

STABILISASI SWELLING TIGA DIMENSI (3D) TANAH LEMPUNG EKSPANSIF DENGAN LIMBAH INDUSTRI KERAJINAN MARMER

Paulo Jorge Marcal^{1*}, Agus Tugas Sudjianto², Candra Aditya³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang

*Email Korespondensi: paulotimorense11@gmail.com

ABSTRAK

Setiap pekerjaan teknik sipil tidak lepas dengan aspek yang paling penting yaitu tanah. Sejumlah masalah yang berkaitan dengan bangunan teknik sipil yang sering dijumpai di lapangan adalah sifat-sifat teknis tanah yang buruk ditandai dengan kadar air tanah yang tinggi, kompreibilitas yang besar dan daya dukung yang rendah. Sebagian dari jenis tanah yang memiliki sifat buruk tersebut adalah tanah yang mudah mengalami kembang susut besar. Beberapa jenis tanah yang memiliki potensi kembang susut besar adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume secara signifikan seiring dengan perubahan kadar airnya. Tanah jenis ini merupakan tanah lempung yang banyak mengandung mineral-mineral dengan potensi kembang (*swelling potential*) tinggi atau disebut dengan tanah lempung ekspansif. Dari hasil penelitian pada tanah lempung ekspansif di lokasi Kabupaten Jombang (Jawa Timur) menunjukkan bahwa potensi kembang bebas tanah lempung ekspansif yang sangat bervariasi yakni dipengaruhi oleh jenis atau klasifikasi tanah ekspansif, unsur kimia dan mineral, kadar air aktivitas dan indeks plastisitas. Hasil Pengujian limbah industri kerajinan marmer sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif menunjukkan bahwa hasil sifat fisis dengan komposisi penambahan bahan stabilisasi 5%, 10%, 15% 20% mengalami penurunan kadar air cukup konsisten.

Kata kunci : Stabilisasi swelling (3D), Tanah Lempung Ekspansif, Limbah Industri Marmer

ABSTRACT

Every civil engineering work cannot be separated from the most important aspect, namely land. A number of problems related to civil engineering buildings that are often encountered in the field are poor soil technical properties characterized by high soil water content, high compressibility and low bearing capacity. Some of the soil types that have these bad properties are soils that are prone to large shrinkage. Some types of soil that have the potential for large shrinkage are soils that can experience significant changes in volume along with changes in water content. This type of soil is clay soil that contains a lot of minerals with high swelling potential or is called expansive clay. From the results of research on expansive clay in the location of Jombang Regency (East Java) it shows that the potential for free development of expansive clay is very varied, which is influenced by the type or classification of expansive soil, chemical and mineral elements, activity water content and plasticity index. The results of the testing of marble handicraft industry waste as an expansive clay stabilization material show that the results of physical properties with the composition of adding stabilizing agents 5%, 10%, 15% 20% experienced a fairly consistent decrease in water content.

Keywords : Swelling Stabilization (3D), Expansive Clay Soil, Ceramic Waste

1. PENDAHULUAN

Setiap pekerjaan teknik sipil tidak lepas dengan aspek yang paling penting yaitu tanah. Sejumlah masalah dengan bangunan teknik sipil yang sering dijumpai di lapangan adalah akibat dari sifat-sifat teknis tanah yang buruk, yang ditandai dengan kadar air tanah yang tinggi, kompreibilitas yang besar dan daya dukung yang rendah [1]. Sebagian dari jenis tanah yang memiliki sifat buruk tersebut adalah tanah yang mudah mengalami kembang susut besar [2]. Swelling volumetrik (3D) yang besar pada tanah lempung ekspansif tersebut sangat membahayakan bangunan ringan dan jalan raya [3]. Metode perbaikan atau stabilisasi selama ini baru dilakukan pada *swelling vertical* (1D). Guna mendapatkan hasil yang optimal pada

stabilisasi tanah lempung ekspansif maka harus diketahui bagaimana penggunaan bahan aditif yang mengandung silika (Si) terhadap perilaku *swelling* 3 dimensi [2]. Dengan demikian kembang diasumsikan terjadi hanya pada arah vertikal saja. Kondisi ini agak berbeda dengan banyak kejadian di lapangan, tanah yang mengembang adalah tanah yang sudah menyusut sebelumnya. Pada tanah yang telah menyusut tersebut menjadi retak-retak akibat penyusutan 3 dimensi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah dari pandangan ilmu Teknik Sipil merupakan himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relative lepas (*loose*) yang terletak di atas batu dasar (*bedrock*) [4]. Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap-ngendap diantara partikel- partikel. Ruang diantara partikel-partikel dapat berisi air, udara, ataupun yang lainnya. Lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah berbutir halus ukuran koloidal yang terbentuk dari mineral-mineral ekspansif [5]. Lempung ini memiliki sifat yang khas yakni kandungan mineral ekspansif mempunyai kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut tinggi apabila terjadi perubahan kadar air [6].

