



Research Article

KARAKTERISASI TANAH VULKANIK DI KABUPATEN KEDIRI, JAWA TIMUR, INDONESIA BERDASARKAN UJI CPT, SPT, DAN PMT

Fransisko Wiwarsono^{1*}, Paulus Pramono Rahardjo¹⁾, dan Imam Achmad Sadisun²⁾¹⁾ Universitas Katolik Parahyangan, Kota Bandung, Jawa Barat²⁾ Institut Teknologi Bandung, Kota Bandung, Jawa Barat

Received: 23 February 2023, Accepted: 23 August 2023, Published: 24 February 2024

Abstract

Indonesia is a country surrounded by the Pacific Ring of Fire so that various areas are dominated by volcanic soil. Volcanic soils have unique and unusual characteristics, different structures and properties from soil in general, and are strongly influenced by geological processes. Volcanic soils were also found to be problematic and caused a lot of geotechnical damage. Research on volcanic soils from a geotechnical perspective in Indonesia is still very limited. This study aims to characterize volcanic materials in Kediri Regency, East Java, Indonesia, based on in situ testing using CPT (Cone Penetration Test), Standard Penetration Test (SPT), and Pressuremeter Test (PMT). CPT and SPT are the most common and frequently used field tests, while PMT is used to obtain horizontal stresses. Some data from the X-Ray Diffraction Analysis (XRD) test and corebox drilling results will also be used in this study. Field test results will display soil classification and parameters, which will then be combined, and empirical correlations will be obtained for site characterization as well as comparisons with other volcanic soil literature studies. The results showed that the volcanic soil in Kediri Regency consists of non-lateritic to lateritic soil. Based on the CPT and SPT correlations, it was found that the q_c/N value was greater than in general soils for both cohesive and non-cohesive soils. The authors also found a relationship between parameters and interpretation of PMT data against N_{SPT} for cohesive volcanic soils in the study area.

Key Words: CPT, Kediri Regency, site characterization, SPT, PMT, volcanic soil.

1. PENDAHULUAN

Tanah yang berasal dari aktivitas vulkanik adalah kelompok material yang luas dengan karakteristik divergen yang sangat besar. Tanah vulkanik banyak ditemukan di banyak negara di seluruh dunia dan terdistribusi di wilayah tropis sebesar 60% (Leamy, 1984; Nanzyo, dkk. 1993) dan mewakili daerah dengan populasi manusia dan pertumbuhan demografis dan ekonomi yang konstan (Arnalds, dkk. 2007; Bommer, dkk. 2002; Leamy, 1984; Lizcano & Herrera, 2006; Nanzyo, dkk. 1993; Picarelli, dkk. 2006).

Material tanah vulkanik merupakan material yang sangat unik, memiliki struktur yang sangat bervariasi, dan sangat bergantung dari iklim, suhu, derajat pelapukan, endapan lingkungannya, komponen mineral dan kimia, porositas, serta sementasi. Sehingga diantisipasi bahwa karakteristik mekanis dari tanah vulkanik akan berbeda (Miura, dkk. 2003; Sumartini, dkk. 2018; Wesley, 2010).

Tanah vulkanik juga diketahui merupakan tanah problematik. Di beberapa negara, kerusakan

geoteknik yang signifikan terjadi di area tanah vulkanik akibat gempa, seperti likuifaksi (Izumiya, dkk. 2019; Miura, dkk. 1995; Ogo, dkk. 2018; Suzuki & Yamamoto, 2004; Yamashita, dkk. 2006) dan juga kestabilan lereng (Bommer, dkk. 2002; Mousavi, 2017; Okewale & Grobler, 2020).

Beberapa penelitian di Indonesia tentang tanah vulkanik yakni potensi swelling pada tanah vulkanik breksi dan tufa di Sumedang, Indonesia (Widita, dkk. 2017) dan karakteristik anisotropi dari tanah vulkanik Bogor (Rahardjo & Sulastri, 2021). Penelitian tanah vulkanik dari sudut pandang geoteknik masih sangat terbatas, dimana bila dilihat secara geologi, Indonesia terletak di *ring of fire* dan masih banyak gunung api yang aktif.

Istilah pada tanah vulkanik di berbagai negara cukup beragam dan tidak didefinisikan secara unik. Istilah pada tanah vulkanik digunakan untuk mendeskripsikan tanah yang memiliki karakteristik umum terhadap material tanah yang muncul dari pelapukan piroklastik. Wesley (1973) membagi 2 jenis material vulkanik yakni *Andosol* (material

berwarna coklat tua hingga coklat kekuningan) dan *Latosol* (tanah merah). Istilah *Andosol* juga berasal dari Jepang yang artinya tanah gelap (*dark soil*). Di Selandia Baru, disebut dengan istilah *yellow brown pumice* atau *yellow brown loams*. Tanah abu vulkanik (*volcanic ash*) adalah istilah lain yang dapat digunakan. Maeda, dkk. (1977) menyatakan bahwa *allophane* lebih tepat digunakan.

Wesley (2010) menyatakan bahwa *allophane* terbentuk dari pelapukan in situ dari material vulkanik, khususnya abu. Formasi ini terdiri dari komposisi non kristalin yang terbentuk dari material piroklastik berbutir halus oleh pendinginan secara cepat dan kemudian dipercaya mengalami pelapukan kimia lanjutan sebagai berikut:

Volcanic ash → allophane → halloysite → kaolinite
→ sesquioxides → laterite

Pada pembentukan geologi secara primer ini (saat pendinginan) menjadi abu vulkanik, material didominasi oleh senyawa silika yang kemudian mengalami pelapukan lanjutan (pembentukan geologi secara sekunder) seperti pencucian, hujan, iklim dan perubahan suhu dimana kadar silika akan menurun dan mengalami konversi diikuti dengan konsentrasi besi dan aluminium yang meningkat. Hal ini bersifat sebagai cementing agents, sehingga menghasilkan formasi material keras yang membentuk laterite (kemerahan).

Karakteristik geoteknik dari tanah vulkanik seharusnya dipelajari dengan mempertimbangkan komponen mineral dan kimianya, yang dimana akan memberikan pengaruh signifikan pada perilaku mekanisnya (de Vallejo, dkk. 1981; Jacquet, 1990; Rendon, dkk. 2020). Dari banyaknya penelitian, komponen mineralogi dari tanah vulkanik terdiri dari *allophane*, *halloysite*, *imogolite*, *montmorillonite*, *ferrihydrate*, *geothite*, *annorthite*, *smectite*, *quartz*, dan *albite*, sedangkan komponen kimia terdiri dari silika, aluminium yang diikuti dengan oksida besi dan hidroksida.

Dari segi kekuatan berdasarkan uji in situ, Lizcano & Herrera (2006) menyatakan bahwa nilai N_{SPT} tanah vulkanik kurang dari 10 dimana biasanya bervariasi antara 4-8. Miura, dkk. (2003) mendapatkan suatu korelasi q_c (CPT) atau q_t (CPT_u) terhadap N_{SPT} untuk tanah vulkanik di Jepang (*pumice*, *kanto loam* dan *sandy volcanic*) sebesar 0,8N dalam satuan MPa. Mereka juga menemukan bahwa hampir tidak ada perbedaan nilai/korelasi antara Uji CPT dan CPT_u. Takesue, dkk. (2017) menemukan $q_t = 0,85 N_{60}$ dan $f_s = 0,0052 N_{60}$ dalam satuan MPa untuk tanah Shirasu (pasiran vulkanik) di Jepang dan rasio q_c / N_{60} terhadap deposit aluvial Shirasu adalah 3 kali dari penelitian oleh Seed, dkk. (1985) untuk tanah dengan rerata butiran yang sama

(D50). Menurut Miura, dkk. (2003) dan Takesue, dkk. (2017), nilai N_{SPT} cenderung lebih rendah akibat perpecahan partikel (*particle crushing / particle breakage*). Tipikal hasil CPT dengan q_c berkisar 1-3 MPa sampai kedalaman 25m pada tanah di Indonesia dan Selandia Baru (Wesley, 2010).

