

KARAKTERISTIK DENSITAS BATU MARMER BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR PADA FORMASI TOTOGAN, KARANGSAMBUNG, KEBUMEN

CHARACTERISTICS OF MARBLE ROCK DENSITY BASED ON MICROTREMOR DATA IN TOTOGAN FORMATION, KARANGSAMBUNG, KEBUMEN

Nugroho Budi Wibowo^{1,2*}, T. F. Niryatama², Andi²

¹BMKG, Stasiun Geofisika Sleman, Yogyakarta

Jalan Wates Km 8 Jitengan, Balecatuur, Gamping, Sleman, Yogyakarta, Indonesia

*Email corresponding: nugroho.wibowo@bmgk.go.id

²Fakultas Sainstek, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga
Yogyakarta, Indonesia

Cara sitasi: N. B. Wibowo, T. F. Niryatama, Andi, "Karakteristik Densitas Batu Marmer berdasarkan Data Mikrotremor pada Formasi Totogan, Karangsembung, Kebumen," *Kurvatek*, vol. 11, no. 1, pp. 53-60, 2022. doi: 10.33579/krvtk.v11i1.6383 [Online].

Abstrak — Pada Desa Totogan terdapat singkapan Formasi Totogan yang tersusun atas batu pualam (marmer) berwarna putih, merah dan hijau. Batu marmer pada Formasi Totogan merupakan bagian dari cagar alam *Geopark* Karangsembung, sehingga keberadaannya menjadi salah satu situs yang penting. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran keberadaan batu marmer pada Formasi Totogan dengan menggunakan metode mikrotremor. Identifikasi keberadaan batu marmer dilakukan menggunakan parameter densitas batuan berdasarkan data mikrotremor. Nilai densitas pada lokasi pengukuran bervariasi antara 400 – 2600 kg/m³. Densitas batuan dengan nilai <1000 kg/m³ diinterpretasikan sebagai lapisan tanah permukaan, densitas 1000 – 1400 kg/m³ diinterpretasikan sebagai Batu Marmer terlapuk dan densitas >1400 kg/m³ merupakan Batu Marmer segar (*fresh marble*).

Kata kunci: Mikrotremor, Formasi, Totogan, Densitas

Abstract — In Totogan Village, there is an outcrop of the Totogan Formation which is composed of white, red and green marble. The marble stones in the Totogan Formation are part of the Karangsembung Geopark nature reserve, so its existence is one of the important sites. This study aims to determine the distribution of the presence of marble stones in the Totogan Formation using the microtremor method. Identification of the presence of marble stones was carried out using rock density parameters based on microtremor data. The density value at the measurement site varies between 400 – 2600 kg/m³. The density of rocks with a value of <1000 kg/m³ is interpreted as a surface soil layer, a density of 1000 – 1400 kg/m³ is interpreted as weathered Marble and a density of >1400 kg/m³ is fresh marble.

Keywords: Microtremor, Formation, Totogan, Density

I. PENDAHULUAN

Marmer adalah batuan alami yang berasal dari metamorfisme batu kapur karena panas dan tekanan yang meningkat di dalam bumi. Sejak beberapa dekade terakhir, marmer telah digunakan untuk banyak aplikasi dekorasi dan konstruksi. Ketersediaan endapan marmer menawarkan kelayakan pertumbuhan ekonomi dengan aplikasi potensial. Karakteristik marmer secara signifikan dipengaruhi oleh komposisi mineralnya. Banyak penelitian telah melaporkan mineral yang tersusun dalam marmer dari berbagai daerah seperti Pakistan [1-2], Yunani [3], Pohorje Mountain [4], pulau Thassos [5], Nigeria [6-7], Maroko [8-9], dan Göktepe (Muğla, Turki) [10]. Secara umum, identifikasi mineral dilakukan dengan menggunakan metode *X-ray Diffraction* (XRD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa marmer pada penelitian-penelitian terdahulu dibentuk oleh kalsit atau mineral dolomit. Salah satu parameter fisis yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi batuan penyusun bawah permukaan adalah densitas batuan (kg/m³). Pendekatan geofisika

