode *time-variant* telah sesuai.

Berdasarkan nilai simpangan baku dari kedua interval kala pengamatan, pada kala 2003 hasil perataan dengan interval kala 2002 dan 2003 memiliki nilai simpangan baku yang lebih kecil dari kala 2012 hasil perataan dengan interval kala 2002 dan 2012. Nilai simpangan baku yang kecil dari estimasi koordinat posisi titik pantau pada interval kala 2002 dan 2003 karena dipengaruhi oleh nilai varian a posteriori yang lebih kecil dibanding pada interval kala 2002 dan 2012. Nilai varian a posteriori yang dihasilkan dari perataan pada interval kala 2002 dan 2003 sebesar $3,03 \times 10^{-6}$ dan pada interval kala 2002 dan 2012 sebesar $6,06 \times 10^{-4}$. Nilai simpangan baku rata-rata dari estimasi koordinat posisi titik ikat dan titik pantau pada interval kala 2002 dan 2003 untuk komponen *Easting* (E) dan *Northing* (N) berturut-turut sebesar 0,009 mm dan 0,003 mm. Nilai simpangan baku rata-rata dari estimasi koordinat posisi titik ikat dan titik pantau pada interval kala 2002 dan 2012 untuk komponen *Easting* (E) dan *Northing* (N) berturut-turut sebesar 0,172 mm dan 0,06 mm.

Besar vektor pergeseran horizontal 2D dan simpangan baku dari titik ikat dan titik pantau pada kedua interval kala pergeseran berbeda satu sama lain. Besar *magnitude* vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D pada interval kala 2002 dan 2003 dalam rentang 0,01 s.d 1,195 mm/tahun, dengan nilai simpangan baku pergeseran horizontal dalam rentang 0,012 s.d 0,705 mm/tahun. Besar *magnitude* vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D pada interval kala 2002 dan 2012 dalam rentang 0,014 s.d 1,17 mm/tahun, dengan nilai simpangan baku pergeseran horizontal dalam rentang 0,131 s.d 1,011 mm/tahun. Vektor kecepatan pergeseran horinzontal 2D dan nilai simpangan baku dari titik pantau (titik II hingga VIII) pada kedua interval kala pergeseran sangat kecil jika dibandingkan dengan titik ikat BOR1, hal ini diduga karena adanya pengaruh nilai pendekatan untuk estimasi kecepatan pergeseran setiap komponen pergeseran, sementara pada titik BOR1 menggunakan pendekatan estimasi kecepatan pergeseran menggunakan nilai kecepatan pergeseran titik BOR1 dari hasil kajian Lestari (2015).

Pola pergeseran horizontal titik-titik pantau Candi Borobudur dari masing-masing interval kala pergeseran yang dikaji dengan metode *time-variant* diilustrasikan pada

Gambar 3.2 Pada gambar tersebut besar dan arah pergeseran horizontal masing-masing titik pantau untuk setiap periode yang dikaji digambarkan dalam bentuk vektor pergeseran. Pola pergeseran ini mengacu pada kala awal yaitu kala 2002. Pola pergeseran ini dibentuk berdasarkan besar dan arah dari vektor kecepatan pergeseran horizontal 2D titik ikat dan titik pantau dari kedua interval kala pergeseran yaitu interval kala 2002 dan 2003 serta 2002 dan 2012.



Gambar 3.2 Pola pergeseran horizontal titik pantau mengacu pada kala 2002 hasil perataan HKT metode *time-variant*

Berdasarkan ilustrasi vektor pergeseran titik pantau pada Gambar 3.2 untuk setiap periode pergeseran 1 dan 10 tahun sejak 2002, terlihat bahwa pola pergeseran kedua periode berbeda dan saling berkebalikan, terkecuali untuk titik BOR1 yang relatif sama ke arah timur laut. Pola pergeseran horizontal 2D titik pantau pada interval kala 2002 dan 2003 dominan ke arah barat laut, dengan besar vektor pergeseran yang relatif bervariasi. Pola pergeseran horizontal 2D titik pantau pada interval kala 2002 dan 2012 dominan ke arah tenggara, dengan besar vektor pergeseran relatif bervariasi.