2.2 Mekanisme Kembang Tiga Dimensi (*Volumetric Swelling*)

Mekanisme kembang pada tanah ekspansif di lapangan terjadi pada tiga dimensi atau yang dikenal dengan kembang volumetrik. [5] Tipe pengembangan tanah ketika tanah dalam keadaan kering menjadi basah, sepanjang tahap awal tanah akan mengalami ekspansif volumetrik tiga dimensi (*three dimensional (3-D) volumetric expansions*) karena tanah lempung kering mengalami retak-retak yang masih terbuka [7].

2.3 Lempung ekspansif

Lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah berbutir halus ukuran koloidal yang terbentuk dari mineral-mineral ekspansif. Lempung ini memiliki sifat yang khas yakni kandungan mineral ekspansif mempunyai kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut tinggi apabila terjadi perubahan kadar air [2]. Apabila terjadi peningkatan kadar air, tanah ekspansif akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan pengembangan [8]. Sedangkan bila kadar air berkurang sampai batas susutnya, akan terjadi penyusutan [9]. Sifat kembang susut yang demikian bisa menimbulkan kerusakan pada bangunan, khususnya bangunan ringan dan jalan [10].

2.4 Perbaikan Tanah Lempung Ekspansif

Perbaikan tanah lempung ekspansif ada 3 metode, yaitu : mencegah perubahan kadar air, stabilisasi tanah dan diberi perkuatan [11]. Secara rinci ketiga metode perbaikan tanah lempung ekspansif seperti pada Gambar 3 dari ketiga metode tersebut, metode yang murah dan banyak dikembangkan adalah metode stabilisasi secara kimia [12]. Stabilisasi secara kimia banyak menggunakan bahan aditif, diantaranya : kapur, semen, fly ash, aspal. Bahan aditif tersebut merupakan puzollan yang dapat memadatkan tanah lempung ekspansif bila diberi air [13].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Pengambilan Material Penelitian

Pengambilan sampel tanah lempung ekspansif, diambil secara langsung di, Kabupaten Jombang Jawa Timur. Dalam keadaan asli (*undisturbed*) maupun terganggu (*disturbed*), contoh pengambilan sampel ini seperti dilihat pada peta lokasi Gambar 1 dan 2. Ditentukanya daerah ini, karena dampak kerusakan konstruksi jalan raya dan bangunan akibat tanah lempung ekspansif sangat dirasakan oleh masyarakat dan pengguna jalan yang melintas di Kabupaten Jombang Jawa Timur.



Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel Limbah Kerajinan Marmer diambil dari Desa Besuki, Kecamatan Campurdarat, Kabupaten Tulugagung seperti pada Gambar 2 berikut ini [14].



