

INTISARI

Candi Borobudur merupakan candi terbesar di Indonesia yang terletak di Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Candi Borobudur dilindungi dan dilestarikan oleh *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) sehingga diperlukan pemantauan secara berkelanjutan terhadap bangunan candi. Salah satunya secara geodetik yang secara periodik telah dilakukan oleh Balai Konservasi Borobudur (BKB) ataupun peneliti sebelumnya. Pengukuran bersama dengan pihak BKB untuk mengetahui stabilitas jaring pemantau deformasi candi serta analisis pergeseran kala 2000 s.d. 2012 telah dilakukan dengan memanfaatkan data pengamatan *Global Positioning System* (GPS) dan *Total Station* (TS). Dalam upaya pemantauan secara berkala, pada tahun 2019 melalui kegiatan penelitian oleh Departemen Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada dilakukan pengukuran kembali sembilan titik pantau deformasi menggunakan metode pengamatan GPS. Terdapat perbedaan kondisi pada pengukuran kala 2012 dan 2019. Pengukuran kala 2012 dilakukan dengan dua metode, yaitu terestris dan GPS, sedangkan pengukuran kala 2019 hanya dilakukan dengan metode GPS. Perbedaan metode pengukuran pada kedua kala untuk analisis deformasi mengakibatkan perlunya upaya penyamaan sistem pada kedua kala. Oleh karena itu, pada kala 2012 dilakukan integrasi data pengamatan GPS dan data terestris. Dari kedua kala dihitung besar pergeseran tiga dimensi dan ketelitiannya untuk mengetahui pengaruh perbedaan metode pengamatan dan pengolahan data kala 2012 dan 2019 pada analisis pergerakan jaring pemantau candi.

Penelitian ini menggunakan data 2012 berupa data pengamatan GPS hasil solusi gabungan multikala dan vektor kecepatan (data koordinat titik sekutu) serta data pengukuran terestris (data koordinat kartesi tiga dimensi serta simpangan baku dan data pengukuran *total station*). Data tahun 2019 berupa data *Receiver INdependent EXchange* (RINEX) pengukuran GPS pada sembilan titik pengamatan. Integrasi data pengamatan GPS dan terestris kala 2012 dilakukan dengan menggunakan metode transformasi sebangun 3D dan hitungan perataan metode kombinasi dengan kondisi pada parameter untuk memperoleh koordinat titik jaring pemantau candi dalam sistem toposentrik. Metode integrasi dengan transformasi sebangun 3D dan hitungan perataan metode kombinasi dengan kondisi pada parameter dibandingkan ketelitiannya untuk digunakan dalam analisis pergeseran 3D. Data pengukuran GPS 2019 diolah menggunakan perangkat lunak *Geogenius*. Analisis pergerakan kala 2012 dan 2019 dilakukan dengan uji kesebangunan jaring dan uji pergerakan titik dengan derajat kepercayaan 95%.

Integrasi data GPS dan terestris dengan metode transformasi sebangun menghasilkan nilai yang lebih teliti jika dibandingkan dengan metode hitung perataan metode kombinasi dengan kondisi pada parameter. Hal ini dibuktikan dengan simpangan baku koordinat hasil transformasi mencapai fraksi milimeter pada seluruh komponen, sedangkan pada metode hitung perataan jaring simpangan baku vertikal (komponen *Up*) berada pada fraksi sentimeter. Analisis pergeseran data pengamatan kala 2012 dan 2019 berdasarkan metode transformasi sebangun 3D diperoleh nilai pergerakan horizontal rerata sebesar 53,98 cm dengan arah tenggara dan timur laut dan nilai pergerakan vertikal rerata sebesar 28,15 cm dengan arah naik. Analisis pergeseran data pengamatan kala 2012 dan 2019 berdasarkan metode hitung perataan kombinasi dengan kondisi pada parameter diperoleh nilai pergerakan horizontal rerata sebesar

33,05 cm dengan pola memutar berlawanan arah jarum jam dan nilai pergerakan vertikal rerata sebesar 2,34 cm dengan arah bervariasi. Besar dan pola pergeseran yang diperoleh belum sesuai dengan prediksi pergeseran dari pengamatan GPS multitarahun pada penelitian sebelumnya. Hasil ini membuktikan bahwa perbedaan metode pengukuran mempengaruhi analisis deformasi.

Kata kunci : terestris, GPS, integrasi data, transformasi sebangun, hitung perataan, pergeseran 3D, Borobudur.

ABSTRACT

Borobudur temple is the largest temple in Indonesia that located in Magelang Regency, Central Java Province. Borobudur temple is protected and preserved by *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO), so monitoring the temple structure need to be done periodically. One of the monitoring methods is through geodetic measurement which is periodically undertaken by Balai Konservasi Borobudur (BKB) or previous researchers. Joint research with BKB to determine the stability of deformation monitoring network and analyze the displacement from 2000 until 2012 have been done using *Global Positioning System* (GPS) and *Total Station* (TS) observation data. For updating the monitoring process, in 2019 through research by Geodetic Engineering of Gadjah Mada University, nine monitoring points was remeasured using GPS observation method. There are different condition in 2012 and 2019 measurements. The 2012 measurement was done using two methods i.e. terrestrial and GPS, while 2019 measurement only used GPS method. This differences required unification of coordinate system between two epochs. Thus, GPS observation and terrestrial data in 2012 need to be integrated. Furthermore, 3D displacement are calculated and the effect of different observation method and GPS processing in 2012 and 2019 to its accuracy are then evaluated.

This research used 2012 data such as GPS network points positions and their velocity vector from multi epoch combined solutions and terrestrial measurement data. The 2019 data were GPS measurement *Receiver INdependent EXchange* (RINEX) data at nine observation points. Integration of GPS observation data and terrestrial data was done using 3D conformal transformation method and general least square adjustment with the conditions on parameter to determine coordinate of Borobudur monitoring network points in topocentric coordinate system. The accuration of 3D conformal transformation method and general least square adjustment with the conditions on parameter as integration methods are compared to be used in 3D displacement analysis. The 2019 data processing using *Geogenius*. The deformation analysis for 2012 and 2019 data using congruency network test and point displacement test at 95% confidence interval.

Integration of GPS observation and terrestrial data using 3D conformal transformation give more accurate result than least square network adjustment using general method with the conditions on parameter. This is proved by the standard deviation of the transformation coordinates results in millimeter fractions. Analysis of the displacement between 2012 and 2019 based on 3D conformal transformation method obtained horizontal displacement average of 53,98 cm with directions to the southeast and northeast and vertical displacement average of 28,15 cm in an upward directions. Based on general least square adjustment with the conditions on parameter method obtained horizontal displacement average of 33,05 cm with anticlockwise directions and vertical displacement average of 2,34 cm with varying directions. This magnitude and the direction of the displacement vector were differed from the prediction of previous GPS multiyear analysis. This result proved that the difference of measurement method affect the deformation analysis.

Key word: terrestrial, GPS, data integration, conformal transformation, least square adjustment, 3D displacement, Borobudur.