

# Kombinasi Survei Terrestrial dan Satelit Navigasi untuk Pendefinisian Koordinat Titik Pemantauan Candi Prambanan

Rochmad Muryanto<sup>a, 1</sup>, Hidayat Panuntun<sup>a</sup>, Hanif Ilmawan<sup>a, 2\*</sup>, Erlyna Nour Arrofiqoh<sup>a</sup>, Afradon Aditya Setyawan<sup>a</sup>, Muhammad Iqbal Taftazani<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

<sup>1</sup> [rochmad\\_mury@ugm.ac.id](mailto:rochmad_mury@ugm.ac.id); <sup>2</sup> [hanif.ilmawan@ugm.ac.id](mailto:hanif.ilmawan@ugm.ac.id)\*

Informasi artikel	ABSTRAK
<i>Sejarah artikel</i> Diterima : 2024-02-18 Revisi : 2024-07-26 Dipublikasikan : 2024-08-15	Candi Prambanan dibangun di atas kondisi struktur tanah yang tidak stabil, yaitu pada lapisan tanah pasir dengan kepadatan sedang. Pada sisi sebelah barat terdapat sesar pada bentang alam Sungai Opak yang dapat mempengaruhi kestabilan Candi Prambanan. Pemantauan secara rutin dari aspek geometrik pada Candi Prambanan diperlukan karena Candi Prambanan berada di wilayah yang rawan gempa serta berada pada struktur tanah yang labil. Penelitian ini telah berhasil mendefinisikan koordinat X, Y, Z dan $\phi$ , $\lambda$ , h Titik Pantau berdasarkan pengamatan GPS dengan pengolahan <i>post-processing</i> menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK (GNSS at MIT/Global Kalma Filter). Tinggi ortometrik (H) seluruh Titik Pantau telah didapatkan dari pengukuran beda tinggi dengan titik referensi TTG-852 (Titik Tinggi Geodesi 852) dan dihitung menggunakan metode <i>least square adjustment</i> . Posisi kala ke-1 Candi Prambanan didapatkan dengan melakukan pengukuran pengikatan ke muka dari Titik Pantau terhadap reflektor yang dipasang pada tubuh candi. Hasil pengukuran ini berupa posisi definitif dari Titik Pantau dan Titik Pengamatan pada tubuh Candi Prambanan dengan rata-rata simpangan baku pada koordinat X, Y, dan H berturut-turut adalah sebesar 1,27 mm, 2,04 mm, dan 2,17 mm. Koordinat tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam pemantauan deformasi di tahun yang akan datang.
<b>Kata kunci:</b> Candi Prambanan Pemantauan Deformasi Konservasi Cagar Budaya	<b>ABSTRACT</b> <i>Prambanan Temple was built on an unstable soil structure—a layer of sandy soil with medium density. While on the west side, there are faults in the Opak River which could affect the stability of Prambanan Temple. Due to those situations, periodic monitoring of geometric aspects is necessary. This research has succeeded in defining X, Y, Z and <math>\phi</math>, <math>\lambda</math>, h coordinates of Monitoring Points based on GPS observations which was post-processed using GAMIT/GLOBK (GNSS at MIT/Global Kalma Filter) software. The orthometric height (H) of all Monitoring Points had been obtained from the height difference survey tied to the TTG-852 (Titik Tinggi Geodesi 852) reference point and calculated using the least square adjustment method. The position of Prambanan Temple was obtained by measuring the reflector mounted on the body of the temple using intersection method. The results were definitive position of Monitoring Points and Observation Points on the Prambanan Temple structure, with the average standard deviations in the X, Y, and H coordinates being 1.27 mm, 2.04 mm, and 2.17 mm, respectively. Those coordinates could be used as reference points in monitoring deformation in the following years.</i>
<b>Keywords:</b> Prambanan Temple Deformation Survey Conservation Cultural Heritage	

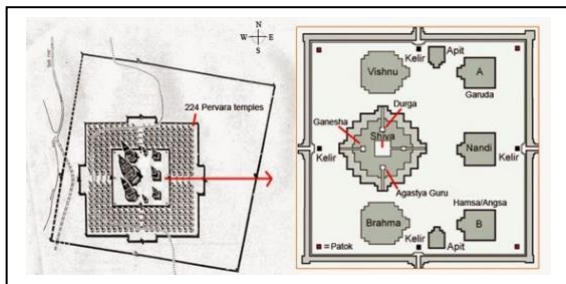
## Pendahuluan

Candi Prambanan merupakan bangunan bersejarah yang diperkirakan dibangun pada tahun 856 Masehi. Seorang berkebangsaan Belanda bernama C. A. Lons menemukan kembali candi ini dalam kondisi runtuh pada tahun 1733.

UNESCO memberikan pengakuan internasional dengan memberikan status warisan dunia yang wajib dilestarikan pada tahun 1991.

Kompleks bangunan Candi Prambanan terdiri atas tiga bagian tingkatan halaman. Pada

tingkatan tertinggi, terdapat tiga Candi Trimurti, tiga Candi Wahana, dua Candi Apit, empat Candi Kelir, dan empat Candi Patok. (Gambar 1).