Adapun *magnitude* vektor pergeseran rerata untuk interval kala 2002 dan 2003 sebesar 0,29 mm/tahun, sementara *magnitude* pergeseran rerata untuk interval kala 2002 dan 2012 sebesar 0,32 mm/tahun. Besar vektor pergeseran rerata dari titik pantau pada kedua interval kala pergeseran tidak linier dengan besar vektor pergeseran horizontal 2D pada interval kala 2002 dan 2012 bukan sepuluh kali dari besar vektor pergeseran pada interval kala 2002 dan 2012. Berdasarkan nilai *magnitude* pergeseran rerata tiap interval pengamatan didapatkan bahwa laju atau kecepatan pergeseran horizontal jaring pantau Candi Borobudur yang digunakan mengalami peningkatan sebesar 0,03 mm/tahun.

3.3. Perbandingan Analisis Vektor Kecepatan Pergeseran Horizontal 2D Hasil HKT antara Metode Parameter dengan Koreksi Titik Ikat dan Metode *Time-Variant*

3.3.1. Perbandingan Vektor Kecepatan Pergeseran dan Simpangan Baku Pergeseran pada Interval Kala Tahun 2002 dan 2003

Perbandingan vektor kecepatan pergeseran dan simpangan baku pergeseran setiap titik pantau pada interval kala tahun 2002 dan 2003 disajikan dalam bentuk grafik perbandingan. Perbandingan vektor kecepatan

pergeseran titik pantau disajikan pada Gambar 3.3 sedangkan simpangan baku pergeseran titik pantau disajikan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Grafik kecepatan pergeseran horizontal titik pantau pada interval kala tahun 2002 dan 2003

Berdasarkan Gambar 3.3 terlihat sangat jelas bahwa nilai vektor kecepatan pergeseran hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat dan HKT metode *time-variant* adalah berbeda. Nilai vektor kecepatan pergeseran horizontal titik pantau dari hasil perataan metode parameter dengan koreksi titik ikat lebih besar dibanding pada nilai vektor kecepatan pergeseran horizontal titik pantau dari hasil perataan metode *time-variant*, dengan selisih nilai rerata kecepatan pergeseran horizontal kedua metode sebesar 7,81 mm/tahun. Hal ini dikarenakan perbedaan parameter estimasi yang digunakan dalam perbandingan.

Pergeseran horizontal titik pantau pada metode parameter dengan koreksi titik ikat didapat dari perhitungan selisih koordinat estimasi titik pantau antar kala pengamatan yang kemudian dibagi dengan interval waktu pergeseran, sehingga diduga menyebabkan pergeseran horizontal yang terdeteksi bernilai besar, namun pada dasarnya data yang digunakan belum sepenuhnya dilakukan koreksi seperti pada data azimuth awal yang digunakan dan hanya pada titik ikat saja. Nilai vektor kecepatan pergeseran rerata dari metode parameter sebesar 7,97 mm/tahun. Sementara pada metode *time-variant* parameter estimasi pergeserannya berupa vektor kecepatan pergeseran horizontal, yang menandakan adanya pergeseran horizontal dari titik pantau, yang pada dasarnya belum merepresentasikan adanya pergeseran pada setiap titik pantau karena nilai dari vektor kecepatan pergeseran kecil dan relatif seragam dengan rerata sebesar 0,155 mm/tahun.

Berdasarkan Gambar 3.4 juga terlihat sangat jelas pola dari nilai simpangan baku kecepatan pergeseran dari hasil analisis pergeseran kedua metode. Nilai simpangan baku kecepatan pergeseran dari hasil perataan metode parameter dengan koreksi titik ikat lebih besar dan relatif lebih seragam dari hasil perataan metode *time-variant*, dengan selisih nilai simpangan baku kedua metode sebesar 0,374 mm/tahun. Ketelitian vektor kecepatan pergeseran horizontal dari hasil perataan metode parameter lebih tinggi dari hasil metode *time-variant*. Nilai simpangan baku yang kecil dari vektor pergeseran horizontal titik pantau hasil perataan metode parameter menandakan memiliki bersifat yang sensitif dalam mendeteksi pergeseran.