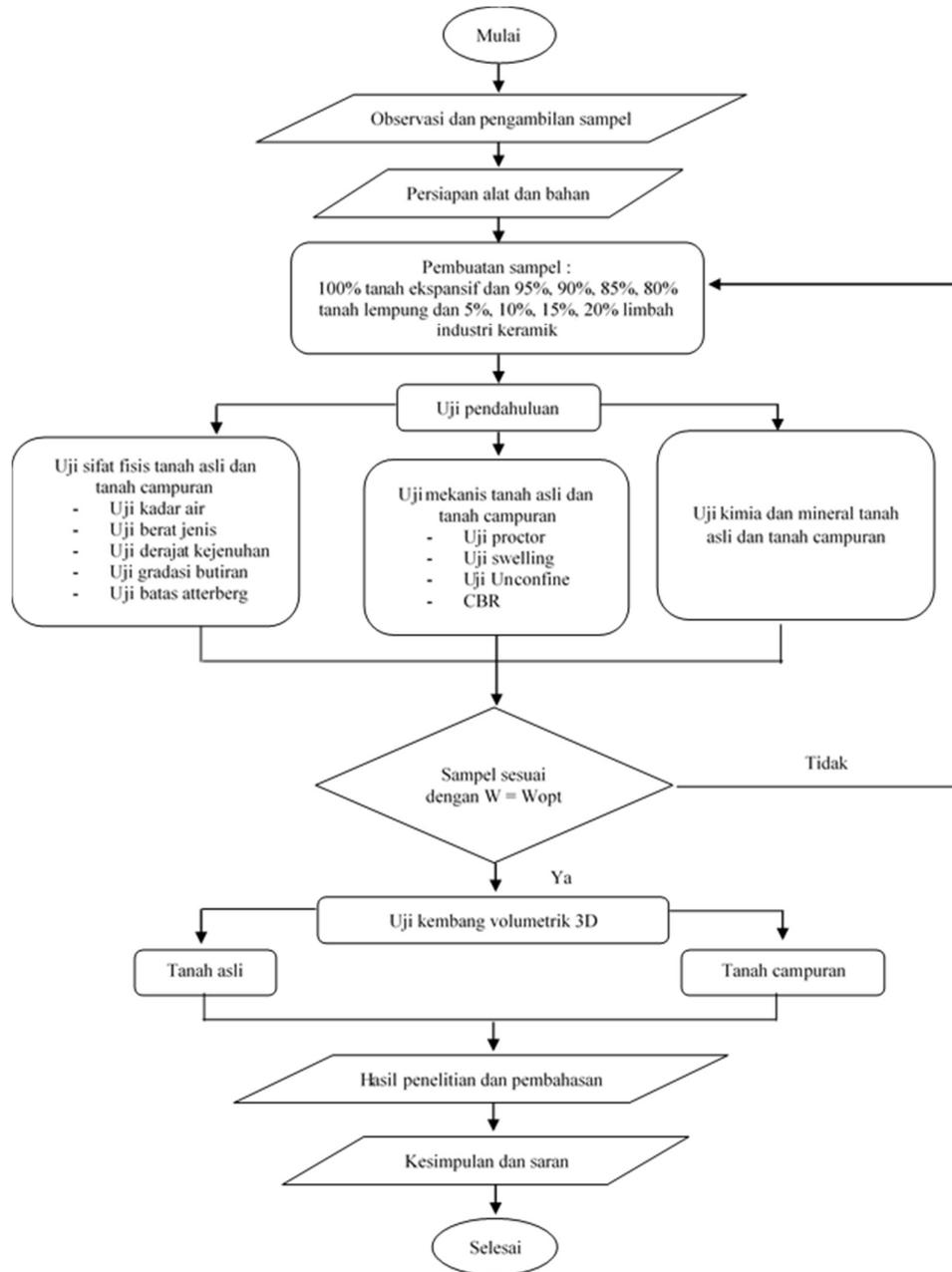
Gambar 2. Pengambilan Sampel Limbah Industri Kerajinan Marmer

3.2 Persiapan Bahan dan Peralatan Uji di Laboratorium

Mempersiapkan peralatan maupun sampel untuk uji pendahuluan maupun uji utama di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang. Spesifikasi benda uji tanah lempung ekspansif kabupaten jombang adalah tanah asli (*undisturbed*) dan tanah terganggu (*disturbed*). Untuk mencampur tanah adalah tanah lempung ekspansif ditambahkan limbah Keramik selanjutnya dibuat benda uji dengan komposisi campuran adalah : tanah lempung 95% + 5% limbah Industri Keramik, tanah lempung 90% + 10% limbah Industri Keramik, tanah lempung 85% + 15% limbah Industri Keramik, dan tanah lempung 80% + 20% limbah Industri Keramik, dengan cetakan standar menggunakan alat proctor, akan diuji terhadap kembang, contoh tanah tersebut lolos ayakan nomor 40 (4,25mm) [15].

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dengan melakukan observasi dan pengambilan sampel serta menyiapkan alat dan bahan. Sampel yang sudah dibuat kemudian diuji yaitu uji sifat fisis tanah asli dan tanah campuran, uji mekanis tanah asli dan tanah campuran, uji kimia dan mineral tanah asli dan tanah campuran, lalu terakhir dilakukan uji kembang volumetrik 3D pada tanah asli dan tanah campuran. Berikut diagram alir penelitian [16].



Gambar 3. Diagram alir penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian pada tanah lempung ekspansif di lokasi Kabupaten Jombang (Jawa Timur) menunjukkan bahwa potensi kembang bebas tanah lempung ekspansif yang sangat bervariasi yakni dipengaruhi oleh jenis atau klasifikasi tanah ekspansif, unsur kimia dan mineral, kadar air aktivitas dan indeks plastisitas [17].

