

## Analisis struktur batuan di bawah permukaan kompleks arkeologis situs liyangan menggunakan *electrical resistivity tomography* dan *analytic signal geomagnetik*

Wrego Seno Giamboro<sup>1\*</sup>, Hafiz Hamdalah<sup>1</sup>, Wahyu Hidayat<sup>1</sup>, Bambang Kuncoro Prasongko<sup>2</sup>,  
Bonang Surya Utama<sup>1</sup>, Tegar Anandya Fathoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Engineering Departement UPN "Veteran" Yogyakarta

<sup>2</sup> Geological Engineering Departement UPN "Veteran" Yogyakarta  
Jl. Padjajaran/SWK 104 (Lingkar Utara) Condong Catur Yogyakarta

\*email: wrego\_seno@upnyk.ac.id

**Abstrak** – Situs Liyangan yang berada di lereng Gunung Sindoro merupakan kompleks pemukiman kuno yang dibangun di area basah yang kaya akan tumbuh – tumbuhan, ladang, dan area pesawahan. Investigasi geofisika menggunakan metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan Analytic Signal Geomagnetic (ASG) dilakukan di daerah penelitian untuk mengetahui struktur batuan di bawah permukaan. Data Electrical Resistivity Tomography (ERT) menunjukkan bangunan arkeologi pada situs Liyangan dibangun di atas batuan dengan tingkat nilai resistivitas rendah (<100 ohm.m) yang diinterpretasikan sebagai endapan alluvial yang memiliki saturasi air yang tinggi. Kedalaman endapan alluvial ini terdeteksi bervariasi antara 3 – 16 meter di bawah permukaan dan terdapat batuan dasar di bawah endapan alluvial ini yang berupa batuan vulkanik Gunung Sindoro. Hasil ini menunjukkan bahwa Situs Liyangan memiliki area yang subur dan kaya akan air sehingga memungkinkan peradaban masa lalu berkembang di sekitar area situs. Beberapa anomali yang diduga sebagai bangunan arkeologi yang terpendam juga terdeteksi pada penampang ERT dengan nilai resistivitas sedang – tinggi (1000-5000 ohm.m). Data ASG menunjukkan daerah Situs Liyangan yang terungkap saat ini memiliki rentang nilai intensitas kemagnetan rendah – sedang ((-55)-4.4nT), sedangkan area dugaan bangunan situs yang masih terpendam memiliki nilai intensitas magnetik tinggi (>22nT). Melalui peta ASG juga didapatkan dua buah struktur patahan berdasarkan nilai kontras intensitas magnetik yang berarah tenggara – barat laut dan timur laut – barat daya.

**Kata kunci:** Situs Liyangan, Geomagnetik, Resistivitas, Anomali

**Abstract** – The Liyangan site is located on the slopes of Mount Sindoro is an ancient residential complex built in a wet area rich in vegetation, fields, and rice fields. Geophysical investigations using the Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Analytic Signal Geomagnetic (ASG) methods were carried out in the study area to determine the rock structure below the surface. Electrical Resistivity Tomography (ERT) data shows that archaeological buildings at the Liyangan site are built on rocks with low resistivity values (<100 ohm.m) which are interpreted as alluvial deposits with high water saturation. The depth of this alluvial deposit is detected to vary between 3-16 meters below the surface and there is bedrock under this alluvial deposit in the form of volcanic rock of Mount Sindoro. These results indicate that the Liyangan Site has a fertile area and is rich in water, allowing past civilizations to develop around the site area. Several anomalies suspected to be buried archaeological structures were also detected in the ERT section with moderate to high resistivity values (1000-5000 ohm.m). The ASG data shows that the Liyangan Site area that is currently being revealed has a low to moderate magnetic intensity value range ((-55)-4.4nT), while the suspected buried site building area has a high magnetic intensity value (>22nT). Through the ASG map, two fault structures were also obtained based on the contrast value of the magnetic intensity which are trending southeast – northwest and northeast – southwest.

