



Pendefinisian Jaring Kontrol Sistem Cerdas Candi Borobudur ke dalam Datum SRGI 2013

(Define Control Network of Borobudur Temple Smart System on SRGI 2013 Datum)

Nerissa Mutiara Christy¹, Bilal Ma'ruf², Dedi Atunggal²

¹ Alumni Departemen Teknik Geodesi FT-UGM, Indonesia

² Staf Pengajar Departemen Teknik Geodesi FT-UGM, Indonesia

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

Diterima (*Received*): 10/Mar/2022 Direvisi (*Revised*): 30/Nov/2022 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 01/Dec/2022

ABSTRAK

Candi Borobudur merupakan candi Buddha terbesar di dunia dan diakui sebagai salah satu warisan budaya yang dilindungi oleh *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO). Sebagai salah satu realisasi pemeliharaan Candi Borobudur dilakukan pemantauan stabilitas Candi Borobudur melalui pengukuran yang dilakukan secara periodik setiap tahun sejak 1983. Seiring dengan kemajuan teknologi, pemantauan stabilitas candi dapat dilakukan dengan menggunakan sistem cerdas. Untuk itu diperkenalkan Sistem Cerdas Candi Borobudur. Sistem Cerdas Candi Borobudur menggunakan *Robotic Total Station* (RTS) untuk pemantauan deformasi secara *real-time*. Untuk mendukung pemantauan stabilitas candi menggunakan (RTS) perlu dilakukan pendefinisian jaring kontrol pemantauan sistem cerdas ke dalam datum Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) 2013. Pada penelitian ini dilakukan pendefinisian jaring kontrol pemantauan yang berada di halaman Candi Borobudur ke dalam datum SRGI 2013. Pendefinisian dilakukan dengan pengamatan *Global Navigation Satellite System* (GNSS) metode statik pada 7 November 2019 *date of year (doy)* 311 selama ± 6 jam dengan *sampling-rate* 30 detik dan *mask angle* 15°. Pengolahan data pengamatan GNSS dilakukan dengan menggunakan *software Spectra Precision GeoGenius* dan 4 titik *Continuously Operating Reference System* (CORS) Badan Informasi Geospasial (BIG) CKBM, CMGL, JOGS, dan CSLO sebagai titik ikat. Analisis penentuan kelas dan orde mengacu Standar Nasional Indonesia Jaring Kontrol Horizontal (SNI JKH). Hasil dari penelitian yang telah dilakukan berupa 9 titik jaring kontrol pemantauan sistem cerdas yang telah terdefinisi dengan baik terhadap 4 titik CORS BIG dengan ketelitian berkisar dari 4 mm s.d. 13 mm. Penentuan kelas yang dilakukan menggunakan hasil perataan jaring bebas dengan 1 titik ikat. Orde dari jaring ditentukan dari hasil perataan jaring terikat dengan 4 titik kontrol yang terdistribusi pada 4 kuadran. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa jarring dikualifikasi sebagai kelas 2A dan orde 1. Pemantauan sistem cerdas menggunakan RTS sudah dapat dilakukan dengan mengacu pada koordinat titik-titik jaring pemantauan yang sudah diperoleh.

Kata Kunci: SRGI 2013, koordinat, kelas, orde

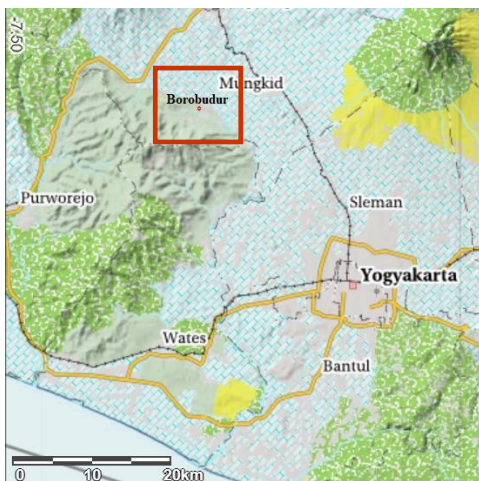
ABSTRACT

Borobudur Temple is declared the biggest Buddhist temple in the world and one of the world's heritage protected by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). As one of the temple maintenance realizations, Borobudur Temple monitoring has been done periodically since 1983. Along with technological advancement, temple stability monitoring using a smart system is possible. Therefore introduced Borobudur Temple Smart System. Borobudur Temple Smart System utilizes Robotic Total Station (RTS) technology for real-time deformation monitoring. For supporting temple stability monitoring using RTS, defining the smart system monitoring control points into the SRGI 2013 datum is needed. This research defines the observation control network of the Borobudur Temple located in Borobudur yard to the Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) 2013. Global Navigation Satellite System (GNSS) static mode observation data on November 7th, 2019 is used in this research. GNSS observation was done for ± 6 hours, using 30 second sampling-rate and 15° mask angle. Data processing using Spectra Precision GeoGenius software and Continuously Operating Reference System (CORS) Badan Informasi Geospasial (BIG) CKBM, CMGL, JOGS, and CSLO as fixed points. The class and order definition refers to the Standar Nasional Indonesia Jaring Kontrol Horizontal (SNI JKH). These research results are 9 points of smart system control network that are well defined to 4 points, with accuracy ranging from 4 mm to 13 mm. A class determination as the result of network-free adjustment with 1 fixed point. The network order is the result of network-biased adjustment with 4 fixed points that are distributed at 4 quadrants. The result analysis shows that the network is qualified for class 2A and order 1. Coordinate of the 9 points as the result of this research can be used for the intelligent system monitoring using a total station.

Keywords: SRGI 2013, coordinates, class, order

1. Pendahuluan

Candi Borobudur merupakan candi Buddha yang berlokasi di Borobudur, Magelang, Jawa Tengah seperti ditampilkan pada Gambar 1.1. Candi berbentuk stupa ini didirikan oleh para penganut agama Buddha Mahayana sekitar abad ke 8 Masehi pada masa pemerintahan wangsa Syailendra. Lingkungan geografis Candi Borobudur dikelilingi oleh Gunung Merapi dan Merbabu di sebelah Timur, Gunung Sindoro dan Sumbing di sebelah Utara, dan pegunungan Menoreh di sebelah Selatan, serta terletak di antara Sungai Progo dan Elo. Borobudur adalah candi atau kuil Buddha terbesar di dunia. Selain itu, Candi Borobudur juga merupakan salah satu warisan budaya yang dilindungi dan dilestarikan oleh UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*). Candi Borobudur resmi masuk dalam daftar warisan budaya dunia pada 13 Desember 1991 dengan nomor registrasi 348 yang diperbarui menjadi 592 (Islam, 2013).