4.1 Pengujian Kembang Susut Tanah (Swelling 3D)

Kembang susut tanah didefinisikan sebagai peristiwa pengembangan (*swell*) karena meresapnya air ke pori-pori tanah menggantikan udara akibat penambahan beban [18]. Pengujian ini mempunyai tujuan untuk mengetahui seberapa besar persentase mengembang dan tekanan (*pressure*) apabila tanah dibebani. Sebagai tanah yang volumenya berubah terhadap pengaruh siklus pengerigan-pembasahan dan pengisapan suction yang berhubungan dengan

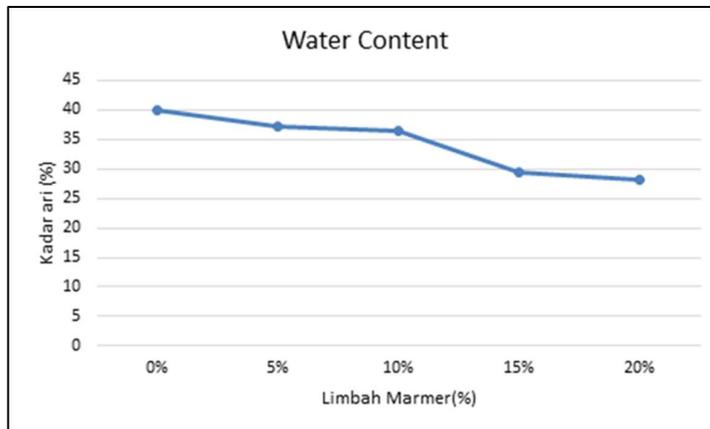
permasalahan dan keruntuhan yang telah diteliti dalam bidang konstruksi seperti yang dilaporkan dari banyak sumber di dunia. Uji pengisapan tanah adalah salah satu cara yang ampuh untuk menyelidiki perilaku tanah kembang susut untuk digunakan dalam memilih tipe pondasi dan membuat keputusan desain. Pengetahuan tentang pengisapan tanah dan aliran air tanah kembang susut membantu memprediksi perilaku yang mungkin dari tekanan mengembang *swelling pressure*.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian *Swelling Horizontal*

| Kandungan (%) | Hari | Diameter (cm) | Diameter (%) | Tinggi (cm) | Tinggi (%) | Volume (cm ³) | Volume (%) |
|---------------|------|---------------|--------------|-------------|------------|---------------------------|------------|
| 0% | 1 | 3.2 | 100 | 3.3 | 100 | 26.6 | 100 |
| 5% | | 3.2 | 100 | 3.4 | 100 | 27.4 | 100 |
| 10% | | 3.3 | 100 | 3.4 | 100 | 29.1 | 100 |
| 15% | | 3.4 | 100 | 3.5 | 100 | 31.8 | 100 |
| 20% | | 3.5 | 100 | 3.5 | 100 | 33.7 | 100 |
| 0% | 2 | 3.3 | 103.1 | 3.5 | 106.1 | 29.9 | 112.8 |
| 5% | | 3.4 | 106.3 | 3.5 | 102.9 | 31.8 | 116.2 |
| 10% | | 3.5 | 106.1 | 3.5 | 102.9 | 33.7 | 115.8 |
| 15% | | 3.5 | 102.9 | 3.7 | 105.7 | 35.6 | 112.0 |
| 20% | | 3.6 | 102.9 | 3.6 | 102.9 | 36.7 | 108.8 |
| 0% | 3 | 3.5 | 106.1 | 3.7 | 105.7 | 35.6 | 118.9 |
| 5% | | 3.6 | 105.9 | 3.6 | 102.9 | 36.7 | 115.3 |
| 10% | | 3.6 | 102.9 | 3.6 | 102.9 | 36.7 | 108.8 |
| 15% | | 3.5 | 100.0 | 3.7 | 100.0 | 35.6 | 100.0 |
| 20% | | 3.6 | 100.0 | 3.6 | 100.0 | 36.7 | 100.0 |
| 0% | 4 | 3.5 | 100.0 | 3.7 | 100.0 | 35.6 | 100.0 |
| 5% | | 3.6 | 100.0 | 3.6 | 100.0 | 36.7 | 100.0 |
| 10% | | 3.4 | 94.4 | 3.6 | 100.0 | 32.7 | 89.2 |
| 15% | | 3.5 | 100.0 | 3.7 | 100.0 | 35.6 | 100.0 |
| 20% | | 3.6 | 100.0 | 3.6 | 100.0 | 36.7 | 100.0 |

Tabel 1 menampilkan data hasil pengujian *swelling horizontal* selama 3 hari dengan kandungan 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% limbah industri keramik dengan hasil yang bervariasi.