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan interpretasi dari uji in situ untuk menentukan parameter tanah vulkanik dan mengembangkan korelasi empiris dari uji in situ yakni CPT, SPT dan PMT untuk tanah vulkanik di Kab. Kediri

2. METODE

Lokasi penelitian terletak pada Kabupaten Kediri, Kecamatan Grogol, Jawa Timur, Indonesia. Penelitian ini dilakukan pada sebuah infrastruktur baru yaitu Bandara Internasional Dhoho, Kediri. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi proyek Bandara Internasional Dhoho, Kabupaten Kediri, Kecamatan Grogol, Jawa Timur, Indonesia (Sumber: Google Earth)

Data penelitian ini terdiri dari data uji in situ dari PT. Geotechnical Engineering Consultant (GEC) dengan jumlah 11 titik Bor + SPT dan 16 titik PMT serta 27 titik Bor + SPT, 15 titik CPT, dan 8 titik CPT_u dari PT SOILENS Bandung. Lokasi titik-titik penyelidikan geoteknik lapangan ini dapat dilihat pada Tabel 2. Data lain seperti XRD juga dilakukan pada 3 titik bor dengan keterangan yang disampaikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi Uji XRD dan deskripsi tanah yang diuji pada tanah vulkanik di Kab. Kediri

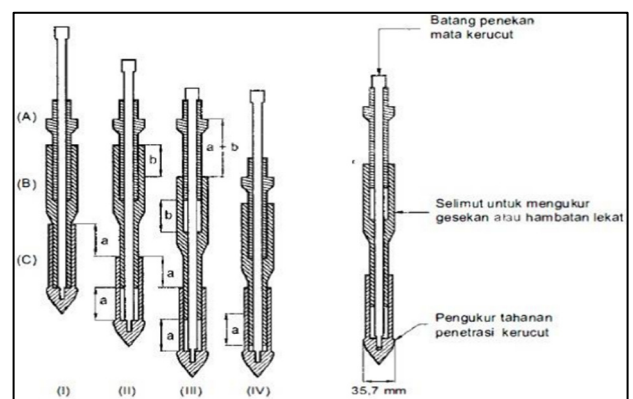
Kode Bor	z (m)	Deskripsi Tanah	Fase	Quantitative Analysis (%)
BH 3-4	4 – 4,3	Brown Clay with Gravel	Halloysite	58,4
			Anorthite	35,8
			Hematite	5,8
BH 4-12	7 – 7,45	Grayish Brown Sandy Clay with Gravel	Halloysite	52,3
			Albite	36,7
			Geothite	6,4
			Quartz	3,7
			Montmorillonite	0,9
BH 4-18	8 – 8,7	Brownish Yellow Sandy Clay	Albite	59,5
			Halloysite	26,2
			Hastingsite	8,4
			Quartz	5,3
			Montmorillonite	0,5

Tabel 2. Lokasi dan titik koordinat uji lapangan oleh PT GEC dan PT SOILENS

Nomor Uji	Koordinat		
	X	Y	Z
SONDIR (CPT)			
S-01	604254,73	9141901,23	106,19
S-02	604334,67	9141989,79	104,4
S-03	604172,58	9142001,06	94,81
S-04	604250,22	9142061,42	97,53
S-06	605427,89	9141854,92	92,44
S-07	605446,1	9142055,86	85,38
S-08	605026,72	9142280,93	91,69
S-09	605138,29	9142280,22	92,22
S-10	605265,37	9142303,58	92,42
S-11	605046,62	9142447,63	92,43
S-14	604145,92	9143633,18	85,66
CPT-S35	603870,27	9143708,72	89,9
CPT-S36	603684,78	9144022,32	85,96
CPT-S40	603627,99	9144032,11	88,99
CPT-S90	604685,25	9142830,12	90,5
Piezocene (CPT_u)			
C1-8	603874,34	9144464,09	74,02
C2-1	604045,242	9143500,452	84,575
C2-2	604035,312	9143575,024	84,872
C2-4	603966,644	9143681,017	82,426
C2-6	603841,81	9143756,8	85,93
C2-9	603717,43	9143944,23	79,15
C2-10	604177,92	9143829,37	81,59
C2-11	604191,728	9143865,362	81,603
Pemboran + SPT			
BH 1-19	604261,76	9143633,282	82,108
BH 1-20	604155,282	9143790,788	81,383
BH 1-31	604184,916	9141915,331	102,32
BH 2-4	604327,731	9142139,013	96,285
BH 2-11	604624,362	9142798,395	89,859
BH 2-20	604111,797	9143525,86	84,177
BH 3-4	604064,659	9141957,541	96,784
BH 4-5	605051,409	9142362,944	89,231
BH 4-6	605329,078	9142260,949	86,298
BH 4-12	605361,075	9142039,88	82,149
BH 4-14	604066,634	9143700,418	81,045
BH 4-18	605141,288	9142215,225	91,334
BH 5-13	604333,517	9141937,79	108,291
BH 5-16	604920,605	9142441,244	91,917
BH 5-23	605496,287	9141962,552	81,822
BH 6-28	603807,837	9144471,802	77,211
BH 6-29	603932,275	9144491,219	71,083
BH 6-33	603607,456	9144056,018	90,807
BH 6-38	603852,475	9143757,585	89,043
BH 6-40	604140,808	9143928,696	81,225
BH 8-23	603820,199	9144374,942	74,097
BH 8-24	603837,53	9144412,564	73,831
BH 8-33	603864,508	9144370,886	74,06
BH 8-34	603788,146	9144414,219	73,898
BH 8-56	603688,941	9143999,773	84,453
BH 8-57	603721,972	9143951,803	80,105

Nomor Uji	Koordinat		
	X	Y	Z
BH 8-58	603756,042	9143903,38	81,332
BHB S4-01	604720,654	9142822,613	90,625
BHB S6-03	604272,627	9143461,694	85,184
BHB S6-04	604213,153	9143545,735	84,861
BHB S6-05	604155,962	9143627,13	84,371
BHB S6-06	604098,846	9143708,981	84,567
BHB S7-02	603901,071	9143992,53	82,696
BH C-01	603830	9144387,14	73,964
BH M-01	603923,82	9144213,35	79,145
BH M-02	604000	9144095	82,101
BH M-03	604069,982	9143999,388	81,644

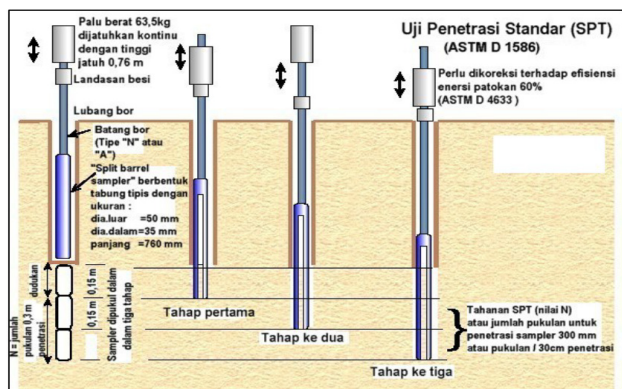
Sondir Mekanis atau CPT adalah suatu alat berbentuk silindris dengan ujungnya berupa suatu konus. Dalam uji sondir, alat ini ditekan ke dalam tanah dan kemudian perlawanan tanah terhadap ujung sondir (tahanan ujung) dan gesekan pada selimut silinder diukur. Cara operasi Uji CPT ditunjukkan oleh Gambar 3. Alat ini telah lama populer di Indonesia dan telah digunakan hampir pada setiap penyelidikan tanah pada pekerjaan-pekerjaan teknik sipil karena relatif mudah pemakaiannya, cepat dan amat ekonomis. Besaran penting yang diukur pada uji sondir adalah perlawanan ujung yang diambil sebagai gaya penetrasi per satuan luas penampang ujung sondir (q_c). Besarnya gaya ini seringkali menunjukkan identifikasi dari jenis tanah dan konsistensinya. Interpretasi hasil pembacaan sondir lainnya adalah pengukuran gesekan selimut (f_s) yang juga untuk klasifikasi tanah. Prosedur pengujian CPT dilakukan tiap interval 20cm hingga umumnya kedalaman 30m atau perlawanan konus > 100 bar. Prosedur Sondir Mekanis mengikuti standar SNI 2827:2008.