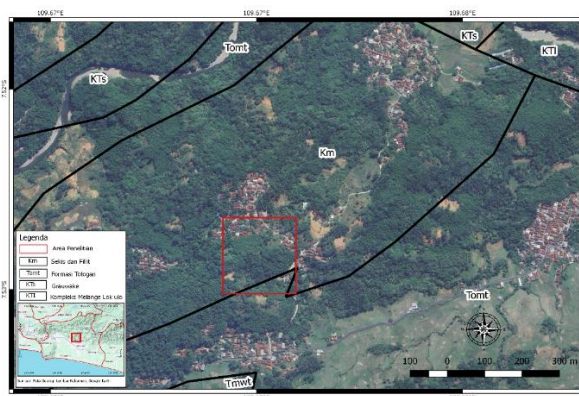
yang banyak digunakan untuk mendapatkan parameter densitas batuan adalah metode gravitasi. Pada penelitian ini akan dilakukan uji coba pengembangan model bawah permukaan untuk mendapatkan parameter densitas berdasarkan data pengukuran mikrotremor. Parameter densitas dihasilkan dari proses inversi menggunakan metode *ellipticity curve*.

Karangsambung terletak kurang lebih 20 km di utara Kota Kebumen, Jawa Tengah. Formasi batuan tertua yang mendasari cekungan ini tersingkap di daerah Luk Ulo yang merupakan inti dari Pegunungan Serayu. Pegunungan ini secara fisiografi dimasukkan ke dalam lajur tengah (*central zone*) dari penggolongan fisiografi Pulau Jawa yang membentuk suatu pemisah antara daerah aliran Sungai Serayu di utara dan daerah aliran sungai-sungai yang bermuara di Samudera Hindia. Karangsambung merupakan salah satu dari tiga tempat tersingkapnya batuan pra-Tersier di Jawa, yaitu Ciletuh, Jawa Barat dan di Bayat, Pegunungan Jiwo, Jawa Tengah. Himpunan batuan yang tersingkap di daerah tersebut ditafsirkan akibat penunjaman Lempeng Samudera Hindia ke bawah Lempeng Benua Eurasia pada umur Kapur Atas hingga Paleosen [10]. Formasi Totogan (Tomt) dan kawasan Sekis Filit (KM) merupakan formasi di kawasan Karangsambung.

Formasi Totogan (Tomt) tersusun atas litologi batulempung berwarna kelabu dengan struktur menyerpih, serta mengandung fragmen batulempung, batupasir, batugamping, lava bantal, dan sekis. Formasi ini berumur Oligosen, yaitu sekitar 36 sampai 25 juta tahun berdasarkan identifikasi fosil *Globoquadrina praedehiscens* dan *Globigeriona binaensis* [11]. Batuan sedimen dalam formasi ini memiliki variasi ukuran yang berbeda. Pada bagian bawah, fragmen batuan sangat beragam dan berukuran besar, sedangkan pada bagian atas fragmen lebih seragam dan berukuran lebih kecil [12].

Sekis dan Filit (KM) Filit terbentuk dari metamorfosis tingkat rendah-sedang (*low intermediate sillur-Devonian*) yang berasal dari lempung pada zona subduksi. Filit memiliki warna abu-abu kehitaman dengan foliasi yang halus, struktur lepidoblastik. Selanjutnya, filit dapat mengalami metamorfosis kembali sehingga menjadi sekis, ketika suhu dan tekanan meningkat lebih tinggi. Struktur sekis secara umum menunjukkan foliasi yang kuat dan berwarna abu-abu serta mengandung mineral plagioklas dan beberapa mika [13].

Formasi Totogan merupakan satu satuan batuan yang ditemukan di daerah Karangsambung, Kebumen, Jawa Tengah (**Gambar 1**). Formasi ini terdiri dari kelompok sedimen yang tercampur akibat proses gravitasi yang dikenal sebagai olistostrome. Batuan dalam formasi ini umumnya berupa batulempung berfragmen, yang terbentuk dari material yang terdistribusi secara acak dalam matriks lempung hitam bersisik. Pada Desa Totogan terdapat singkapan Formasi Totogan yang tersusun atas batu pualam (marmer) berwarna putih, merah dan hijau. Batu marmer pada Formasi Totogan merupakan bagian dari cagar alam *Geopark* Karangsambung, sehingga keberadaannya menjadi salah satu situs yang penting. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran keberadaan batu marmer pada Formasi Totogan dengan menggunakan metode mikrotremor.

