



JURNAL TEKNIK SIPIL KOKOH

Journal homepage: <https://ejournal.upi.edu/index.php/kokoh>

PENENTUAN NILAI PERGERAKAN VERTIKAL PADA TITIK PANTAU DEFORMASI DI KOMPLEK CANDI PRAMBANAN

Widya Hanifazza¹, Nurrohmat Widjajanti²

^{1,2}Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gdjah Mada
Koresponden : nwidjajanti@ugm.ac.id

ABSTRACT

Prambanan Temple is one of the largest Hindu temples in Indonesia that has been declared one of the world heritage sites by UNESCO in 1991. The soil structure underneath the temples consists of Young Mount Merapi and sand sediments characterized as a light structure. It can shift quickly, making Prambanan Temple susceptible to vertical movements. Geodetic measurement was held periodically using Total Station, but there has not been any comprehensive analysis for the vertical movements. The study generated computation for the vertical movements of the monitoring point located on the body of the Prambanan Temple. Then an analysis of the vertical movement was generated. This computation uses observations data of the vertical angles and horizontal distance for the first- period (2019) and the second-period measurement (2020) from the deformation monitoring points spread across six temples in the yard of Prambanan Temple. The height value (Z) and standard deviation are computed using a general least square adjustment method. The vertical deformation is analyzed by a statistical test which consists of a significance test for different parameters and a single point displacement test using a confidence level of 95%. Furthermore, analysis of the vertical movement velocity is carried out at each monitoring point. The result is the Z value for the second-period measurement along with its precision, the value of vertical movement, and the velocity of vertical movement at each monitoring point. The Z value obtained in the second-period measurement has a standard deviation value of less than 4 mm, ranging from 0,322 to 3,096 mm.

ARTICLE INFO

Article history:

Received:

Received in revised form:

Accepted:

Available online:

Keywords:

Prambanan Temple, Total Station, least square adjustment, combination method, vertical movement,

1. Pendahuluan

Candi Prambanan merupakan situs bersejarah peninggalan kerajaan Mataram yang kira-kira dibangun pada abad ke-9 Masehi. Candi Prambanan telah dinyatakan sebagai situs warisan dunia (*World Heritage*) oleh *United Nations Educational Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) pada tahun 1991, sehingga perlu dijaga kelestarian dan keberadaannya dari bahaya kerusakan fisik baik karena usia, kegagalan struktur, ataupun bencana alam yang terjadi. Kompleks Candi Prambanan terdiri atas beberapa candi yang dibangun sebagai persembahan untuk Trimurti (tiga dewa utama Hindu), yaitu Candi Brahma, Candi Wisnu, dan Candi Siwa (Candi Roro Jonggrang) serta candi yang berukuran lebih kecil dari ketiga candi utama yaitu Candi Nandi, Candi Angsa, dan Candi Garuda.

Situs ini terletak tidak jauh dari kaki Gunung Merapi dan berada dekat aliran Sungai Opak yang juga merupakan bagian dari Sesar Opak. Sesar Opak merupakan salah satu patahan aktif yang terletak di sepanjang aliran Sungai Opak yang memiliki arah ke barat daya-timur laut (Natawidjaja, 2016). Sebagai akibat dari gempa Yogyakarta tahun 2006, beberapa bangunan candi di kompleks Candi Prambanan mengalami kerusakan. Struktur tanah di sekitar kompleks Candi Prambanan terdiri atas endapan Gunung Merapi Muda dan endapan pasir halus (Pramumijoyo, dkk., 2009) yang merupakan kondisi yang kurang tepat untuk konstruksi bangunan karena sifatnya yang tidak padat sehingga mudah bergeser.

Nilai deformasi pada badan candi dianggap perlu mengingat lokasi Candi Prambanan yang terletak di jalur patahan aktif yaitu Sesar Opak dan faktor usia serta jenis material penyusun struktur Candi Prambanan. Jenis material penyusun pada struktur bangunan bersejarah dapat memberikan pembebanan pada struktur bangunan itu sendiri sehingga dapat menjadi salah satu penyebab terjadinya deformasi (Telioni, dkk, 2006).