Gambar 3. Metode kerja Sondir Mekanis

Uji Penetrasi Standar telah memperoleh popularitas dimana-mana sejak tahun 1927 dan telah diterima sebagai uji tanah rutin di lapangan. Uji Penetrasi Standard dapat dilakukan dengan cara yang relatif mudah. Metode pengujian tanah dengan SPT termasuk cara yang cukup ekonomis untuk memperoleh informasi mengenai kondisi di bawah

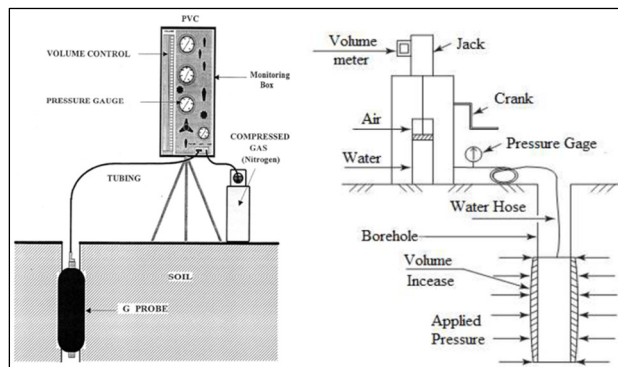
permukaan tanah. Alat uji SPT ini terdiri dari beberapa komponen yang sederhana, mudah dipindahkan, dipasang dan mudah pemeliharannya. Suatu metode uji yang dilaksanakan bersamaan dengan pengeboran untuk mengetahui, baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan. Uji SPT terdiri atas uji pemukulan tabung belah dinding tebal ke dalam tanah, disertai pengukura jumlah pukulan untuk memasukkan tabung belah sedalam 30mm vertikal. Dalam sistem beban jatuh ini digunakan palu dengan berat 63,5 kg, yang dijatuhkan secara berulang dengan tinggi jatuh 76cm. Pelaksanaan pengujian dibagi dalam 3 (tiga) tahap, yaitu berturut-turut setebal 150mm untuk masing-masing tahap. Tahap pertama dicatat sebagai dudukan, sementara jumlah pukulan untuk memasukkan tahap ke-dua dan ke-tiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan SPT (dinyatakan dalam pukulan/30cm). Untuk skema urutan uji SPT dapat dilihat pada Gambar 4. Prosedur Uji SPT mengadopsi standar SNI 4153-2008. Dalam penelitian ini, digunakan jenis *automatic trip hammer*. Untuk identifikasi tanah, dapat dilakukan secara langsung dilapangan secara visual dan sentuhan berdasarkan contoh tanah yang tersimpan dalam *corebox*. Dalam hal ini, pemboran dilakukan dengan metode bor kering (*dry boring/coring*).



Gambar 4. Skema urutan Uji Penetrasi Standar (SNI 4153:2008)

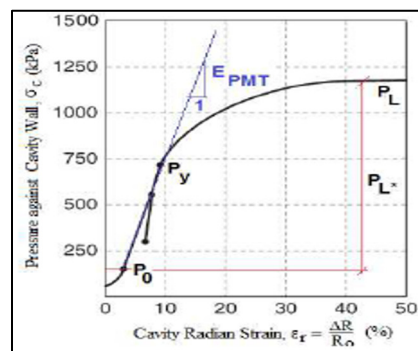
Pressuremeter Test (PMT) merupakan penyelidikan geoteknik yang dilakukan langsung di lapangan (*in situ*) dengan cara mengembangkan membran karet berbentuk silinder yang diletakkan dalam lubang bor untuk pengujian pada tanah atau batuan. Uji PMT dilakukan dengan mengukur besar deformasi pengembangan karet yang akan terjadi pada setiap tahap peningkatan tekanan yang diberikan ke dalam membran. Uji PMT dilakukan dengan menggunakan pressuremeter tipe Menard dengan menggunakan sonde tipe NX. Sebelum pengujian dilakukan, terlebih dahulu sonde dikembangkan di udara yang dimaksudkan untuk

mengkoreksi besarnya tekanan yang terbaca pada saat pengujian terhadap kekakuan membran sistem uji. Contoh ilustrasi alat pressuremeter dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pressuremeter Test (Briaud, 1992)

Hasil uji, berupa kurva hubungan tegangan-regangan radial, diplot setelah koreksi dilakukan terhadap data pengukuran selama pengujian. Kurva tersebut menunjukkan perilaku material uji menahan peningkatan tegangan lateral. Analisis terhadap kurva tersebut kemudian akan dapat memberikan data parameter kuat tekan / batuan yang diperlukan untuk merencanakan konstruksi bangunan atau pondasi suatu bangunan sipil yang ditumpu oleh lapis material yang diuji. Tipikal hasil untuk tes *pressuremeter* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tipikal grafik pengujian yang telah dimodifikasi (Briaud, 1992)

Dari hasil kurva tegangan regangan uji PMT, secara sederhana diperoleh 6 parameter yaitu: P_o , P_y , P_L , K_m , E_m dan G sebagaimana dijelaskan dibawah ini:

- 1) Tekanan horizontal *at rest* / *Horizontal Pressure at rest*, P_o

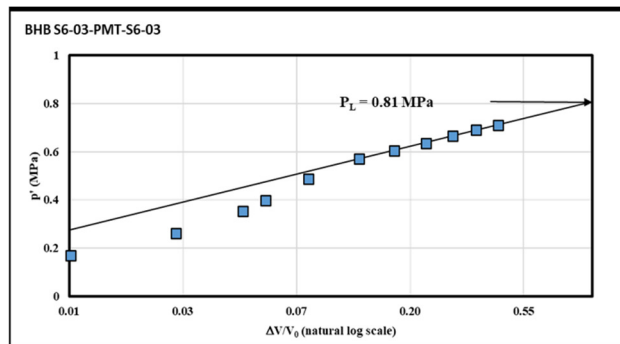
Tekanan, P_o , didefinisikan sebagai tekanan dimana membran menyentuh dinding lubang bor pertama kali, contohnya titik pertama saat diawal bagian linear atau elastik dari kurva tegangan regangan pressuremeter yang digambarkan pada Gambar 6. Tegangan ini juga seringkali diinterpretasikan sebagai tegangan total horizontal saat diam sebagaimana dijabarkan dalam persamaan dibawah ini.

$$P_o = \sigma'_{vo} k_o + u_o \quad (1)$$

$$\sigma'_{ho} = \sigma'_{vo} k_o = P_o - u_o \quad (2)$$

2) Tekanan leleh atau *Yield Pressure*, P_y
 Sering disebut juga P_F yang merupakan tekanan dimana perilaku tanah mulai berubah dari pseudo-elastik menjadi plastis. Nilai tegangan leleh (P_y) mencerminkan batas dimana tanah mulai bersifat plastis. Sehingga, nilai P_y mendekati atau sama dengan tegangan prakonsolidasi (P'_c). Akhir dari bagian linear dan awal dari bagian non linear (plastis) dari kurva pengujian PMT dijabarkan sebagai P_y dalam Gambar 6.