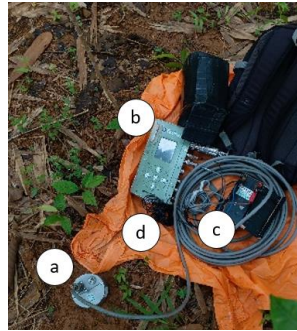


Gambar 1. Lokasi area penelitian pada kawasan Sekis Filit dan Formasi Totogan, Karangsambung, Kebumen

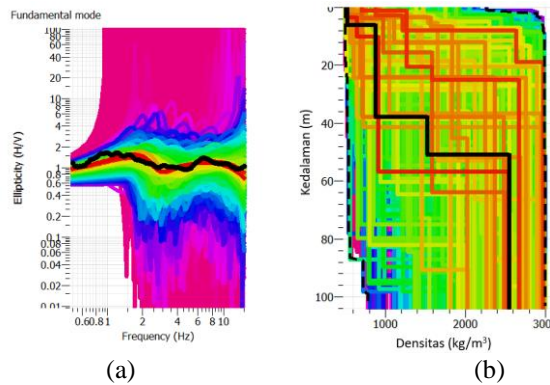
II. METODE PENELITIAN

Identifikasi keberadaan batu marmer dilakukan menggunakan parameter densitas batuan berdasarkan data mikrotremor. Pengukuran mikrotremor menggunakan satu set *Portabel Seismograph* yang terdiri atas seismometer, *digitizer*, GPS, *accu*, kompas geologi (**Gambar 2**), palu geologi dan laptop. Standar operasional pengukuran data mikrotremor berdasarkan pada *SESAME European research project* dengan durasi pengukuran 30 menit untuk setiap titiknya [Sesame]. Pengukuran mikrotremor dilakukan pada

Formasi Totogan dengan lima titik pengukuran. Titik pengukuran berjarak ±40 meter dan membentuk pola lintasan, dengan variasi ketinggian antara 164 – 180 mdpl. Lintasan tersebut memotong bukit yang terdapat singkapan batu marmer. Pengukuran dengan model lintasan dilakukan untuk mendapatkan model penampang 2D pada lintasan tersebut. Penampang 2D yang dimodelkan merupakan penampang *ground profile density*. *Ground profile density* dihasilkan dari pengolahan data mikrotremor dengan metode HVSR dan inversi *ellipticity curve*. Inversi *Ellipticity Curve* (**Gambar 3.a**) merupakan metode inversi berdasarkan kurva HVSR dan input parameter berupa v_p , v_s , densitas serta *poisson ratio*. Hasil inversi berupa *ground profile* densitas (**Gambar 3.b**). *Ground profile* densitas yang dihasilkan akan diinterpretasikan untuk menentukan keberadaan batuan marmer pada Formasi Totogan. Pengolahan data mikrotremor menggunakan software geopsy dan dinver.



Gambar 2. Portabel Seismograf terdiri atas (a) seismometer, (b) digitizer, (c) accu dan (d) GPS (Dokumentasi Lapangan, 2024)



Gambar 3. Model (a) *Ellipticity curve* dengan menggunakan inversi kurva HVSR dan (b) *Ground profile* densitas hasil inversi kurva HVSR dengan metode *ellipticity curve*

A. Mikrotremor

Mikrotremor adalah getaran tanah dengan amplitudo perpindahan 0,1 hingga 1 µm dan 0,001 hingga 0,01 cm/s untuk amplitudo kecepatan [14]. Spektra mikrotremor komponen horizontal dan vertikal dibandingkan dengan menggunakan metode HVSR (**Gambar 4**). Menurut Nakamura (Nakamura, 1989), fungsi transfer situs gelombang geser dan spektrum *H/V* sebagai fungsi frekuensi sangat terhubung. Rasio *H/V* pada *ambient noise* berhubungan erat dengan frekuensi yang terdeteksi di lapangan, seperti yang ditunjukkan oleh Nakamura [15]. Nakamura memperoleh data yang menunjukkan bahwa nilai tertinggi dari rasio spektrum komponen horizontal terhadap vertikal di stasiun yang terletak di daerah batuan keras mendekati nilai 1. Maksimum *H/V* untuk stasiun yang terletak di batuan lunak lebih besar dari satu. Sumber gelombang permukaan non-alami cenderung menyebabkan gelombang Rayleigh merambat melalui lapisan tanah atau lanau lunak [14]. Gelombang *Rayleigh* mempengaruhi komponen horizontal dan vertikal permukaan tetapi tidak berpengaruh pada komponen gelombang di batuan dasar [16]. Nakamura menyatakan bahwa terdapat dua komponen horizontal yang diukur pada arah *N-S* dan *W-E* pada bidang pengamatan. Persamaan HVSR dituliskan sebagai berikut:

$$HVSR = \frac{\sqrt{(A_{(N-S)}(f))^2 + (A_{(W-E)}(f))^2}}{A_{(V)}(f)} \tag{1}$$

dimana:

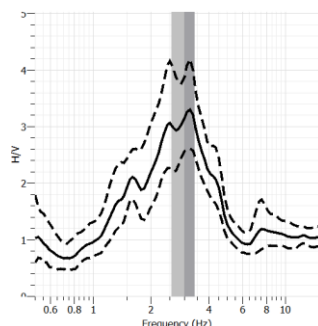
HVSR = Horizontal to Vertical Ratio

$A_{(N-S)}(f)$ = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *North-South*

$A_{(W-E)}(f)$ = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *West-East*

$(A_{(V)}(f))$ = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *vertical*

Kurva *H/V* yang dihasilkan dari persamaan *HVSR* seperti pada Gambar 3 berikut [17].



Gambar 4. Kurva *H/V*, garis hitam merupakan nilai rerata *H/V* dan garis putus-putus merupakan standar deviasi. Puncak dari garis hitam merupakan nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0)

B. Densitas Batuan

Densitas atau massa jenis merupakan perbandingan massa dengan volume total. Densitas pada setiap batuan berbeda-beda tergantung pada material penyusun batuan dan faktor lain (Tabel 1). Pada umumnya semakin bertambah kedalaman batuan maka densitas juga semakin besar karena tekanan hidrostatik batuan tersebut semakin besar. Semakin besarnya tekanan menyebabkan batuan mengalami kompresi sehingga semakin rapat lapisan suatu batuan yang menyebabkan semakin besar densitas batuan. Besarnya densitas suatu batuan juga bergantung pada besarnya porositas suatu batuan. Semakin besar porositas suatu batuan mengindikasikan semakin besar pula massa suatu batuan yang hilang atau rongga batuan semakin besar. Hal ini yang menyebabkan densitas semakin berkurang [18].

Tabel 1. Nilai Densitas Batuan Metamorf [19]

Jenis Batuan	Densitas (Kg/m^3)
Kuarsit	2500 – 2700
Sekis	2390 – 2900
Marmer	2600 – 2900
Gneis	2590 – 3000
Eclogit	3200 – 3540

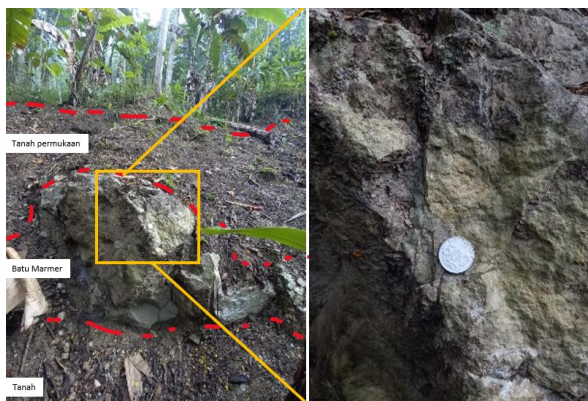
III. HASIL DAN DISKUSI

Titik pengukuran mikrotremor pada kawasan batu marmer dilakukan pada lima titik pengukuran dengan orientasi Tenggara – Barat Laut dan kontras elevasi maksimum 22 meter (**Gambar 5**). Pengukuran data mikrotremor dilakukan dengan durasi 30 – 45 menit pada setiap titik pengukuran. Titik pengukuran membuat lintasan yang memotong bukit di Formasi Totogan. Elevasi terendah terdapat pada Datum 12 (165 mdpl) dan elevasi tertinggi pada Datum 29 (187 mdpl).