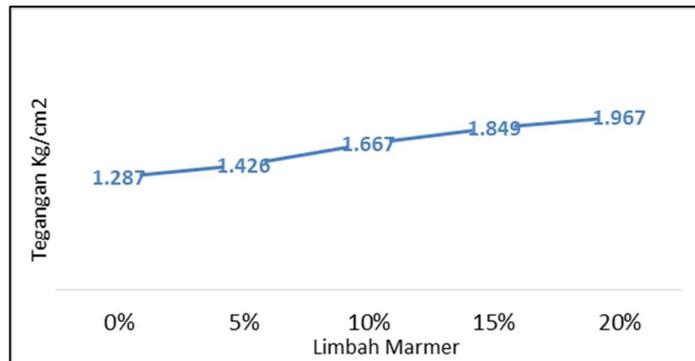
4.2 Pengujian Kadar air tanah ekspansif asli dan limbah industri marmer



Gambar 4. Grafik pengujian kadar air tanah asli jombang

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa pengaruh semakin besar persentase campuran limbah marmer maka nilai kadar air menjadi bervariasi [19]. Apabila tanah asli dicampur dengan limbah marmer sebanyak 5% kadar air tanah menurun menjadi 37.09%, lalu pada komposisi campuran sebesar 10% kandungan air kembali menurun menjadi 36.58%, pada komposisi campuran 15% kandungan air menurun menjadi 29.41%, lalu pada komposisi campuran 20% kadar air kembali menurun menjadi 28.13%.

4.3 Hasil pengujian sifat mekanis dan analisis tanah ekspansif asli dan campuran limbah industri marmer



Gambar 5. Grafik Tegangan Unconfined Tanah Asli + 5%,10%,15% dan 20% Limbah Marmer

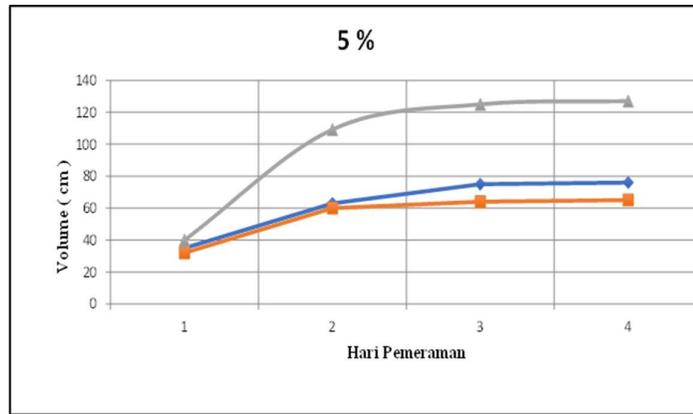
Dari grafik hasil pengujian unconfined tanah asli dan campuran limbah marmer diatas menunjukkan bahwa tegangan tanah yang terjadi semakin menurun seiring dengan penambahan bahan stabilisasi [20]. Untuk tanah asli jombang memiliki nilai 1,287 kg/cm², kemudian tanah asli dicampur limbah marmer sebanyak 5% dan nilai tegangan tanah bertambah menjadi 1,426 kg/cm². Lalu untuk komposisi 10% tanah asli dan campuran nilai tegangan tanah kembali bertambah menjadi 1,667 kg/cm². Kemudian pada komposisi tanah campuran 15% nilai tegangan tanah juga semakin bertambah menjadi 1,849 kg/cm², dan pada komposisi campuran terakhir sebesar 20% tegangan tanah bertambah menjadi 1,967 kg/cm².