Pengukuran deformasi sebelumnya sudah pernah dilakukan pada permukaan tanah di sekitar Candi Prambanan, namun pengukuran pada badan candi baru dilaksanakan pertama kali pada tahun 2018 dalam kegiatan PTUPT yang menghasilkan koordinat 3D dari titik pantau yang berada pada badan candi (Widyaningsih, 2019). Penelitian yang terdahulu hanya menghasilkan nilai koordinat 3D dari titik-titik pantau dan belum menghasilkan nilai deformasi pada titik pantau yang terletak di badan candi. Kajian ini dapat menghasilkan nilai deformasi vertikal pada titik pantau yang terletak di badan Candi Prambanan.

Hasil kajian ini berupa nilai tinggi titik pantau pada tahun 2020 beserta ketelitiannya, nilai pergerakan vertikal dari tahun 2019 s.d. 2020, dan nilai kecepatan pergerakan vertikal pada setiap titik pantau. Pengukuran titik pantau badan Candi Prambanan dilakukan dengan *Total Station* yang didirikan pada titik kontrol yang berada di sekitar halaman candi. Metode pengukuran vertikal menggunakan metode trigonometri. Pengukuran tersebut dapat diperoleh data berupa jarak dan sudut *heling*, yang selanjutnya diolah untuk mendapatkan koordinat Z (nilai tinggi) dari setiap titik pantau. Sebelum nilai tinggi digunakan untuk penentuan nilai pergerakan vertikal pada badan Candi Prambanan, diperlukan hitungan perataan untuk menghasilkan nilai estimasi nilai tinggi

beserta ketelitiannya. Hitung perataan yaitu hitung perataan metode kombinasi. Penggunaan metode kombinasi dapat membentuk persamaan lebih fleksibel, tidak ada aturan untuk penentuan parameter dan ukuran, serta nilai residu dan nilai parameter dapat ditentukan secara bersamaan saat proses iterasi (Apriyanti, 2015). Nilai pergerakan vertikal dari titik-titik pantau diperoleh dengan data dua kala yang berbeda. Data terdiri atas data sekunder berupa data ukuran titik pantau pada tahun 2019 dan data primer berupa data ukuran titik pantau pada tahun 2020.

2. Metode

2.1. Data dan Lokasi

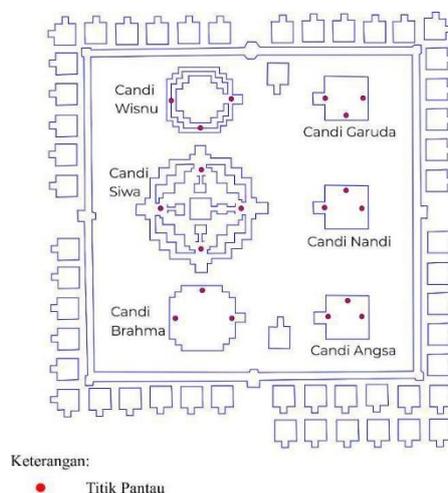
Data berupa data pengukuran sudut vertikal dan jarak horizontal titik pantau deformasi pada pengamatan tahun 2019 dan 2020. Lokasi Candi Prambanan terletak di Desa Prambanan, Daerah Istimewa Yogyakarta, berada pada $7^{\circ}45'8''\text{LS}$ dan $110^{\circ}29'30''\text{BT}$.

2.2. Metodologi

Tahapan meliputi akuisisi data, *screening* data pengukuran, hitung perataan metode kombinasi, uji statistik setelah perataan, analisis pergerakan vertikal, dan visualisasi pergerakan vertikal yang terjadi pada titik pantau deformasi.