Gambar 5. Distribusi titik pengukuran mikrotremor pada Formasi Totogan, Desa Totogan. Titik merah merupakan titik pengukuran mikrotremor (Google Earth dan data lapangan)

Marmer merupakan batuan metamorf hasil dari proses metamorfisme batugamping, proses metamorfisme yang terjadi dipengaruhi oleh suhu dan tekanan yang dapat menyebabkan perubahan pada struktur, tekstur dan mineralogi pada batugamping tersebut. Mineral utama penyusun marmer adalah kalsit (CaCO_3), dolomit dan mineral lainnya, seperti mineral lempung, mika, kuarsa, pirit, oksida besi, dan grafit. Kalsit sebagai penyusun batu gamping (protolith marmer) mengalami rekristalisasi pada proses metamorfosa (0). Batu marmer pada Formasi Totogan memiliki warna putih, merah dan hijau. Batu marmer ini memiliki tekstur rekristalisasi dengan dominasi mineral kalsit dan dolomit (**Gambar 6**).



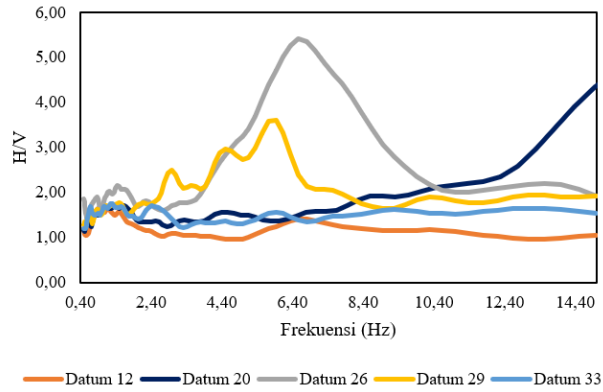
Gambar 6. Rekristalisasi batu marmer dengan dominasi mineral kalsit dan dolomit (dok lapangan, 2025)

Kurva HVSR pada lima titik pengukuran memiliki rentang nilai H/V dari 1,50 s/d 5,50 dengan frekuensi puncak bervariasi antara 0,50 s/d 6,50 Hz. Pola kurva HVSR merepresentasikan kontras ketebalan lapisan sedimen dan batuan dasar dilapangan (**Gambar 7**). Pola kurva HVSR dengan puncak yang jelas terlihat pada titik datum pengukuran 26 dan 29, sedangkan untuk titik datum 12, 20 dan 33 tidak menunjukkan puncak yang cukup jelas. Hal tersebut berkorelasi dengan kondisi titik pengukuran dilapangan, tanah permukaan terlihat dengan jelas dan cukup tebal pada titik datum 26 dan 29 (**Gambar 8**).

Batu Marmer putih pada Formasi Totogan tersingkap dipermukaan pada kawasan sekitar datum 12 (**Gambar 7**). Kondisi Batu Marmer Putih yang tersingkap kepermukaan telah mengalami proses pelapukan (*weathering*), sehingga memiliki kondisi retakan halus hingga besar yang menyebar acak, akibat tekanan dan pelarutan mineral, dengan kondisi permukaan kasar atau berpori. Kesan warna yang muncul seperti noda coklat, abu-abu atau kehijauan yang dapat ditemukan pada permukaan batuan dikarenakan oksidasi dan kotaminasi air tanah. Permukaan batuan terlihat lubang kecil atau rongga, hasil dari pelarutan mineral karbonat oleh air asam. Kondisi Batu Marmer terlapuk dan belum terlapuk terepresentasi dengan nilai densitas batuan hasil pengukuran mikrotremor. Nilai densitas pada lokasi pengukuran bervariasi antara 400 – 2600 kg/m^3 . Densitas batuan dengan nilai $<1000 \text{ kg/m}^3$ diinterpretasikan sebagai lapisan tanah permukaan, densitas 1000 – 1400 kg/m^3 diinterpretasikan sebagai Batu Marmer terlapukkan dan densitas $>1400 \text{ kg/m}^3$ merupakan Batu Marmer segar (*fresh marble*) (**Tabel 1**).



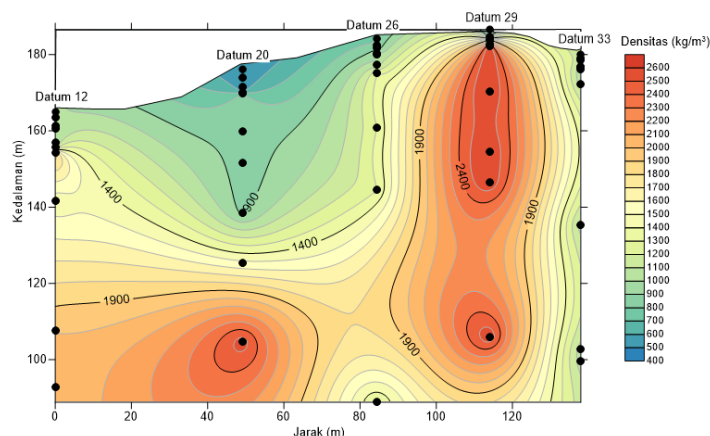
Gambar 7. Distribusi Batu Marmer (dipermukaan) pada jalur datum 12 dan tanah permukaan pada datum 20, datum 26 serta datum 29 (dok.lapangan, 2025)



