
Analisis Karakteristik Pengembangan (*Swelling*) Pada Tanah Lempung Dengan Stabilitas Hasil Olahan (Limbah) Marmer Kabupaten Maros

¹Humairah Annisa, ²Zulfadli Ibrahim, ³Ilham Yunus

^{1,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lamappapoleonro

^{2,3} Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Makassar

¹ Jl. Kesatria No 60, Soppeng, Sulawesi Selatan-Indonesia

² Jl. Daeng Tata Raya Parang Tambung, Makassar, Sulawesi Selatan

e-mail : ¹humairah@unipol.ac.id, ²zulfadliibrahim607@gmail.com,

³ilham.yunus@unipol.ac.id

JTEKSIL

Abstrak

Kata Kunci :

Tanah lempung,
limbah marmer,
swelling

Tanah lempung dengan sifat ekspansif banyak ditemukan di Kota Makassar, ditandai dengan kecenderungan mudah mengembang menyebabkan kemampuan dukung tanah yang rendah. Metode yang umumnya digunakan untuk mengatasi hal ini meliputi stabilisasi mekanis, kimia, fisik, hingga menggunakan bahan tambah. Di sisi lain, limbah juga menjadi masalah serius sehingga perlu ditanggulangi, salah satunya metode *recycle*. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus melakukan *recycle* pada limbah marmer dari Kabupaten Maros sebagai bahan tambah untuk mengurangi potensi pengembangan tanah (*swelling*) dan meningkatkan kemampuan mekanisnya sekaligus mengurangi limbah. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh limbah serbuk marmer pada tanah lempung terhadap kepadatan dan perilaku *swelling* tanah lempung. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental menggunakan alat konsolidasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer (LM) terhadap tanah asli (tanah lempung ekspansif) berpengaruh positif meningkatkan kepadatan tanah sebesar 6,258% - 12,044% dengan komposisi optimumnya antara 10%-20% dan *swelling* tanah lempung berkurang sebesar 12,883% - 21,739% pada kadar substitusi limbah marmer sebesar 10% - 20% (LM10% - LM20%).

Abstract

Keywords:

Clay soil, marble
waste, swelling

Clayey soil with expansive properties is commonly found in Makassar, characterized by its tendency to expand easily, resulting in low soil-bearing capacity. Common methods used to address this issue include mechanical, chemical, and physical stabilization, as well as the use of additives. On the other hand, waste also poses a serious problem and needs to be addressed, one of which is through recycling methods. Therefore, this research will focus on recycling marble waste from Maros Regency as an additive to reduce the potential soil expansion (*swelling*) and improve its mechanical properties while reducing waste. This research aims to analyze the effect of marble powder waste on clayey soil density and swelling behavior. The method used is an experimental method using consolidation equipment. The results of the study show that the substitution of marble waste (LM) for original soil (expansive clay soil) has a positive effect, increasing soil density by 6.258% - 12.044% with an optimum composition between 10% - 20%, and reducing clayey soil swelling by 12.883% - 21.739% at a marble waste substitution rate of 10% - 20% (LM10% - LM20%).

© 2024 Jteksil Universitas Lamappapoleonro

PENDAHULUAN

Permasalahan yang sering dijumpai pada tanah lempung adalah karakteristiknya, tanah ini tergolong sebagai tanah ekspansif dan secara alami banyak ditemukan di berbagai wilayah di dunia (Chen, 1975). Tanah ekspansif merupakan jenis tanah yang cenderung untuk mengalami perubahan volumetrik (mengembang) sebagai respons terhadap perubahan kadar air (Das, 2010; Hardiyatmo, 2012). Kandungan mineral lempung seperti *montmorillonite*, *illite*, dan *vermiculite* menyebabkan lempung rentan terhadap kembang susut (Firoozi et al., 2016). Tanah ekspansif dianggap oleh para *engineer* sebagai jenis tanah yang bermasalah karena dapat menyebabkan kerusakan parah pada struktur yang dibangun di atasnya.

Permasalahan tanah ekspansif ini dapat diatasi dengan stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah merupakan upaya untuk perbaikan karakteristik mekanis tanah, dan hingga saat ini masih menjadi kajian yang menarik untuk diteliti, mulai dari metode pelaksanaannya hingga material yang digunakan (Hardiyatmo, 2018). Model stabilisasi tanah yang telah banyak dilakukan adalah stabilisasi dengan bahan tambah seperti kapur, semen, hingga penggunaan material sisa (limbah) hasil industri.

Beberapa penelitian berfokus pada penggunaan limbah marmer sebagai bahan tambah dan hasil telah menunjukkan adanya pengaruh positif. Harianto dan Masri (Harianto & Ahmad Masri, 2016) meneliti limbah marmer yang berasal dari Kab. Enrekang dengan variasi 5% - 30% interval 5% dan menunjukkan nilai CBR meningkat, Siregar dan Andajani (Siregar & Andajani, 2017) meneliti limbah marmer dari hasil olahan PT. Industri Marmer Indonesia Tulungagung (IMIT) variasi limbah marmer 0% - 20% interval 5% menunjukkan nilai *potential swelling* menurun seiring bertambahnya kadar limbah marmer, dan Marcal et al. (Marcal et al., 2022) menggunakan limbah kerajinan marmer dari Desa Besuki, Kab. Tulungagung dengan variasi limbah marmer 5% - 20% interval 5% menunjukkan kadar air menurun dan tegangan tanah asli meningkat seiring bertambahnya kadar limbah marmer. Meskipun terjadi peningkatan kualitas/ kapasitas/ kemampuan tanah dengan adanya limbah marmer, tetapi perlu dikaji lebih jauh limbah marmer dari sumber (*quarry*) lain dan *range* variasi kadar limbah lebih diperbesar, guna memaksimalkan penggunaan limbah marmer ini dengan skala lebih besar lagi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penggunaan limbah hasil olahan marmer dari PT. Makassar Marmer Mulia Indah dari Kab. Maros dengan menambah *range* variasi menjadi 0% - 50% interval 10%.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung

Mineral lempung merupakan jenis mineral yang berbeda dari jenis tanah lainnya. Sebagian besar mineral lempung adalah mineral kristalin yang memiliki bentuk lembaran dan memiliki kemampuan untuk meningkatkan kohesi. Lempung dapat terbentuk dari proses pelapukan kimiawi yang berasal dari material seperti feldspar, mika, dan batu lempung (*limestone*). Ukuran partikel lempung lebih kecil dari 0,002 mm (Chen, 1975; Hardiyatmo, 2018).

Lempung memiliki komponen mineral yang penting (Nelson & Miller, 1997):

1. Kelompok *kaolinite*, memiliki ikatan hidrogen yang kuat dan menjaga ikatan setiap partikel lempung secara bersama-sama. Kelompok ini termasuk kelompok mineral lempung yang tidak ekspansif,

2. Kelompok *mica-like* (seperti mika), seperti *illite* dan *vermiculite*. *Illite* mengandung ikatan potasium yang lemah memungkinkan adanya sedikit pengembangan (ekspansif),
3. Kelompok *smectite*, seperti *montmorillonite*, memiliki ikatan hidrogen yang lemah sehingga banyak menimbulkan masalah, sangat mudah mengembang atau ekspansif.

Mineral lempung aktif seperti *montmorillonite* dan campurannya dengan mineral lempung lainnya menunjukkan aktivitas. Dalam kondisi tertentu, *chlorites* dan *vermiculites* juga menunjukkan aktivitas. Sementara itu, *kaolinite* dan *illite* umumnya tidak aktif, meskipun kadang-kadang dapat berkontribusi pada sifat ekspansif jika jumlahnya cukup banyak. Kadar lempung ekspansif dalam tanah berpengaruh terhadap tingkat pengembangannya. *Montmorillonite* murni dapat mengembang lebih dari 15 kali lipat dari volume aslinya. Namun, *montmorillonite* sulit ditemukan di alam karena sering tercampur dengan mineral lain yang lebih stabil atau dengan pasir dan lanau. Umumnya, tanah yang memiliki potensi pengembangan tinggi mengandung *montmorillonite* tidak lebih dari 35% hingga 50% (Hardiyatmo, 2018). *Montmorillonite* dikenal sebagai mineral lempung yang penyebab pengembangan tanah.

Nelson & Miller (1997) mengungkapkan bahwa kembang susut lempung dipengaruhi oleh karakteristik tanah yang memengaruhi sifat dasar medan gaya internal antar partikel, faktor lingkungan yang memengaruhi sistem gaya internal, serta kedudukan tegangan.

Pengembangan (Swelling)

Tanah yang banyak mengandung lempung atau dominan lempung akan mudah mengalami perubahan volume sehingga mudah mengalami deformasi. Lempung sangat sensitif terhadap perubahan kadar air, yaitu jika kadar air semakin bertambah, maka lempung akan mengembang cenderung melunak. Sebaliknya jika kadar air berkurang, maka lempung akan menyusut cenderung retak.

Pengembangan pada tanah lempung memiliki proses yang agak kompleks. Kadar mineral lempung dan kadar air awal pada tanah lempung sangat mempengaruhi besar pengembangan dan tekanan pengembangan yang terjadi. Tanah yang memiliki susunan acak biasanya lebih mudah mengalami pengembangan dibandingkan dengan tanah yang tersusun secara teratur. Gangguan pada tanah atau proses pembentukan ulang tanah lempung dapat memperburuk sifat pengembangannya. Kation *monovalen* dalam lempung (seperti *sodium montmorillonite*) akan mengalami pengembangan yang lebih signifikan dibandingkan dengan lempung yang mengandung kation *divalen* (seperti *kalsium montmorillonite*) (Hardiyatmo, 2012, 2018). Untuk memprediksi sifat kembang susut tanah lempung, diperlukan uji potensi pengembangan (*swelling potential*). Potensi pengembangan menyatakan persentase perubahan tinggi terhadap tinggi awal benda uji tanah yang diuji melalui alat konsolidasi (konsolidometer).

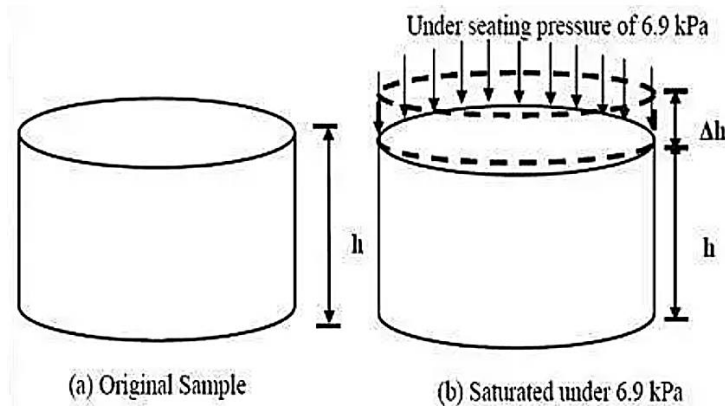
$$\text{Swelling} = \Delta h/h \times 100\% = (h_f - h)/h \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