Gambar 3.4 Grafik simpangan baku kecepatan pergeseran horizontal titik pantau pada interval kala tahun 2002 dan 2003

3.3.2. Perbandingan Vektor Kecepatan Pergeseran dan Simpangan Baku Pergeseran pada Interval Kala Tahun 2002 dan 2012

Perbandingan vektor kecepatan pergeseran dan simpangan baku pergeseran setiap titik pantau pada interval kala tahun 2002 dan 2012 disajikan dalam bentuk grafik perbandingan. Perbandingan vektor kecepatan pergeseran titik pantau disajikan pada Gambar 3.5. sedangkan simpangan baku pergeseran titik pantau disajikan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.5. Grafik kecepatan pergeseran horizontal titik pantau pada interval kala tahun 2002 dan 2012

Berdasarkan Gambar 3.5. terlihat sangat jelas bahwa pola dan nilai vektor kecepatan pergeseran yang berbeda dari hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat dan HKT metode *time-variant*. Sama halnya pada interval kala 2002 dan 2003, pada interval kala 2002 dan 2012 nilai vektor kecepatan pergeseran horizontal titik pantau dari hasil perataan metode parameter dengan koreksi titik ikat lebih besar dibanding pada nilai vektor kecepatan pergeseran horizontal titik pantau dari hasil perataan metode *time-variant*, dengan selisih rerata nilai vektor kecepatan pergeseran kedua metode sebesar 3,59 mm/tahun, dan titik IV mengalami pergeseran terbesar. Pola nilai kecepatan pergeseran horizontal pada interval kala 2002 dan 2012 sedikit berbeda dengan pola nilai kecepatan pergeseran horizontal pada interval kala 2002 dan 2003, yang diduga karena beda interval waktu yang lebih lama sehingga terjadi perubahan besar nilai pergeseran horizontal pada titik pantau tersebut.

Perbedaan nilai kecepatan pergeseran horizontal antar kedua metode ini dikarenakan perbedaan parameter estimasi yang digunakan dalam perbandingan. Pergeseran horizontal titik pantau pada metode parameter dengan koreksi titik ikat didapat dari perhitungan selisih koordinat estimasi titik pantau antar kala pengamatan yang kemudian dibagi dengan interval waktu pergeseran, sehingga diduga menyebabkan pergeseran horizontal yang terdeteksi bernilai besar, namun pada dasarnya data yang digunakan belum sepenuhnya dilakukan koreksi seperti pada data azimuth awal yang digunakan dan hanya pada

titik ikat saja. Nilai vektor kecepatan pergeseran rerata dari metode parameter sebesar 3,78 mm/tahun. Sementara pada metode *time-variant* parameter estimasi pergeserannya berupa vektor pergeseran horizontal, yang menandakan adanya pergeseran horizontal dari titik pantau, yang pada dasarnya belum merepresentasikan adanya pergeseran pada setiap titik karena nilai dari vektor pergeseran kecil dan relatif seragam dengan selisih antar nilai cukup kecil, dengan rerata sebesar 0,193 mm/tahun.



Gambar 3.6. Grafik simpangan baku kecepatan pergeseran horizontal titik pantau pada interval kala 2002 dan 2012.