2.2.1. Akuisisi Data

Survei pendahuluan dilakukan untuk menentukan skema pengukuran, persebaran titik pantau deformasi, dan lokasi titik kontrol. Bahan sebelum pengukuran berupa data koordinat 3D dan ketelitiannya dari titik-titik ikat. Data koordinat 3D titik ikat diperoleh dari laporan pemantauan deformasi Candi Prambanan dalam kegiatan PTUPT-UGM oleh (Muryamto, 2018). Koordinat titik ikat diperoleh dari pengukuran dengan *receiver* GNSS geodetik frekuensi ganda sesuai spesifikasi SNI JKH yang memenuhi orde-0 dengan metode relatif statik dengan durasi pengamatan selama 1x24 jam kontinyu dan nilai *sampling rate* 15 detik. Jumlah titik ikat sebanyak 10 buah, dengan rincian tiga titik yang terletak di luar pelataran Candi Prambanan dan tujuh titik yang terletak di sekitar pelataran Candi Prambanan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Persebaran titik pantau deformasi di pelataran Candi Prambanan (modifikasi dari Muryamto, 2018)

Alat ukur pada pengukuran ini yaitu *Total Station* TOPCON GM-55 series. Alat ukur perlu dicek terkait kelengkapan dan syarat pemakaian alat ukur yang meliputi kesalahan kolimasi serta indeks vertikal, agar hasil pengukuran terhindar dari kesalahan sistematis. Besar nilai kesalahan kolimasi dan kesalahan indeks vertikal dihitung dengan persamaan (1) dan (2) (Basuki, 2011).

$$\text{Kesalahan kolimasi} : 90^\circ - \left(\frac{\text{Hz LB} - \text{Hz B}}{2} \right) \quad (1)$$

$$\text{Kesalahan indeks vertikal} : 180^\circ - \left(\frac{\text{Vt B} + \text{Vt LB}}{2} \right) \quad (2)$$

Keterangan:

Hz LB: bacaan sudut horizontal dalam kedudukan teropong luar biasa

Hz B : bacaan sudut horizontal dalam kedudukan teropong biasa

Vt LB : bacaan sudut vertikal dalam kedudukan teropong luar biasa

Vt B : bacaan sudut vertikal dalam kedudukan teropong biasa

Akuisisi data dilakukan dengan membaca bacaan sudut vertikal dalam keadaan teropong biasa dan luar biasa. Setiap titik pantau diukur sebanyak dua seri rangkap. Data yang diperoleh dari akuisisi data berupa sudut vertikal dan jarak horizontal. Perekaman data dilakukan secara manual dengan mencatat bacaan sudut vertikal, heling, dan jaraknya.

2.2.2. Screening Data Pengukuran

Tujuan screening data yaitu untuk mendeteksi kesalahan kasar dan sistematis pada data pengukuran. Pengecekan kesalahan sistematis pada data ukuran dilakukan dengan persamaan (3) (Basuki, 2011).

$$180^\circ - \left(\frac{\text{B} + \text{L}}{2} \right) \quad (3)$$

Keterangan:

B : bacaan sudut dalam kedudukan teropong biasa

LB : bacaan sudut dalam kedudukan teropong luar biasa

Nilai toleransi untuk screening data yaitu $k \sqrt{2}$ (k merupakan nilai ketelitian bacaan sudut pada Total Station) dengan nilai k pada alat pada kajian ini yaitu sebesar 5". Pengolahan data awal dilakukan dengan metode bowditch untuk mendapatkan nilai Z dari masing-masing titik pantau berdasarkan data pengukuran jarak dan sudut vertikal. Nilai Z tersebut sebagai nilai pendekatan pada proses hitung perataan.

2.2.3. Hitung Perataan Metode Kombinasi

Metode ini merupakan gabungan dari metode parameter dan metode kondisi. Nilai parameter tidak dihitung secara langsung namun melalui penyelesaian berdasarkan persamaan yang terdiri atas besaran ukuran. Hasil pengukuran merupakan fungsi parameter. Pada persamaan yang terbentuk, besaran ukuran saling terkait dan harus memenuhi syarat geometris dan matematis. Model fungsional pada metode kombinasi seperti pada persamaan (4) (Widjajanti, 2001).