Gambar 1. Lokasi Candi Borobudur (modifikasi dari Ina-Geoportal/ <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>, April 2020)

Berdasarkan rekomendasi UNESCO *Expert Meeting, team monitoring* pemugaran candi Borobudur, dalam hal ini Balai Konservasi Peninggalan Borobudur (BKPB), melakukan pemantauan stabilitas Candi Borobudur melalui pengukuran yang secara periodik setiap tahun sejak 1983 (Setyawan, 2011). Beberapa kegiatan untuk memelihara candi telah dilakukan secara signifikan sejak selesainya restorasi pada tahun 1983. Dalam rangka pemeliharaan Candi Borobudur oleh Balai Studi dan Konservasi Candi Borobudur, dilakukan penanaman patok (*benchmark*) di beberapa lokasi pada badan dan halaman candi yang digunakan sebagai titik-titik pengukuran deformasi atau pergeseran candi baik pada arah horizontal maupun vertikal. Metode pengamatan geodetik untuk pemantauan candi sudah dilaksanakan secara periodik sejak selesainya restorasi besar, yaitu dengan melaksanakan pengukuran poligon dan sipat datar secara terpisah (Lestari, 2015).

Sementara itu perkembangan teknologi penentuan posisi menggunakan data satelit *Global Positioning System* (GPS). GPS memungkinkan penentuan posisi dan waktu 24 jam per hari, di seluruh bagian dunia dan dalam segala cuaca (Leick dkk., 2015). Terdapat beberapa kesalahan pada penentuan posisi dengan GPS seperti kesalahan jam satelit, kesalahan *ephemeris*, kesalahan pantulan ionosfer, dan kesalahan pantulan troposfer (Yin & Yong, 2019). Ketelitian posisi GPS secara umum bergantung pada empat faktor yaitu penggunaan metode penentuan posisi, geometri dan distribusi satelit yang diamati, ketelitian data yang digunakan, dan strategi pengolahan data yang diterapkan (Abidin, 2007). Dengan adanya perkembangan teknologi tersebut, pada tahun 2000 dilakukan penelitian terkait sistem pemantauan stabilitas Candi Borobudur dengan menggunakan metode pengamatan GPS. Metode selanjutnya yang pernah dilakukan dalam pemantauan Candi Borobudur adalah dengan mengombinasikan pengamatan GPS, sipat datar teliti, dan *Total Station* (TS). Pengembangan metode tersebut dilakukan dengan menggunakan data pengamatan GPS epok tahunan dan data pengukuran jaring horizontal dengan metode poligon serta data pengukuran beda tinggi (*levelling*) jaring pemantauan vertikal untuk kurun waktu 2002 s.d. 2012 (Lestari, 2015; Lestari & Dewanto, 2020).

Seiring dengan perkembangan teknologi, banyak ditemukan teknologi-teknologi baru termasuk dalam bidang pemetaan. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya salah satu teknologi baru yaitu *Robotic Total Station* (RTS). RTS merupakan *Total Station* yang penggunaannya dapat dilakukan dari jarak jauh (*remote operation*) (Crumal, 2019). RTS merupakan kumpulan instrumen pengukuran yang dapat digunakan untuk mengukur prisma bergerak (Lenda dkk., 2019). Penggunaan RTS tersebut dapat diaplikasikan pada pemantauan struktur, salah satunya adalah pemantauan struktur Candi Borobudur. Pemantauan dengan RTS dapat dilaksanakan secara detail, sehingga tidak hanya memantau pergerakan atau pergeseran candi secara umum, namun juga dapat memantau kestabilan dinding, relung dan bagian-bagian lain dari candi yang mungkin mengalami deformasi secara parsial akibat pelapukan, efek gempa dan sebagainya (Atunggal dkk., 2019).

Salah satu wujud penggunaan teknologi baru RTS pada pemantauan deformasi Candi Borobudur adalah sistem cerdas Candi Borobudur. Sistem tersebut memungkinkan dilakukan pemantauan deformasi Candi Borobudur secara *real-time*. Pemantauan struktur menggunakan RTS tersebut memerlukan titik-titik kontrol pemantauan sebagai acuan dalam pengukuran. Pengamatan menggunakan RTS dilakukan menggunakan titik-titik kontrol yang berada pada halaman Candi Borobudur. Titik-titik kontrol pengamatan tersebut perlu mengacu pada sistem referensi geospasial. Sistem referensi geospasial adalah suatu sistem referensi koordinat, yang digunakan dalam pendefinisian dan penentuan posisi

suatu entitas geospasial mencakup posisi horizontal, posisi vertikal maupun nilai gayaberat berikut perubahannya sebagai fungsi waktu (Badan Informasi Geospasial, 2013). Mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial No. 15 Tahun 2013 tentang Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) 2013, SRGI 2013 digunakan sebagai sistem referensi geospasial tunggal dalam penyelenggaraan informasi geospasial nasional menggantikan Datum Geodesi Nasional 1995 (DGN 1995). Perbedaan datum tersebut memiliki perubahan koordinat dengan fungsi waktu sehingga diperlukan pendefinisian koordinat titik mengacu pada datum yang baru (Pahlevi & Pangastuti, 2014).

2. Data dan Metodologi

2.1 Data dan Lokasi

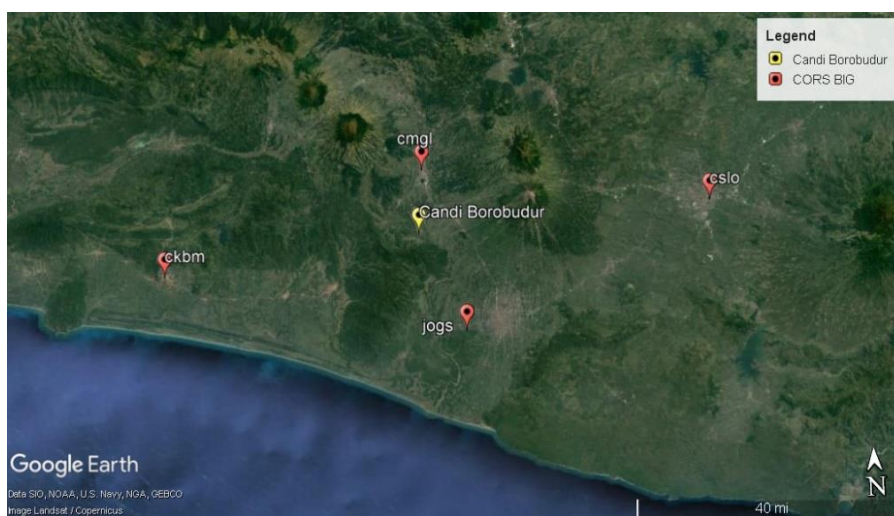
Pada penelitian ini digunakan data pengamatan GNSS titik kontrol yang berada di halaman Candi Borobudur dan data RINEX stasiun CORS Badan Informasi Geospasial (BIG). Data pengamatan dilakukan pada 9 titik yaitu titik BM1, BM2, BM3, BM4, BM5, BM6, BM7, BM8 dan BME. Proses pengamatan dilakukan selama ± 6 jam pada tanggal 7 November 2019 (*doy* 311). Pengamatan GNSS dilakukan dengan metode statik dengan *sampling-rate* 30 detik dan *mask angle* 15° . Lokasi dan persebaran titik kontrol di halaman Candi Borobudur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi titik kontrol di halaman Candi Borobudur (modifikasi dari Google Earth)

