

Perilaku Mekanis Tanah Pasir Bergradasi Buruk Menggunakan Uji Pemadatan dan *Direct Shear Test*

Arif Rivianto^[1], Agata Iwan Candra^{[1]*}, Mahardi Kamalika Khusna Ali^[1], Gilang Wahyu Kottama^[1], Mokhamat Wildan Prasetyo^[1], Muhamad Rizal Agus Joko Budiawan^[1], Muhammad Rifqi Fatkhur Rohman^[1], Muhammad Sousa Taufani^[1]

^{[1]*} *Department of Civil Engineering, Kadiri University, Kediri, 64115, Indonesia*

Email: arifrivianto74@gmail.com, iwan_candra@unik-kediri.ac.id*, mahardi@unik-kediri.ac.id, wahyugilang970@gmail.com, mokhamatwildanprasetyo@gmail.com, mochamadbud17@gmail.com, rifqifakhur86@gmail.com, taufanisousa@gmail.com

*) Correspondent Author

Received: 12 January 2023; Revised: 27 April 2023; Accepted: 03 Mei 2023

How to cited this article:

First author, Second Author, (2022). Judul Artikel. Jurnal Teknik Sipil, 19(1), 223–233.

<https://doi.org/10.28932/jts.v19i2.6042>

ABSTRAK

Tanah memiliki unsur-unsur penting bagi makhluk hidup sebagai tempat tinggal, bahan bangunan dan media tanam. Keanekaragaman sifat-sifat tanah telah dipahami dalam berbagai bidang ilmu. Ketahanan tanah sangat memengaruhi kestabilan dan daya dukung tanah pada bangunan sipil. Sampel tanah diambil dari Desa Sidorejo Kabupaten Nganjuk yang tergolong tanah berpasir bergradasi buruk (SP). Banyak penyelidikan telah dilakukan mengenai sifat fisik dan mekanik tanah dengan memeriksa pemadatan dan kekuatan geser. Namun, masih banyak peneliti yang belum mengetahui perilaku mekanik tanah secara detail mengenai tanah (SP). Uji pemadatan dilakukan menggunakan metode *Standard Proctor Test* dengan penambahan air pada setiap sampel sebesar 2,5%, dilanjutkan dengan pengujian kuat geser menggunakan metode *Direct Shear Test* dari sampel pemadatan dengan berat basah maksimum. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku mekanik tanah pasir bergradasi buruk (SP) terhadap kuat geser. Pengujian kuat geser diperoleh nilai kohesi sebesar 2,0305 kPa dan sudut geser sebesar 28,892°. Berdasarkan hasil penelitian, sifat mekanik tanah (SP) dapat dijadikan acuan untuk konstruksi pada jenis tanah dan klasifikasi tanah yang sama.

Kata kunci: *Kuat Geser, Pasir Buruk, Pemadatan, Sifat Mekanik.*

ABSTRACT. *Mechanical Behavior of Poorly Graded Sandy Soil Using Compaction and Direct Shear Tests. Soil has important elements for living things as a place to live, building materials and planting media. The diversity of soil properties has been understood in various fields of science. Soil resistance greatly affects the stability and carrying capacity of the soil in civil buildings. Soil samples were taken from Sidorejo Village, Nganjuk Regency, which are classified as poorly graded sandy soils (SP). Many investigations have been made regarding the physical and mechanical properties of soil by examining compaction and shear strength. However, there are still many researchers who do not know the soil mechanical behavior in detail regarding soil (SP). The compaction test was carried out using the Standard Proctor Test method with the addition of 2.5% water to each sample, followed by a shear strength test using the Direct Shear Test method from compaction samples with maximum wet weight. This study aims to determine the mechanical behavior of poorly graded sand (SP) on shear strength. The shear strength test obtained a cohesion value of 2.0305 kPa and a shear angle of 28.892°. Based on the research results, soil mechanical properties (SP) can be used as a reference for construction on the same soil type and soil classification.*