**Key words:** Geoelectric, Geomagnetic, Liyangan Site

### PENDAHULUAN

Sebuah pemukiman kuno yang lenyap akibat proses erupsi Gunung Sindoro ditemukan kembali dalam kompleks situs kuno yang tertata rapih dan menjadi suatu petunjuk yang sangat penting dalam mengungkap kehidupan sosial Jawa kuno. Situs tersebut dinamakan situs Liyangan yang berada di Dusun Liyangan, Desa

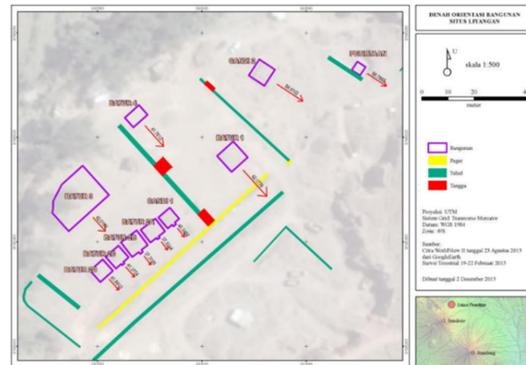
Purbosari, Kecamatan Ngadirejo, Kabupaten Temanggung, Jawa Tengah. Sebelum ditemukan, Situs Liyangan merupakan area pertanian masyarakat di sekitar Dusun Liyangan sampai akhirnya penambang pasir di sekitar situs menemukan fragmen bongkahan batu pada tahun 2000 yang menjadi awal mula pelestarian situs Liyangan [1] (**Gambar 1**).



**Gambar 1.** Eskavasi awal situs Liyangan oleh Balai Arkeologi Yogyakarta Pada Tahun 2010 [1].

Situs Liyangan tertimbun erupsi gunungapi Sindoro dan menimbun pemukiman kuno yang diperkirakan berasal dari kerajaan mataram kuno pada abad ke-8 sampai ke-10 masehi [2]. Terdapat beberapa bangunan kuno berupa batur, talud, petirtaan, altar dan beberapa sisa bangunan. Bangunan situs Liyangan diperkirakan menerus mengikuti lereng gunung Sindoro ke arah puncak dengan orientasi bangunan yang menghadap ke tenggara, dimana orientasi bangunan dianggap sebagai lanskap spiritual bagi pendiri bangunan ini [2] (**Gambar 2**).

Setelah dilakukan penelitian oleh Balai Arkeologi Yogyakarta, terungkap bahwa situs Liyangan merupakan area pemukiman kuno yang lengkap, mulai dari area hunian, pemujaan, dan pertanian. Melalui penelitian karbon pada benda-benda yang terdapat di situs Liyangan, terungkap bahwa situs Liyangan telah digunakan sebagai area pemukiman mulai abad ke - 2 masehi sampai abad ke - 11 masehi secara terus menerus sampai akhirnya tertutup material erupsi Gunung Sindoro di sekitar abad ke- 11 masehi [1]. Hal tersebut mengungkapkan bahwasannya usia situs Liyangan setara dengan peradaban Romawi kuno di Italia yang meyakinkan kita bahwa peradaban Jawa kuno telah memiliki sistem sosial dan peradaban yang maju.



**Gambar 2.** Orientasi struktur bangunan pada Situs Liyangan [2]

Pada saat ini diperkirakan baru sekitar 20% pemukiman yang terungkap dan tereskavasi oleh peneliti, dimana 80% pemukiman kuno pada situs Liyangan masih terkubur material vulkanik Gunung Sindoro. Hal tersebut menjadi permasalahan utama para peneliti arkeologi untuk memperkirakan seberapa luas area pemukiman kuno pada situs Liyangan. Melalui perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi penelitian mengenai obyek-obyek terpendam dapat dilakukan melalui penyelidikan berbagai metode geofisika. Penelitian mengenai obyek arkeologi terpendam telah dilakukan oleh beberapa peneliti [3-5]. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa nilai anomli rendah (VLF) yang diduga sebagai candi dengan nilai konduktivitas anomali yang rendah [3]. Hasil interpretasi GPR di Candi Kedulan memiliki pola refleksi yang *chaotic* pada penampang *radargram*, dimana struktur candi terbenam sejauh 7 meter di bawah permukaan [4]. Batuan candi yang terpendam memiliki nilai intensitas kemagnetan yang tinggi yang memberikan kontras dengan batuan sekitarnya [5].

Pemahaman mengenai batuan dasar sebuah situs arkeologi dapat memberikan gambaran mengenai kondisi lanskap dan lingkungan pada saat bangunan situs tersebut dibuat. Hal tersebut memiliki korelasi dengan aktivitas sosial masyarakat di sekitar situs pada masa lampau. Gambaran mengenai batuan dasar terutama yang sudah terendapkan di bawah permukaan dapat diketahui dengan melakukan analisis bawah permukaan. Untuk itu diperlukan teknologi yang mampu memberikan gambaran bawah permukaan mengenai batuan dasar di sebuah situs arkeologi. Teknologi yang digunakan dan diaplikasi pada penelitian ini adalah *Electrical Resistivity Tomography (ERT)* dan *Analytic Signal Geomagnetic (ASG)*, teknologi ini

merupakan salah satu pengembangan teknologi dari ilmu geofisika yang digunakan untuk mengukur sebaran nilai resistivitas/tahanan jenis dan intensitas kemagnetan batuan di bawah permukaan.

