

INTISARI

Candi Borobudur merupakan candi Budha terbesar di dunia yang menjadi salah satu warisan budaya yang dilindungi dan dilestarikan oleh UNESCO. Pemeliharaan Candi Borobudur sebagai warisan dunia merupakan pekerjaan yang kompleks dan harus terus dilaksanakan. Metode pengamatan geodetik untuk pemantauan Candi sudah dilaksanakan secara periodik sejak selesainya restorasi besar tahun 1983, yaitu dengan melaksanakan pengukuran poligon dan sipat datar secara terpisah. Sementara itu perkembangan teknologi penentuan posisi menggunakan data satelit (GPS) memberikan peluang penentuan posisi 3D secara serentak dengan tingkat ketelitian yang semakin baik. Analisis secara komprehensif terhadap data pengamatan GPS, data pengamatan terestris, dan integrasi kedua data tersebut perlu dioptimalkan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan stabilitas Candi Borobudur berdasarkan integrasi data pengamatan GPS dan terestris jaring pemantau deformasi Candi.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pengamatan GPS tahun 2002, 2003, dan 2012, data pengukuran jaring horizontal dengan metode poligon serta data pengukuran beda tinggi (*levelling*) jaring pemantau vertikal untuk kurun waktu 2002 s.d 2012. Analisis stabilitas dilakukan dengan menentukan besar dan laju perpindahan posisi horizontal maupun vertikal titik-titik pantau. Analisis deformasi model statis diterapkan pada masing-masing data pengamatan untuk mengetahui pergeseran posisi horizontal maupun vertikal antar kala. Sementara analisis model kinematis diterapkan pada data pengamatan GPS, untuk mendapatkan vektor kecepatan perpindahannya. Hasil analisis ini digunakan untuk prediksi posisi titik-titik pantau GPS sesuai kala pengamatan data terestris. Integrasi data pengamatan GPS dan terestris kemudian dilakukan dengan solusi Procrustes. Analisis stabilitas dengan metode geometrik dilakukan untuk data pengamatan GPS dan data pengamatan terestris secara terpisah dan data hasil integrasi. Hasil analisis dengan metode geometrik ini selanjutnya dibandingkan dengan hasil studi geoteknik yang sudah ada secara kualitatif.

Hasil penelitian ini menggambarkan bahwa ketelitian estimasi posisi dan vektor kecepatan perubahan posisi titik-titik pantau GPS adalah dalam fraksi millimeter dan submilimeter dan penambahan kala 2012 meningkatkan akurasi dan ketelitian estimasinya. Analisis pergeseran horizontal berdasarkan data pengamatan GPS multi kala menggambarkan adanya pengaruh eksternal pada pergeseran yang terjadi. Hal ini dibuktikan dengan besar dan arah rerata pergeseran yang konsisten dengan arah pergerakan tektonik di Pulau Jawa. Analisis pergeseran horizontal secara internal data pengamatan GPS memberikan pola yang sama seperti hasil analisis berdasarkan data pengamatan terestris, dan pergeseran horizontal terjadi pada jaring di Zona-1. Analisis lebih lanjut terhadap pergeseran horizontal yang terjadi, diketahui bahwa Candi Borobudur masih

stabil. Analisis pergeseran vertikal dari data sipat datar memberikan hasil yang kontradiktif dengan hasil studi goteknik. Analisis pergeseran vertikal dengan melakukan integrasi data pengamatan GPS dan terestris memberikan penurunan dengan laju rerata 3,7 mm/thn. Analisis pergeseran 3D terhadap data hasil integrasi tampak bahwa stabilitas candi dipengaruhi oleh faktor eksternal dan internal. Hasil analisis pergeseran 3D dengan metode geometrik diperoleh nilai pergeseran internal yang signifikan dengan nilai rerata pergeseran 6,4 mm/thn dengan pergeseran vertikal yang lebih dominan.

Kata kunci : GPS, poligon, sipat datar, solusi Procrustes, analisis deformasi, Borobudur

ABSTRACT

The maintenance of Borobudur temple as one of the world's important cultural monument is a complex task embracing many disciplines. Geodetic observation using terrestrial method had been implemented for monitoring the stability of the temple after the restoration completed in 1983. Conventional spirit leveling and traverse methods had been applied separately to monitor the vertical and horizontal displacement of the temple. This separation often resulted in different stations having different information. Global Positioning System is able to provide precise and reliable information for the horizontal and vertical component, thereby unifying the networks and maximizing individual strengths. This study aims to analyze the stability of Borobudur temple through the integration of GPS and terrestrial data measurements at Borobudur monitoring network.

The data are acquired from the measurement campaigns which include precise GPS observation in 2002, 2003 and 2012, and the leveling and traversing data performed within 2002 and 2012. Stability analysis was performed by determining the magnitude and the rate of horizontal and vertical displacement vector. Static deformation model was applied for all data to determine the deformation between epochs. The kinematic model was applied for GPS data observation to calculate the rate of displacement. This vector was used to predict the GPS network points positions at the epoch same as the terrestrial data. GPS and terrestrial data integration was performed using Procrustes solution. The stability analysis by geometric method was performed for GPS and terrestrial data separately and from the integrated data. This geometric analysis result was then compared qualitatively with the previous geotechnical data for the evaluation.

The results from this study described millimeter precision for the GPS position estimation and sub millimeter for the rate of displacement, and proved that the 2012 epoch added in this study has increased the precision. The horizontal displacement analysis based on multi epochs GPS data has shown that it has been influenced by the external factor. This could be proved from the average value of the displacement magnitude and the direction was consistent with the tectonic movement of Java island. From the internal horizontal displacement analysis, the results from GPS data gave similar figure of the horizontal displacement with the terrestrial data and some significant horizontal displacement occurred in the Zone-1 level network. Further analysis of the horizontal displacements rate indicated that the temple is still in stable condition. The vertical displacement analysis from leveling data show contradictory results with the geotechnical study. Vertical displacement analysis from the integrated GPS and leveling data has given downward movement with the rate approximately 3.7 mm/yr. The 3D displacement analysis from integrated GPS and terrestrial data indicated that the displacement was

caused by external and internal factors. The result shows that the rate of 3D displacement was about 6.4 mm/yr and dominated by the vertical displacement.

Keywords: GPS, traversing, levelling, Procrustes solution, deformation analysis, Borobudur