Data pengamatan stasiun CORS BIG yang digunakan pada penelitian ini adalah CORS JOGS, CKBM, CMGL dan CSLO pada *doy* 311. CORS JOGS (Yogyakarta) merupakan CORS BMKG Yogyakarta yang berlokasi di Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. CORS CKBM merupakan CORS Kebumen yang berlokasi di Kebumen, Jawa Tengah. CORS CMGL merupakan CORS Magelang yang terletak di

Magelang, Jawa Tengah. CORS CSLO merupakan CORS Solo yang berlokasi di Solo, Jawa Tengah. Semua data memiliki interval waktu pengamatan 30 detik dengan berkas observasi setiap satu hari penuh baik dalam format observasi (*.yr[o]) dan navigasi (*.yr[n]). Lokasi dan persebaran stasiun CORS BIG yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi stasiun CORS BIG (modifikasi dari Google Earth)

2.2. Metodologi

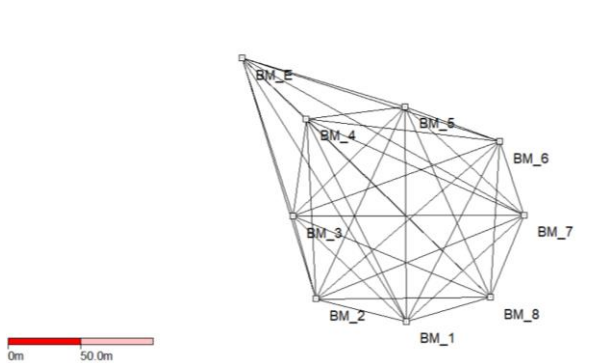
Penelitian ini dilakukan dalam 3 tahapan yaitu persiapan data, pengolahan, dan analisis hasil. Persiapan data meliputi pengumpulan data RINEX hasil pengamatan 9 titik pantau di Candi Borobudur dan data RINEX CORS JOGS. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software* GeoGenius. Pengolahan data diawali dengan tahapan pengolahan *baseline*. Hasil dari pengolahan *baseline* perlu dilakukan uji statistik, jika tidak memenuhi syarat maka perlu dilakukan pengecekan dan perbaikan sinyal. Jika hasil pengolahan *baseline* sudah memenuhi syarat uji statistik yang dilakukan, dilanjutkan dengan perataan jaring bebas menggunakan 1 titik ikat (CORS JOGS). Setelah perataan jaring bebas, ditambahkan titik 3 titik ikat yaitu CORS CMGL, CSLO, dan CKBM. Penambahan titik tersebut digunakan untuk perataan jaring terikat. Hasil dari perataan jaring bebas kemudian digunakan untuk penentuan kelas jaring. Sedangkan hasil perataan jaring terikat digunakan untuk penentuan orde jaring.

2.1.1 Perataan Jaring Bebas

Tahap perataan jaring dilakukan menggunakan hasil dari pengolahan *baseline* yang telah dilakukan sebelumnya. Pengolahan jaring dilakukan hitung perataan yang umumnya menggunakan hitung perataan kuadrat terkecil. Persamaan pengamatan dapat disusun dalam sistem koordinat kartesi maupun geodetik (Abidin, 2000). Pengolahan *baseline* dilakukan dengan menetapkan 1 titik sebagai titik *fix*. Nilai koordinat dinyatakan menggunakan sistem koordinat kartesi dalam WGS84. Sistem koordinat kartesi merupakan sistem koordinat yang menyatakan posisi di atas permukaan bumi dengan besaran dari 3 sumbu yaitu sumbu X, Y, dan Z (Janssen, 2009). Nilai koordinat CORS JOGS pada Tabel 1 digunakan dalam proses pengolahan *baseline* dengan titik CORS JOGS sebagai titik *fix*.

Tabel 1. Koordinat titik ikat pada perataan jaring bebas

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
JOGS	-2191895,132	5927112,413	-861716,492



Gambar 4. Ilustrasi jaring yang terbentuk

Perataan jaring yang pertama dilakukan merupakan perataan jaring bebas (*free network adjustment*). Perataan

jaring bebas memberikan informasi relatif atau bukan mutlak tentang posisi titik (Al Zubaidy et. al., 2012). Perataan jaring bebas dilakukan setelah pengolahan tiap *baseline* yang terbentuk seperti pada Gambar 4, selesai dilakukan.

2.1.2 Penetapan Kelas

Penetapan kelas jaring ditentukan berdasar panjang sumbu-panjang (*semi-major axis*) dari setiap elips kesalahan relatif dengan tingkat kepercayaan 95%. Bentuk dan orientasi dari elips kesalahan menunjukkan ketidakpastian posisi dari suatu titik (Jassim, 2019). Elips kesalahan dinyatakan dalam besaran setengah sumbu panjang (σ_x) dan setengah sumbu pendek (σ_y) (Mikhail & Gracie, 1981). Sumbu panjang dari elips kesalahan relatif yang digunakan merupakan hasil perataan jaring bebas.