Δh = Tinggi pengembangan sampel (mm)

h = Tinggi sampel mula-mula (mm)

h_f = Tinggi akhir sampel (mm)



Gambar 1. Skema Pengembangan (Uji Laboratorium)

Limbah Marmer

Marmer (CaCl) adalah jenis batuan metamorf yang berasal dari batu gamping atau dolomit (CaCO_3). Proses metamorfosis ini terjadi akibat pengaruh suhu dan tekanan yang dihasilkan oleh gaya endogen, yang menyebabkan rekristalisasi pada batuan tersebut, sehingga terbentuk tekstur foliasi dan non-foliasi. Marmer diperoleh melalui penambangan, menghasilkan bongkahan-bongkahan batu yang kemudian diolah menjadi berbagai produk, termasuk furniture. Selama proses pengolahan, marmer akan dipotong dan dihaluskan, namun proses ini juga menghasilkan sisa produksi yang cukup banyak, baik dalam bentuk potongan, serbuk halus, maupun limbah cair (Kurniawati & Titisari, 2019; Mulyaningsih, 2018).

Limbah marmer merupakan sisa hasil olahan yang dihasilkan dari proses pengolahan blok batu marmer menjadi ubin, yang kemudian berbentuk bubuk dan melalui berbagai tahapan (Ferriyall, 2005). Pengolahan marmer saat ini telah menggunakan teknologi bubut batu besar. Hasil studi yang dilakukan oleh PT. Sucofindo Jakarta menunjukkan bahwa limbah marmer mengandung komposisi sebagai berikut: senyawa CaO dengan kadar 52,69%, CaCO_3 41,92%, MgO 0,84%, MgCO_3 1,76%, SiO_2 1,62%, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 0,37% (Harianto & Ahmad Masri, 2016). Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen utama limbah marmer adalah zat kapur. Senyawa ini juga ditemukan dalam semen, dengan kadar senyawa CaO dalam limbah marmer hampir setara dengan yang terdapat pada semen, yaitu 52,69% pada limbah marmer dan 60%-70% pada semen, CaCO_3 .

Tabel 1. Unsur Kimia Limbah Marmer (Harianto & Ahmad Masri, 2016)

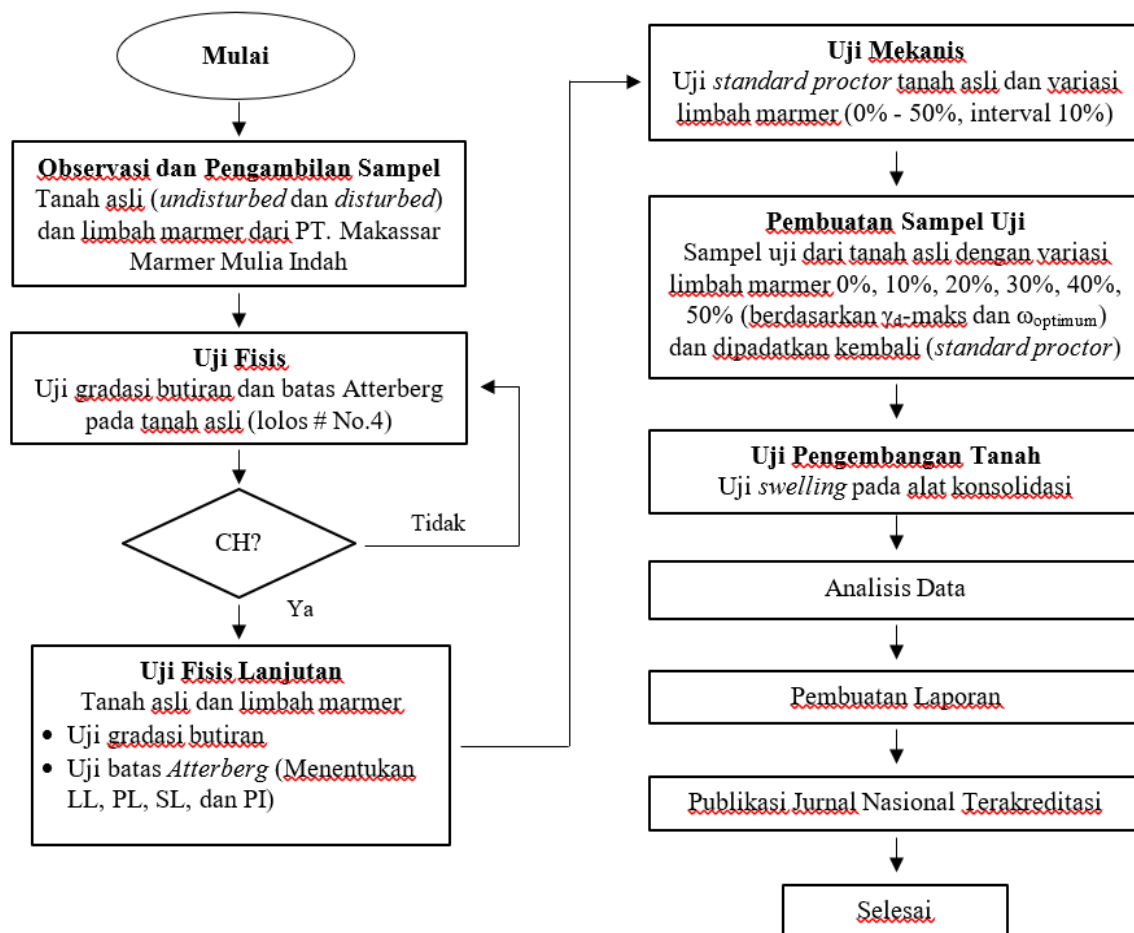
Unsur Kimia	Kandungan (%)
CaO	52,69
CaCO_3	41,92
MgO	0,84
MgCO_3	1,76
SiO_2	1,62
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,37