Keywords: *Compaction, Mechanical Properties, Poor Sand, Shear Strength.*

1. PENDAHULUAN

Tanah memiliki unsur penting kehidupan makhluk hidup sebagai tempat tinggal, bahan dasar bangunan dan media tanam. Ukuran partikel tanah menunjukkan golongan jenis tanah yang berbeda kerikil 0,76-2 mm, pasir 2-0,075 mm, lanau 0,075-0,002 mm, dan lempung < 0,002 mm (Das, 2013). Namun, kondisi geografi mengakibatkan suatu perbedaan sifat tanah pada setiap wilayah. Keragaman sifat tanah telah dipahami dalam berbagai bidang keilmuan (C. Wang et al., 2021). Pada bidang teknik sipil, setiap sifat tanah memiliki beberapa karakteristik yang berbeda. Karakteristik tanah sangat memengaruhi daya dukung dan stabilitas (Rehman et al., 2018). Karakteristik tanah terbagi dalam 2 jenis tanah gradasi baik dan gradasi buruk. Dalam penelitian ini difokuskan pada satu jenis tanah yang mengalami kegagalan geser bila terdapat kandungan air yang banyak yaitu tanah berpasir bergradasi buruk (SP). Tanah (SP) mempunyai karakteristik berbutir kasar dengan varietas susunan didominasi oleh pasir dengan persentase lebih dari 50% (ASTM C136, 2019).

Pemicu paling umum terjadinya tanah longsor adalah ketika tanah menerima air yang berlebihan. Ikatan antara tanah dan jumlah pori sangat berpengaruh pada proses peyerapan air. Tanah berbutir kasar memiliki angka pori yang lebih tinggi dari pada tanah berbutir halus (Vallejo, 2001). Angka pori tanah merupakan volume rongga kosong pada tanah yang berisi air dan udara (Deb et al., 2010). Permeabilitas dari tanah pasir yang tinggi perlu diperbaiki dengan mengurangi jumlah pori (T. Wang et al., 2018). Sehingga, perlu dilakukan pemadatan untuk mengurangi volume rongga kosong tanah (ASTM 698-07, 2007). Dampak pemadatan dinamis mampu mengurangi kompresibilitas dan permeabilitas serta meningkatkan kuat geser tanah. Untuk memperoleh besaran nilai kuat geser tanah pasir bergradasi buruk (SP) dilakukan pengujian geser langsung (ASTM D3080, 2003). Kuat geser merupakan kemampuan partikel tanah menahan gaya tarik dan dorongan per satuan luas (Al-Badran & Al-Ameri, 2020). Kekuatan geser memiliki peranan yang penting dalam analisis stabilitas tanah, antara lain daya dukung sebuah pondasi, stabilitas lereng, analisis dinding penahan tanah dan sebagai standar keamanan struktur sebuah bangunan. Sehingga, parameter kuat geser perlu diketahui untuk meminimalisir kerusakan konstruksi akibat pergeseran tanah.

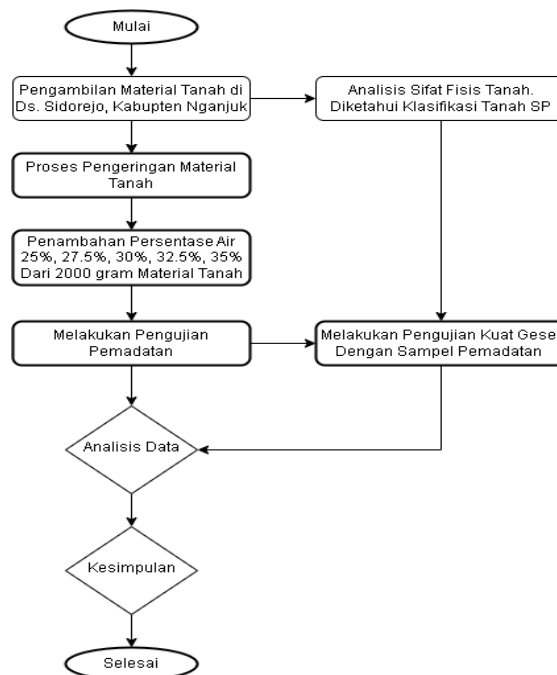
Banyak investigasi yang telah dilakukan mengenai sifat fisis dan sifat mekanik tanah (Cao et al., 2019; Su et al., 2018). Investigasi sifat mekanik tanah dilakukan dengan menguji pemadatan dan menguji kekuatan geser tanah. Namun, masih banyak peneliti yang