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (4)$$

La merupakan besaran estimasi terbaik dari hasil pengamatan dan Xa merupakan nilai parameter yang dicari. Model linierisasi pada metode kombinasi seperti pada persamaan (5) (Widjajanti, 2001).

$$BV + AX + W = 0 \quad (5)$$

Nilai parameter dan residu didapatkan dengan persamaan (6) dan (7) (Widjajanti, 2001).

$$X = - [A^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A]^{-1} [A^T(BP^{-1}B^T)^{-1}W] \quad (6)$$

$$V = - P^{-1}B^T (BP^{-1}B^T)^{-1}(AX + W) \quad (7)$$

Keterangan:

X : matriks parameter yang dicari

V : matriks koreksi

B : matriks turunan persamaan terhadap ukuran

A : matriks turunan persamaan terhadap parameter

P : matriks bobot

W : matriks hasil hitungan matematis antara ukuran dan parameter pendekatan

Matriks varian-kovarian pengamatan hasil hitungan dapat diperoleh dengan hukum perambatan kesalahan acak seperti pada persamaan (8) dan (9) (Widjajanti, 2001).

$$\Sigma_x = \sigma_o^2 [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^{-1} \quad (8)$$

$$\sigma_o^2 \{P^{-1}B^T(BP^{-1}B^T)^{-1}(B\Phi - A(A^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A)^{-1}A^T(BP^{-1}B^T)^{-1}B\Phi)\} \quad (9)$$

2.2.4. Uji Statistik Setelah Perataan

Uji statistik setelah hitung perataan untuk mengetahui adanya kesalahan tak acak pada data hasil pengamatan. Pengujian statistik dilakukan terhadap nilai varian dan koreksi hasil pengamatan untuk rentang nilai kepercayaan tertentu. Uji statistik ini meliputi uji global dan data snooping (Nurrohmat & Heliani, 2005).

Uji global dilakukan terhadap semua data pengukuran setelah hitung perataan. Tujuan uji global yaitu untuk mengetahui keberadaan kesalahan tak acak yang mempengaruhi data pengukuran. Uji global dilakukan dengan membandingkan nilai varian aposteriori dengan nilai varian apriori terhadap nilai distribusi tabel Fisher (Ghilani, 2010). Tahapan uji global dimulai dengan penyusunan hipotesis seperti pada persamaan (10) dan (11).

$$H_o : \sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2 \quad (10)$$

$$H_a : \sigma_o^2 \neq \hat{\sigma}_o^2 \quad (11)$$

Hipotesis nol diterima jika memenuhi syarat pada persamaan (12) (Ghilani, 2010).

$$\frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} < F_{1-\alpha, df, \infty}^{1/2} \quad (12)$$

Keterangan:

σ_o^2 : varian apriori

$\hat{\sigma}_o^2$: varian aposteriori

$F_{1-\alpha, f, \infty}^{1/2}$: nilai distribusi tabel Fisher dengan taraf uji α dan derajat kebebasan (df)

2.2.5. Analisis Pergerakan Vertikal

Hitung analisis pergerakan vertikal dilakukan dengan membentuk persamaan pergerakan vertikal. Besar nilai pergerakan diperoleh dari selisih nilai tinggi (Z) kedua kala pengukuran yang disajikan dalam persamaan (13) (Widjajanti, 2001).

$$dz = h_{\text{kala II}} - h_{\text{kala I}} \quad (13)$$

Keterangan:

dz : nilai pergerakan vertikal

$h_{\text{kala I}}$: nilai tinggi kala I

$h_{\text{kala II}}$: nilai tinggi kala II

Analisis pergerakan vertikal digunakan untuk menentukan nilai pergerakan vertikal dan analisis ada tidaknya pergerakan vertikal yang terjadi pada titik-titik pantau dengan uji statistik (Widjajanti, 2001). Data yang diperlukan dalam analisis ini yaitu data hasil hitung perataan terpisah dari setiap kala beserta nilai estimasi parameter dari setiap kala, nilai matriks varian-kovarian nilai tinggi titik pantau setiap kala, dan nilai varian aposteriori setiap kala. Tahapan analisis pergerakan vertikal ini yaitu uji pergerakan titik pantau dan penentuan kecepatan pergerakan vertikal titik pantau.

Uji statistik dilakukan terhadap pergerakan titik pantau untuk mengetahui posisi titik yang mengalami pergerakan dengan metode data snooping. Tahap uji pergerakan titik pantau yaitu sebagai berikut (Widjajanti, 2001).