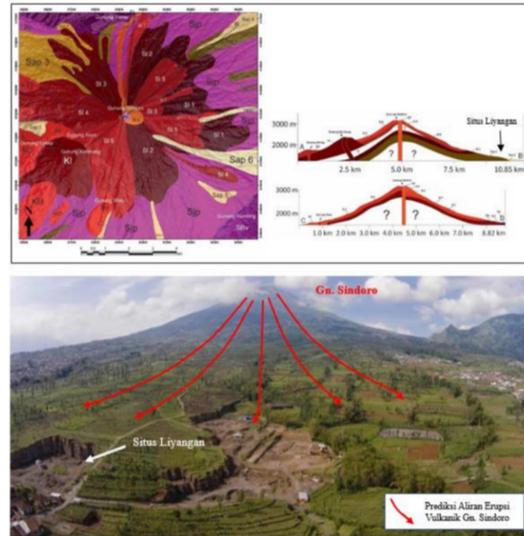
### Aspek Geologi Pengendapan Material Vulkanik Gunung Sindoro

Gunungapi Sindoro merupakan salah satu gunungapi aktif yang berada di Provinsi Jawa Tengah dan termasuk ke dalam jajaran gunungapi Kuarter di Pulau Jawa. Aktivitas vulkanisme Gunungapi Sindoro dapat dipelajari dari aspek vulkanostratigrafinya. Bemmelen, mengatakan bahwa pada tahun 1600 - 1617 Sindoro pernah meletus dengan hebatnya dan meluluh-lantakkan desa-desa yang berada di kakinya. Hal ini yang diperkirakan telah mengubur Situs Liyangan sedalam 10 meter di bawah permukaan tanah. Sedangkan Balai Arkeologi Yogyakarta berkesimpulan, pemusnahan peradaban akibat letusan Gunung Sindoro yang sangat dahsyat itu terjadi sekitar tahun 971 Masehi. Pembuktian kebenaran mengenai sejarah tertimbunya Situs Liyangan perlu dilakukan kajian terhadap aspek geologi pengendapan material vulkanik dari Gunung Sindoro yang mencakup analisa vulkanostratigrafi dan fasies vulkanik Gunung Sindoro. Hal ini bertujuan untuk melihat strata dan urutan-urutan kejadian letusan masa lalu yang dapat dilihat dari lapisan tanah yang berada sekitar situs Liyangan (**Gambar 3**).

Sistem Gunungapi Sindoro dapat dibagi menjadi tiga fasies yaitu fasies sentral, proksimal, dan medial dari beberapa pusat erupsi [6].

1. Fasies Sentral Sindoro (FSS) tersebar di bagian puncak Gunungapi Sindoro yang tersusun atas kubah lava dan endapan jatuhnya freatik.
2. Fasies Proksimal Sindoro (FPS) sebagian besar disusun oleh aliran lava hasil erupsi pusat Gunungapi Sindoro yang tersebar ke segala arah dan sedikit endapan klastika gunungapi seperti endapan aliran piroklastik dan endapan jatuhnya piroklastik. Fasies ini ditemukan pada morfologi lereng atas Gunungapi Sindoro.
3. Fasies Medial Sindoro (FMS) didominasi oleh endapan klastika gunungapi seperti endapan aliran piroklastik dan endapan jatuhnya piroklastik. Endapan yang menyusun fasies ini merupakan produk Gunungapi

Sindoro yang tersebar di bagian lereng bawah.



**Gambar 3.** Peta geologi dan vulkanostratigrafi daerah Gunung Sindoro berdasarkan interpretasi citra dan pemetaan geologi, data umur absolut [6]

### METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengaplikasikan metode geofisika *ERT* untuk mengetahui kondisi batuan bawah permukaan melalui distribusi nilai resistivitas batuan. Secara umum metode ini dikembangkan berdasarkan persamaan yang diturunkan melalui Hukum Ohm mengenai hubungan arus listrik ( $I$ ) dan beda potensial ( $\Delta V$ ) sebagai berikut:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

dengan,  $R$  Resistansi (Ohm),  $\Delta V$  = Beda potensial (Volt),  $I$  = Arus listrik (Ampere)

Berdasarkan hubungan di atas didapatkan nilai resistivitas batuan dengan mempertimbangkan faktor geometri/konfigurasi metode *ERT* yang digunakan. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi tahapan pengumpulan data lapangan (akuisisi), tahapan pengolahan data lapangan, dan tahapan analisis data.