3) Batas tekanan atau *Limit Pressure*, P_L
 Limit pressure, disebut P_L dalam Gambar 6 didefinisikan sebagai tegangan horizontal ultimit dari kurva uji PMT yang dimana tanah mulai ‘mengalir’ dan kurva menjadi asimtotis, sebagai contoh regangan radial tetap meningkat sementara tekanan hampir tidak meningkat. Umumnya, dalam uji aslinya, *limit pressure* ini sulit dicapai, dan kurva pengujian harus di ekstrapolasi dalam bentuk plot logaritma yang ditunjukkan pada contoh Gambar 7.



Gambar 7. Contoh metode untuk menentukan batas tekanan, P_L (Wiwarsono et al., 2021)

4) Coefficient of Horizontal Subgrade Reaction, K_m
Coefficient of horizontal subgrade reaction, K_m diperoleh melalui bagian linear dari kurva uji, contohnya:

$$K_m = \frac{\Delta P}{\Delta R} = \frac{P_y - P_o}{R_{P_y} - R_{P_o}} \quad (3)$$

Dimana R_{P_y} dan R_{P_o} adalah radius cavity pada P_y dan P_o .

5) Elastic/Stiffness/Deformation/Pressuremeter Modulus, E_m

Modulus kekakuan tanah, E_m , diturunkan dari persamaan berikut:

$$E_m = (1 + \nu) \frac{R_{P_o} + R_{P_y}}{2} K_m \quad (4)$$

Dimana ν adalah angka poisson dari tanah, biasanya diambil 0.33.

6) Shear Modulus, G

Modulus geser, G , dihitung sebagai berikut:

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

Dari hasil PMT, kita juga dapat menginterpretasi *undrained shear strength* (S_u) yang akan digunakan sebagai salah satu korelasi dari N_{SPT} . Penulis mengadopsi korelasi empiris dari Amar & Jezequel (1972) untuk menginterpretasi S_u .

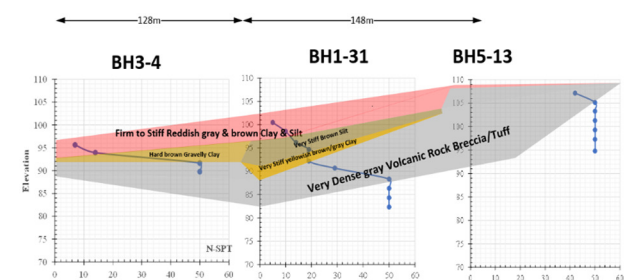
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi geologi pada lokasi penelitian diperlukan guna memperoleh pemahaman awal terkait kondisi lapangan sebelum melakukan penelitian geoteknik. Gambar 8 menampilkan peta geologi Kabupaten Kediri, Jawa Timur, Indonesia. Berdasarkan Peta Geologi *Quadrangle Madiun*, formasi geologi pada lokasi adalah batuan vulkanik zaman *Quaternary Pleistocene (Pawonsewu Morphocet - Q_p)* yang terdiri dari breksi vulkanik dengan fragmen *andesit pyroxene, tuff, aglomerat, dan lava andesit pyroxene*.



Gambar 8. Peta Geologi Lokasi Penelitian (Sumber: *Geological Map of the Madiun Quadrangle and Google Earth™*)

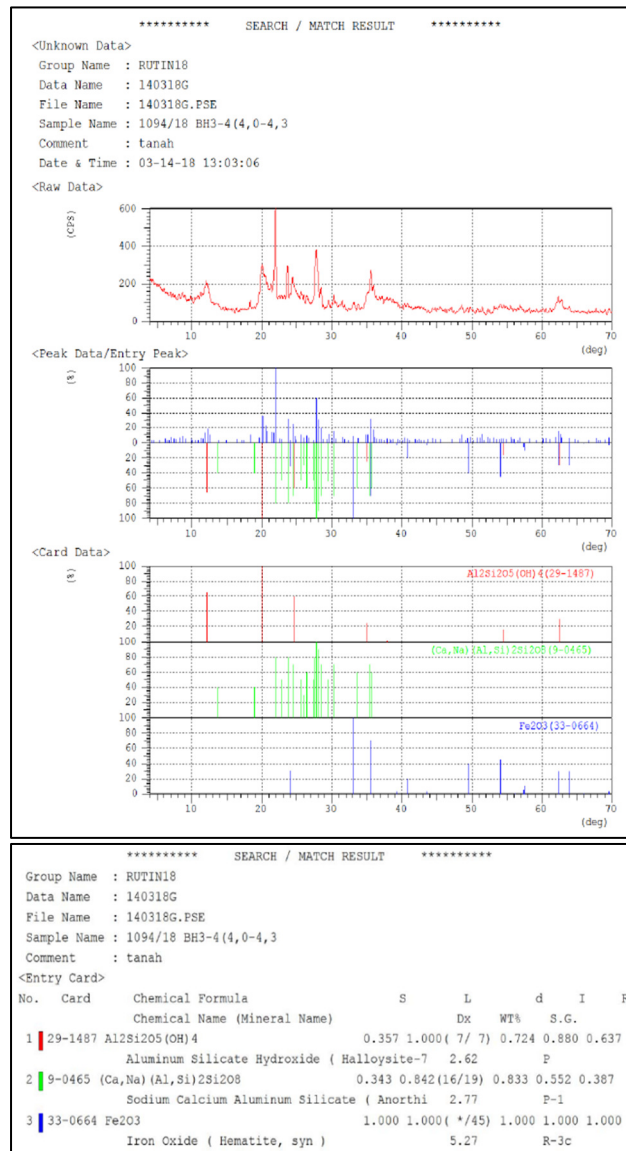
Peneliti melakukan pembagian zona terhadap uji pemboran dan pemilahan perlapisan stratigrafi untuk melihat Persebaran data tanah pada masing-masing zona. Salah satu perlapisan stratigrafi dari beberapa zona ditampilkan pada Gambar 9 yakni potongan geoteknik area-1. Dapat dilihat bahwa pada permukaan tanah seluruh titik bor didominasi oleh tanah kohesif berwarna coklat kemerahan dengan konsistensi teguh sampai kaku yang kemudian selanjutnya diikuti dengan adanya campuran dari material berbutir kasar (pasir dan kerikil) berwarna coklat dan kekuningan hingga lapisan batuan yang sangat keras/padat berwarna abu.



Gambar 9. Perlapisan stratigrafi Area-1

Sesuai yang dijelaskan pendahuluan di atas, bahwa karakteristik geoteknik dari tanah vulkanik seharusnya dipelajari dengan mempertimbangkan komponen mineral yang memberikan pengaruh signifikan pada perilaku mekanisnya (de Vallejo, dkk. 1981; Jacquet, 1990; Rendon, dkk. 2020). Komposisi kimia dan mineral dari tanah vulkanik bergantung pada karakteristik kimia dan mineral dari material induknya (Arnalds, dkk. 2007), faktor lingkungan makro dan mikro, pelapukan saat deposisi dan tahap formasi tanah (Dahlgren, dkk. 1993). Berdasarkan Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa mineral tanah vulkanik tersebut didominasi oleh mineral *Halloysite*, *Albite* dan *Anorthite* dengan komposisi kimia Alumunium Silikat Hidroksida yang dimana hal ini masih termasuk material pembentukan geologi secara primer, dalam artian belum terjadi pelapukan (sekunder) ataupun pencucian sehingga menjadi material *lateritic* (berwarna merah). Hal ini juga ditunjukkan dari deskripsi tanah hasil pemboran dari ketiga titik tersebut yang ditunjukkan dari jenis material lempung kepasiran (*sandy clay*) berwarna coklat keabuan hingga coklat kekuningan yang dalam hal ini disebut sebagai *Andosol* (oleh Wesley) atau dengan istilah lain *non lateritic soil* karena kandungan besi yang sangat minim / tidak ada. Sayangnya, dalam penelitian ini, peneliti tidak memperoleh *corebox* tanah yang diuji XRD ini. Salah satu contoh hasil Uji XRD ditampilkan pada Gambar 10.