**Gambar 1.** Denah Candi Prambanan (Muryanto dkk., 2019)

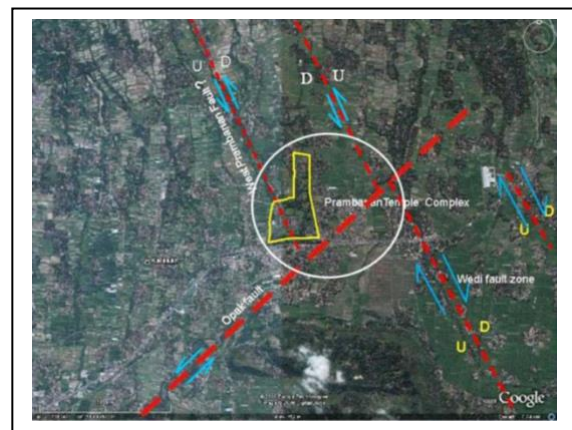
Candi Prambanan terletak di kaki Gunung Merapi. Candi ini dibangun di atas tanah dengan struktur yang labil, yaitu berupa tanah timbunan pasir yang dipadatkan dengan kepadatan sedang. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sutarto dkk. (2018), ditemukan mata air pada kedalaman 14 meter dari permukaan tanah.

Terdapat Sesar Opak pada sisi barat kompleks Candi Prambanan (Gambar 2). Handayani (2019) menjelaskan bahwa Sesar Opak merupakan patahan aktif dengan orientasi timur laut-barat daya. Lebar zona sesar sebesar 2,5 km dan dapat dibedakan menjadi dua blok. Blok timur bergeser ke arah utara, sedangkan blok barat relatif bergeser ke arah selatan. Sesar Opak membentang dari kawasan Pantai Parangtritis ke arah utara hingga mencapai wilayah timur Kota Yogyakarta (Tsuji dkk., 2009).

Menurut BMKG (2023), Sesar Opak bergerak aktif sehingga sering menjadi penyebab terjadinya gempa di Yogyakarta. Salah satu gempa terbesar yang berasal dari aktivitas sesar Opak terjadi pada tahun 2006. Gempa bumi dengan magnitudo 6,3 tersebut menyebabkan 6.234 korban jiwa dan banyak bangunan rusak, termasuk Candi Prambanan. Sesar Opak terus aktif hingga saat ini dan terakhir menyebabkan gempa di Bantul tanggal 30 Juni 2023 lalu dengan magnitudo 6,0.

Secara umum, penilaian bahaya akibat bencana alam pada suatu objek warisan budaya biasanya dilakukan setelah bencana alam tersebut terjadi. Hal ini menyebabkan kurangnya skenario pencegahan dan mitigasi bencana pada objek

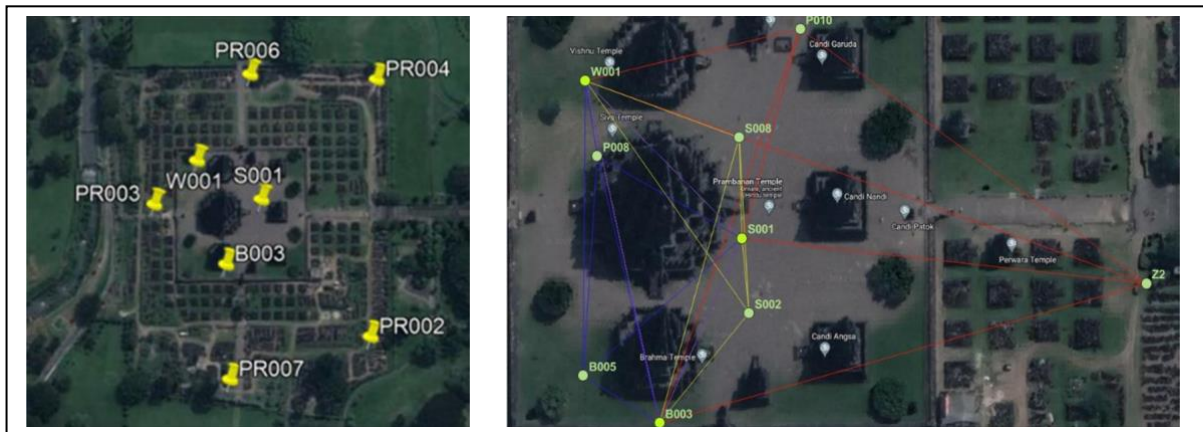
warisan budaya yang terdampak. Tanpa skenario yang jelas, dampak yang ditimbulkan akibat bencana alam akan menjadi lebih kompleks dan parah. Salah satu bencana alam yang memberikan kerusakan signifikan pada Candi Prambanan adalah Gempa Jogjakarta tahun 2006 (Kompas, 2016). Akibat dari gempa tersebut, batuan atap dan pagar langkan pada Candi Siwa, Brahma, Wisnu, dan Wahana mengalami kerusakan. Kerusakan yang dimaksud berupa adanya batuan candi yang jatuh, retak, dan lepas.



**Gambar 2.** Zona Sesar Opak dan sesar lainnya di sekitar Komplek Candi Prambanan. (dimodifikasi dari Wirakusumah dkk., 2010)

Monitoring secara kontinu menjadi salah satu dasar untuk perencanaan konservasi yang berkelanjutan di kawasan Candi Prambanan. Salah satu bentuk monitoring yang dilakukan adalah monitoring struktur tubuh Candi Prambanan dan deformasi permukaan di kawasan candi tersebut. Secara umum, ketidakstabilan struktur dan deformasi permukaan dapat disebabkan oleh gerakan jangka panjang yang disebabkan oleh aktivitas tektonik dari sesar yang terdapat di sekitar Kawasan Candi Prambanan.