4.4 Pengujian Kembang Susut Tanah (Swelling 3D)



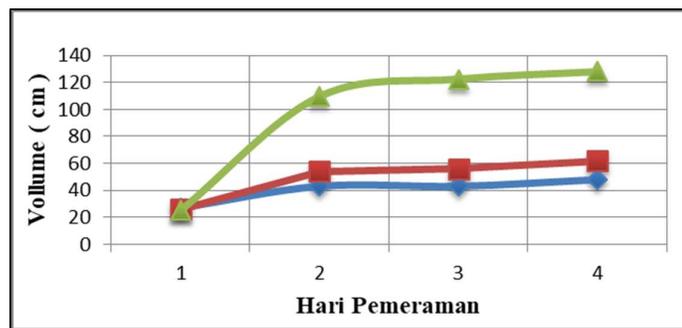
Gambar 6. Grafik pengujian swelling tanah asli Kabupaten Jombang

Pengujian benda uji volume swelling sudah tdk mengembang volume swelling atau 0%. Dari hasil pengujian swelling 3D pada tanah asli Jombang atau 0% pada hari pertama diameter 0% lalu pada hari kedua pengembangan diameter bertambah menjadi 3,0% hari ketiga pengembangan sebesar 5,9% dan hari ke empat pengembangan sebesar dengan hari ketiga atau 0%. Untuk nilai benda uji tinggi benda uji pada hari pertama didapat nilai 0% lalu pada hari kedua pengembangan sebesar 5,9% hari ketiga pengembangan bertambah menjadi 6,0% dan untuk hari ke empat pengembangan tinggi 0%. Lalu untuk data pengujian nilai volume swelling benda uji pada hari pertama didapat persentase pengembangan 0% lalu pada hari kedua volume pengembangan benda uji bertamba dari 0% jadi 13,0% lalu pada hari ketiga pengembangan volume mengalami penambahan sebesar 18,5%, dan untuk hari ke empat



Gambar 7. Grafik pengujian swelling tanah asli dan tambahan Limbah Industri marmer 5%

Dari hasil pengujian swelling 3D pada tanah asli Jombang dengan campuran limbah Marmer 5% pada hari pertama diameter 0% lalu pada hari kedua pengembangan diameter bertambah menjadi 3,2% hari ketiga pengembangan sebesar 6,1% dan hari ke empat pengembangan sebesar dengan hari ketiga atau 0%. Untuk nilai benda uji tinggi benda uji pada hari pertama didapat nilai 0% lalu pada hari kedua pengembangan sebesar 3,2% hari ketiga pengembangan bertambah menjadi 3,5% dan untuk hari ke empat pengembangan tinggi 0%. Lalu untuk data pengujian nilai volume swelling benda uji pada hari pertama didapat persentase pengembangan 0% lalu pada hari kedua volume pengembangan benda uji bertambah dari 0% jadi 9,5% lalu pada hari ketiga pengembangan volume mengalami penambahan sebesar 15,6%, dan untuk hari ke empat pengujian benda.



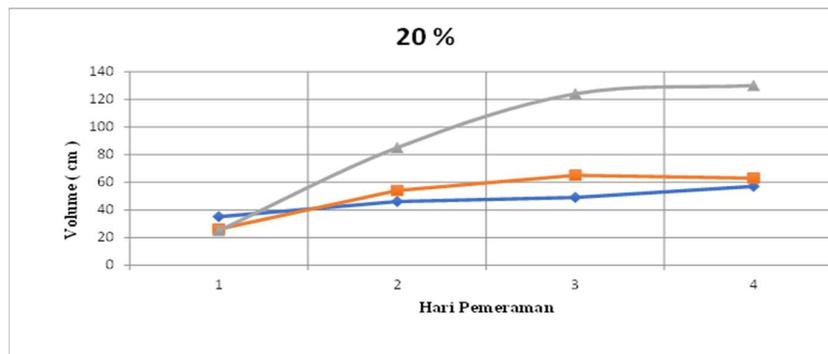
Gambar 8. Grafik pengujian swelling tanah asli dan tambahan Limbah Industri Marmer 10%

Dari hasil pengujian swelling 3D pada tanah asli Jombang dengan campuran limbah Marmer 10% pada hari pertama diameter 0% lalu pada hari kedua pengembangan diameter bertambah menjadi 3,3% hari ketiga pengembangan sebesar 3,3% dan hari ke empat pengembangan sebesar dengan hari ketiga atau 3,6%. Untuk nilai benda uji tinggi benda uji pada hari pertama didapat nilai 0% lalu pada hari kedua pengembangan sebesar 3,5% hari ketiga pengembangan bertambah menjadi 3,6% dan untuk hari ke empat pengembangan tinggi 0%. Lalu untuk data pengujian nilai volume swelling benda uji pada hari pertama didapat persentase pengembangan 0% lalu pada hari kedua volume pengembangan benda uji bertambah dari 0% jadi 9,3% lalu pada hari ketiga pengembangan volume mengalami penambahan sebesar 8,7%, dan untuk hari ke empat pengujian benda uji volume swelling sudah tdk pengembang volume swelling.