belum melakukan investigasi mekanik tanah secara detail terhadap tanah pasir bergradasi buruk (SP). Untuk mencapai kuat geser maksimum dari tanah pasir bergradasi buruk (SP), pengujian kuat geser menggunakan sampel tanah hasil uji pemadatan yang memiliki berat volume basah maksimum (H.L. Wang et al., 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku mekanik tanah pasir bergradasi buruk (SP) terhadap kuat geser. Adapun pengujian yang dilakukan meliputi uji pemadatan dengan standard ASTM 698-07 dan *direct shear test* dengan standard ASTM D3080. Dari pengujian tersebut akan didapatkan nilai *Maximum Dry Density* (MDD), *Optimum Moisture Content* (OMC), kohesi dan sudut geser (Malizia & Shakoor, 2018; Nugraha, 2020; Rishavilenda & Desiani, 2018). Nilai tersebut dapat digunakan untuk mengetahui perilaku mekanis tanah dan diharapkan dapat digunakan sebagai acuan pembangunan sebuah konstruksi pada jenis dan klasifikasi tanah yang sama.

2. METODOLOGI

Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kadiri. Alur penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



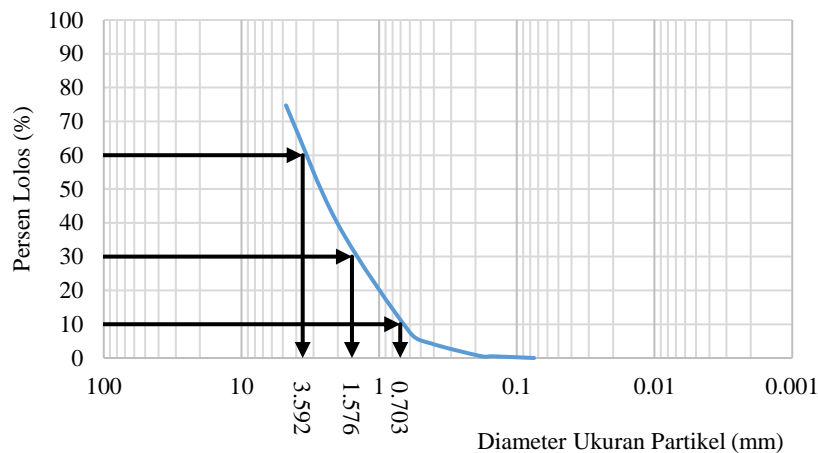
Gambar 1. Alur Penelitian

Penelitian dari **Gambar 1** dimulai dari pengambilan material tanah di Desa Sidorejo, Kecamatan Sawahan, Kabupaten Nganjuk. Proses pengeringan tanah dilakukan di tahap awal menggunakan oven selama 24 jam. Kemudian dilanjutkan pengujian pemadatan tanah dengan persentase air 25%, 27,5%, 30%, 32,5%, dan 35%. Sedangkan,

uji kuat geser menggunakan sampel hasil pemadatan dengan berat basah paling tinggi. Hasil penelitian yang didapatkan dianalisis dan ditarik kesimpulan dari kuat geser tanah SP yang dipadatkan.