1. Menyusun hipotesis sebagai berikut:

H_0 : titik ke-i tidak mengalami pergerakan vertikal

H_a : titik ke-i mengalami pergerakan vertikal

2. Menetapkan tarif uji (α).
3. Menentukan nilai batas $F_{1-\alpha, \infty, df}$ dari tabel Fisher dengan argumen α .
4. Menghitung nilai uji (W_{di}) dengan persamaan (14).

$$W_{di} = \frac{Q_{di}^{-1} V_{di}}{\sigma_{od} \sqrt{N_{di}}} \quad (14)$$

5. Menguji hipotesis nol (H_0). H_0 diterima apabila memenuhi persamaan (15).

$$W_{di} \leq (\hat{F}_{1-\alpha, \infty, df})^{1/2} \quad (15)$$

Jika nilai H_0 diterima maka titik ke-i tidak mengalami pergerakan vertikal. Namun, apabila nilai H_0 ditolak maka titik ke-i mengalami pergerakan. Pergerakan tanah secara vertikal merupakan penyebab dari terjadinya perbedaan tinggi pada interval waktu antara kala pengamatan. Kecepatan pergerakan untuk masing-masing titik pantau dapat ditentukan dengan membagi perbedaan tinggi dengan selang waktu antara dua kala pengamatan yang berurutan. Secara matematis, nilai kecepatan pergerakan vertikal dapat dinyatakan, dalam persamaan (16) (Widjajanti, 2002).

$$V_i = \frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t_{n,n+1}} \quad (16)$$

Keterangan:

- V_i : kecepatan pergerakan titik pantau i selama n, n+1 (mm/tahun)
 h_i^{n+1}, h_i^n : tinggi (setelah hitung perataan) dari titik pantau i pada kala ke-n, ke-n+1 yang berurutan
 $\Delta t_{n,n+1}$: selisih waktu antara kala pengamatan ke-n+1 dengan kala ke-n

Varian kecepatan dapat ditentukan melalui hukum perambatan kesalahan varian-kovarian dengan persamaan (17) (Widjajanti, 2002).

$$\sigma_{v_i}^2 = \frac{\sigma^2 h_i^{n+1} + \sigma^2 h_i^n}{\Delta t_{n,n+1}^2} \quad (17)$$

Keterangan:

- $\sigma_{n^2}, \sigma_{n+1^2}$: varian dari h_i^n, h_i^{n+1} yang ditentukan dari perataan masing-masing kala
 $\sigma_{v_i}^2$: varian kecepatan titik i

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Nilai Tinggi Titik Pantau Kala II Beserta Ketelitiannya

Hasil penentuan nilai tinggi titik pantau badan Candi Prambanan dilakukan dengan hitung perataan metode kombinasi. Metode kombinasi digunakan karena dalam tahap pembentukan persamaan perhitungan tinggi dengan trigonometrik terdiri atas ukuran dan parameter yang tidak bebas satu sama lain, melainkan harus memenuhi syarat geometris dan matematis pengukuran. Persamaan yang terbentuk tidak linier sehingga perlu dilakukan iterasi. Iterasi pada persamaan untuk pergerakan vertikal pada kajian ini dilakukan sebanyak delapan kali. Parameter yang dicari pada perhitungan ini yaitu 19 nilai tinggi titik pantau badan Candi Prambanan pada kala II pengamatan. Hasil estimasi nilai tinggi titik pantau badan Candi Prambanan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai tinggi titik pantau kala II beserta ketelitiannya.