Berdasarkan Gambar 3.6 terlihat bahwa pola simpangan baku kecepatan pergeseran pada interval kala 2002 dan 2012 untuk hasil perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat dan perataan HKT metode *time-variant* memiliki kesamaan dengan pola simpangan baku pergeseran pada interval kala 2002 dan 2003. Pola simpangan baku kecepatan pergeseran hasil perataan HKT metode parameter terlihat lebih seragam dibanding dengan hasil perataan HKT metode *time-variant* yang bervariasi. Nilai simpangan baku pergeseran dari hasil perataan metode parameter dengan koreksi titik ikat lebih besar dari hasil perataan metode *time-variant*. dengan selisih nilai simpangan baku pergeseran horizontal kedua metode sebesar 0,55 mm/tahun. Ketelitian vektor kecepatan pergeseran horizontal dari hasil perataan metode parameter lebih tinggi dari hasil metode *time-variant*. Nilai simpangan baku yang kecil dari vektor kecepatan pergeseran horizontal titik pantau hasil perataan metode parameter menandakan bahwa jaring bersifat yang sensitif dalam mendeteksi pergeseran.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa hasil analisis pergeseran horizontal dari perataan HKT metode parameter dengan koreksi titik ikat dan metode *time-variant* memiliki nilai vektor kecepatan pergeseran horizontal yang berbeda, termasuk juga nilai simpangan baku pergeseran untuk interval kala pengamatan yang sama yaitu 2002 dan 2003 serta 2002 dan 2012. Vektor kecepatan pergeseran horizontal hasil perataan HKT metode *time-variant* lebih kecil dari hasil perataan HKT metode parameter, sementara nilai simpangan baku kecepatan pergeseran horizontal hasil metode *time-variant* lebih besar dari hasil metode parameter, dengan perbedaan nilai simpangan baku kecepatan pergeseran keduanya sebesar 0,5 mm. Dengan demikian, hasil pada studi ini berbeda dengan hasil kajian pada jaring pemantau vertikal (Sari, 2016), dimana metode *time*

variant memberikan hasil yang lebih teliti. Perbedaan ini dikarenakan pada kasus jaring pemantauan horizontal Candi Borobudur dengan data ukuran sudut dan jarak yang merupakan persamaan non-linier serta bentuk jaring yang berupa polygon tertutup berakibat pada jumlah ukuran lebih yang minimum sehingga memungkinkan masih adanya kesalahan yang terkandung pada data pengamatan, sedangkan pada penelitian Han, dkk (2014) dan Sari (2016) menggunakan kasus jaring sipat datar dengan ukuran beda tinggi yang merupakan persamaan linier, dengan jumlah ukuran lebih pada pembentukan persamaan *time variant* yang memadai. Penelitian ini juga membuktikan bahwa metode *time variant* yang diterapkan untuk jaring vertikal dapat diterapkan pada jaring horizontal untuk menentukan vektor posisi dan kecepatan perubahan posisi titik-titik pantau sekaligus dalam sekali proses hitungan, apabila vektor kecepatan perubahan posisi titik ikat diketahui.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

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

6. Referensi

- Apriyanti, D. (2014). *Analisis Pergeseran Horizontal Waduk Sermo Tahun 2012-2013 Berdasarkan Hasil Hitung Perataan Parameter Berbobot*. Skripsi. Universitas Gadjah Mada.
- Caspary, W.F, 1987, *Concepts of Network and Deformation Analysis*, Monograph 11, School of Surveying the University of New South Wales, Australia
- Ghilani, C. (2010). *Adjustment Computation Spatial Data Analysis Fifth Edition*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Han, J.Y., Hwang, C., Chou, J.Y., dan Hung, W.C., (2014), "Time-Variant Adjustment for a Level Network", *Journal of Surveying Engineering*, 140, 04014004-1-04014004-7.
- Iskandar, H. (2013). *Analisis Kualitas Desain Jaring Pemantau Horizontal Candi Borobudur Untuk Studi Deformasi (Kala Pengamatan 2011 Dan 2012)*. Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
- Kuang, S., (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concept and Application*, Ann Abror Press Inc., Michigan, USA
- Lestari, D. (2015). *Analisis Stabilitas Candi Borobudur Berdasar Integrasi Data Pengamatan GPS dan Terestris Jaring Pemantau Deformasi Candi*. Disertasi, Universitas Gadjah Mada.
- Mikhail, E., & Gracie, G. (1981). *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Sari, R. I. (2016). *Perbandingan Pergeseran Vertikal Hasil Hitungan Perataan Jaring Sipat Datar Antara Metode Parameter Dan Metode Time-Variant (Studi Kasus: Jaring Pemantau Candi Borobudur)*. Skripsi. Universitas Gadjah Mada.