Tabel 2. Kelas dan orde pengukuran jaring kontrol horizontal (Badan Standardisasi Nasional, 2002)

Orde	c	Jaring Kontrol	Jarak*	Kelas
00	0,01	Jaring fidusial nasional (jaring tetap GPS)	1.000	3A
0	0,1	Jaring titik kontrol geodetik nasional	500	2A
1	1	Jaring titik kontrol geodetik regional	100	A
2	10	Jaring titik kontrol geodetik lokal	10	B
3	30	Jaring titik kontrol geodetik perapatan	2	C
4	50	Jaring titik kontrol pengukuran	0,1	D

*) Jarak tipikal antar titik yang berdampingan dalam jaringan (km)

Penetapan orde dilakukan dengan menghitung batas maksimal sumbu panjang yang diperbolehkan dari elips kesalahan relatif, yang dihitung dengan rumus (1). Nilai faktor empirik (c) yang menggambarkan tingkat presisi survei pada persamaan disesuaikan dengan kelas yang ditentukan, disajikan pada Tabel 2.

$$r = c (d + 0.2) \quad (1)$$

Keterangan :

- r : panjang maksimum dari sumbu-panjang yang diperbolehkan dalam milimeter
- c : faktor empirik yang menggambarkan tingkat presisi survei
- d : jarak antara titik (dalam kilometer)

2.1.3 Perataan Jaring Terikat

Perataan jaring terikat atau *constrained network adjustment* merupakan tahap perataan setelah perataan jaring bebas. Perataan jaring terikat dilakukan setelah hasil dari perataan jaring bebas yang sudah masuk kriteria dalam kontrol kualitas. Perataan jaring terikat memberikan koordinat definitif untuk titik-titik yang

didefinisikan (Prasidya dkk., 2019). Dalam perataan jaring jaring terikat digunakan 4 titik ikat yaitu titik CORS JOGS, CMGL, CSLO dan CKBM. Nilai koordinat dari 4 titik CORS tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Koordinat titik ikat pada perataan jaring bebas

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
CMGL	-2185668,470	5935038,734	-824386,587
CKBM	-2126084,115	5953244,437	-845639,329
CSLO	-2248479,135	5909748,224	-834744,616
JOGS	-2191895,132	5927112,413	-861716,492

2.1.4 Penetapan Orde

Penetapan orde jaring ditentukan berdasar panjang sumbu-panjang (*semi-major axis*) dari setiap elips kesalahan relatif dengan tingkat kepercayaan 95%. Elips kesalahan dinyatakan dalam besaran setengah sumbu panjang (σ_x) dan setengah sumbu pendek (σ_y) (Mikhail & Gracie, 1981). Sumbu panjang dari elips kesalahan yang digunakan merupakan hasil perataan jaring terikat. Nilai

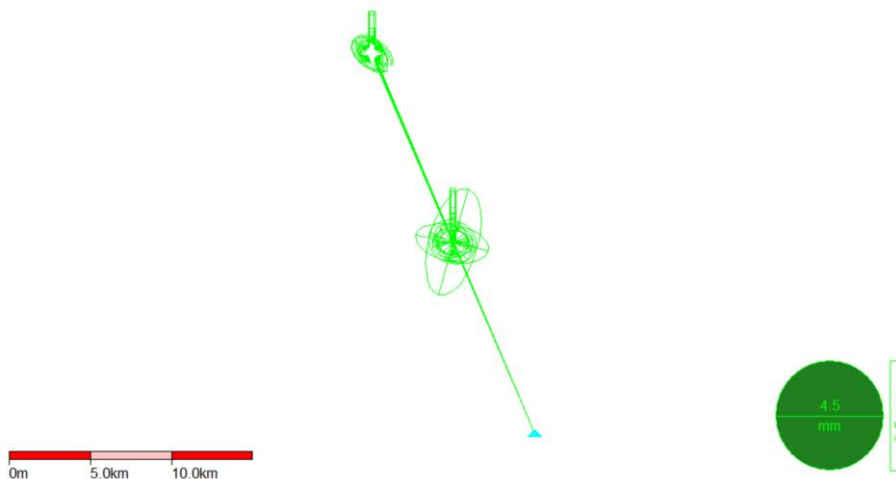
koordinat dinyatakan menggunakan sistem koordinat kartesi dalam WGS84. Penetapan orde dilakukan dengan menghitung batas maksimal sumbu panjang yang diperbolehkan dari elips kesalahan relatif, yang dihitung dengan rumus (1). Nilai faktor empirik (c) yang menggambarkan tingkat presisi survei pada persamaan disesuaikan dengan kelas yang ditentukan, disajikan pada 2.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengolahan GeoGenius

3.1.1 Perataan Jaring Bebas

Perataan jaring bebas ditujukan untuk konsistensi data vektor *baseline* satu terhadap lainnya (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Pengolahan data GNSS menggunakan *software* GeoGenius diawali dengan pengolahan *baseline*. Data fase yang digunakan sebagai masukan kemudian masuk ke tahap pengolahan *baseline*, kemudian menghasilkan vektor *baseline* (dX , dY , dZ) (Abidin, 2002). Proses pengolahan *baseline* tersebut dilakukan dengan menetapkan satu titik sebagai titik *fix*.



Gambar 5. Pengolahan *baseline* dengan 1 titik ikat

Pada proses pengolahan *baseline* dengan satu titik ikat, ditampilkan hasil berupa rata-rata kesalahan horizontal dan vertikal seperti pada Gambar 3.1. Elips kesalahan relatif atau elips kesalahan garis merupakan elips yang menggambarkan daerah kepercayaan dari ketelitian koordinat suatu titik relatif terhadap titik lainnya. Berbeda dengan elips kesalahan absolut, bentuk, ukuran serta orientasi elips kesalahan relatif tidak dipengaruhi oleh lokasi titik datum dalam jaringan (Hofmann-Wellenhof, dkk., 2007). Kesalahan rata-rata horizontal dari pengolahan *baseline* yang telah dilakukan sebesar 4,5 mm dan kesalahan vertikal sebesar 8,5 mm.

Hasil dari perataan jaring bebas disajikan pada Gambar 3.2, dengan elips kesalahan hasil perataan. Selain itu juga disajikan rata-rata kesalahan horizontal dan vertikal dari

perataan jaring bebas tersebut. Pada perataan jaring bebas ditampilkan rata-rata kesalahan horizontal sebesar 4,0 mm dan rata-rata kesalahan vertikal sebesar 10,5 mm.

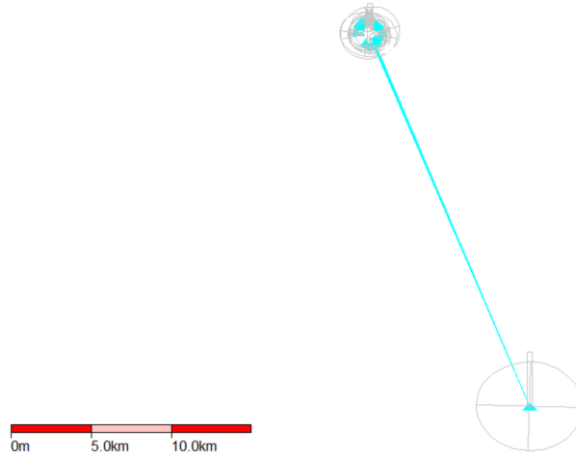
Tabel 4. Koordinat titik kontrol hasil perataan jaring bebas

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
BM1	-2183592,921	5933607,322	-838931,100
BM2	-2183535,364	5933630,582	-838915,993
BM3	-2183522,744	5933643,233	-838859,589
BM4	-2183534,314	5933648,689	-838793,260
BM5	-2183599,181	5933625,983	-838785,118
BM6	-2183660,014	5933600,928	-838808,444
BM7	-2183672,988	5933588,076	-838858,945

Lanjutan Tabel 4.