No	Titik	Z (m)	Simpangan baku (mm)
1	Nu	153,372	0,3
2	Gb	150,837	0,4
3	Gs	151,426	0,3
4	Nb	153,353	0,4
5	Au	152,472	0,5
6	Ab	152,242	0,3
7	Gt	158,379	3,1
8	Nt	160,100	1,7
9	At	154,819	2,1
10	Wt	153,787	0,4
11	Ws	153,770	0,5
12	St	156,120	0,3
13	Bu	154,764	0,3
14	Bt	153,671	0,4
15	Ss	157,232	0,3
16	Wb	155,659	0,3
17	Sb	160,769	0,4
18	Su	157,310	0,5
19	Bb	153,998	0,6

Nilai simpangan baku dari nilai Z diperoleh dengan cara mengakar-kuadratkan diagonal matriks variankovarian parameter (Σ_x). Hubungan setiap titik pantau dengan simpangan bakunya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 2. Berdasarkan grafik pada Gambar 2 terlihat bahwa nilai simpangan baku terbesar terletak pada titik pantau Gt, yaitu sebesar 3,1 mm. Kemudian titik At dan Nt dengan nilai simpangan baku masing-masing sebesar 2,1 mm dan 1,7 mm. Hal ini dapat terjadi karena nilai simpangan baku dipengaruhi oleh nilai jarak antara titik ikat dengan titik pantau pada badan candi. Semakin besar jarak antara titik ikat dengan titik pantau, maka simpangan bakunya juga semakin besar.



Gambar 2. Grafik ketelitian pengukuran pada tiap titik pantau

Berdasarkan data pengukuran jarak datar, titik pantau Gt, At, dan Nt memiliki jarak yang cukup jauh serta ketiga titik tersebut masing-masing diukur dari dua titik ikat yang sama, yaitu titik ikat Z2 dan PRB2. Berikut jarak titik pantau Gt, At, dan Nt terhadap titik ikatnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jarak titik pantau Gt, At, dan Nt terhadap titik ikatnya

Titik	Jarak Datar (m)
Z2-Gt	94,349
PRB2-Gt	172,274
Z2-At	78,117
PRB2-At	109,433
Z2-Nt	78,681
PRB2-Nt	139,478

Tabel 2 menunjukkan adanya kesesuaian terhadap prinsip hitung perataan kuadrat terkecil yang menyatakan bahwa titik pantau dengan jarak yang dekat dari titik ikat memiliki simpangan baku yang kecil dan titik pantau dengan jarak yang jauh dari titik ikat memiliki simpangan baku yang besar. Faktor lain yang dapat mempengaruhi nilai ketelitian pada estimasi nilai tinggi titik pantau yaitu kesalahan pada ukuran heling dan tinggi alat.

3.2. Hasil Uji Global Setelah Perataan

Hasil uji global setelah hitung perataan nilai tinggi dengan metode kombinasi disajikan pada Tabel 3.

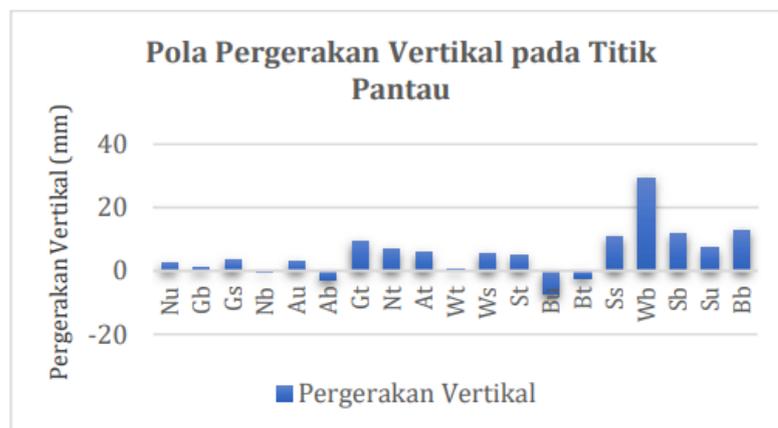
Tabel 3. Hasil uji global setelah hitung perataan metode kombinasi

Varian Aposteriori ($\hat{\sigma}_o^2$)	Varian Apriori (σ_o^2)	df	Nilai Tabel Fisher ($\alpha =$ 0,05)	Hasil
$3,78 \times 10^{-4}$	1	19	1,58	diterima

Tingkat kepercayaan pada uji global ini sebesar 95%. Hasil uji global yaitu hipotesis nol (H_0) diterima yang menunjukkan bahwa tidak ada kesalahan tak acak pada data pengamatan. Tahap data snooping tidak dilakukan pada uji statistik setelah perataan karena data pengamatan lolos uji global yang mengindikasikan tidak adanya kesalahan tak acak yang harus dicari.