Salah satu teknik pengamatan teliti yang bisa digunakan untuk monitoring struktural dan deformasi permukaan di kawasan cagar budaya adalah pengamatan geodetik berbasis satelit (Kuczyńska dkk., 2019; Tang dkk., 2016; Themistocleous dkk., 2021). Pada penelitian ini, digunakan teknologi Global Navigation Satellite System (GNSS), Waterpass Digital, dan Total Station untuk mengukur titik pantau sebagai salah



**Gambar 3.** Sebaran titik kontrol di Kawasan Candi Prambanan

satu bentuk dari kegiatan monitoring struktural dan deformasi permukaan di Kawasan Candi Prambanan.

Penelitian ini bertujuan untuk mendefinisikan koordinat X, Y, Z dan  $\phi$ ,  $\lambda$ , h jaringan Titik Pantau yang tersebar di dalam dan luar area inti Candi Prambanan. Koordinat tersebut merupakan pengukuran kala ke-1 yang dapat digunakan sebagai acuan pemantauan yang akan datang.

### Perkembangan Pemantauan Deformasi Candi Prambanan

Studi tentang pemantauan Candi Prambanan pernah dilakukan oleh Balai Pelestarian Peninggalan Purbakala Yogyakarta—kini bernama Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X—pada tahun 1995, 1999, 2001, dan 2002 (BP3, 2004). Pengukuran dilakukan dengan metode triangulaterasi pada kerangka poligon tertutup di delapan titik pantau Candi Siwa. Pengukuran jarak dilakukan dengan pita ukur yang memiliki ketelitian 1 mm. Alat ukur sudut yang digunakan adalah teodolit. Metode hitungan koordinat menggunakan metode Bowditch pada sistem koordinat lokal. Metode hitungan analisis pergeseran dilakukan dengan membandingkan perubahan koordinat antara dua periode, yaitu tahun 1997 dengan 1999 dan tahun 1999 dengan 2001.

Studi dilanjutkan oleh Wicaksono (2014) dan Shodiq (2015) dengan menggunakan titik dan kerangka yang sama. Pengukuran dilakukan satu kali pada tahun 2013 dan dua kali pada tahun 2015. Pengukuran ini menggunakan alat ukur sudut dan jarak berupa Total Station Nikon DTM-352 dengan ketelitian sudut 5" dan jarak 3 mm +

3 ppm. Metode hitungan untuk memperoleh koordinat dilakukan dengan hitung kuadrat terkecil metode parameter (Wicaksono, 2014) dan metode *inner constraint* (Shodiq, 2015). Perhitungan koordinat masih menggunakan metode *Bowditch*, tetapi dengan sistem koordinat global. Salah satu titik kontrol diikatkan terhadap N0005 dan TTG 836 melalui pengukuran GNSS. Proses analisis telah menggunakan *global congruency test* dan uji-uji statistik, sehingga hasil yang didapatkan lebih baik daripada periode sebelumnya. Analisis dilakukan dengan menggunakan data multi-kala dan kombinasinya, mulai dari data 1999 hingga 2015. Dengan demikian, pola arah pergeseran dan variasi nilai dapat diketahui.

Studi selanjutnya dilakukan Muryanto dkk. (2019) dengan fokus pada pembangunan jaring titik kontrol. Jaring titik kontrol diukur menggunakan metode GNSS dan diolah dengan perangkat lunak *scientific* GAMIT v.10.70. Pengolahan dilakukan dengan metode jaring orde 0 dan diikatkan pada tujuh titik IGS (*International GNSS Service*) Global. Studi ini telah mendefinisikan koordinat X, Y, Z delapan titik kontrol dengan simpangan baku horizontal sebesar 3-7 mm dan simpangan baku vertikal sebesar 9-13 mm.

### Metode

Melanjutkan studi-studi yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini dilakukan di Candi Prambanan yang terletak di perbatasan antara Provinsi D. I. Yogyakarta dengan Provinsi Jawa Tengah pada bulan Juli tahun 2022. Jaringan Titik Pantau dibuat di sekitar kompleks Candi Prambanan. Terdapat delapan Titik Pantau Utama

yang tersebar di halaman utama dan halaman luar Candi Prambanan (Gambar 3). Tiga titik berada di halaman utama (S001, B003, dan W001) sedangkan lima titik lainnya berada di halaman luar (PR002, PR003, PR004, PR006, dan PR007). Titik Pantau Perapatan sejumlah enam titik juga dibangun di halaman Candi Prambanan. Titik-titik tersebut yaitu P008, P010, B005, S002, S008, dan Z002.