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
BM8	-2183648,324	5933589,524	-838914,903
BME	-2183494,669	5933668,598	-838751,466
JOGS	-2191895,132	5927112,413	-861716,492

Tabel 4 menunjukkan nilai koordinat kartesi 3 dimensi titik kontrol hasil perataan jaring dengan 1 titik sebagai titik ikat. Titik CORS JOGS digunakan sebagai titik ikat yang telah didefinisikan dalam SRGI 2013. Penggunaan titik CORS JOGS bertujuan agar 9 titik lainnya terdefinisi ke dalam SRGI 2013.



Gambar 6. Hasil perataan jaring bebas dengan 1 titik ikat

Tabel 5. Elips kesalahan titik hasil perataan jaring bebas

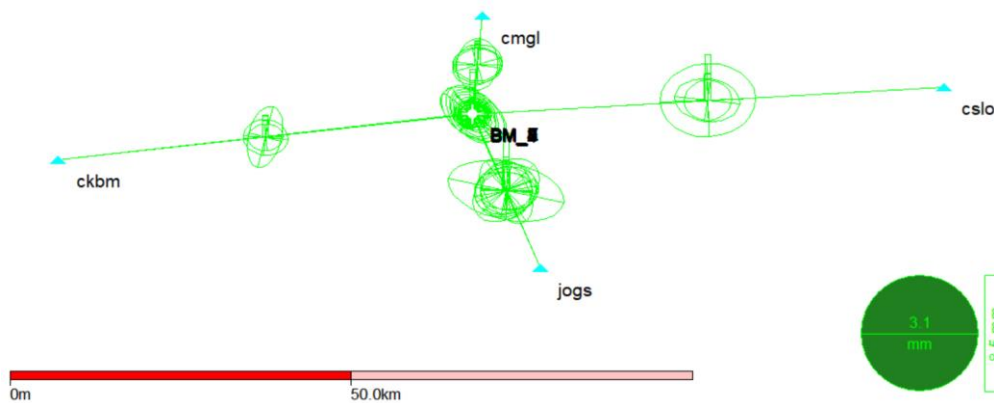
Titik	a (mm)	b (mm)	θ (derajat)
BM1	1,6	1,4	-73,2
BM2	2,2	1,7	-82,2
BM3	1,5	1,3	79,9
BM4	1,6	1,4	-4,5
BM5	1,6	1,4	87,6
BM6	2,3	2	77,7
BM7	1,2	1	-85,5
BM8	1,5	1,2	89,6
BME	1,4	1,2	-85,3
JOGS	4	3,3	-88,7

Pada tahap perataan bebas didapatkan nilai parameter elips kesalahan dari tiap titik yang ditampilkan pada tabel. Berdasarkan Tabel 5, elips kesalahan dengan ukuran paling besar merupakan titik JOGS dengan nilai sumbu panjang (a) sebesar 4 mm dan nilai sumbu pendek (b) sebesar 3,3 mm. Titik kontrol dengan nilai elips kesalahan paling minimal merupakan titik BM 7 dengan nilai sumbu panjang (a) sebesar 1,2 mm dan nilai sumbu pendek (b) 1 mm.

Dari hasil perataan jaring yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa tidak ada *baseline* yang ditolak dari uji statistik. Sehingga setelah dilakukan perataan jaring bebas dapat diketahui bahwa data pengamatan 9 titik tersebut konsisten satu terhadap lainnya.

3.1.2 Perataan Jaring Terikat

Perataan jaring terikat dilakukan setelah perataan jaring bebas dengan hasil yang dianggap baik atau sudah

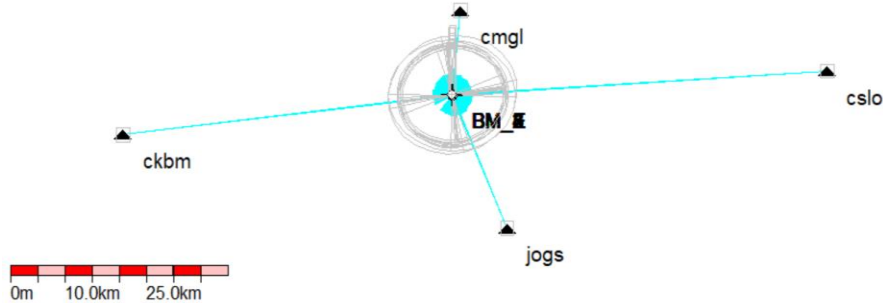


Gambar 7. Pengolahan *baseline* dengan 4 titik ikat

konsisten dari vektor *baseline* satu terhadap lainnya (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Perataan jaring terikat digunakan untuk mendapatkan nilai koordinat final dari titik.

Pada Gambar 7 ditampilkan hasil pengolahan *baseline* dengan 4 titik ikat berupa elips kesalahan relatif dari tiap

baseline. Selain itu, kesalahan horizontal dan vertikal rata-rata dari hasil pengolahan *baseline* juga ditampilkan pada hasil pengolahan *baseline*. Kesalahan rata-rata horizontal pada pengolahan *baseline* dengan 4 titik ikat sebesar 3,1 mm dan vertikal sebesar 8,5 mm.



Gambar 8. Hasil perataan jaring terikat dengan 4 titik ikat

Pada Gambar 8 disajikan hasil perataan jaring terikat dengan 4 titik. Hasil dari perataan jaring terikat berupa elips kesalahan dari tiap titik. Elips kesalahan absolut atau elips kesalahan titik menggambarkan daerah kepercayaan

dari ketelitian koordinat suatu titik (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Selain itu, disajikan pula rata-rata besaran kesalahan horizontal dan vertikal dari perataan jaring terikat. Rata-rata kesalahan horizontal sebesar 5,4 mm dan rata-rata kesalahan vertikal sebesar 13,9 mm.