Gambar 9. Grafik pengujian swelling tanah asli dan tambahan Limbah Industri Marmer 15%

Dari hasil pengujian swelling 3D pada tanah asli Jombang dengan campuran limbah marmer 15% pada hari pertama diameter 0% lalu pada hari kedua pengembangan diameter bertambah menjadi 3,3% hari ketiga pengembangan sebesar 0%, Untuk nilai benda uji tinggi benda uji pada hari pertama didapat nilai 0% lalu pada hari kedua pengembangan sebesar 3,2% hari ketiga pengembangan bertambah menjadi 0%. Lalu untuk data pengujian nilai volume swelling benda uji pada hari pertama didapat persentase pengembangan 0% lalu pada hari kedua volume pengembangan benda uji bertambah dari 0% jadi 9,4% lalu pada hari ke tiga pengujian benda uji volume swelling sudah tidak mengembang volume swelling.



Gambar 10. Grafik pengujian swelling tanah asli dan tambahan Limbah Industri marmer 20%

Dari hasil pengujian swelling 3D pada tanah asli Jombang dengan campuran limbah marmer 20% pada hari pertama diameter lalu pada hari kedua pengembangan diameter bertambah menjadi 5,9% hari ketiga pengembangan sebesar 0% ,Untuk nilai benda uji tinggi benda uji pada hari pertama didapat nilai 0% lalu pada hari kedua pengembangan sebesar 3,2% hari ketiga pengembangan bertambah menjadi 0%. Lalu untuk data pengujian nilai volume swelling benda uji pada hari pertama didapat persentase pengembangan 0% lalu pada hari kedua volume pengembangan benda uji bertambah jadi 15,8% lalu pada hari ke tiga pengujian benda uji volume swelling sudah tidak mengembang volume swelling.

5. KESIMPULAN

Hasil Pengujian limbah industri kerajinan marmer sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif menunjukkan bahwa hasil sifat fisis dengan komposisi penambahan bahan stabilisasi 5%, 10%, 15% 20% mengalami penurunan kadar air cukup konsisten. Untuk hasil pengujian hasil index plastis didapat nilai yang cukup bervariasi naik dan turun nilai IP untuk tanah asli Jombang adalah 48,73%, sedangkan untuk komposisi campuran 5% nilai IP mengalami kenaikan menjadi 45,20%, untuk komposisi campuran 10% nilai IP kembali mengalami penurunan menjadi 39,48%,sedangkan pada komposisi 15% tanah asli dan limbah marmer nilai index plastis mengalami penurunan menjadi 28,73%, kemudia komposisi terakhir tanah asli dan campuran 20% limbah marmer didapat nilai Ip kembali menurun menjadi 25,54%.