Metode pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini merupakan kombinasi antara pengukuran GNSS dan teristris. Pengukuran GNSS dilakukan guna mendapatkan koordinat X, Y, Z dan  $\phi$ ,  $\lambda$ , h beserta simpangan bakunya. Pengolahan data GNSS dilakukan dengan metode jaring orde 0 dan diikatkan pada delapan titik IGS Global. Untuk mendapatkan tinggi orthometrik (Z), dilakukan pengukuran beda tinggi dengan menggunakan alat Waterpass Digital yang diikatkan pada satu Titik Tinggi Geodesi (TTG) bernomor 852. Perhitungan beda tinggi dan tinggi titik hasil pengukuran sipat datar dilakukan dengan metode *least square adjustment* (LSA). Pengukuran GNSS dan Waterpass dilakukan terhadap seluruh Titik Pantau Utama dan Perapatan. Setelah mendefinisikan posisi Titik Pantau, dilakukan pengamatan terhadap titik pengamatan yang berada di tubuh candi. Pengukuran dilakukan dengan metode pengikatan ke muka menggunakan alat Total Station. Target yang digunakan adalah reflektor yang dipasang di tubuh candi. Pengukuran titik pengamatan dilakukan secara berulang sehingga mendapatkan nilai lebih yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan koordinat definitif X, Y, dan H menggunakan metode LSA.

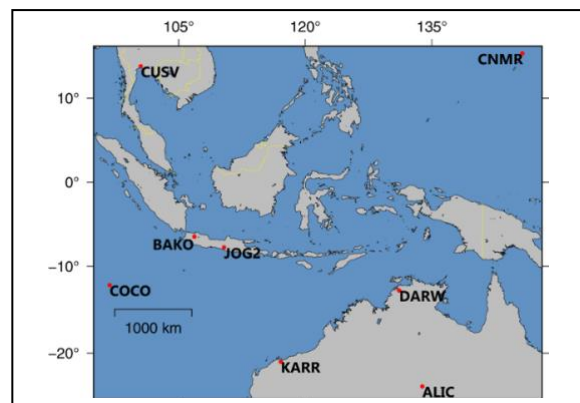
### Pengukuran dan Pengolahan Data GNSS

Pengukuran delapan Titik Pantau Utama dilakukan menggunakan standar spesifikasi teknis yang tertulis pada SNI JKH untuk orde-0. Secara spesifik, delapan Titik Pantau tersebut diukur dengan receiver GNSS tipe Geodetik *dual frequency*. Metode pengukuran yang digunakan adalah pengukuran statik dengan durasi 3 x 24 jam secara kontinu. Selama 72 jam pengamatan, receiver diatur untuk menerima sinyal GNSS dengan sampling rate setiap 15 detik. Karena letak delapan titik tersebut relatif dekat, tidak dilakukan pengamatan meteorologis seperti yang disyaratkan pada pengukuran titik orde-0. Dalam

hal ini, diasumsikan bahwa parameter meteorologis di tiap titik adalah konstan.

Agar titik koordinat yang dihasilkan optimal, pendefinisian titik berdasarkan pada minimal data pengamatan dari 4 satelit GNSS dengan nilai *Dilution of Precision* (DOP) kurang dari 10. Pengukuran enam Titik Pantau Perapatan dilakukan dengan metode yang serupa, tetapi lama pengamatannya hanya 4 jam. Konfigurasi pengukuran Titik Pantau Perapatan melibatkan tiga Titik Pantau Utama (B003, S001, dan W001) yang posisinya dianggap *fix*.

Data pengamatan GNSS yang berbentuk RINEX diolah menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK. Pengolahan data dilakukan dengan pendekatan yang hampir sama dengan pendekatan yang digunakan oleh (Heliani dkk., 2014). Dalam hal ini, stasiun pengamatan yang berada dalam satu jaring pengamatan dianalisis dengan mengasumsikan bahwa parameter orientasi bumi (*Earth Orientation Parameter* atau EOP) sejajar dengan orbit GNSS.



**Gambar 4.** Stasiun IGS yang digunakan pada pengolahan jaring GNSS.

*Fenite Element Solution* 2004 (FES2004) digunakan untuk model koreksi pasang surut air laut (Panuntun, 2012). Pengolahan dilakukan dengan metode jaring, dimana titik kontrol yang diukur harus diikatkan pada stasiun tetap IGS yang beroperasi 24 jam tanpa henti. Pada penelitian ini, delapan stasiun IGS digunakan sebagai stasiun referensi metode pengolahan jaring dengan GAMIT/GLOBK (Gambar 4). Penggunaan delapan stasiun IGS tersebut dimaksudkan agar solusi *loose constraint* yang dihasilkan oleh GAMIT ditransformasi dengan transformasi enam parameter ke dalam sistem koordinat *International Terrestrial Reference Frame* 2014 (ITRF2014) (Altamimi dkk., 2016).

## Pengukuran dan Penghitungan Tinggi Orthometrik

Pengukuran posisi vertikal titik pantau dilakukan secara simultan terhadap 14 titik yang sebelumnya telah diukur posisi horizontalnya dengan GNSS. Pengukuran dilakukan dengan alat Waterpass Digital dalam suatu geometri jaringan sipat datar. Geometri jaringan sipat datar yang dipakai untuk pengukuran posisi vertikal ini berbentuk *loop* atau berupa jaringan sipat datar tertutup. Pembentukan *loop* dipilih karena lebih mudah dalam penentuan koreksi kesalahannya. Kontrol kesalahan suatu jaringan sipat datar tertutup (*loop*) didasarkan pada beda total dalam satu loop harus sama dengan nol. *Loop* dalam pengukuran ini dibuat menjadi dua, yaitu *loop* luar yang menghubungkan titik-titik pantau di halaman 2 candi dan *loop* dalam yang menghubungkan titik-titik pantau di halaman 1. Loop luar dan loop dalam dihubungkan dengan pengukuran secara pulang-pergi sisi PR03-P008. Dalam pengukuran ini, spesifikasi pengukuran jaringan sipat datar dibuat dengan mengacu pada kelas jaring LAA pada Standar Nasional Indonesia (SNI) Jaring Kontrol Vertikal (JKV).