Penelitian oleh Jamal et al (2021) mengungkapkan bahwa serbuk limbah marmer yang dihasilkan dari industri penambangan di Kabupaten Maros memiliki komposisi kimia utama, yaitu Kalsium Oksida (CaO) sebesar 53,56% dan Silika Dioksida (SiO_2) sebesar 0,68%. Temuan ini menunjukkan bahwa kandungan kimia limbah marmer di Kabupaten Maros sejalan dengan limbah marmer secara umum, termasuk hasil temuan dari PT. Sucofindo.

METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif (*quantitative research*) dengan metode eksperimental, dimana pengambilan data dilakukan dari hasil pengujian laboratorium. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian fisis dan mekanis tanah. Pengujian fisis berupa pengujian berat jenis (*specific gravity*), kadar air, dan gradasi butiran Atterberg Limit. Pengujian mekanis berupa pengujian *swelling* dengan alat konsolidometer dan kepadatan (*standar proctor*). Penelitian ini utamanya menggunakan uji *swell test* konsolidasi untuk mengetahui *swelling* yang terjadi pada tanah lempung yang distabilisasi dengan limbah marmer dari PT. Makassar Marmer Mulia Indah. Berikut tahapan penelitian digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Tahapan Penelitian

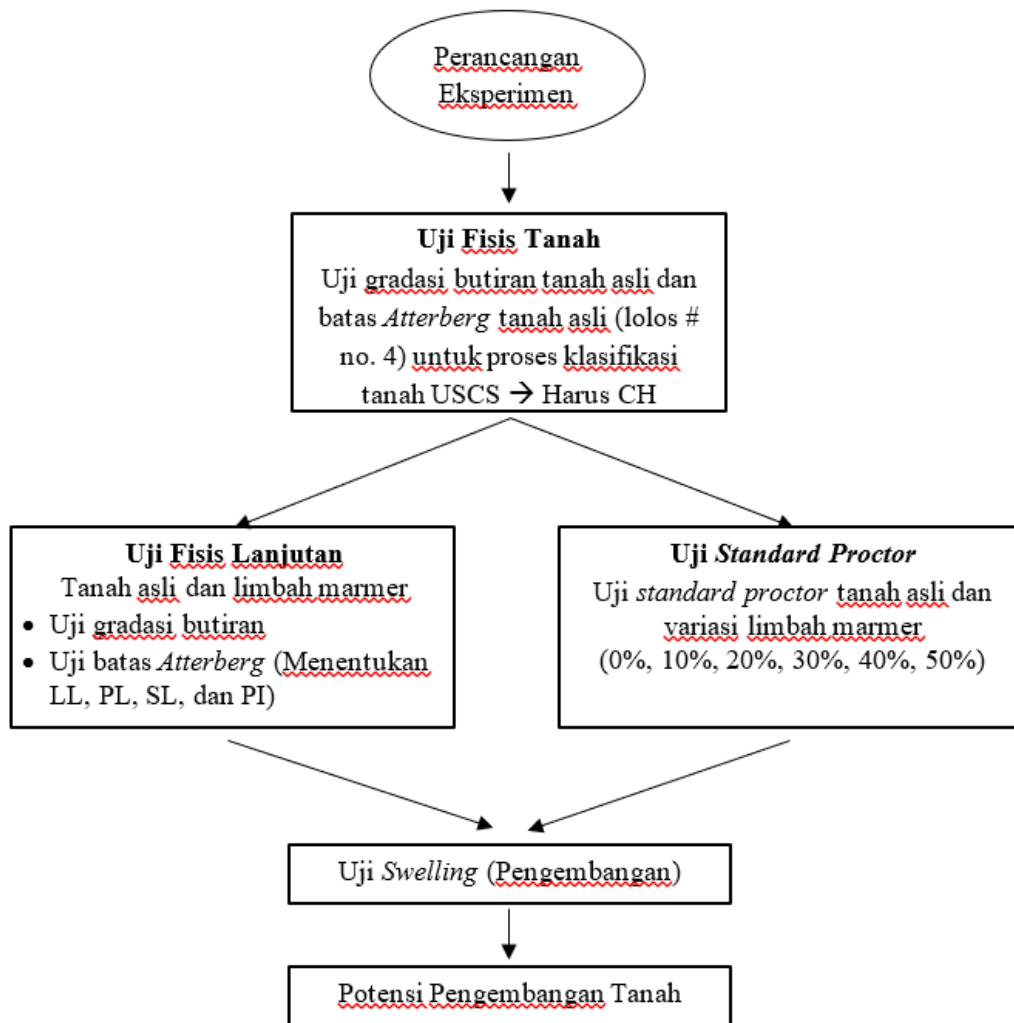
Metode Pengumpulan Data

1. Metode Observasi
Pengamatan dilaksanakan di lokasi untuk memeriksa dan mengumpulkan kebutuhan material yang diperlukan.
2. Eksperimental
Melakukan serangkaian uji coba untuk mengumpulkan data yang diperlukan untuk melakukan analisis.
3. Studi Pustaka

Pengumpulan data dengan cara mempelajari buku–buku, artikel, jurnal, berita, dan lain-lain yang dianggap relevan dan dapat mendukung dalam proses penelitian.