3.3. Nilai Pergerakan Vertikal Titik Pantau

Nilai pergerakan diperoleh dari hasil selisih nilai tinggi kala II dengan nilai tinggi kala I yang ditentukan dengan persamaan (15). Nilai dan pola pergerakan vertikal dari setiap titik pantau badan Candi Prambanan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik pola pergerakan vertikal pada titik pantau

Berdasarkan Gambar 3, pergerakan vertikal yang terjadi cenderung berupa kenaikan, kecuali pada titik pantau Ab, Bu, dan Bt. Ketiga titik tersebut mengalami pergerakan vertikal berupa penurunan. Penurunan pada titik Ab, Bu, dan Bt masing-masing sebesar 0,27 cm, 0,73 cm, dan 0,22 cm, sedangkan pergerakan titik pantau yang mengalami kenaikan terbesar terdapat pada titik Wb, yaitu sebesar 2,94 cm.

Pergerakan pada titik tersebut dapat mencapai fraksi sentimeter dikarenakan adanya pengaruh dari sifat material penyusun lapisan tanah di bawah pelataran Candi Prambanan yang berupa sedimen pasir yang bersifat tidak padat sehingga rentan terhadap pergerakan vertikal. Titik Wb dimungkinkan terjadi kesalahan pembidikan prisma dikarenakan jarak yang cukup jauh antara titik pantau Wb dengan titik ikat.

Faktor lain yang dapat menyebabkan terjadinya pergerakan vertikal yang signifikan yaitu beban mati dan beban hidup dari bangunan candi. Beban mati yaitu berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang (SNI 1727:2013 pasal 3.1), sedangkan beban hidup yaitu beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan (beban angin, beban hujan, beban gempa, atau beban banjir) (SNI 1727:2013 pasal 4.1). Beban hidup yang dimaksud pada kajian ini yaitu beban yang disebabkan oleh aktivitas manusia pada bangunan candi.

Nilai pergerakan vertikal yang diperoleh perlu diuji secara statistik untuk mengetahui signifikansi perbedaan nilai pergerakan vertikal.

3.4. Hasil Uji Pergerakan Titik

Uji pergerakan titik dilakukan untuk mengetahui titik-titik pantau yang mengalami pergerakan secara statistik. Prinsip uji statistik dalam uji pergerakan titik-titik pantau pada badan Candi Prambanan yaitu metode data snooping. Hasil uji pergerakan titik disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hasil uji pergerakan titik

Uji pergerakan titik pantau ini dilakukan dengan nilai derajat kebebasan (df) sebesar tak hingga, derajat kepercayaan sebesar 95%, dan nilai $df = 1$. Nilai table Fisher dalam uji statistik ini yaitu sebesar 1,04. Penolakan H_0 pada uji pergerakan titik menunjukkan bahwa titik pantau bergerak secara vertikal. Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa telah terjadi pergerakan vertikal pada semua titik pantau deformasi. Namun demikian, besarnya pergeseran ini harus dievaluasi lagi karena belum dilakukan uji stabilitas titik ikat yang digunakan dalam penentuan tinggi titik pantau.

3.5. Nilai Kecepatan Pergerakan Vertikal Titik Pantau

Analisis kecepatan pergerakan vertikal pada setiap titik pantau diperoleh dengan membagi nilai pergerakan yang terjadi pada rentang waktu tertentu dengan interval waktu pengamatan. Hasil analisis kecepatan pergerakan vertikal titik pantau disajikan pada Tabel 4 dan grafik kecepatan pergerakan vertikal pada titik pantau dapat dilihat pada Gambar 5..

Tabel 4. Kecepatan pergerakan vertikal pada setiap titik pantau.