Jaringan sipat datar dalam suatu pengukuran hanya akan memiliki nilai tinggi lokal apabila belum didefinisikan ketinggian titiknya melalui pengikatan ke titik yang telah diketahui ketinggiannya. Dalam pengukuran ini, jaringan sipat datar diikatkan pada satu Titik Tinggi Geodesi (TTG) bernomor 852. Posisi TTG-852 berada di pondasi Jembatan Bogem bagian selatan. Titik TTG-852 tersebut sudah terintegrasi dengan Jaring Kontrol Vertikal Nasional (JKVN). Data ketinggian TTG-852 diperoleh dari Badan Informasi Geospasial. Tinggi yang digunakan adalah tinggi orthometrik dan dinotasikan dengan simbol H.

Perhitungan beda tinggi dan tinggi titik hasil pengukuran sipat datar dilakukan dengan metode LSA. Persamaan pengamatan linier untuk n beda tinggi seksi (antar titik) pada LSA parameter dengan 1 titik ikat A yang mengikuti persamaan umum:

$$L + V = AX \quad (1)$$

Dalam hal ini, persamaannya menjadi:

$$\begin{aligned} \Delta H_1 + V_1 &= -H_{awal} + H_1 \\ \Delta H'_1 + V'_1 &= H_{awal} - H_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 + V_2 &= -H_1 + H_2 \\ \Delta H'_2 + V'_2 &= H_1 - H_2 \\ &\vdots \\ \Delta H_n + V_n &= -H_n + H_{awal} \\ \Delta H'_n + V'_n &= H_n - H_{awal} \end{aligned} \quad (2)$$

Nilai parameter pada matriks X diperoleh berdasarkan persamaan:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (3)$$

Dimana bobot pengukuran pada matriks P berbanding terbalik dengan jarak:

$$P = \frac{1}{\sqrt{d_i^2}} = \frac{1}{d_i} \quad (4)$$

Selanjutnya dihitung residu pengukuran V dari matriks X dengan persamaan berikut :

$$V = AX + F \quad (5)$$

Matriks V selanjutnya dipakai untuk memperoleh nilai varian a posteriori dengan persamaan berikut:

$$\sigma_o^2 = \frac{V^T P V}{n-u} \quad (6)$$

Selanjutnya untuk memperoleh nilai simpangan baku setiap titik dihitung matriks varian-kovarian sebagai berikut:

$$\Sigma_{xx} = \sigma_o^2 (A^T P A)^{-1} \quad (7)$$

Hasil dari proses ini adalah koordinat tinggi beserta simpangan bakunya. Hasil ini diintegrasikan dengan posisi horizontal pada pengolahan data GNSS untuk memperoleh koordinat horizontal dan vertikal tubuh candi.

## Pengukuran Posisi Horizontal dan Vertikal Tubuh Candi

Target dipasang pada tubuh candi dengan tujuan untuk pemantauan pergerakan horizontal dan vertikal candi-candi utama. Target berupa reflektor ditanam di batu penyusun candi sedemikian rupa sehingga sangat kuat dan bertahan lama. Pemasangan reflektor pada tubuh candi dilakukan pada semua candi utama (Siwa, Brahma, Wishnu, Angsa, Garuda, dan Nandi). Pada setiap candi utama dipasang sebanyak 3 reflektor, kecuali candi Siwa sebanyak 4 reflektor.

Titik yang terpasang berjumlah total 19 titik sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Lokasi pemasangan setiap prisma pada tubuh candi dipilih dengan mempertimbangkan hal-hal berikut:

1. Mampu diamati dengan dari minimal dua titik pantau;
2. Berada pada batu candi baru;
3. Pada sudut elevasi yang masih mampu terjangkau dari tanah (tidak terlalu tinggi);

4. Bisa dihitung posisi 3D-nya (horizontal dan vertikal) berdasarkan 2 titik pantau; serta
5. Titik pantau yang dipakai harus memiliki *backsight* untuk memudahkan hitungan.

**Tabel 1.** Rincian pemasangan prisma target di tubuh candi.

No.	Kode	Lokasi Candi	Titik Pantau
1	SU	Siwa Utara	W001, P008
2	SS	Siwa Selatan	S002, B005
3	SB	Siwa Barat	P008, PR03
4	ST	Siwa Timur	S001, S002
5	WS	Wisnu Selatan	S001, S008
6	WT	Wisnu Timur	S001, S008
7	WB	Wisnu Barat	W001, P008, PR03
8	BU	Brahma Utara	S001, S002
9	BB	Brahma Barat	B005, P008
10	BT	Brahma Timur	S001, S002
11	GS	Garuda Selatan	S001, S008
12	GB	Garuda Barat	S001, S008
13	GT	Garuda Timur	Z2, PR02
14	NU	Nandi Utara	P010, S008
15	NB	Nandi Barat	S001, S002
16	NT	Nandi Timur	Z2, PR02
17	AU	Angsa Utara	S001, S002
18	AB	Angsa Barat	S001, S002
19	AT	Angsa Timur	Z2, PR02

Pengukuran posisi 3D (horizontal dan vertikal) prisma target di tubuh candi dilakukan dengan alat Total Station. Posisi alat berada di Titik Pantau yang telah didefinisikan koordinatnya melalui pengukuran GNSS dan Waterpass. Metode yang diterapkan untuk pengukuran posisi horizontal adalah dengan *intersection* atau pemotongan ke muka. Pada metode pemotongan ke muka, target diukur dari dua titik lain yang sudah didefinisikan koordinatnya. Sudut horizontal dan jarak mendatar ke target yang akan diukur guna mendapatkan koordinat X dan Y. Dalam hal ini, setiap titik berdiri alat perlu arah acuan berdasarkan titik *backsight* yang merupakan titik pantau juga.