Gambar 8. Variasi bentuk kurva HVSR pada Formasi Totogan (Analisis Data, 2024)

Tabel 1. Nilai Densitas Batuan hasil Pengukuran Mikrotremor pada Kawasan Penelitian

Datum	Kedalaman (m)	Densitas (kg/m ³)	Intepretasi
12	0	1034,57	Marmar terlapukkan
	1,46	1034,57	Marmar terlapukkan
	3,61	1034,57	Marmar terlapukkan
	4,23	1034,57	Marmar terlapukkan
	7,92	1034,57	Marmar terlapukkan
	9,29	1034,57	Marmar terlapukkan
	10,68	1869,53	Marmar
	23,22	1433,07	Marmar
	57,41	1997,02	Marmar
	72,18	1997,02	Marmar
20	0	527,2	Tanah
	2,35	527,2	Tanah
	4,68	527,2	Tanah
	6,18	527,2	Tanah
	6,43	878,6	Tanah
	16,39	878,6	Tanah
	24,64	878,6	Tanah
	37,79	878,6	Tanah
	50,95	1530,04	Marmar
	71,47	2554,96	Marmar
26	0	812,7	Tanah
	1,8	812,7	Tanah
	2,38	1014,6	Marmar terlapukkan
	3,95	1014,6	Marmar terlapukkan
	4,23	1014,6	Marmar terlapukkan
	6,89	1292,24	Marmar terlapukkan
	9,11	1292,24	Marmar terlapukkan
	23,44	1292,24	Marmar terlapukkan
	39,73	1292,24	Marmar terlapukkan
	95,37	2773,18	Marmar
29	0	640,65	Tanah
	1,85	2199,24	Marmar
	2,6	2199,24	Marmar
	2,87	2199,24	Marmar
	3,83	2580,63	Marmar
	4,27	2580,63	Marmar
	16,22	2580,63	Marmar
	31,92	2580,63	Marmar
	40,13	2580,63	Marmar
	80,53	2798,24	Marmar
33	0	1138,75	Marmar terlapukkan
	1,08	1138,75	Marmar terlapukkan
	1,66	1138,75	Marmar terlapukkan
	3,14	1020,19	Marmar terlapukkan
	3,57	1020,19	Marmar terlapukkan
	3,95	1048,1	Marmar terlapukkan
	7,92	1048,1	Marmar terlapukkan
	44,77	1048,1	Marmar terlapukkan
	77,39	1048,1	Marmar terlapukkan
	80,53	1552,37	Marmar



Gambar 9. Model densitas batuan pada jalur pengukuran mikrotremor Formasi Totogan

Lapisan tanah permukaan dominan terdapat pada Datum 12 hingga Datum 29, dengan variasi ketebalan antara 5 – 25 meter. Lapisan tanah permukaan yang paling tebal terdapat pada Datum 20 dan berada pada tekuk lereng. Kondisi ini memungkinkan lokasi tersebut merupakan zona pengendapan dan sedimentasi dari proses erosi. Lapisan Batu Marmer yang mengalami pelapukan terdapat pada kedalaman 20 – 130 meter dengan ketebalan 5 – 10 meter. Batu marmer segar teridentifikasi pada puncak bukit hingga kedalaman 95 meter.