Nama Titik	Kecepatan Pergerakan Vertikal (cm/tahun)
Nu	0,23
Gb	0,11
Gs	0,33
Nb	-0,003
Au	0,29
Ab	-0,28
Gt	0,94
Nt	0,69
At	0,59
Wt	0,006
Ws	0,55
St	0,49
Bu	-0,74
Bt	-0,23
Ss	1,09
Wb	2,94
Sb	1,17
Su	0,73
Bb	1,28



Gambar 5. Grafik kecepatan pergerakan vertikal Berdasarkan nilai pada Tabel 4 dan grafik pada Gambar 5 hasilnya menunjukkan bahwa nilai kecepatan kenaikan titik pantau terkecil terjadi pada titik Wt dengan nilai kecepatan pergerakan sebesar 0,06 cm/tahun, sedangkan titik Wb memiliki nilai kecepatan kenaikan titik pantau terbesar dengan nilai sebesar 2,94 cm/tahun. Selain itu, nilai kecepatan penurunan titik pantau terkecil terdapat pada titik Nb dengan nilai kecepatan pergerakan sebesar -0,03 cm/tahun dan nilai kecepatan penurunan titik pantau terbesar terdapat pada titik Bu dengan nilai sebesar -0,74 cm/tahun.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan, nilai tinggi (Z) titik pantau hasil perataan metode kombinasi lolos uji global pada tingkat kepercayaan 95%. Ketelitian dari 19 nilai tinggi titik pantau memiliki simpangan baku antara 0,3 mm s.d. 3,1 mm. Hasil uji pergerakan titik vertikal menggunakan metode data snooping dengan tingkat kepercayaan 95% menunjukkan

adanya penolakan H_0 dimana semua titik mengalami pergerakan vertikal. Besarnya pergeseran ini harus dievaluasi lagi karena belum dilakukan uji stabilitas titik ikat yang digunakan dalam penentuan tinggi titik pantau. Hasil analisis kecepatan pergerakan naik titik pantau terkecil terdapat pada titik Bu yaitu sebesar 0,73 cm/tahun. Nilai kecepatan pergerakan naik titik pantau terbesar terdapat pada titik Wb yaitu sebesar 2,94 cm/tahun. Nilai kecepatan pergerakan turun titik pantau terkecil terdapat pada titik Nb yaitu sebesar 0,03 cm/tahun dan nilai kecepatan pergerakan turun titik pantau terbesar terdapat pada titik Bu yaitu sebesar 0,74 cm/tahun.

Referensi

- Apriyanti, D. (2015). Analisis Deformasi Aspek Geometrik 3D pada Titik Kontrol Pemantauan Bendungan Waduk Sermo. Universitas Gadjah Mada.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). SNI 1727:2013. Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Basuki, S. (2011). Ilmu Ukur Tanah (Edisi Revisi). Yogyakarta. Gadjah Mada University Press.
- Ghilani, C.D. (2010). Adjustment Computation: Spatial Data Analysis. 5 th. Canada.
- John Wiley & Sons Inc. Muryanto, R. (2018). Laporan Pemantauan Deformasi Candi Prambanan dalam Kegiatan PTUPT-UGM. Sekolah Vokasi UGM.
- Natawidjaja, D.H. (2016). GEOMAGZ Majalah Geologi Populer. Retrieved from Kementrian ESDM Badan Geologi. Website: <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/misteri-patahan-sumber-gempa-yogya-2006/>.
- Nurrohmat, W. & Heliani, L. (2005). Perataan Jaring Geodesi. Jurusan Teknik Geodesi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada.
- Pramumijoyo, S., Ahmad R., Suprpto S., Hariana S., Ni Luh Nyoman R., Aris M., Darmojo B.A., & Kayato H. (2009). Membangun Kembali Prambanan. Balai Pelestarian Peninggalan Purbakala Yogyakarta.
- Telioni, E., George G., & Caterina S. (2006). Determination of Deformations of the Ancient Temple of Zeus in Nemea, Greece. 3rd IAG/12th FIG Symposium.
- Baden. Widjajanti, N. (2001). Deformasi Dasar. Teknik Geodesi. Universitas Gadjah Mada.
- Widjajanti, N. (2002). Deformasi Vertikal. Teknik Geodesi. Universitas Gadjah Mada.
- Widyaningsih L. (2019). Penentuan Koordinat 3D pada Titik Pantau Deformasi Badan Candi Prambanan dengan Hitung Perataan. Universitas Gadjah Mada