Penentuan posisi vertikal dilakukan dengan metode trigonometri. Metode ini pada prinsipnya adalah mengukur beda tinggi antar dua titik menggunakan data sudut vertikal ataupun data sudut heling dan jarak datar. Beda tinggi dijumlahkan dengan tinggi acuan untuk

memperoleh tinggi target atau posisi vertikalnya. Data yang diukur adalah data tinggi alat ( $h_i$ ), jarak miring ( $S_{AB}$ ), dan sudut heling ( $\theta$ ). Dalam hal ini, tinggi target ( $h_t$ ) = 0, karena langsung menempel pada tubuh candi (tanpa statif). Elevasi target ( $H_t$ ) dihitung dengan rumus berikut:

$$H_t = H + \Delta H \quad (8)$$

dengan

$$\Delta H = h_i + S \sin \theta - h_t \quad (9)$$

Pengukuran dilakukan dari beberapa posisi sehingga mendapatkan hasil ukuran lebih. Posisi horizontal (X, Y) dihitung dengan hitung perataan metode LSA kombinasi, sedangkan posisi vertikal (H) dihitung dengan hitung perataan metode LSA parameter.

### Koordinat Definitif dan Evaluasi Ketelitian

Hasil pengolahan data GNSS pada titik pantau utama disajikan dalam Tabel 2. Koordinat titik kontrol hasil pengolahan data GNSS disajikan dalam sistem koordinat kartesi 3D. Sistem tersebut memiliki standar sebagai berikut: (1) titik pusat sistem koordinat kartesi berada pada pusat bumi; (2) sumbu X adalah perpotongan meridian nol *Conventional Zero Meridian* (CZM) dengan bidang ekuator; (3) sumbu Z adalah garis dalam arah *Conventional Terrestrial Pole* (CTP); serta (3) sumbu Y merupakan garis pada bidang ekuator yang tegak lurus pada sumbu X dan Z dalam kaidah tangan kanan (Leick dkk., 2015).

Simpangan baku terbesar berada pada sumbu Y dengan rentang 12,34 mm hingga 18,33 mm. Simpangan baku terkecil berada sumbu Y dengan rentang 4,83 mm hingga 6,13 mm. Kecenderungan ini juga terjadi pada hasil pengolahan data GNSS titik pantau perapatan (Tabel 3). Nilai simpangan baku sumbu Y adalah yang terbesar dengan rentang 15,98 mm hingga 55,54 mm. Nilai simpangan baku sumbu Z menjadi yang terkecil dengan rentang 3,73 mm hingga 9,52 mm. Simpangan baku titik pantau perapatan secara umum lebih besar daripada titik pantau utama. Hal ini adalah wajar mengingat orde pengukuran titik pantau utama lebih tinggi daripada titik pantau perapatan. Untuk memudahkan pengamatan pada tubuh candi, koordinat 3D hasil pengamatan GNSS kemudian dikonversi menjadi sistem koordinat UTM Zona 49S. Daftar koordinat Titik Pantau Utama dan Perapatan dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 2.** Koordinat 3D titik pantau utama.

No	Titik	X (m)	S <sub>x</sub> (mm)	Y (m)	S <sub>y</sub> (mm)	Z (m)	S <sub>z</sub> (mm)
1	PR06	-2212567,819	9,04	5920496,715	15,17	-854530,884	5,28
2	PR07	-2212537,689	10,39	5920469,141	18,33	-854783,559	5,91
3	PR04	-2212671,772	8,90	5920457,467	14,96	-854533,376	5,40
4	PR02	-2212655,722	9,97	5920430,753	17,10	-854751,800	5,73
5	PR03	-2212487,979	7,96	5920512,006	12,34	-854641,351	4,83
6	B003	-2212543,061	9,37	5920486,149	17,37	-854690,363	6,13
7	S001	-2212574,303	9,29	5920482,806	15,98	-854635,994	5,38
8	W001	-2212525,713	8,95	5920506,258	17,18	-854600,033	5,53

**Tabel 3.** Koordinat 3D titik pantau perapatan.

No	Titik	X (m)	S <sub>x</sub> (mm)	Y (m)	S <sub>y</sub> (mm)	Z (m)	S <sub>z</sub> (mm)
1	P008	-2212518,147	13,48	5920507,045	37,97	-854613,616	9,52
2	B005	-2212522,759	12,37	5920496,736	30,97	-854673,158	8,73
3	S008	-2212566,936	20,97	5920488,784	21,36	-854613,967	3,73
4	S002	-2212565,655	77,87	5920482,881	55,54	-854657,857	4,09
5	P010	-2212581,665	13,80	5920487,350	29,76	-854586,053	6,71
6	Z002	-2212663,397	9,09	5920443,882	20,21	-854651,844	5,63