Tabel 6. Koordinat dan simpangan baku hasil perataan jaring terikat

Titik	Koordinat			Simpangan Baku		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
BM1	-2183592,930	5933607,322	-838931,115	±6,1	±11,9	±4,4
BM2	-2183535,358	5933630,510	-838916,000	±6,7	±12,8	±4,8
BM3	-2183522,745	5933643,222	-838859,583	±6	±11,1	±4,3
BM4	-2183534,290	5933648,604	-838793,261	±5,7	±11,1	±4,7
BM5	-2183599,189	5933625,959	-838785,137	±6,2	±11,5	±4,6
BM6	-2183660,023	5933600,900	-838808,461	±6,8	±13	±5,4
BM7	-2183672,995	5933588,049	-838858,962	±5,6	±10,4	±4
BM8	-2183648,331	5933589,497	-838914,922	±5,7	±10,8	±4,1
BME	-2183494,672	5933668,569	-838751,483	±5,9	±11,1	±4,4
CKBM	-2126084,115	5953244,437	-845639,329	0,0	0,0	0,0
CMGL	-2185668,470	5935038,734	-824386,587	0,0	0,0	0,0
CSLO	-2248479,135	5909748,224	-834744,616	0,0	0,0	0,0
JOGS	-2191895,132	5927112,413	-861716,492	0,0	0,0	0,0

Tabel 6 menampilkan nilai koordinat kartesi 3 dimensi dan simpangan baku titik setelah dilakukan perataan jaring terikat atau terkendala penuh. Secara keseluruhan, nilai simpangan baku tertinggi terdapat pada komponen simpangan baku Y (σ_y). Simpangan baku terendah terdapat pada komponen Z (σ_z). Titik dengan simpangan baku paling besar merupakan titik BM 6, dengan nilai simpangan baku X (σ_x) 6,8 mm, simpangan baku Y (σ_y) 13 mm dan simpangan baku Z (σ_z) 5,4 mm. Hal

tersebut menunjukkan bahwa titik BM 6 memiliki kesalahan paling besar di antara titik lainnya.

Titik dengan nilai simpangan baku minimal merupakan titik BM 7 dengan simpangan baku X (σ_x) 5,6 mm, simpangan baku Y (σ_y) 10,4 mm dan simpangan baku Z (σ_z) 4 mm. Titik dengan nilai simpangan baku minimal dianggap sebagai titik dengan ketelitian paling tinggi. Dengan nilai simpangan baku minimal, titik BM 7 dapat dikatakan sebagai titik dengan ketelitian paling baik.

Tabel 7. Elips kesalahan titik hasil perataan jaring terikat

Titik	a (mm)	b (mm)	θ (derajat)
BM_1	4,6	4	87,6
BM_2	5,3	4,4	-88,7
BM_3	4,6	3,8	80,9
BM_4	4,4	4,1	69,4
BM_5	4,7	4,1	82,6
BM_6	5,4	4,6	77,9
BM_7	4,3	3,6	83,7
BM_8	4,4	3,7	84,1
BM_E	4,5	3,9	83,4
CKBM	0,0	0,0	0,0
CMGL	0,0	0,0	0,0
CSLO	0,0	0,0	0,0
JOGS	0,0	0,0	0,0

Tabel 7 menyajikan besaran parameter elips kesalahan titik hasil perataan jaring terikat. Berdasarkan tabel, titik dengan nilai elips kesalahan minimal adalah titik BM 7 dengan nilai sumbu panjang (a) sebesar 4,3 mm dan sumbu pendek (b) 3,6 mm. Sedangkan titik dengan elips kesalahan paling besar merupakan titik BM 6 dengan nilai sumbu panjang (a) sebesar 5,4 mm dan nilai sumbu pendek (b) sebesar 4,6 mm. Nilai parameter dari elips kesalahan pada titik CKBM, CMGL, CSLO dan JOGS sebesar 0,0 mm dikarenakan 4 titik tersebut dianggap sebagai titik ikat yang dianggap tetap (*fix*) sehingga diasumsikan tidak memiliki kesalahan.

3.2. Penetapan Kelas dan Orde Jaring

3.2.1. Penetapan Kelas

Penetapan kelas dari jaring dilakukan dengan membandingkan nilai sumbu panjang dari elips kesalahan relatif dan batas maksimal panjang dari elips kesalahan relatif yang diperbolehkan. Elips kesalahan relatif merupakan hasil perataan jaring terkendala bebas. Perataan jaring bebas pada penelitian ini menggunakan titik CORS JOGS. CORS JOGS merupakan salah satu stasiun

pengamatan geodetik tetap/kontinu atau dikenal sebagai stasiun InaCORS. Mengacu pada Tabel 2, titik ikat yang digunakan merupakan jaring tetap dengan kelas 3A. Maka dalam penentuan kelas jaring, digunakan kelas yang berada di bawah kelas 3A yaitu kelas 2A.

Tabel 8. Hasil penetapan kelas 2A

Titik	d (km)	a (mm)	b (mm)	c (ppm)	r	Keterangan
JOGS BM_1	25,105	1,6	1,4	0,1	2,53	Diterima
JOGS BM_2	25,144	2,2	1,7	0,1	2,53	Diterima
JOGS BM_3	25,203	1,5	1,3	0,1	2,54	Diterima
JOGS BM_4	25,261	1,6	1,4	0,1	2,55	Diterima
JOGS BM_5	25,241	1,6	1,4	0,1	2,54	Diterima
JOGS BM_6	25,193	2,3	2	0,1	2,54	Diterima
JOGS BM_7	25,140	1,2	1	0,1	2,53	Diterima
JOGS BM_8	25,097	1,5	1,2	0,1	2,53	Diterima
JOGS BM_E	25,317	1,4	1,2	0,1	2,55	Diterima

Nilai faktor empirik (c) yang digunakan pada kelas 2A sebesar 0,1 ppm. Berdasarkan Tabel 8, didapatkan rata-rata sumbu panjang yang diperbolehkan sebesar 2,54 mm. Sedangkan nilai sumbu panjang dari elips relatif (a) hasil perataan jaring bebas sebesar 1,65 mm. Nilai r yang telah dihitung memiliki besaran yang tidak jauh berbeda dikarenakan jarak dari titik ikat (JOGS) terhadap 9 titik pada jaring kontrol pemantauan tidak jauh berbeda. Mengacu pada Tabel 3.5 dapat diketahui bahwa nilai sumbu panjang dari elips kesalahan relatif hasil perataan jaring terkendala bebas tidak melebihi nilai sumbu panjang yang diperbolehkan pada kelas 2A.