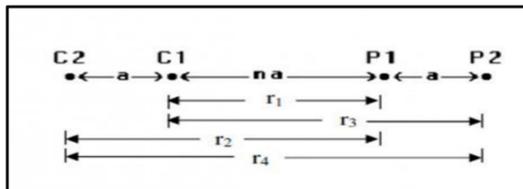
Metode *AST* merupakan salah satu filter pada data geomagnetic, dimana metode ini mengukur nilai intensitas medan magnet bumi yang dipengaruhi oleh nilai suseptibilitas batuan di bawah permukaan. Secara umum persamaan kuat medan magnet adalah sebagai berikut:

$$H = \frac{F}{q_2} = \frac{q_1}{\mu_0 r^2} \hat{r}_1 \quad (2)$$

dengan  $H$  adalah kuat medan magnet,  $F$  adalah gaya magnet,  $q_1$  dan  $q_2$  adalah besaran masing-masing benda,  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang bebas dan  $r$  adalah jarak antara  $m_1$  dan  $m_2$  [7]. Kemampuan suatu benda untuk termagnetisasi disebut suseptibilitasnya dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = kH \tag{3}$$

Tahapan awal dalam pengumpulan data lapangan adalah tahapan persiapan. Pada tahapan ini dilakukan studi literatur mengenai obyek penelitian, pemilihan metode tepat guna, pembuatan desain pengukuran, dan persiapan peralatan lapangan. Pada tahapan studi literatur dilakukan studi mengenai literatur – literatur pendukung mengenai obyek penelitian dan dari perspektif arkeologi dan geologi di sekitar Situs Liyangan. Tahapan akuisisi data dilakukan dengan penentuan konfigurasi metode geolistrik yang digunakan agar sesuai dengan obyek pengukuran. Dalam penelitian ini konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi dipole – dipole, dimana konfigurasi ini memiliki keunggulan dalam mendeliniasi perubahan sifat resistivitas di bawah permukaan baik secara horizontal dan vertikal (**Gambar 4**).



**Gambar 4.** Konfigurasi dipole – dipole dalam pengukuran geolistrik [7]

Setelah dilakukan penentuan konfigurasi, tahapan berikutnya dalam pengumpulan data lapangan adalah membuat desain pengukuran lapangan. Penentuan desain pengukuran lapangan dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang diantaranya; orientasi target, kondisi control geologi lapangan, topografi permukaan, dan ketersediaan pemukiman masyarakat di daerah penelitian. Adapun orientasi pengukuran lapangan pada penelitian ini berarah timur laut – barat daya dan tenggara – barat laut mengikuti arah orientasi Situs Liyangan (**Gambar 5**).



**Gambar 5.** Desain lintasan pengukuran metode geolistrik (Dimodifikasi dari Citra Google Earth yang diakses tanggal 8 Agustus 2022)

Pada akuisisi metode geomagnetik digunakan dua buah perangkat proton magnetometer yang berfungsi untuk mengukur variasi intensitas medan magnet bumi, dimana satu buah alat digunakan untuk mengukur variasi spasial medan magnet bumi dan satu alat yang lain digunakan untuk mengukur variasi temporal intensitas medan magnet bumi. Dari kedua data tersebut, kemudian didapatkan nilai intensitas medan magnet anomali melalui persamaan sebagai berikut:

$$H_a = H_{average} - H_{var} - H_{IGRF} \tag{4}$$

dengan,  $H_a$  : total intensitas medan magnet anomali,  $H_{ave}$  : rata – rata medan magnet spasial,  $H_{var}$  : variasi medan magnet temporal,  $H_{IGRF}$  : Koreksi IGRF (44700 nT).

Titik pengukuran lapangan metode geomagnetik dilakukan dengan sistem grid dimana jarak antar titik pengukuran sejauh 10 meter dengan arah grid timur – barat dan utara – selatan (**Gambar 6**).