Metode Perancangan Eksperimen

Dalam penelitian ini, perancangan eksperimen berupa perancangan sampel uji dari tanah asli dengan campuran variasi limbah marmer 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% yang diuji potensi pengembangan setiap variasinya menggunakan alat konsolidasi (konsolidometer). Berikut detail bagan perancangan sampel uji hingga proses untuk mendapatkan pengembangan tanah (*potential swelling*).



Gambar 3. Diagram Perancangan Eksperimen

HASIL DAN PEMBAHASAN

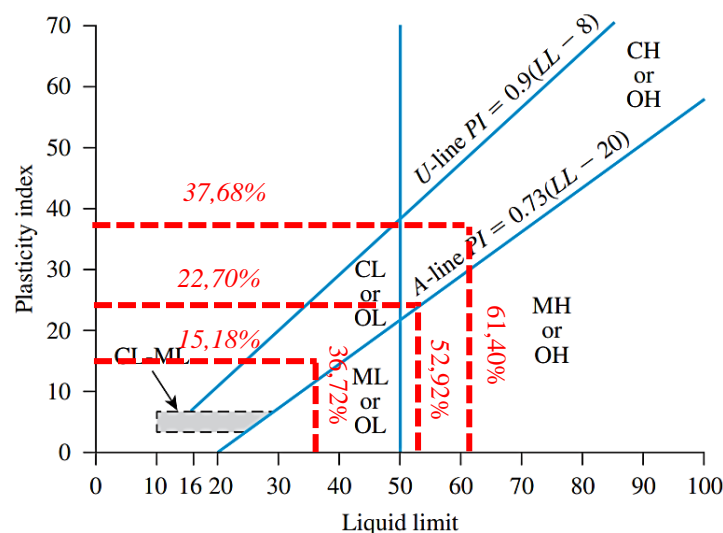
Hasil Uji Fisis dan Mekanis Tanah Asli

Pengujian sampel tanah berupa pengujian fisis dan mekanis tanah. Pengujian fisis terdiri dari uji gradasi butiran (*Sieve Analysis* dan *Hydrometer Analysis*), batas-batas Atterberg (*Atterberg Limit*), dan kadar air. Sedangkan, pengujian mekanis terdiri dari uji pemadatan *standard proctor* dan uji konsolidasi. Berikut pada Tabel 2 hasil pemeriksaan sampel tanah.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Fisis dan Mekanis Tanah Asli

Jenis Uji	Hasil Uji			Ket.	
	Titik 1	Titik 2	Titik 3		
Grain Size Analysis	Gravel	10,40	7,62	2,45	%
	Sand	20,51	26,98	27,14	
	Silt	18,49	26,80	38,21	
	Clay	51,60	38,60	32,20	
	# No. 4	91,80	95,14	86,52	
	# No. 200	69,24	65,61	69,23	
Atterberg Limit	LL	61,40	52,92	36,72	%
	PL	23,72	30,22	21,54	
	PI	37,68	22,70	15,18	
Pemadatan (Standard Proctor)	$\gamma_{d_{max}}$	1,566	1,735	1,483	gr/cm ³
	$\omega_{optimum}$	24,32	27,50	22,93	%

Berdasarkan hasil uji yang disajikan pada Tabel 2, maka dapat dilakukan klasifikasi jenis tanah menggunakan sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*). Data yang digunakan adalah data hasil uji *Grain Size Analysis* dan *Atterberg Limit*.



Gambar 4. Grafik Plastisitas Hasil Uji Tanah Asli Titik 1, 2 dan 3 (Das, 2010)

Berdasarkan Gambar 4, baik sampel tanah Titik 1, 2 dan 3 tergolong CH atau *Clay High Plasticity* (lempung plastisitas tinggi).

Potensi Pengembangan (*Potential Swelling*) Berdasarkan Nilai *Atterberg Limit*

Potensi pengembangan bertujuan untuk melihat potensi perubahan volume tanah akibat adanya air dalam, dikategorikan rendah, sedang, tinggi, atau sangat tinggi.

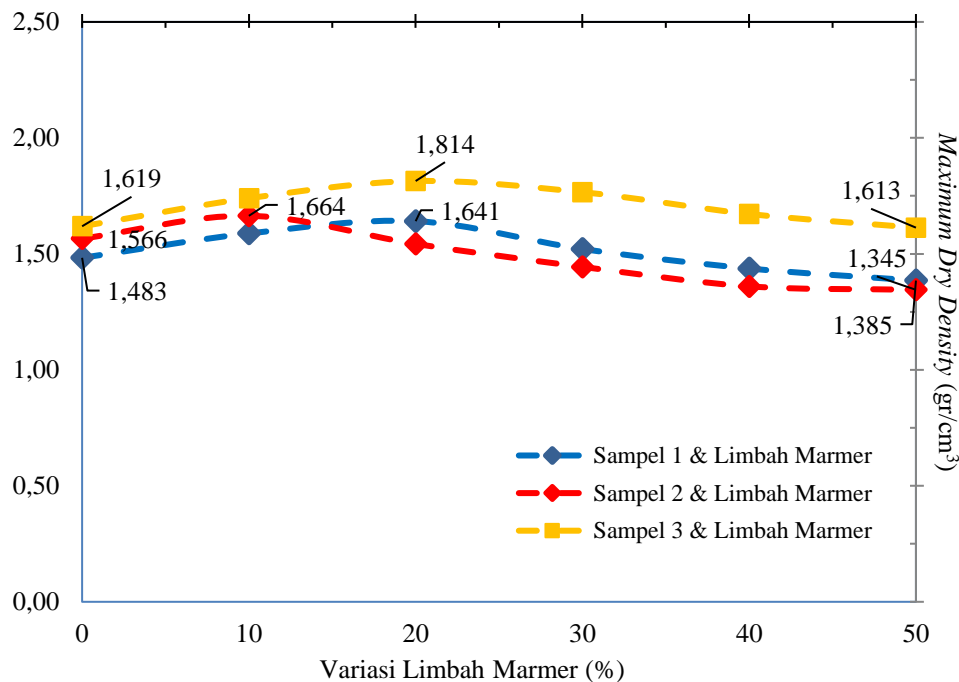
Tabel 3. *Potential Swelling* Tanah Asli