3.2.2. Penetapan Orde Jaring

Penentuan orde perlu mengacu pada kelas dari jaring titik kontrol tersebut yaitu tidak boleh lebih tinggi dari kelasnya. Selain bergantung pada kelas jaring, orde jaring bergantung pada tingkat presisi dari titik-titiknya terhadap titik ikat yang digunakan (Badan Standarisasi Nasional, 2002). Dari penentuan kelas yang telah dilakukan, kelas yang digunakan sebagai acuan merupakan kelas 2A. Maka dalam penentuan orde digunakan klasifikasi orde 0.

Tabel 9. Hasil penetapan orde jaring 0

Titik	d (km)	Elips		c (ppm)	r	Keterangan
		a (mm)	b (mm)			
CMGL BM_1	14,761	4,6	4	0,1	1,50	Ditolak
CKBM BM_1	61,138	4,6	4	0,1	6,13	Diterima
CSLO BM_1	69,260	4,6	4	0,1	6,95	Diterima

Lanjutan Tabel 9.

Titik	d (km)	Elips		c (ppm)	r	Keterangan	
		a (mm)	b (mm)				
JOGS	BM_1	25,105	4,6	4	0,1	2,53	Ditolak
CMGL	BM_2	14,744	5,3	4,4	0,1	1,49	Ditolak
CKBM	BM_2	61,078	5,3	4,4	0,1	6,13	Diterima
CSLO	BM_2	69,321	5,3	4,4	0,1	6,95	Diterima
JOGS	BM_2	25,144	5,3	4,4	0,1	2,53	Ditolak
CMGL	BM_3	14,698	4,6	3,8	0,1	1,49	Ditolak
CKBM	BM_3	61,069	4,6	3,8	0,1	6,13	Diterima
CSLO	BM_3	69,334	4,6	3,8	0,1	6,95	Diterima
JOGS	BM_3	25,203	4,6	3,8	0,1	2,54	Ditolak
CMGL	BM_4	14,630	4,4	4,1	0,1	1,48	Ditolak
CKBM	BM_4	61,085	4,4	4,1	0,1	6,13	Diterima
CSLO	BM_4	69,321	4,4	4,1	0,1	6,95	Diterima
JOGS	BM_4	25,261	4,4	4,1	0,1	2,55	Ditolak
CMGL	BM_5	14,615	4,7	4,1	0,1	1,48	Ditolak
CKBM	BM_5	61,154	4,7	4,1	0,1	6,14	Diterima
CSLO	BM_5	69,252	4,7	4,1	0,1	6,95	Diterima
JOGS	BM_5	25,241	4,7	4,1	0,1	2,54	Ditolak
CMGL	BM_6	14,632	5,4	4,6	0,1	1,48	Ditolak
CKBM	BM_6	61,217	5,4	4,6	0,1	6,14	Diterima
CSLO	BM_6	69,188	5,4	4,6	0,1	6,94	Diterima
JOGS	BM_6	25,193	5,4	4,6	0,1	2,54	Ditolak
CMGL	BM_7	14,681	4,3	3,6	0,1	1,49	Ditolak
CKBM	BM_7	61,228	4,3	3,6	0,1	6,14	Diterima
CSLO	BM_7	69,174	4,3	3,6	0,1	6,94	Diterima
JOGS	BM_7	25,140	4,3	3,6	0,1	2,53	Ditolak
CMGL	BM_8	14,740	4,4	3,7	0,1	1,49	Ditolak
CKBM	BM_8	61,198	4,4	3,7	0,1	6,14	Diterima
CSLO	BM_8	69,201	4,4	3,7	0,1	6,94	Diterima
JOGS	BM_8	25,097	4,4	3,7	0,1	2,53	Ditolak
CMGL	BM_E	14,593	4,5	3,9	0,1	1,48	Ditolak
CKBM	BM_E	61,046	4,5	3,9	0,1	6,12	Diterima
CSLO	BM_E	69,363	4,5	3,9	0,1	6,96	Diterima
JOGS	BM_E	25,317	4,5	3,9	0,1	2,55	Ditolak

Mengacu pada hasil yang disajikan pada Tabel 9, terdapat 18 nilai sumbu panjang yang tidak masuk kriteria dan 18 nilai sumbu panjang yang masuk kriteria nilai r yang telah ditentukan. Penolakan tersebut terjadi pada titik yang diikatkan dengan CORS JOGS dan CMGL. Hal tersebut terjadi karena jarak antar titik dan CORS JOGS serta CORS CMGL relatif lebih dekat dibandingkan dengan 2 titik ikat yang lainnya. Dengan jarak yang relatif dekat, maka nilai r yang didapatkan akan relatif kecil. Karena

pada SNI JKH belum disampaikan secara lebih dalam terkait dengan kriteria penolakan nilai r, dengan asumsi setengah dari nilai sumbu panjang yang ditolak maka perlu dilakukan perhitungan kembali dengan kriteria orde yang lebih rendah yaitu orde 1. Penentuan orde selanjutnya dilakukan pada orde 1. Orde 1 memiliki klasifikasi dengan faktor empirik (c) sebesar 1 ppm. Hasil dari perhitungan panjang maksimum dari sumbu panjang yang diperbolehkan dalam milimeter dengan

menggunakan nilai c sebesar 1 ppm disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil penetapan orde 1