Hasil pengujian sifat mekanis untuk tanah asli Jombang dan campuran limbah industri kerajinan marmer didapat nilai presentase tegangan yang menurun pada tanah asli nilai tegangan tanah asli sebesar 1.287 kg/cm³, lalu komposisi tambahan bahan stabilisasi 5% nilai tegangan tanah meningkat menjadi 1.426 kg/cm³, lalu pada campuran 10% nilai bertambah menjadi 1.667 kg/cm³, lalu pada campuran 15% nilai kembali meningkat sebesar 1.849 kg/cm³, kemudian pada komposisi campuran terakhir atau 20% didapat nilai tegangan tanah sebesar 1.967 kg/cm³. Dari hasil pengujian laboratorium pengaruh bahan stabilisasi berupa limbah industri kerajinan marmer terhadap swelling (3D) ialah cukup bervariasi, tetapi volume hari peneraman semakin naik dari hari pertama sampai hari ke empat, untuk tanah asli pengembangan diameter dan, tinggi sampai hari ke empat, seperti pada komposisi 5% pengembangan berhenti sampai hari ke tiga. Untuk diameter 3,2% tinggi 3,4% dan volume 26,6%. Pada komposisi campuran 10% pengembangan sampai hari ke tiga untuk diameter 3,3%, tinggi 3,4% dan volume 27,4%. Pada komposisi campuran limbah marmer 15% pengembangan sampai hari ke dua untuk diameter 3,5% ,tinggi 3,7% dan volume 35,6%. Yang terakhir komposisi campuran 20% limbah industri marmer berhenti mengembang sampai hari ke dua dengan diameter 3,6% tinggi 3,6% dan volume 36,7%. Dari hasil pengujian stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan menggunakan limbah industri kerajinan marmer didapat nilai komposisi optimum adalah berkisar dari 15% dan 20%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Gumay, “Analisa Stabilitas Daya Dukung Tanah Lempung Lunak Menggunakan Abu Limbah Ampas Tebu (Studi Kasus Tanah Lempung Lunak dan Abu Ampas Tebu di Area Pabrik Gula Sugar Group Kabupaten Lampung Tengah),” *TAPAK (Teknologi Apl. Konstr. J. Progr. Stud. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [2] A. T. Sudjianto, M. Cakrawala, dan C. Aditya, “The Effects of Water Contents On Free Swelling of Expansive Soil,” *Int. J. Civ. Environ. Eng*, vol. 12, hal. 13–17, 2012.
- [3] S. Sudhakar, E. Duraisekaran, G. Dilli Vignesh, dan G. D. Kanna, “Performance Evaluation of Quarry Dust Treated Expansive Clay For Road Foundations,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 45, no. 4, hal. 2637–2649, 2021.
- [4] H. C. Hardiyatmo, “Mekanika Tanah Jilid 1,” *Penerbit PT, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta*, 1992.
- [5] A. J. Puppala, G. S. Pillappa, L. R. Hoyos, D. Vasudev, dan D. Devulapalli, “Comprehensive Field Studies To Address The Performance of Stabilized Expansive Clays,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 1989, no. 1, hal. 3–12, 2007.
- [6] A. T. Sudjianto, “Kajian Model Perilaku Swelling Pada Tanah Lempung Ekspansif Dengan Pola Dua Dimensi,” *Pros. Konf. Nas. Tek. Sipil I, Univ. Atmajaya, Yogyakarta, Indones.*, 2007.
- [7] I. K. Wibowo dan H. Santoso, “Perbaikan Tanah Ekspansif Dengan Menggunakan Quicklime dan Abu Ampas Tebu.” *Petra Christian University*, 2003.
- [8] J. Nelson dan D. J. Miller, *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons, 1997.
- [9] C. S. Gourly, D. Newill, dan H. D. Schreiner, “Expansive Soil,” 1993.
- [10] H. C. Hardiyatmo, *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*. Gadjah Mada University Press, 2006.
- [11] I. B. Mochtar, “Rekayasa Penanggulangan Masalah Pembangunan pada Tanah-tanah Sulit,” *Jur. Tek. Sipil FTSP ITS, Surabaya*, 2002.
- [12] A. T. Sudjianto, “Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Garam Dapur (NaCl),” *J. Tek. Sipil Univ. Atma Jaya Yogyakarta*, vol. 8, no. 1, hal. pp-53, 2009.
- [13] M. Ikhsan, “Kuat Tekan Bebas Tanah Lempung Sukodono Sragen yang Distabilisasi dengan Kapur dan Bubuk Arang Tempurung Kelapa.” *Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 2019.
- [14] C. Aditya, A. Halim, dan S. Silviana, “Pemanfaatan Limbah Marmer dan Serbuk Silika pada Industri Bata Beton Pejal dan Berlubang,” *Pros. SENIATI*, hal. 16-A, 2016.
- [15] A. (American S. for T. and Materials), “Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones,” 2002.

- [16] Y. Amran dan R. Sadiya, “Analisis Peningkatan Sifat Mekanis Tanah Dasar Menggunakan Campuran Abu Limbah Ampas Tebu dan Semen,” *TAPAK (Teknologi Apl. Konstr. J. Progr. Stud. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 1, hal. 74–83, 2019.
- [17] M. M. E. Zumrawi, “Performance and Design of Expansive Soils As Road Subgrade,” *China Chang. Univ.*, 2000.
- [18] I. Wardana, “Kelakuan Tanah dengan Sifat Kembang Susut yang Tinggi pada Stabilisasi Tanah dengan Bahan Serbuk Marmer dan Bahan Stabilia,” *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 2, 2009.
- [19] C. Aditya, D. Irawan, dan S. Silviana, “Pasir Dari Limbah Marmer Sebagai Bahan Stabilisasi Pada Tanah Ekspansif,” 2018.
- [20] C. Aditya, A. Halim, dan S. Silviana, “Pemanfaatan Limbah Marmer Dan Serbuk Zeolit Sebagai Material Pada Bata Ringan CLC (Cellular Lightweight Concrete),” in *Seminar Nasional Sistem Informasi (SENASIF)*, 2017, vol. 1, hal. 919–930.