Sampel	Parameter		Derajat Pengembangan (%)		
	PI (%)	S (%)	Chen (1988)	Seed et al (1962)	Sneath (1984)
1	37,68	15,14	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi
2	22,70	4,40	Tinggi	Sedang	Tinggi
3	15,18	1,65	Sedang	Sedang	Tinggi

Berdasarkan Tabel 3, potensi pengembangan (*potential swelling*) pada masing-masing sampel berdasarkan kriteria Chen (1988) dan Snethen (1984) tergolong dalam derajat pengembangan yang tinggi - sangat tinggi, sedangkan berdasarkan kriteria Seed et al (1962) tergolong sedang untuk sampel 2 dan 3, serta derajat pengembangan tinggi untuk sampel 1. Kesimpulan yang bisa ditarik adalah potensi pengembangan tanah lempung tergolong tinggi.

Hasil Uji Pemadatan Tanah Asli dan Tanah Stabilisasi Limbah Marmer

Sebelum melihat besar pengembangan yang terjadi pada tanah asli dan tanah hasil stabilisasi, perlu diketahui besar kepadatan tanahnya melalui uji pemadatan *standard proctor*. Berikut ini Gambar 5 merupakan hasil uji pemadatan.



Gambar 5. Grafik Uji Pemadatan Tanah Asli dan Tanah Dengan Variasi Subtitusi Limbah Marmer Terhadap *Max. Dry Density*

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa kepadatan kering maksimum (*maximum dry density*) pada seluruh sampel meningkat. Kepadatan maksimum sampel 1 dan 3 paling tinggi pada sampel dengan kadar limbah marmer 20% (LM20%), yaitu sebesar 1,641 gr/cm³ dan 1,814 gr/cm³. Sedangkan kepadatan maksimum pada sampel 2 paling tinggi pada sampel dengan kadar limbah marmer 10% (LM10%). Masing- masing sampel juga menunjukkan penurunan kepadatan saat kadar LM melebihi kadar tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan, penambahan limbah marmer memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan kepadatan tanah, tetapi dibatasi pada kadar tertentu.

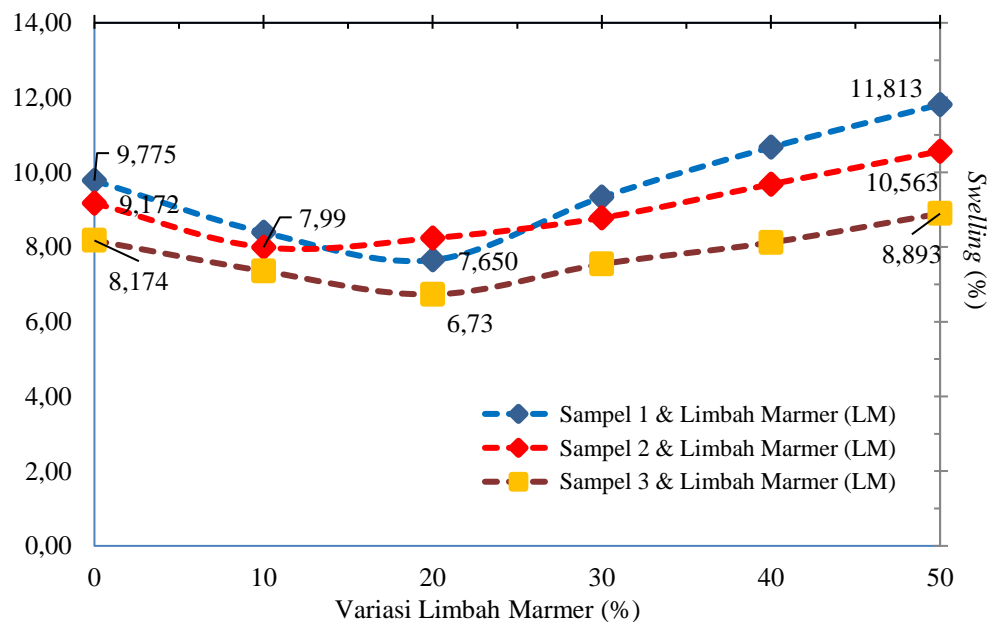
Pengembangan (*Swelling*) Tanah Asli dan Setelah Distabilisasi Limbah Marmer

Besar pengembangan tanah dapat diketahui melalui uji konsolidasi. Data yang disajikan pada Tabel 4 berikut membandingkan hasil pengembangan (*swelling*) tanah asli dan tanah setelah distabilisasi limbah marmer pada beberapa variasi campuran, yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%.