2.1 Data Tanah

Tanah yang diambil dari Desa Sidorejo, Kecamatan Sawahan, Kabupaten Nganjuk tergolong jenis latosol. Tanah latosol atau tanah merah tropis merupakan tanah yang banyak dijumpai didaerah tropis. Kadungan tanah latosol antara lain konsentrasi besi dan alumunium oksida yang tinggi. Pada wilayah pengambilan tanah memiliki kondisi geografi berupa dataran tinggi. Sifat fisik tanah telah diketahui berdasarkan **Gambar 2** dan **Tabel 1**. Klasifikasi tanah tergolong pasir bergradasi buruk (SP), sesuai USCS.



Gambar 2. Kurva Distribusi Ukuran Partikel

Tabel 1. Sifat Tanah

<i>Uji</i>	<i>Standard Pengujian</i>	<i>Hasil</i>
Berat jenis	ASTM D-854	2,72
Kerikil %	ASTM C136	25,25
Pasir %	ASTM C136	74,25
Lempung & Lanau %	ASTM C136	0,50
C _u	ASTM C136	5,11
C _c	ASTM C136	0,98
Batas Cair %	ASTM D-4318	23,5
Batas Plastis %	ASTM D-4318	2,80
Indeks Plastisitas %	ASTM D-4318	20,70
USCS		SP

Sumber: (Hasil Analisis Sifat Fisik Tanah, 2022)

2.2 Uji Pemadatan

Pada Pengujian pemadatan menggunakan metode *Standart Proctor Test* dikarenakan metode ini mempunyai energi pemadatan yang sesuai dengan alat berat pada proyek konstruksi di area sekitar Kabupaten Nganjuk. Tanah dipadatkan dengan alat pemadatan dalam cetakan silinder ber-volume 943,3 cm³. Penambahan persentase air pada

kelima sampel sebesar 25%, 27,5%, 30%, 32,5% dan 35%. Kemudian tanah dipadatkan menggunakan penumbuk yang memiliki berat 2,5 kg dan tinggi jatuh penumbuk 30,48 cm. Pemadatan tanah dilakukan dalam 3 lapis dengan jumlah tumbukan 25 kali setiap lapis. Setelah pemadatan selesai, massa total sampel ditimbang dan keringkan sampel tanah pada cawan dengan dioven selama 24 jam serta timbang hasil kering. Berdasarkan data yang diperoleh, dianalisis untuk mendapatkan nilai OMC, MDD, angka pori dan derajat kejenuhan. Energi pemadatan pada sampel tanah dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \frac{N_b \times N_l \times W \times H}{V} \quad (1)$$

Keterangan :

E = Energi Pemadatan

N_b = Jumlah Pukulan

N_l = Jumlah Lapis

W = Berat Pemukul

H = Tinggi jatuh Pukulan

V = Volume

2.3 Direct Shear Test

Proses *direct shear test*, menggunakan sampel tanah hasil uji pemadatan yang memiliki berat volume basah maksimum. Sampel dibagi menjadi 3 bagian dengan diameter, tebal dan kerapatan sampel diusahakan agar sama. Beban tiap pengujian bervariasi dari 800 gram, 1595 gram dan 3163 gram. Sebelum melakukan uji, pastikan dial horizontal, dial vertikal dan proving ring menunjukkan angka nol. Putaran alat pada uji dilakukan secara konstan tiap per 0,2 mm dial horizontal dan catat bacaan dial. Lakukan berulang-ulang sampai bacaan proving ring maksimum, apabila nilai percobaan sudah sama sebanyak 3 kali maka pengujian dapat dihentikan. Berdasarkan data yang didapat dari pengujian dianalisis untuk mengetahui parameter kuat geser dan gambar hubungan gaya geser dan perpindahan geser vertikal yang terjadi pada sampel serta perhitungan kuat geser tanah didapat melalui rumus berikut.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

Keterangan :

τ = Kuat Geser

c = Kohesi

σ = Tegangan Normal

$\tan \varphi$ = Gesekan

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Uji Pemadatan:

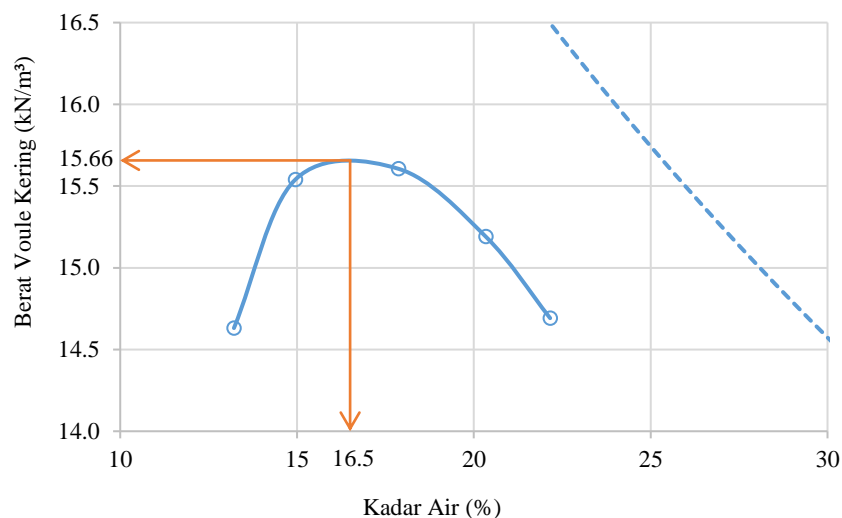
Pada uji pemadatan tanah yang dilakukan dengan selisih air 2,5% dari kelima sampel tanah pasir bergradasi buruk (SP) didapatkan hasil yang ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Data Pengujian Pemadatan

<i>Hasil Pengujian</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
Penambahan Air (g)	: 500	550	600	650	700
Penambahan Air (%)	: 25	27,5	30	32,5	35
Berat Basah Cetakan (g)	: 1594	1719	1770	1759	1727
Berat Volume Basah (kN/m ³)	: 16,56	17,86	18,39	18,28	17,95
Berat Basah Tanah Cawan (g)	: 39,75	26,52	33,58	39,17	31,15
Berat Kering Tanah Cawan (g)	: 35,11	23,07	28,49	32,55	25,5
Berat Volume Kering (kN/m ³)	: 14,63	15,54	15,61	15,19	14,69
Berat Air (g)	: 4,64	3,45	5,09	6,62	5,65
Kadar Air (%)	: 13,22	14,95	17,87	20,34	22,16
Angka Pori	: 0,80	0,69	0,68	0,73	0,79
Derajat kejenuhan (%)	: 44,44	57,93	69,93	74,58	75,21

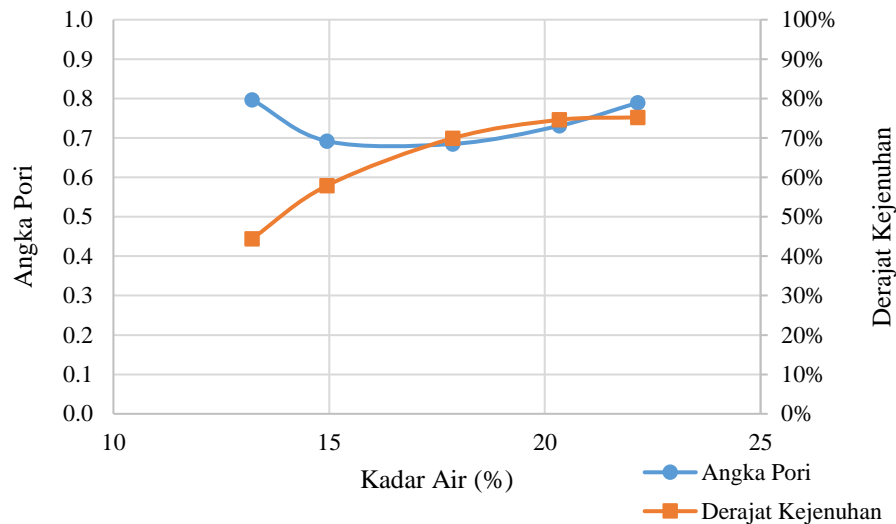
Sumber: (Data Hasil Penelitian Mekanika Tanah di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kadiri)