Cara lain untuk menentukan jenis tanah vulkanik adalah berdasarkan visual dari warna, dalam hal ini, pengamatan warna tanah dari *corebox* hasil pemboran dari hasil uji PMT dilakukan oleh peneliti. Salah satu contoh *corebox* ditampilkan pada Gambar 11. Sebagian besar tanah uji PMT merupakan tanah kohesif coklat kemerahan yang kemudian diikuti dengan warna coklat dan abu. Untuk yang berwarna coklat kemerahan diduga sedang/sudah mengalami pelapukan dan juga pencucian sehingga menghasilkan formasi material *laterite* (*lateritic soils*) yang dimana kadar silika menurun dan konsentrasi besi dan alumunianya meningkat dan terhidrasi membentuk besi dan alumunium oksida. Kandungan besi dan alumunium oksida inilah yang menghasilkan warna merah pada tanah vulkanik (Wesley, 2010). Sedangkan sampel berwarna lain, diduga belum mengalami proses sekunder sehingga tidak ada komposisi besi & alumunium pada sampel tersebut. Namun, sayangnya, pada penelitian ini, titik pengambilan Uji PMT tidak dilakukan pengujian XRD sehingga tidak diketahui komposisi mineral dan kimianya.



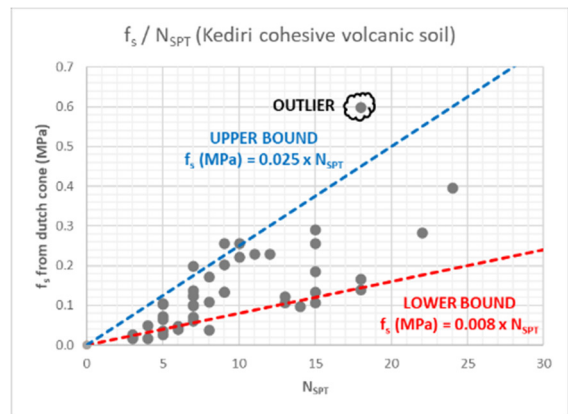
Gambar 10. Hasil Uji XRD titik BH 3-4 (z = 4 – 4,3m)



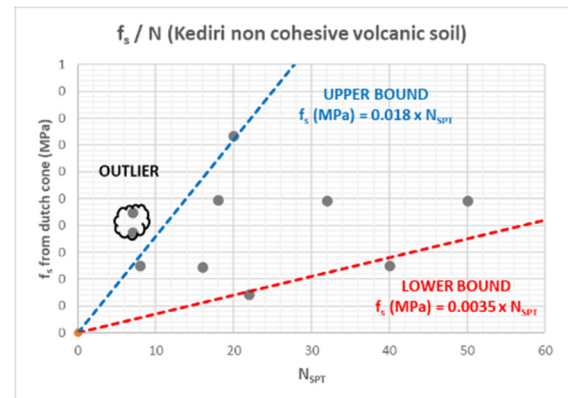
Gambar 11. Corebox BHB S7-02 (z = 3,5m)

Peneliti menemukan adanya korelasi antara Uji Sondiri Mekanis (CPT) terhadap nilai N_{SPT} untuk tanah-tanah vulkanik di Kab. Kediri. Untuk tanah kohesif (lihat Gambar 12), q_c/N berada di rentang 0,15N sd 0,5N (MPa) dengan nilai rata-rata di 0,28N (MPa). Sedangkan, untuk tanah non kohesif Kab. Kediri (lihat Gambar 13), q_c/N berada di rentang

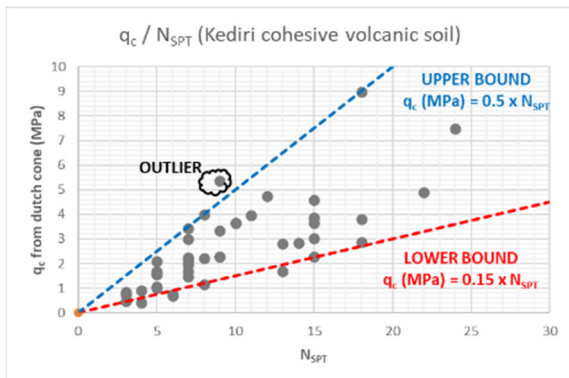
0,5N sd 1,1N (MPa) dengan nilai rata-rata di 0,7 N (MPa). Kedua batasan ini memiliki nilai yang cukup tinggi dibandingkan pada tanah umumnya. Miura, dkk. (2003) mendapatkan batasan yang lebih tinggi yakni 1,6N. Namun, penulis menduga dikarenakan adanya perbedaan jenis material vulkanik yang diuji. Tingginya nilai q_c/N yang ditemukan pada penelitian ini dan juga oleh Miura, dkk. (2003). Peneliti menduga adanya proses pengelasan antar butir material saat meletusnya gunung api yang melontarkan material ke daratan yang kemudian mengalami pelapukan/disentigrasi dan perubahan sifat kimia (dari senyawa silika menjadi senyawa besi) yang membentuk material yang kuat/keras (*lateritic soil*). Menurut Miura, dkk. (2003) dan Takesue, dkk. (2017), Pada tanah yang didominasi oleh material vulkanik, terjadi perpecahan partikel akibat pukulan palu SPT (dinamik), sehingga menimbulkan ketidakpastian nilai N_{SPT} dan nilai tahanan ujung sondir akan relatif tinggi karena sifatnya yang *quasistatic*. Perbandingan gesekan selimut juga ditunjukkan pada Gambar 14 untuk tanah kohesif vulkanik dan Gambar 15 untuk tanah vulkanik non kohesif. Pada tanah kohesif, perbandingan f_s terhadap N_{SPT} menunjukkan rentang dari 8N sd 25N dalam kPa. Sedangkan pada tanah non kohesif, datanya cukup tersebar dan didapatkan rentang dari 3,5N sd 18N dalam kPa.