**Tabel 4.** Koordinat UTM titik pantau.

No	Station	Easting (m)	Northing (m)	h (m)
1	PR06	443916,283	9143190,080	176,418
2	PR07	443898,025	9142934,879	174,458
3	PR04	444027,358	9143187,692	176,381
4	PR02	444021,943	9142967,208	175,477
5	PR03	443836,306	9143078,725	177,817
6	B003	443896,992	9143029,590	179,547
7	S001	443927,343	9143084,528	179,939
8	W001	443873,599	9143120,752	180,002
9	P008	443866,256	9143107,039	179,926
10	B005	443874,254	9143046,989	179,988
11	S008	443918,330	9143106,750	179,947
12	S002	443919,250	9143062,474	179,944
13	P010	443932,591	9143134,930	179,960
14	Z002	444024,412	9143068,243	176,840

Hasil pengolahan tinggi orthometrik menunjukkan simpangan baku maksimal 1,580 mm (Tabel 5). Tinggi orthometrik ini digunakan untuk menentukan posisi vertikal target pada tubuh candi.

Hasil perhitungan koordinat tubuh candi menunjukkan hasil dengan ketelitian hingga fraksi milimeter (Tabel 6). Simpangan baku terbesar terdapat pada koordinat Y dengan nilai 13,20 mm. Rata-rata simpangan baku pada koordinat X, Y, dan tinggi H berturut-turut adalah sebesar 1,27 mm, 2,04 mm, dan 2,17 mm. Koordinat ini

selanjutnya dapat digunakan sebagai data kala ke-1 dan menjadi acuan bagi pengukuran di tahun-tahun selanjutnya.

Costamagna dkk. (2020) menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) untuk pemantauan deformasi Loka-Hteik-Pan Temple (Bagan, Myanmar) Hasilnya mengindikasikan kemampuan TLS untuk mendeteksi perubahan sebesar 1 cm atau lebih, tetapi dapat ditingkatkan lagi jika menggunakan titik kontrol sebagai referensi. Costamagna dkk. (2020) merekomendasikan pemasangan titik kontrol untuk memastikan

akurasi registrasi koordinat yang diukur secara berkala (*time series*).

**Tabel 5.** Tinggi orthometrik titik pantau.

No.	Titik	H (m)	S <sub>H</sub> (mm)
1	PR02	148,482	1,348
2	Z002	149,273	1,431
3	PR04	149,300	1,504
4	PR06	148,909	1,549
5	PR10	152,465	1,575
6	S008	152,515	1,579
7	S001	152,486	1,580
8	S002	152,519	1,580
9	B003	152,439	1,578
10	B005	152,427	1,575
11	W001	152,437	1,561
12	PR08	152,435	1,555
13	PR03	150,316	1,538
14	PR07	147,138	1,452

Senada dengan itu, Georgopoulos dkk. (2016) menekankan pentingnya penggunaan jaringan titik kontrol sebagai acuan pengamatan deformasi. Pengamatan TLS dengan acuan jaring titik kontrol untuk studi deformasi yang dilakukan Georgopoulos dkk. (2016) menghasilkan tingkat

ketelitian hingga 1 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil pengukuran Titik Pantau di Candi Prambanan pada kala ke-1 memiliki arti penting sebagai referensi bagi survei deformasi di tahun selanjutnya.

### Kesimpulan

Titik Pantau untuk mengamati deformasi Candi Prambanan telah berhasil didefinisikan koordinatnya. Koordinat yang digunakan dalam sistem proyeksi UTM Zona 49S dengan sistem tinggi orthometrik. Terdapat 14 Titik Pantau yang tersebar di sekitar kawasan Candi Prambanan. Hasil pengolahan data menunjukkan rata-rata simpangan baku koordinat sekitar 2 mm, yang mengindikasikan akurasi tinggi dari hasil kombinasi pengukuran GPS dan survei teristris. Selanjutnya, perlu dilakukan pengukuran secara berkala di tahun-tahun yang akan datang guna memantau pergerakan deformasi Candi Prambanan. Titik-titik pantau juga dapat digunakan sebagai titik kontrol pengukuran apabila akan dilakukan pengukuran topografi, fotogrametri, ataupun pemodelan 3D Candi Prambanan.

**Tabel 6.** Koordinat tubuh candi kala ke-1 tahun 2022.

Titik	X (m)	S <sub>x</sub> (mm)	Y (m)	S <sub>y</sub> (mm)	H (m)	S <sub>H</sub> (mm)
Nu	443944,256	1,36	9143089,403	1,87	162,633	1,50
Gb	443941,577	0,64	9143119,181	0,70	160,100	1,38
Gs	443944,432	0,59	9143118,082	0,74	160,689	1,38
Nb	443940,754	0,37	9143083,157	0,68	162,629	1,23
Au	443944,900	0,70	9143051,222	0,80	161,734	1,92
Ab	443941,290	0,82	9143047,828	0,74	161,513	1,36
Gt	443947,153	3,28	9143122,398	3,82	167,633	8,42
Nt	443947,582	1,48	9143085,212	3,05	169,358	4,87
At	443948,802	1,10	9143048,611	2,35	164,077	5,75
Wt	443902,579	1,54	9143119,386	1,54	163,052	1,36
Ws	443896,869	0,72	9143114,522	1,19	163,033	1,37
St	443906,824	0,38	9143081,634	0,54	165,387	1,20
Bu	443898,126	0,85	9143053,665	1,24	164,031	1,34
Bt	443903,233	1,71	9143049,025	1,58	162,940	1,37
Ss	443897,770	0,38	9143073,258	0,49	166,507	1,25
Wb	443889,984	1,76	9143122,648	2,83	164,913	1,21
Sb	443886,093	0,85	9143083,251	0,87	170,033	1,38
Su	443895,459	5,27	9143095,457	13,20	166,574	1,26
Bb	443890,339	0,41	9143048,451	0,46	163,217	1,59



## Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada khususnya Sekolah Vokasi atas hibah Penelitian Pemandatan Damas sehingga kegiatan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Selanjutnya penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah X atas izin dan bantuan selama proses akuisisi data.

## Referensi

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*(8), 6109–6131.
- BP3 Yogyakarta. (2004). *Pelapukan Batu Candi Siwa dan Upaya Penanganannya*.
- Costamagna, E., Santana Quintero, M., Bianchini, N., Mendes, N., Lourenço, P. B., Su, S., Paik, Y. M., & Min, A. (2020). Advanced non-destructive techniques for the diagnosis of historic buildings: The Loka-Hteik-Pan temple in Bagan. *Journal of Cultural Heritage*, *43*, 108–117.
- Georgopoulos, G. D., Telioni, E. C., & Tsontzou, A. (2016). The contribution of laser scanning technology in the estimation of ancient Greek monuments' deformations. *Survey Review*, *48*(349), 303–308.
- Handayani, L. (2019). Active Fault Zones of the 2006 Yogyakarta Earthquake Inferred from Tilt Derivative Analysis of Gravity Anomalies. *Riset Geologi dan Pertambangan*, *29*(1), 1–11.
- Heliani, L. S., Danardono, Widjajanti, N., & Panuntun, H. (2014). Multi-epoch GNSS Data Analysis on Geodynamics Study of Central Java. *Procedia Environmental Sciences*, *20*, 678–683.
- Kuczyńska, G., Stawska, M., & Walicka, A. (2019). Modern geodetic techniques in the monitoring of historic buildings. *E3S Web of Conferences*, *97*.
- Kusuma, W. (2016, Mei 27). *Gempa Bumi 2006 Porak-porandakan Kompleks Candi Prambanan*. Kompas.com. [https://regional.kompas.com/read/2016/05/27/08300061/gempa.bumi.2006.porak-porandakan.kompleks.candi.prambanan?page=all#google\\_vignette](https://regional.kompas.com/read/2016/05/27/08300061/gempa.bumi.2006.porak-porandakan.kompleks.candi.prambanan?page=all#google_vignette)
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
- Muryamto, R., Taftazani, M. I., Yulaikhah, Y., Cahyono, B. K., & Prasidya, A. S. (2019a). Development and Definition of Prambanan Temple Deformation Monitoring Control Points. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, *1*(2).
- Muryamto, R., Taftazani, M. I., Yulaikhah, Y., Cahyono, B. K., & Prasidya, A. S. (2019b). Development and Definition of Prambanan Temple Deformation Monitoring Control Points. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, *1*(2).
- Panuntun, H. (2012). *Penentuan Posisi Anjungan Minyak Lepas Pantai dengan Titik Ikat GPS Regional dan Global* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada.
- Putra, D. H. A. (2023, Agustus 3). *Ancaman Sesar Opak di DIY, Kepala BMKG: Mitigasi Harus Terus Dilakukan, Jangan Terputus!* BMKG.
- Shodiq, A. M. (2015). *Deformasi Horisontal Aspek Geometrik Candi Prambanan Sebelum dan Sesudah Gempa Yogyakarta Tahun 2006* [Skripsi]. Universitas Gadjah Mada.
- Sutarto, Kusumayudha, S. B., Murwanto, H., & Faranisya, S. (2018). Rock Types Characteristics of Prambanan and Sambisari Temples, Yogyakarta Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *212*(1).
- Tang, P., Chen, F., Zhu, X., & Zhou, W. (2016). Monitoring cultural heritage sites with advanced multi-temporal InSAR technique: The case study of the Summer Palace. *Remote Sensing*, *8*(5).
- Themistocleous, K., Danezis, C., & Gikas, V. (2021). Monitoring ground deformation of cultural heritage sites using SAR and geodetic techniques: the case study of Choirokoitia, Cyprus. *Applied Geomatics*, *13*, 37–49.
- Tsuji, T., Yamamoto, K., Matsuoka, T., Yamada, Y., Onishi, K., Bahar, A., Meilano, I., & Abidin, H. Z. (2009). Earthquake Fault of the 26 May 2006 Yogyakarta Earthquake Observed by

- SAR interferometry. Dalam *Earth Planets Space* (Vol. 61).
- Wicaksono, A. (2014). *Penentuan Pergeseran Horizontal Candi Prambanan* [Skripsi]. Universitas Gadjah Mada.
- Wirakusumah, A. D., Soehaimi, A., & Marjiyono. (2010). Geoseismic Research Concerning the Safeguard from the Earthquake Hazards to the World Heritage of Prambanan Temple. *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*.