Tabel 4. *Potential Swelling* Tanah Asli

Sampel	Variasi	Perubahan Tinggi Sampel (ΔH)		<i>Swelling</i> (%)
		<i>Initial Height</i> (cm)	<i>Final Height</i> (cm)	
1	LM0%	1,78	1,954	9,775
	LM10%	1,8	1,951	8,389
	LM20%	1,83	1,970	7,650
	LM30%	1,79	1,957	9,330
	LM40%	1,8	1,992	10,667
	LM50%	1,82	2,035	11,813
2	LM0%	1,69	1,845	9,172
	LM10%	1,74	1,879	7,99
	LM20%	1,82	1,970	8,237
	LM30%	1,8	1,958	8,781
	LM40%	1,76	1,930	9,679
	LM50%	1,69	1,869	10,563
3	LM0%	1,78	1,926	8,174
	LM10%	1,85	1,986	7,355
	LM20%	1,83	1,953	6,73
	LM30%	1,76	1,893	7,541
	LM40%	1,8	1,946	8,121
	LM50%	1,77	1,927	8,893

Selanjutnya, untuk mempermudah dalam menggambarkan pengaruh variasi limbah marmer (LM) terhadap *swelling* tanah asli pada Tabel 4, maka dibuat infografis. Berikut infografis variasi limbah marmer terhadap *swelling* pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tanah Asli Dengan Variasi Subtitusi Limbah Marmer Terhadap Pengembangan (*Swelling*)

Berdasarkan Gambar 6, *swelling* pada sampel 3 dengan kadar limbah marmer 20% (LM20%) merupakan yang terendah dibanding sampel lainnya yaitu 6,73%. *Swelling* pada sampel 1 dan 3 memiliki karakteristik data *swelling* yang hampir menyerupai, dimana masing-

masing sampel dengan kadar limbah marmer 20% (LM20%) menghasilkan *swelling* terendah. Sedangkan sampel 2 menghasilkan *swelling* terendah pada sampel dengan kadar limbah marmer 10% (LM10%), yaitu 7,99%. Sampel 1 tergolong kurang efektif pengaplikasian limbah marmernya karena terjadi peningkatan *swelling* yang signifikan dibanding sampel 2 dan 3, yang mengindikasikan bertambahnya LM melebihi komposisi optimumnya akan menyebabkan potensi *swelling* yang besar. Pada umumnya, dengan substitusi limbah marmer (LM) pada sampel tanah asli berefek pada menurunnya *swelling* sampai dengan kadar LM tertentu.

Pembahasan

1. Pengaruh Limbah Serbuk Marmer Terhadap Kepadatan Tanah Asli

Limbah marmer (LM) berpengaruh positif meningkatkan kepadatan tanah asli. Hal ini ditunjukkan berdasarkan hasil uji kepadatan *standard proctor* pada Gambar 5. Kepadatan sampel 1 meningkat sebesar 10,654%, sampel 2 meningkat sebesar 6,258%, dan sampel 3 meningkat sebesar 12,044%. Ketiga sampel tanah asli dengan variasi kadar limbah marmer (LM) menunjukkan peningkatan *maximum dry density* (kepadatan kering maksimum) hanya pada kadar tertentu saja, maka penggunaan limbah marmer tetap harus dibatasi sampai kadar tertentu. Berdasarkan hasil uji kepadatan pada tiga sampel tersebut, maka komposisi optimum limbah marmer (LM) yang *allowed* adalah antara 10%-20% limbah marmer dengan memberi pengaruh peningkatan kepadatan sekitar 6,258%-12,044%. Serbuk marmer mengandung senyawa kimia yang dapat berinteraksi dengan air. Dalam campuran dengan tanah, serbuk marmer dapat membentuk ikatan dengan air, yang berkontribusi pada stabilitas dan kekuatan tanah. Penambahan serbuk marmer dapat meningkatkan daya dukung tanah, yang mengindikasikan bahwa serbuk marmer tidak hanya berfungsi sebagai pengisi, tetapi juga berperan dalam mengikat air dan meningkatkan sifat fisik tanah (Indriyanti & Kasmawati, 2018; Pratama, 2019).