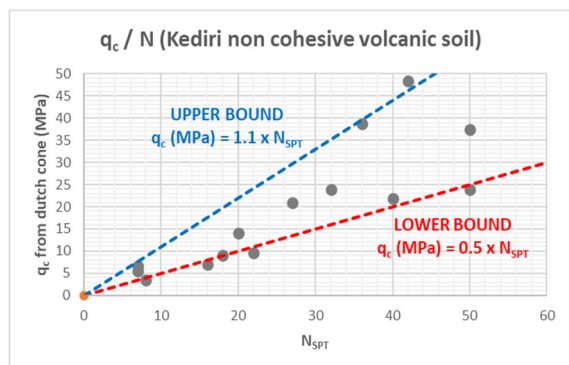
Gambar 14. Hubungan f_s sondir mekanis terhadap N_{SPT} untuk tanah kohesif vulkanik di Kabupaten Kediri



Gambar 15. Hubungan f_s sondir mekanis terhadap N_{SPT} untuk tanah non kohesif vulkanik di Kabupaten Kediri

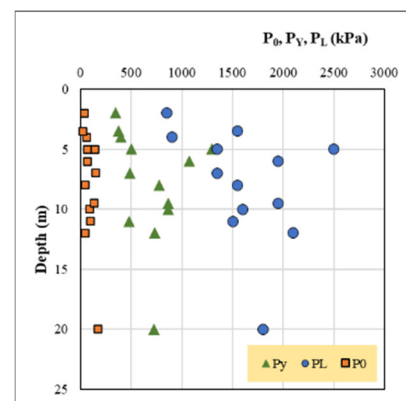


Gambar 12. Hubungan q_c sondir mekanis terhadap N_{SPT} untuk tanah kohesif vulkanik di Kabupaten Kediri

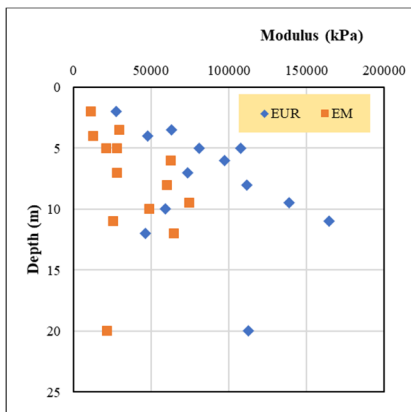


Gambar 13. Hubungan q_c sondir mekanis terhadap N_{SPT} untuk tanah non kohesif vulkanik di Kabupaten Kediri

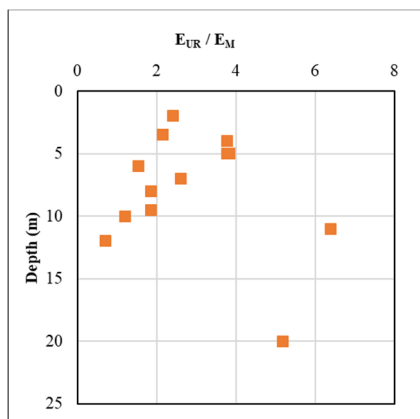
Interpretasi dari Uji PMT dapat dilihat pada Gambar 16 dan 17. Dapat dilihat bahwa tidak ada pengaruh kedalaman terhadap parameter yang diperoleh. Dari Gambar 17 juga ditunjukkan bahwa Modulus *Unload Reload* (E_{UR}) lebih besar daripada E_M dimana berkisar antara 2 – 4 E_M (lihat Gambar 18).



Gambar 16. Interpretasi parameter tegangan dari PMT pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

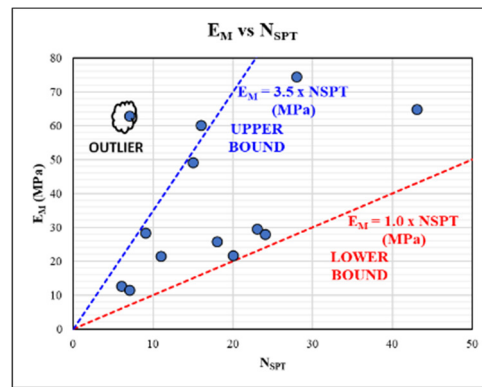


Gambar 17. Interpretasi modulus dari PMT pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

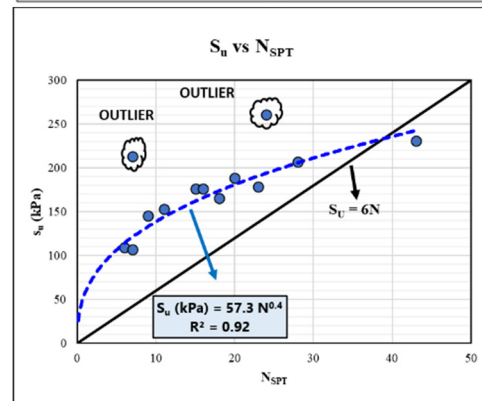
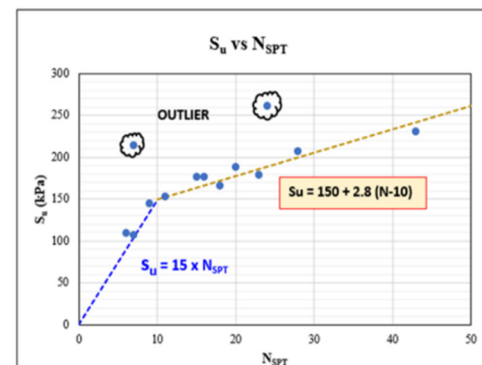


Gambar 18. Perbandingan E_{UR} terhadap E_M pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

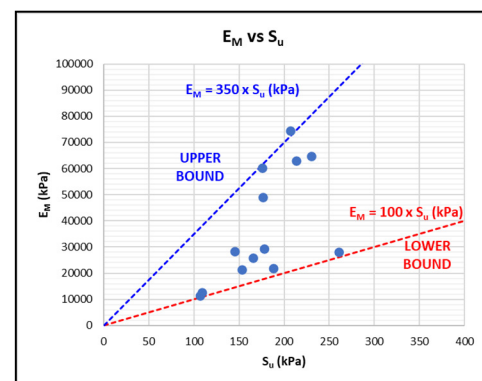
Pada tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri, ditemukan korelasi antara Modulus Pressuremeter (E_M) terhadap N_{SPT} sebesar $1N - 3,5N$ (dalam satuan MPa) pada Gambar 19. Hubungan antara kuat geser tak teralir (S_u) terhadap N_{SPT} juga diperoleh dari peneliti untuk tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri yang ditunjukkan pada Gambar 20 dimana S_u diinterpretasi berdasarkan rumusan dari Amar & Jezequel (1972). Untuk nilai $N_{SPT} < 10$, maka dapat digunakan rumus $S_u = 15N$ dalam satuan kPa sedangkan bila $N > 10$, maka $S_u = 150 + 2,8(N - 10)$. Bila dihubungkan dalam persamaan parabolik, diperoleh korelasi yang baik dengan $R^2 = 0.92$. Suatu korelasi antara Modulus Pressuremeter dan kuat geser tak teralir juga diperoleh dari peneliti untuk tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri ditunjukkan pada Gambar 21. Untuk batas atas, diperoleh E_M sebesar $350 S_u$ dalam satuan kPa sedangkan $100 S_u$ untuk batas bawah.



Gambar 19. Hubungan Modulus Pressuremeter (E_M) terhadap N_{SPT} pada tanah vulkanik di Kab. Kediri

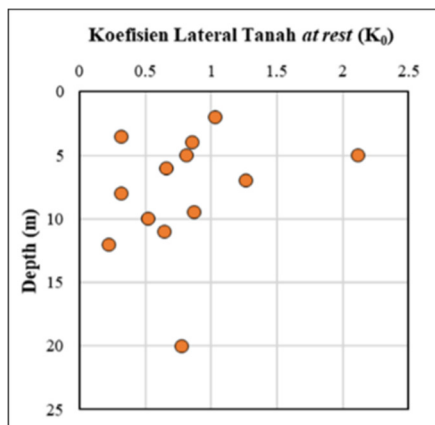


Gambar 20. Hubungan *undrained shear strength* (S_u) terhadap N_{SPT} pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri



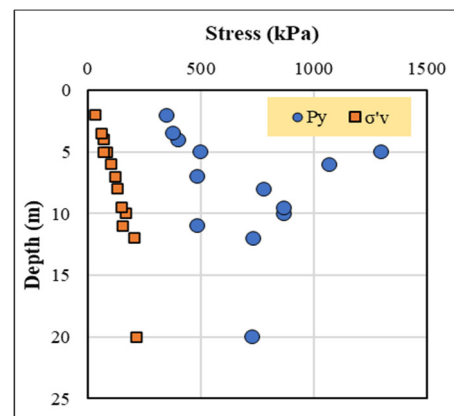
Gambar 21. Hubungan Modulus Pressuremeter (E_M) terhadap S_u dari PMT pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

Bilamana kita bandingkan tegangan tanah horizontal efektif ($P_0 = \sigma'_h$) terhadap tegangan vertikal efektif (σ'_v) maka kita akan mendapat koefisien tekanan lateral tanah saat kondisi diam (*at rest*) atau K_0 . K_0 pada hasil data penelitian ini ditemukan berkisar antara 0,3 sampai dengan 1,2. Dalam hal ini, tegangan tanah horizontal yang ditemukan pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri tidak jauh berbeda dengan tanah secara umum yakni tegangan tanah horizontal lebih rendah dibandingkan tegangan vertikal. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 22.