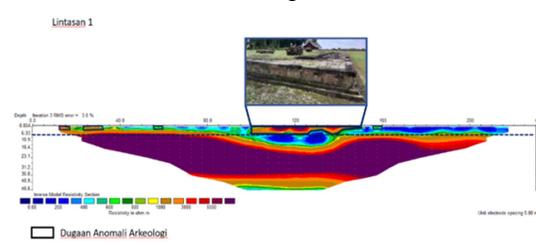


**Gambar 6.** Desain lintasan pengukuran metode geomagnetik (Dimodifikasi dari Citra Google Earth yang diakses tanggal 8 Agustus 2022)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil dan Pembahasan Metode ERT

Melalui proses inversi dua dimensi (2D) data metode geolistrik didapatkan penampang resistivitas 2D (**Gambar 7**) yang menunjukkan distribusi nilai resistivitas di bawah permukaan. Penampang resistivitas kemudian diinterpretasi berdasarkan tingkat nilai resistivitasnya untuk mengetahui struktur situs Liyangan serta struktur batuan di bawah permukaan situs.



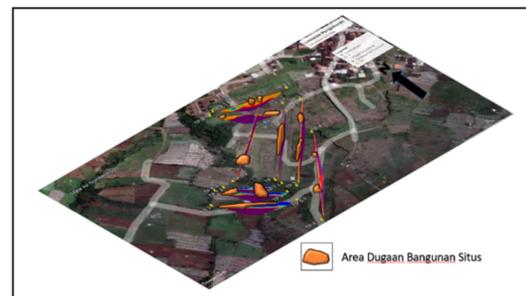
**Gambar 7.** Penampang 2D resistivitas batuan

Berdasarkan penampang 2D resistivitas batuan di bawah permukaan didapatkan variasi nilai resistivitas batuan di bawah permukaan. Penampang 2D menunjukkan batuan candi pada Situs Liyangan yang sudah terungkap maupun yang belum terungkap memiliki tingkat nilai resistivitas yang tinggi yakni sebesar 1000 – 5000 ohm.m. Hal tersebut karena struktur bangunan candi pada Situs Liyangan tersusun atas batuan beku vulkanik berupa batuan andesit yang merupakan produk erupsi dari Gunung Sindoro yang dapat diperoleh masyarakat sekitar pada jaman dahulu di sekitar kompleks Situs Liyangan.

Hal yang menarik dari hasil penampang 2D adalah batuan candi pada Situs Liyangan disusun di area dengan tingkat resistivitas yang rendah (1-300 ohm.m) yang menunjukkan area tersebut merupakan area yang basah dengan tingkat saturasi fluida yang tinggi. Area dengan tingkat resistivitas rendah ini menunjukkan daerah di sekitar Situs Liyangan pada masa lampau merupakan daerah basah yang kaya akan sumber daya air. Hal tersebut mengindikasikan pada masa lampau daerah di sekitar Situs Liyangan merupakan daerah yang kaya akan air sehingga dimanfaatkan oleh masyarakat pada masa itu sebagai lahan pesawahan, perkebunan dan pertanian. Hal tersebut diperkuat dengan berbagai peninggalan masa lampau pada Situs Liyangan yang diantaranya berupa produk pertanian berupa timbunan beras yang terbakar dan tertimbun di bawah permukaan.

Di bawah lapisan basah tersebut didapatkan batuan *basement* berupa batuan vulkanik hasil erupsi Gunung Sindoro yang digambarkan pada penampang 2D dengan tingkat resistivitas yang tinggi (>3000 ohm.m). Batuan *basement* ini menjadi dasar dari lapisan batuan basah yang diperkirakan berupa endapan aluvial sungai yang mengalir dari puncak Gunung Sindoro pada masa lampau. Batuan *basement* ini tersebar di seluruh daerah penelitian dengan persebaran mengikuti kelereng Gunung Sindoro.

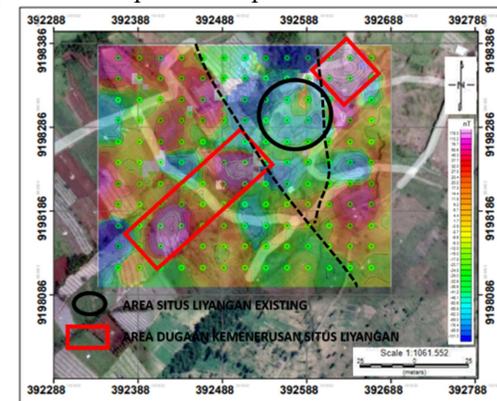
Pola sebaran batuan candi pada Situs Liyangan baik yang masih terpendam maupun yang sudah terungkap tersebar dengan arah timur laut – barat daya mengikuti kelereng Gunung Sindoro (**Gambar 8**).