Berdasarkan **Tabel 2** didapatkan hasil berat basah maksimum pada sampel 3 sebesar 1770 gram dengan penambahan persentase air 30%. Sehingga, dari hasil sampel 3 digunakan sebagai sampel pada *direct shear test*. Pemadatan dilakukan menggunakan energi sebesar 594 kN-m/m diperoleh OMC dan MDD ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Hasil Uji Pemadatan

Dari **Gambar 3** pengujian diperoleh OMC sebesar 16,50% dengan MDD sebesar 15,66 kN/m³ dari puncak tertinggi (Yuan et al., 2022). Kurva *zero air void* digambarkan guna menunjukkan berat kering tanah maksimum yang dapat dicapai oleh kadar air dan berat jenis tertentu. Sedangkan, untuk mengetahui tingkat kepadatan sampel dilihat dari nilai angka pori yang dihasilkan yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Hasil Angka Pori & Derajat Kejenuhan

Berdasarkan **Gambar 4** Sampel pemadatan dengan berat volume paling tinggi memiliki angka pori sebesar 0,68 dan derajat kejenuhan sebesar 69,93%. Semakin tinggi persentase kadar air maka derajat kejenuhan akan meningkat. Namun, derajat kejenuhan tanah SP pada persentase kadar air yang meningkat, diperoleh selisih tingkat kenaikan yang lebih kecil untuk mencapai kondisi jenuh.

3.2 Direct Shear Test :

Pada pengujian geser langsung diperoleh tegangan normal dan tegangan geser yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil *Direct Shear Test*

<i>Tegangan Normal (kPa)</i>	<i>Tegangan Geser (kPa)</i>
2,575	3,347
5,133	5,020
10,179	7,595

Sumber: (Data Hasil Penelitian Mekanika Tanah di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kadiri)

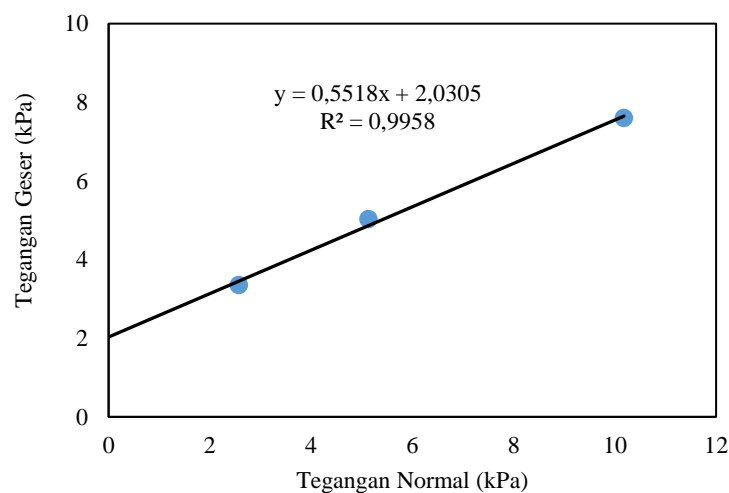
Berdasarkan **Tabel 3** pengujian yang dilakukan pada ketiga sampel dengan beban yang berbeda didapatkan hasil yang berbanding terbalik. Ketika tegangan normal semakin besar maka tegangan geser akan mengecil. Setiap sampel tanah pasir gradasi buruk (SP) menerima tegangan normal yang berbeda. Perpindahan geser ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Perpindahan Geser Vertikal (mm)