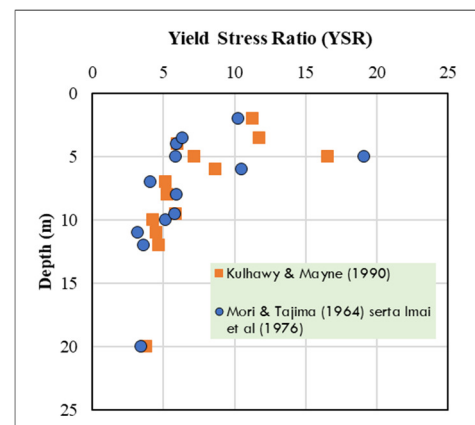


Gambar 22. Nilai koefisien lateral tanah *at rest* dari interpretasi PMT pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

Dikarenakan P_y mendekati atau sama dengan tegangan prakonsolidasi, dalam penelitian ini, peneliti mencoba melakukan perbandingan antara P_y terhadap tegangan vertikal efektif (σ'_v) pada Gambar 23. Mori & Tajima (1964) serta Imai, dkk. (1976) mendapatkan hasil bahwa nilai P_y identik dengan tegangan prakonsolidasi untuk tanah-tanah di Jepang ($P_y = P'_c$). Kulhawy & Mayne (1990) juga mengajukan korelasi antara tegangan prakonsolidasi dengan batas plastis (P_L) yang dimana $P'_c = 0,45 P_L$. Dalam kasus ini, bila kita bandingkan tegangan prakonsolidasi terhadap tegangan vertikal efektif maka akan mendapatkan nilai OCR (*overconsolidation ratio*), namun istilah OCR kurang tepat untuk digunakan sebagaimana telah dijelaskan oleh Maeda, dkk. (1977), Verdugo (2008), dan Wesley (2001, 1994) bahwa istilah *yield stress ratio* – rasio tegangan leleh (YSR) lebih baik digunakan. Peneliti mencoba menghubungkan nilai YSR dari Mori & Tajima (1964) serta Imai et al., (1976) dan Kulhawy & Mayne (1990) pada Gambar 24. Dapat dilihat bahwa, nilai YSR yang diperoleh relatif sama dan berkisar antara 4 sampai dengan 17.

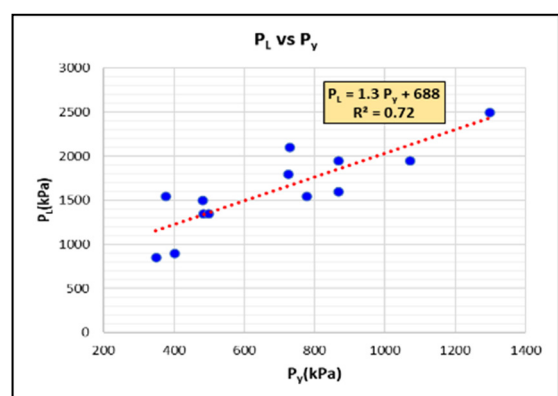


Gambar 23. Hubungan *Yield Pressure* (P_y) terhadap tegangan vertikal efektif pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri



Gambar 24. Perbandingan nilai YSR dari 2 metode terhadap kedalaman pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

Ada hubungan unik antara P_y terhadap P_L yang cukup baik ($R^2 = 0.72$) untuk tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri pada Gambar 25.



Gambar 25. Hubungan Tegangan Leleh (P_y) terhadap Batas Plastis (P_L) pada tanah vulkanik kohesif Kab. Kediri

4. KESIMPULAN

- 1) Berdasarkan peta geologi Indonesia, Kab. Kediri merupakan daerah material vulkanik yang terdiri dari breksi vulkanik dengan fragmen andesit, piroksin, tufa, aglomerat dan lava andesit piroksin.

- 2) Pelapisan geoteknik menunjukkan bahwa lapisan permukaan didominasi oleh tanah kohesif berwarna coklat kemerahan seperti contoh pada *corebox* Uji PMT yang diduga sudah mengalami proses geologi secara sekunder (pelapukan, pencucian, iklim) sehingga diduga telah transformasi menjadi warna kemerahan dari kandungan besi yang muncul/meningkat. Lapisan tanah lain diduga masih merupakan pembentukan geologi secara primer dengan kandungan silikat yang masih tinggi dan didominasi oleh mineral *Albite*, *Annorthite* atau *Halloysite* seperti yang ditampilkan pada Uji XRD. Maka dari itu, tanah vulkanik di daerah Kab. Kediri termasuk non lateritik – tanah lateritik.
- 3) Berdasarkan korelasi CPT dan N_{SPT} , ditemukan nilai q_c/N (satuan MPa) yang lebih besar dibandingkan pada tanah-tanah pada umumnya dimana $0,15N - 0,5N$ untuk tanah kohesif dan $0,5N - 1,1N$ untuk tanah non kohesif. Begitu juga halnya dengan f_s/N (satuan kPa), dimana $8N - 25N$ untuk tanah kohesif dan $3,5N - 18N$ untuk tanah non kohesif.
- 4) Korelasi antara parameter PMT terhadap N_{SPT} untuk tanah vulkanik kohesif juga disajikan pada penelitian ini yakni:
 - a) Modulus Pressuremeter (E_M) berkisar antara $1N - 3,5N$ dalam satuan MPa.
 - b) *Undrained Shear Strength* (S_u) memiliki persamaan yang baik ($R^2 = 0,92$) terhadap nilai N dimana S_u (kPa) = $57,3 N^{0,4}$.
 - c) E_M memiliki hubungan dengan S_u dimana berkisar antara $E_M = 100 S_u$ hingga $350 S_u$ dalam satuan kPa.
 - d) E_{UR} berkisar antara $2E_M$ sampai dengan $4E_M$.
 - e) Perbandingan tegangan horizontal (P_0) terhadap tegangan vertikal efektif (σ'_v) atau dapat disebut dengan istilah K_0 (koefisien lateral tanah *at rest*) adalah sebesar 0,3 hingga 1,2 kalinya. Sedangkan tegangan lelehnya (P_y) terhadap σ'_v atau dalam artian besaran *YSR* (*Yield Stress Ratio*) adalah 4 hingga 17 yang dimana mungkin merupakan *overconsolidated material*. Penentuan tegangan prakonsolidasi dari Kulhawy & Mayne (1990) serta Mori dan Tajima (1964) serta Imai et al., (1976) menghasilkan nilai *YSR*

relatif sama untuk tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri.