Titik	d (m)	Elips		c (ppm)	r	Keterangan	
		a (mm)	b (mm)				
CMGL	BM_1	69,260	4,6	4	1	14,96	Diterima
CKBM	BM_1	25,105	4,6	4	1	61,34	Diterima
CSLO	BM_1	14,744	4,6	4	1	69,46	Diterima
JOGS	BM_1	61,078	4,6	4	1	25,31	Diterima
CMGL	BM_2	69,321	5,3	4,4	1	14,94	Diterima
CKBM	BM_2	25,144	5,3	4,4	1	61,28	Diterima
CSLO	BM_2	14,698	5,3	4,4	1	69,52	Diterima
JOGS	BM_2	61,069	5,3	4,4	1	25,34	Diterima
CMGL	BM_3	69,334	4,6	3,8	1	14,90	Diterima
CKBM	BM_3	25,203	4,6	3,8	1	61,27	Diterima
CSLO	BM_3	14,630	4,6	3,8	1	69,53	Diterima
JOGS	BM_3	61,085	4,6	3,8	1	25,40	Diterima
CMGL	BM_4	69,321	4,4	4,1	1	14,83	Diterima
CKBM	BM_4	25,261	4,4	4,1	1	61,29	Diterima
CSLO	BM_4	14,615	4,4	4,1	1	69,52	Diterima
JOGS	BM_4	61,154	4,4	4,1	1	25,46	Diterima
CMGL	BM_5	69,252	4,7	4,1	1	14,81	Diterima
CKBM	BM_5	25,241	4,7	4,1	1	61,35	Diterima
CSLO	BM_5	14,632	4,7	4,1	1	69,45	Diterima
JOGS	BM_5	61,217	4,7	4,1	1	25,44	Diterima
CMGL	BM_6	69,188	5,4	4,6	1	14,83	Diterima
CKBM	BM_6	25,193	5,4	4,6	1	61,42	Diterima
CSLO	BM_6	14,681	5,4	4,6	1	69,39	Diterima
JOGS	BM_6	61,228	5,4	4,6	1	25,39	Diterima
CMGL	BM_7	69,174	4,3	3,6	1	14,88	Diterima
CKBM	BM_7	25,140	4,3	3,6	1	61,43	Diterima
CSLO	BM_7	14,740	4,3	3,6	1	69,37	Diterima
JOGS	BM_7	61,198	4,3	3,6	1	25,34	Diterima
CMGL	BM_8	69,201	4,4	3,7	1	14,94	Diterima
CKBM	BM_8	25,097	4,4	3,7	1	61,40	Diterima
CSLO	BM_8	14,593	4,4	3,7	1	69,40	Diterima
JOGS	BM_8	61,046	4,4	3,7	1	25,30	Diterima
CMGL	BM_E	69,363	4,5	3,9	1	14,79	Diterima
CKBM	BM_E	25,317	4,5	3,9	1	61,25	Diterima
CSLO	BM_E	69,260	4,5	3,9	1	69,56	Diterima
JOGS	BM_E	25,105	4,5	3,9	1	25,52	Diterima

Berdasarkan Tabel 3.7, setiap sumbu panjang dari elips kesalahan tidak melebihi nilai r yang telah dihitung pada

tiap titik. Nilai faktor empirik yang lebih besar dibandingkan dengan faktor empirik pada orde 0,

menghasilkan nilai r yang dihasilkan akan lebih besar. Sehingga dapat dikatakan semua titik masuk pada kriteria orde jaring 1.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan bahwa titik jaring kontrol pemantauan sistem cerdas Candi Borobudur telah terdefinisi terhadap 4 titik CORS BIG yaitu JOGS, CMGL, CKBM dan CSLO. Sembilan titik tersebut memiliki ketelitian horizontal berkisar antara 5 s.d. 12 mm, sedangkan untuk ketelitian vertikal berkisar dari 4 s.d. 5 mm.

Hasil dari penetapan kelas jaring dari hasil perataan jaring bebas dengan 1 titik ikat menyatakan bahwa jaring kontrol masuk kelas 2A. Hasil dari penetapan orde jaring menggunakan hasil perataan jaring terikat dengan 4 titik ikat CORS (CMGL, CKBM, CSLO dan JOGS) menunjukkan bahwa jaring kontrol pemantauan termasuk orde 1.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

6. Referensi

- Abidin, H. Z. (2002). *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. PT. Pradnya Paramita.
- Abidin, H. Z. & Mugiarto, F. T. (2000). Pengaruh Geometri Jaringan Terhadap Ketelitian Survey GPS. *Jurnal Surveying dan Geodesi*, 10(1), 1–15.
- Abidin, H. Z., (2007). *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya 3rd Edition*. PT. Pradnya Paramita.
- Al Zubaidy, R. Z., Mahdi, H. A. & Hanooka, H. S. (2012). Optimized Zero and First Order Design of Micro Geodetic Networks. *Journal of Engineering*, 18(12), 1344-1364.
- Atunggal, D., Bilal, M., Suhartono, Y., & Setiawan, J. (2019). Evaluasi Kesiapan Pemasangan Sistem Pemantauan Pintar Menggunakan TS Robotik di Candi Borobudur. *Badan Standardisasi Nasional*. (2002). SNI Jaring Kontrol Horizontal.
- Badan Informasi Geospasial. (2013). *Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial No. 15 Tahun 2013 tentang Sistem Referensi Geospasial Indonesia 2013*.
- Badan Informasi Geospasial. (2018). *InaCORS BIG Satu Referensi Pemetaan Indonesia*.
- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment Computation Spatial Data Analysis* (5th ed). John Wiley & Sons. Inc. New Jersey.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E., (2007). *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Islam, M. A. (2013). Peran Brand Borobudur Dalam Pariwisata dan World Heritage. *Jurnal Dewa Ruci*. 8 (3), 377-392.
- Janssen, V. (2009). Understanding Coordinate Systems, Datums and Transformation in Australia. *Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference, Adelaide 2009, Surveying & Spatial Sciences Institute*, pp. 697-715. ISBN: 978- 0-9581366-8-6.
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying* (4th Ed). John Wiley & Sons. Inc. New Jersey.
- Lenda, G., Uznanski A. & Strach M. (2019). Influence of Time Delays of Robotic Total Stations With High Sampling Frequency on Accuracy of Measurements to Moving Prisms. *Archives of Civil Engineering*, 65(1), 32-48.
- Lestari, D. (2015). *Analisis Stabilitas Candi Borobudur Berdasar Integrasi Data Pengamatan GPS dan Terestris Jaring Pemantau Deformasi Candi*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Lestari, D. & Dewanto, B. G. (2020). Analisis Pergeseran Titik Jaring Pemantau Candi Borobudur Mengacu ke ITRF 2008 Berdasarkan Data Pengamatan GPS pada Tahun 2003 dan 2012. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, Vol. 3 No. 2. <https://doi.org/10.22146/jgise.60451>
- Mikhail, Edward M., & Gracie, G. (1981). *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Jassim, M. A. (2019). The Ellipse of Position Error. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 31(s3). <https://doi.org/10.21271/zjpas.31.s3.63>
- Pahlevi, A. & Pangastuti, D. (2014). Indonesian Geospatial Reference System 2013 and Its Implementation on Positioning. *FIG Congress 2014, (June)*, 1-12.
- Prasidya, A. S., Taftazani, M. I., Mutiarasari, W. M., Farida, A., Yacaranda, J., & I, S. U. (2019). Evaluasi Cara Pegikatan ke Titik Tetap pada Penentuan Posisi dengan GNSS. *Geomatika*, 25(2), 55–62.
- Setyawan, J. (2011). Studi Evaluasi Metode Pengukuran Stabilitas Candi Borobudur dan Bukit. *Jurnal Konservasi Cagar Budaya*, 5(1), 31-35.
- Yin, G., & Yong, T. (2019). Comparison and analysis of positioning accuracy between DGPS and GPS. *Journal of Physics: Conference Series*, 1345(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1345/5/052040>