<i>Tegangan Normal</i> <i>2,575 (kPa)</i>	<i>Tegangan Normal</i> <i>5,133 (kPa)</i>	<i>Tegangan Normal</i> <i>10,179 (kPa)</i>
0,00	0,00	0,00
0,02	0,03	0,01
0,05	0,04	0,02
0,08	0,09	0,05
0,11	0,12	0,07
0,15	0,17	0,08
0,18	0,19	0,09
0,20	0,21	0,11
0,21	0,22	0,13
0,22	0,22	0,14
0,23	0,25	0,15
0,24	0,25	0,18
0,26	0,27	0,22
0,28	0,28	0,24
0,31	0,31	0,27
0,35	0,35	0,29
0,38	0,38	0,30
0,39	0,40	0,32
0,49	0,50	0,42
0,59	0,60	0,52
0,69	0,70	0,62
0,79	0,80	0,72
0,89	0,90	0,82
0,99	1,00	0,92
1,09	1,10	1,02
1,19	1,20	1,12
1,29	1,30	1,22
1,39	1,40	1,32
1,49	1,50	1,42
-	1,60	1,52
-	1,70	1,62
-	1,80	1,72
-	1,90	1,82
-	-	1,92
-	-	2,02
-	-	2,12
-	-	2,22
-	-	2,32
-	-	2,42

Sumber: (Data Hasil Penelitian Mekanika Tanah di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kadiri)

Berdasarkan **Tabel 4** menunjukkan perpindahan geser (mm) dan proses uji paling banyak pada tegangan normal 10,179 kPa untuk mencapai tegangan geser maksimum tanah. Perpindahan geser vertikal menyebabkan terjadinya deformasi pada benda uji ketika mencapai tegangan geser maksimum dari bentuk semula. Deformasi ketiga sampel dari pengujian yang dilakukan diperoleh sebesar 1,49 mm, 1,90 mm dan 2,42 mm. Tegangan geser maksimum dari ketiga sampel diperoleh 3,347 kPa, 5,020 kPa, dan 7,595 kPa. Sehingga, hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan parameter kuat geser pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Hasil *Direct Shear Test*

Berdasarkan **Gambar 5** menunjukkan persamaan dengan nilai kohesi diperoleh sebesar 2,030 kPa dan sudut kemiringan ($\tan\phi$) 0,5518 dengan nilai sudut geser sebesar $28,892^\circ$. Hasil R^2 0,995 menunjukkan hubungan linier tegangan normal dan tegangan geser dengan akurasi tinggi, guna menentukan sudut kemiringan ($\tan\phi$) yang tepat (Zhou et al., 2019). Tanah pasir bergradasi buruk (SP) memiliki nilai kohesi yang rendah dikarenakan gaya tarik menarik antar partikel sangat kecil. Faktor gradasi ukuran partikel juga akan mempengaruhi kekuatan geser tanah. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai C_u dan C_c yang tidak memenuhi spesifikasi gradasi yang baik dengan $C_u > 6$ dan $1 < C_c < 3$. Sehingga, pasir bergradasi buruk memiliki kohesi yang lebih kecil dari pada tanah pasir bergradasi baik dan tanah lempung.

4. SIMPULAN

Tanah yang berada di Desa Sidorejo Kabupaten Nganjuk tergolong jenis latosol dan klasifikasi tanah tergolong pasir bergradasi buruk (SP). Kepadatan tanah diperoleh
Perilaku Mekanis Tanah Pasir Bergradasi Buruk Menggunakan Uji Pemadatan dan *Direct Shear Test* 231

OMC 16,50% dan MDD 15,66 kN/m³ dengan energi pemadatan 594 kN-m/m³. Nilai tersebut dapat digunakan sebagai rekomendasi pemadatan di lapangan. Sementara itu, nilai kuat geser diperoleh kohesi 2,030 kPa dan sudut geser 28,892°. Parameter tersebut dapat digunakan sebagai perhitungan daya dukung tanah dalam perencanaan pondasi. Namun, karakteristik tanah pasir bergradasi buruk (SP) kurang layak dipakai sebagai penopang struktur pondasi dikarenakan memiliki nilai geser yang rendah. Sehingga, perlu dilakukan stabilisasi tanah terlebih dahulu agar meminimalisir kerusakan dan kerugian konstruksi. Berdasarkan hasil penelitian sifat mekanik tanah pasir bergradasi buruk (SP) dapat digunakan sebagai acuan pembangunan konstruksi pada jenis dan klasifikasi tanah yang sama.