2. Pengaruh *Swelling* Pada Tanah Lempung Dengan Campuran Limbah Serbuk Marmer

Seiring dengan pengaruh limbah marmer (LM) terhadap meningkatnya kepadatan tanah asli, perilaku *swelling* tanah asli juga ikut terpengaruh. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 6, dimana seluruh sampel mengalami penurunan *swelling*. Sampel 1, 2 dan 3 berturut-turut mengalami penurunan *swelling* sebesar 21,739%, 12,883%, dan 17,667% karena substitusi limbah marmer. Sampel 1 dan 3 sama-sama mengalami penurunan *swelling* terbesar pada kadar substitusi limbah marmer 20% (LM20%), sedangkan sampel 2 mengalami penurunan (*swelling*) pada kadar limbah marmer 10% (LM10%). Hal ini sejalan dengan meningkatnya kepadatan tanah sehingga mengurangi potensi pengembangan (*swelling*). Penurunan *swelling* ini terjadi karena kadar masih dalam batas optimumnya, karena apabila melebihi kadar tertentu akan menyebabkan *swelling* tanah meningkat. Limbah marmer mengandung mineral yang dapat berinteraksi dengan partikel tanah lempung, membentuk ikatan yang lebih kuat antar partikel. Proses ini mengurangi kemampuan tanah untuk menyerap air, yang pada gilirannya menurunkan potensi *swelling* tanah lempung secara signifikan (Nursamiah et al., 2022; Siregar & Andajani, 2017). Dengan menambahkan limbah marmer, kompresibilitas tanah lempung dapat dikurangi (Aditya et al., 2018; Nursamiah et al., 2022).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dipaparkan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Limbah marmer (LM) berpengaruh positif meningkatkan kepadatan tanah asli. Kepadatan sampel 1 meningkat sebesar 10,654%, sampel 2 meningkat sebesar 6,258%, dan sampel 3 meningkat sebesar 12,044%. Berdasarkan hasil uji kepadatan pada tiga sampel, maka komposisi optimum limbah marmer (LM) yang *allowed* adalah antara 10% - 20% limbah marmer dengan memberi pengaruh peningkatan kepadatan sekitar 6,258% - 12,044%.
2. *Swelling* pada setiap sampel yang disubstitusi limbah marmer berturut-turut mengalami penurunan *swelling* sebesar 21,739% (sampel 1), 12,883% (sampel 2), dan 17,667% (sampel 3). Sampel 1 dan 3 sama-sama mengalami penurunan *swelling* terbesar pada kadar substitusi limbah marmer 20% (LM20%), sedangkan sampel 2 mengalami penurunan (*swelling*) pada kadar limbah marmer 10% (LM10%).

SARAN

1. Perlu dipertimbangkan metode lain dalam menguji *swelling* tanah
2. Studi terkait penggunaan bahan limbah seperti limbah marmer ini diharapkan dapat dikembangkan lebih jauh, khususnya terkait pengaruh limbah marmer terhadap peningkatan kemampuan mekanis tanah.
3. Perlu dilakukan pemetaan terhadap lokasi-lokasi keberadaan limbah marmer lokal untuk dilakukan *comparative study*
4. Perlu lebih didalami lebih lanjut terkait studi mikroskopis limbah marmer terhadap tanah

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak terkait yang telah membantu dan bekerjasama demi kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, C., Irawan, D., & Silviana, S. (2018). Pasir Dari Limbah Marmer Sebagai Bahan Stabilisasi Pada Tanah Ekspansif. *Seminar Nasional Hasil ...*, 2018(1), 95–102. <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snp2m/article/download/695/587>
- Chen, F. H. (1975). Foundation on Expansive Soil, Development in Geotechnical Engineering 12. In *Esevier Scientific Publishing Company, Amsterdam*. Elsevier Publ. Co.
- Das, B. M. (2010). Principles of Foundation Engineering, SI Edition. *Cengage Learning*.
- Ferriyall. (2005). *Pemanfaatan Bubuk Marmer Hasil Olahan Industri Batu Marmer Untuk Bahan Campuran Pembuatan Paving Block Sebagai Upaya Minimisasi Limbah (Studi Kasus Di Kabupaten Maros Sulawesi Selatan)*. Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro.
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2016). A Review of Clayey Soils. *Asian Journal of Applied Sciences*, 4(06), 2321–0893. www.ajouronline.com
- Hardiyatmo, H. C. (2012). Mekanika Tanah 1, Edisi Keenam. *Gajah Mada University*.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Tanah Ekspansif; Permasalahan dan Penanganan*. Gadjah mada University Press.

- Harianto, T., & Ahmad Masri. (2016). Karakteristik Mekanis Tanah Kembang Susut Yang Distabilisasi Dengan Limbah Marmer. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2016*, 293–300.
- Indriyanti, I., & Kasmawati, K. (2018). Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. *Teknik Hidro*, 11(2), 14–25. <https://doi.org/10.26618/th.v11i2.2443>
- Jamal, Susilawati N., Andi Aladin, and S. Y. (2021). Konservasi Lingkungan dengan Pemanfaatan Serbuk Limbah Hasil Pengolahan Marmer Daerah Kabupaten Maros Provinsi Sulawesi Selatan. *Journal of Technology Process (JTP)*, 1(1), 21–30.
- Kurniawati, S., & Titisari, A. D. (2019). Rekomendasi Pemanfaatan Marmer Daerah Besole, Kecamatan Besuki, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur Berdasarkan Karakteristiknya. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (Indonesian Journal of Community Engagement)*, 5(2), 251. <https://doi.org/10.22146/jpkm.35963>
- Marcal, P. J., Sudjianto, A. T., & Aditya, C. (2022). Stabilisasi Swelling Tiga Dimensi (3D) Tanah Lempung Ekspansif Dengan Limbah Industri Kerajinan Marmer. *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 2(1), 20–29. <https://doi.org/10.31328/bouwplank.v2i1.234>
- Mulyaningsih, S. (2018). *Pengantar Geologi Lingkungan*. Akprind Press.
- Nelson, J., & Miller, D. J. (1997). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons.
- Nursamiah, Pasmah, D., Fattah, A., P, A. P., & Abadi, F. A. (2022). Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Limbah Marmer Sebagai Materialtanah Dasar (Sub Grade). *Prosiding 6th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2022*, 7(1), 13–17.
- Pratama, S. R. (2019). Pengaruh Substitusi Fly Ash pada Bahan Pengikat Campuran Paving Block ditinjau dari Kuat Tekan, Keausan, dan Penyerapan Air. *Jurnal Fakultas Teknik Sipil Universitas Negeri Surabaya, Surabaya*, 4–7.
- Siregar, D. R., & Andajani, N. (2017). Pengaruh Penambahan Limbah Marmer terhadap Potensial Swelling pada Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Driyorejo. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 3(3), 131–137.