- f) Penentuan nilai P_0 , P_y dan P_L juga dapat diperoleh dari korelasi terhadap N_{SPT} , namun peneliti menyarankan diinterpretasi dari kurva pressuremeter saja karena batasan yang cukup tersebar/jauh.
- g) Peneliti menemukan adanya korelasi antara P_y terhadap P_L yang cukup baik ($R^2 = 0,72$) dengan persamaan sebagai berikut: $P_L = 1,3 P_y + 688$ untuk tanah vulkanik kohesif di Kab. Kediri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada PT GEC dan PT SOILENS Bandung yang telah menyediakan data uji lapangan dan data laboratorium untuk mengakomodasi penelitian ini serta bimbingan dari Bapak Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D. dan Bapak Dr. Eng. Imam A. Sadisun, S.T., M.T. atas bimbingan dalam penyusunan penelitian ini.

REFERENSI

- Amar, S., & Jezequel, J. F. (1972). Essais en place et en laboratoire sur sols coherents, comparaison des resultats. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussees*, 58, 97–108.
- Arnalds, O., Bartoli, F., Buurman, P., Oskarsson, H., Stoops, G., & Garcia-Rodeja, E. (2007). *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer Verlag. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1>
- Bommer, J. J., Rolo, R., Mitroulia, A., & Berdousis, P. (2002). GEOTECHNICAL PROPERTIES AND SEISMIC SLOPE STABILITY OF VOLCANIC SOILS. *12th European Conference on Earthquake Engineering*.
- Briaud, J. L. (1992). *The Pressuremeter*.
- Dahlgren, R., Shoji, S., & Nanzyo, M. (1993). Chapter 5 Mineralogical Characteristics of Volcanic Ash Soils. *Developments in Soil Science*, 21(C), 101–143. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70266-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70266-6)
- de Vallejo, L. G., Salas, J. A. J., & Jimenez, S. L. (1981). ENGINEERING GEOLOGY OF THE TROPICAL VOLCANIC SOILS OF LA LAGUNA, TENERIFE. *Engineering Geology*, 17, 1–17.
- Izumiyama, S., Kamura, A., Kazama, M., Kim, J., & Sato, S. (2019). Seismic Shear Behavior of Clayey Volcanic Soils in Residential Area Damaged by the 2016 Kumamoto Earthquakes in Japan. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Silvestri & Moraci (Eds)*.
- Jacquet, D. (1990). Sensitivity to remoulding of some volcanic ash soils in New Zealand. *Engineering Geology*, 28(1–2), 1–25. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(90\)90031-U](https://doi.org/10.1016/0013-7952(90)90031-U)
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*.
- Leamy, M. L. (1984). *International Committee on the Classification of Andisols (ICOMAND) Circular Letter No. 6*.
- Lizcano, A., & Herrera, M. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en colombia. *Rev. Int. de Desastres*

- Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2), 167–198.
- Maeda, T., Takenaka, H., & Warkentin, B. P. (1977). Physical Properties of Allophane Soils. In *Advances in Agronomy Vol 29* (pp. 229–264). [https://doi.org/Maeda, T. \(1977\). \[Advances in Agronomy\] Volume 29 || Physical Properties of Allophane Soils. , \(\), 229–264. 10.1016/S0065-2113\(08\)60220-5](https://doi.org/Maeda, T. (1977). [Advances in Agronomy] Volume 29 || Physical Properties of Allophane Soils. , (), 229–264. 10.1016/S0065-2113(08)60220-5)
- Miura, S., Yagi, K., & Asonuma, T. (2003). Deformation-Strength Evaluation of Crushable Volcanic Soils by Laboratory and In-Situ Testing. *Soils and Foundation*, 43(No. 4), 47–57.
- Miura, S., Yagi, K., & Kawamura, S. (1995). Liquefaction Damage of Sandy and Volcanic Grounds in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake. *3th International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Mousavi, S. M. (2017). Landslide Susceptibility in Cemented Volcanic Soils, Ask Region, Iran. *Indian Geotechnical Journal*, 47(1), 115–130. <https://doi.org/10.1007/s40098-016-0189-3>
- Nanzyo, M., Shoji, S., & Dahlgren, R. (1993). Chapter 7 Physical Characteristics of Volcanic Ash Soils. *Developments in Soil Science*, 21, 189–207. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70268-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70268-X)
- Ogo, K., Hazarika, H., Kokusho, T., Matsumoto, D., Ishibashi, S., & Sumartini, W. O. (2018). Analysis of liquefaction of volcanic soil during the 2016 Kumamoto Earthquake based on boring data. *Lowland Technology International 2018*, 19(4), 245–250.
- Okewale, I. A., & Grobler, H. (2020). A STUDY OF DYNAMIC SHEAR MODULUS AND BREAKAGE OF DECOMPOSED VOLCANIC SOILS. *Journal of GeoEngineering*, 15(1), 55–68. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).5](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).5)
- Picarelli, L., Evangelista, A., Rolandi, M., & Lampitiello, S. (2006). Mechanical Properties of Pyroclastic Soils in Campania Region. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, 2331–2383.
- Rahardjo, P. ., & Sulastri, Y. (2021). Study of Anisotropy Characteristics of Bogor Volcanic Soil. *Universitas Kediri Riset Teknik Sipil*, 5(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30737/ukarst.v3i2>
- Rendon, M. I., Viviescas, J. C., Osorio, J. P., & Hernandez, M. S. (2020). Chemical, Mineralogical and Geotechnical Index Properties Characterization of Volcanic Ash Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 3231–3244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10706-020-01219-3>
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425–1445.
- Sumartini, W. O., Hazarika, H., Kokusho, T., & Ishibashi, S. (2018). Volcanic Cohesive Soil Behaviour under Static and Cyclic Loading. *Proceeding 20th SEAGC - 3rd AGSSEA Conference in Conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference On Geotechnical Engineering*.
- Suzuki, M., & Yamamoto, T. (2004). LIQUEFACTION CHARACTERISTIC OF UNDISTURBED VOLCANIC SOIL IN CYCLIC TRIAXIAL TEST. *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Takesue, K., Sasao, H., & Makihara, Y. (2017). Cone penetration testing in volcanic soil deposits. *Advances in Site Investigation Practice*, 452–463.
- Verdugo, R. (2008). Singularities of Geotechnical Properties of Complex Soils in Seismic Regions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), 982–991. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2008\)134:7\(982\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:7(982))
- Wesley, L. D. (1973). Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Geotechnique*, 23(4), 471–494. <https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.4.471>
- Wesley, L. D. (2001). Consolidation Behaviour of Allophane Clays. *Geotechnique*, 51(10), 901–904. [https://doi.org/Wesley, L. D. \(2001\). Consolidation behaviour of allophane clays. Géotechnique, 51\(10\), 901–904. doi:10.1680/geot.2001.51.10.901](https://doi.org/Wesley, L. D. (2001). Consolidation behaviour of allophane clays. Géotechnique, 51(10), 901–904. doi:10.1680/geot.2001.51.10.901)
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. John Wiley & Sons, Inc.
- Wesley, L. D. (1994). The Use of Consolidometer Tests to Estimate Settlement in Residual Soils. *Proceedings XIII ICSMFE Vol. 2*, 929–934.
- Widita, A. P., Khairulah, N., Sophian, R. I., & Muslim, D. (2017). Swelling Potential on Volcanic Soil of Breccia and Tuff in Jatinangor Area, Sumedang, West Java, Indonesian. *The 2nd Join Conference of Utsunomiya University and Universitas Padjadjaran*.
- Wiwarsono, F., Arsyad, A. K., Rongsadi, K., Wijaya, M., Anggoro, B. W., Sugiarto, S., & Rahardjo, P. . (2021). *PENELITIAN DOWNHOLE DEEP COMPACTION (DDC) BANDAR UDARA DHOHO KEDIRI*.
- Yamashita, S., Ito, Y., Hori, T., Suzuki, T., & Murata, Y. (2006). Geotechnical properties of liquefied volcanic soil ground by 2003 Tokachi-Oki Earthquake. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2737–2740. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-273>