**Gambar 8.** Persebaran dugaan bangunan Situs Liyangan

### B. Hasil dan Pembahasan Metode AST

Hasil metode geomagnetik berupa peta filter *AST* yang menunjukkan tingkat intensitas kemagnetan batuan. Peta filter *AST* pada daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 9**.



**Gambar 9.** Peta Analytic Signal Geomagnetic (AST)

Berdasarkan peta AST didapatkan informasi bahwa daerah penelitian memiliki tingkat intensitas yang beragam dengan range - 101,3 sampai 178 nT. Untuk area di sekitar Situs Liyangan yang sudah terungkap menunjukkan

nilai intensitas kemagnetan rendah – sedang ((-55)-4.4nT). Hal tersebut mengindikasikan daerah Situs Liyangan yang sudah terungkap merupakan area dengan tingkat sedimentasi yang tinggi atau merupakan area basah. Hal tersebut sesuai dengan analisis pada metode ERT bahwa bangunan candi pada Situs Liyangan dibangun di daerah basah yang merupakan daerah lahan pertanian yang kaya akan air. Terdapat indikasi area dugaan Situs Liyangan yang masih terpendam yang ditandai dengan garis merah yang ditunjukkan dengan nilai intensitas kemagnetan tinggi >22 nT.

Pada peta *AST* juga diindikasikan adanya struktur geologi berupa patahan yang ditunjukkan dengan garis putus – putus yang diinterpretasikan berdasarkan kontras nilai intensitas kemagnetan tinggi dan rendah dimana batas kontras nilai tersebut dapat diindikasikan sebagai struktur patahan/sesar. Didapatkan dua buah struktur patahan yang berarah tenggara – barat laut dan timur laut – barat daya. Struktur patahan ini menjadi salah satu faktor geologi yang mengontrol batuan di daerah sekitar Situs Liyangan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak yakni Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) UPN “Veteran” Yogyakarta yang memberikan pendanaan hibah internal yang mendanai penelitian pada publikasi ini. Penelitian ini juga dapat terlaksana atas Kerjasama dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Tengah yang telah mengakomodir dan memberikan akses penelitian di Situs Liyangan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Teknik Geofisika UPN “Veteran” Yogyakarta yang telah mengakomodasi peralatan lapangan dan pengolahan data dalam penelitian ini.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak yakni Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) UPN “Veteran” Yogyakarta yang memberikan pendanaan hibah internal yang mendanai penelitian pada publikasi ini. Penelitian ini juga dapat terlaksana atas Kerjasama dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Tengah yang telah mengakomodir dan memberikan

akses penelitian di Situs Liyangan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Teknik Geofisika UPN “Veteran” Yogyakarta yang telah mengakomodasi peralatan lapangan dan pengolahan data dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Riyanto, *Situs Liyangan dan Sejarahnya Peradaban Adiluhung di Lereng Gunung*, Yogyakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Badan Penelitian dan Pengembangan dan Perbukuan Pusat Arkeologi Nasional Balai Arkeologi Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, 2020.
- [2] D.A.Tanudirjo, J.S.E.Yuwono, dan A.M.W Adi, “Lanskap Spiritual Situs Liyangan”, *Jurnal Berkala Arkeologi* Vol 39 No. 2 Halaman 97 – 120, 2019.
- [3] Sismanto, “Laporan Teknis Pengukuran Pada Komplek Situs Candi Kedulan Dengan Menggunakan Metode VLF”, Yogyakarta: Lab. Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, UGM, 2004.
- [4] S.Husein, B. S Saptono, P.Subagyo, “Georadar Investigation at the Kedulan Temple Excavation Site, Kalasan, Yogyakarta. Yogyakarta”, Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering, UGM, 2010.
- [5] M. Firdaus, W.S. Giamboro, dan W. Hidayat, “Identification of Buried “Archeological” Objects in the Area Around Kedulan Temple Using Geomagnetic Methods”, *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 2021.
- [6] R. Sukhyar, N.S. Sumartadipura, dan Erfan R.D., “Peta Geologi Gunungapi Sundoro, Jawa Tengah skala 1:50.000”, Direktorat Vulkanologi, Bandung, 1992.
- [7] W.M. Telford, L.P. Geldart, and R.E. Sheriff *Applied Geophysics Second edition*. New York: Cambridge, 1990.