5. SARAN

Perlu kajian lebih lanjut mengenai perilaku mekanis tanah pasir bergradasi buruk (SP) dengan campuran material lain untuk meningkatkan sifat mekanis tanah pasir bergradasi buruk (SP).

6. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Badran, Y. M., & Al-Ameri, A. F. (2020). Effect of Adding Sand on Clayey Soil Shear Strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 870(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012079>
- ASTM 698-07. (2007). ASTM 698-07: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). *ASTM International*, 3, 15.
- ASTM C136. (2019). ASTM C136/C136M Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM Standard Book*, 3–7.
- ASTM D3080. (2003). ASTM D 3080 - 03 Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International*, 04, 7.
- Cao, G., Wang, W., Yin, G., & Wei, Z. (2019). Experimental Study of Shear Wave Velocity in Unsaturated Tailings Soil with Variant Grain Size Distribution. *Construction and Building Materials*, 228, 116744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116744>
- Das. (2013). Principles of Geotechnical Engineering. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Deb, K., Sawant, V. A., & Kiran, A. S. (2010). Effects of Fines on Compaction Characteristics of Poorly Graded Sands. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(2), 299–304. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.02.299-304>
- Malizia, J. P., & Shakoor, A. (2018). PT US CR. *Engineering Geology*, #pagerange#. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.028>
- Nugraha, A. S. (2020). Pengaruh Energi Pemadatan di Laboratorium Terhadap Parameter Kompaksi Material *Crushed Limestone* Padalarang. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(1), 118–132. <https://doi.org/10.28932/jts.v16i1.2496>

- Rehman, Z. ur, Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2018). On Yield Stress of Compacted Clays. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0090-2>
- Rishavilenda, D. S., & Desiani, A. (2018). Menggunakan Geotextile Woven dan Non Woven. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(c), 105–200.
- Su, L. J., Zhou, W. H., Chen, W. Bin, & Jie, X. (2018). Effects of Relative Roughness and Mean Particle Size on the Shear Strength of Sand-Steel Interface. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 122, 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.003>
- Vallejo, L. E. (2001). Interpretation of the Limits in Shear Strength in Binary Granular Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1097–1104. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-5-1097>
- Wang, C., Li, S. yang, He, X. jia, Chen, Q., Zhang, H., & Liu, X. yu. (2021). Improved Prediction of Water Retention Characteristic Based on Soil Gradation and Clay Fraction. *Geoderma*, 404(October 2020), 115293. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293>
- Wang, H.L., Zhou, W.-H., Yin, Z.-Y., & Jie, X.-X. (2019). Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002880](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002880)
- Wang, T., Liu, S., Feng, Y., & Yu, J. (2018). Compaction Characteristics and Minimum Void Ratio Prediction Model for Gap-Graded Soil-Rock Mixture. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/APP8122584>
- Yuan, G., Zhang, J., Ren, Z., & Song, Z. (2022). Research on Mechanical Performance and Micro-Structural Characteristics for Large Graded Aggregates. *Construction and Building Materials*, 341 (May), 127860 . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127860>
- Zhou, W. H., Jing, X. Y., Yin, Z. Y., & Geng, X. (2019). Effects of Particle Sphericity and Initial Fabric on The Shearing Behavior of Soil–Rough Structural Interface. *Acta Geotechnica*, 14(6), 1699–1716. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00781-2>