IV. KESIMPULAN

Densitas batuan pada Formasi Totogan dikawasan penelitian bervariasi antara 527,20 – 2798 kg/m³. Batu Marmer terlapuk memiliki densitas 1000 – 1400 kg/m³ dan densitas >1400 kg/m³ merupakan Batu Marmer segar (*fresh marble*). Batu Marmer dapat ditemukan pada Formasi Totogan dipermukaan tanah hingga kedalaman 95 meter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Saintek UIN Sunan Kalijaga atas bantuan dan kerjasamanya dalam survei dan pengukuran lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Abdul dan Y. I. Phase, "Microstructure and Mechanical Properties of Marble in North-Western Part of Pakistan: Preliminary Findings." *J. Pak Mater Soc.*, vol. 1, no.2. 2007.
- [2] M. Fahad, Y. Iqbal, M. Riaz, R. Ubic, M. Abrar, "Geo-Mechanical Properties of Marble Deposits from the NikaniGhar and Nowshera Formations of the Lesser Himalaya, Northern Pakistan," *A Review, Himalayan Geology*, vol. 37, no. 1, pp. 17-27, Printed in India. 2016.
- [3] G. D. Octavian, N. G. Maria, and C. Corin, "EPR and X-Ray Diffraction Investigation of Some Greek Marbles and Limestones," *Romanian Reports in Physics*, vol. 61, no. 3, pp. 487–499, 2009.
- [4] J. Miha, K. Sabina, S. Simona, Z. Nina, and P. Viljem, "Minerals of Pohorje Marbles," *Geologija*, vol. 56, no. 1, pp. 049-056, Ljubljana, 2013.
- [5] G. Leontakianakos, I. Baziotis, E. Profitis, Chatzitheodoridis and S. Tsimas, "Assessment of the Quality of Calcination of Marbles from Thassos Island using Raman Spectroscopy and X – Ray Diffraction," *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. XLVII, *Proceedings of the 13th International Congress*, Chania, September, 2013.
- [6] M. Onimisi, N. G. Obaje and A. Daniel, "Geochemical and Petrogenetic Characteristics of the Marble Deposit in Itobe Area, Kogi state, Central Nigeria," *Advances in Applied Science Research*, vol. 4, no. 5, pp. 44-57, 2013.
- [7] M. Ali, G. G. Nathaniel, S. C. Mohammed, "Geological Exploration of Marble Deposits in Toto Area, Nasarawa State, Nigeria," *Natural Resources*, vol. 7, pp. 83-92, 2016.
- [8] S. Khrissi, M. Haddad, L. Bejjit, S. A. Lyazidi, M. A. El, and C. Falguères, "Raman and XRD Characterization of Moroccan Marbles," *XII Maghreb Days of Material Sciences*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 186. 2017.

- [9] S. Khriissi, L. Bejjit, M. Haddad, C. Falguères, S. A. Lyazidi, and M. A. El, “Study of Marbles from Middle Atlas (Morocco): Elemental, Mineralogical and Structural Analysis, Sustainable Buildings and Cities,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 353, 2018.
- [10] M. Brilli, M. P. Lapuente, F. Giustini, H. Royo, “Petrography and Mineralogy of the White Marble and Black Stone of Göktepe (Muğla, Turkey) used in Antiquity: New Data for Provenance Determination,” *Journal of Archeological Science: Reports*, vol. 19, pp. 625-642, June 2018.
- [11] P. Saputra dan Idarwati, “Karakteristik Batuan Breksi Formasi Totogan dan Formasi Waturanda, Kecamatan Karangsembung, Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah. 2023.
- [12] C. Ansori dan S. Hadiwisastra, “Karakteristik Fragmen Endapan Olistrostroma Di Karangsembung, Kebumen,” Yogyakarta: IAGI Komda Jateng-DIY. 2002.
- [13] F. Enisahlatun, “Laporan Kuliah Lapangan Karangsembung Bentang Alam dan Identifikasi Batuan (Laporan Kuliah Lapangan), Universitas Negeri Semarang, 2013.
- [14] M. Mirzaoglu dan Ü Dýkmen, “Application of Microtremors to Seismic Microzoning Procedure,” *Journal of The Balkan Geophysical Society*, vol. 6, no. 3, pp. 143–156, 2003.
- [15] Y. Nakamura, “A Method for Dynamic Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface,” vol. 30, pp. 25–33, 1989.
- [16] K. Kanai dan T. Tanaka, “On Microtremors VIII,” *Bulletin of Earthquakes Research Institute*, vol. 97 pp. 144, 1961
- [17] N. B. Wibowo, “Spatial Analysis of Surface Aquifer Thickness Based Frequency predominant in Bantul District,” *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 5, no. 01, p. 62, 2015.
- [18] J. R. Setiawan, “Mikrozonasi Seismisitas Daerah Yogyakarta dan Sekitarnya,” Institut Teknologi Bandung, Bandung. 2009.
- [19] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, “Telford-Geldart-Sheriff-Applied Geophysics (1). Press of the University of Cambridge. 1990.



©2026. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).