

Pengaruh Stabilisasi Geopolimer Berbahan Dasar POFA Terhadap Perilaku Kepadatan Tanah Gambut

The Effect of POFA-Based Geopolymer Stabilization on the Index Density Behavior of Peat Soil

Paundra Okta Bagaskara¹, Dila Oktarise Dwina², dan Nurza Purwa Abiyoga³

^{1,2,3}Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

Email: ¹paundoraobs@gmail.com, ²diladwina@unja.ac.id, ³abiyoga@unja.ac.id

Article history: Received 26-02-2025, Accepted 08-08-2025, Published 31-08-2025

Abstrak

Tanah gambut merupakan jenis tanah yang memiliki kandungan organik, kohesi rendah dan kadar air yang tinggi sehingga daya dukung tanah gambut menjadi rendah. Stabilisasi menggunakan campuran geopolimer berbahan dasar POFA (*Palm Oil Feal Ash*) menjadi salah satu metode yang dapat dilakukan. Geopolimer ini memanfaatkan kandungan silika dan alumina POFA yang direaksikan dengan aktivator alkali (NaOH : Na₂SiO₃ dengan rasio 2:1) untuk membentuk gel aluminosilikat sebagai pengikat yang dapat mempengaruhi struktur dan kekuatan tanah gambut. Variasi kadar geopolimer-POFA yang digunakan adalah 10% hingga 25% dengan waktu pemeraman selama 7 dan 14 hari. Sedangkan rasio natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃) yang digunakan adalah 2:1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan campuran geopolimer-POFA mempengaruhi perilaku kepadatan tanah gambut. Berdasarkan hasil pemadatan, nilai kadar air optimum (OMC) menunjukkan penurunan dari 78,03% menjadi 37,26%. Sedangkan berat kering maksimum (MDD) menunjukkan peningkatan dari 5,300 kN/m³ menjadi 7,411 kN/m³. Dengan demikian, penggunaan campuran geopolimer-POFA sebagai bahan stabilisasi tanah gambut terbukti mempengaruhi struktur dan kekuatan tanah gambut.

Kata kunci: Geopolimer; Palm Oil Fuel Ash; Pemadatan; Tanah Gambut

Abstract:

Peat soil is a type of soil that has organic content, low cohesion, and highwater content, resulting in low soil bearing capacity. Stabilization using a geopolymer mixture based on POFA (*Palm Oil Feal Ash*) is one of the methods that can be used. This geopolymer utilizes the silica and alumina content of POFA, which is reacted with an alkali activator (NaOH: Na₂SiO₃ with a ratio of 2:1) to form an aluminosilicate gel as a binder that can affect the structure and strength of peat soil. The geopolymer-POFA content used varies from 10% to 25% with a curing time of 7 and 14 days. Meanwhile, the ratio of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃) used was 2:1. The results showed that the addition of the geopolymer-POFA mixture affected the density behavior of peat soil. Based on the compaction results, the optimum moisture content (OMC) value showed a decrease from 78.03% to 37.26%. Meanwhile, the maximum dry weight (MDD) showed an increase from 5.300 kN/m³ to 7.411 kN/m³. Thus, the use of geopolymer-POFA mixture as a peat soil stabilizing material was proven to affect the structure and strength of peat soil.

Keywords: Compaction; Geopolymer; Palm Oil Fuel Ash; Peat Soil

1. Pendahuluan

Tanah gambut mengandung bahan organik yang tinggi, mudah mampat, memiliki kuatan geser rendah, serta memiliki sifat asam yang dapat merusak bangunan di atasnya [11]. Tingginya kadar organik pada tanah gambut mengakibatkan ketidakstabilan pada tanah karena kompresibilitasnya yang tinggi dan nilai kuat gesernya yang rendah. Hal tersebut yang membuat tanah gambut sulit untuk dilakukan pembangunan di

atasnya tanpa adanya perbaikan terlebih dahulu. Kendati demikian, permasalahan pada tanah gambut dapat diatasi dengan dilakukannya stabilisasi tanah.

Das B.M. (2010), menyatakan bahwa stabilisasi tanah secara mekanis adalah stabilisasi tanah yang berfokus pada peningkatan kepadatan dan kekuatan tanah melalui proses pemadatan, sedangkan stabilisasi tanah secara kimiawi adalah stabilisasi tanah dengan menambah suatu campuran kimia tertentu seperti *bottom ash*, *fly ash*, kapur, semen dan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA). Salah satu metode stabilisasi tanah secara kimiawi adalah dengan menggunakan geopolimer[7].

Menurut Al-Rkaby et al. (2022), Geopolimer merupakan bahan pengikat pengganti semen yang dihasilkan dari produk samping industri yang mengandung limbah amorf (Si dan Al) dalam jumlah besar, seperti *fly ash* (FA) dan metakaolin (MK) dengan tambahan aktivator alkali (misalnya kalium/natrium silikat dan kalium/natrium hidroksida). Reaksi yang terjadi disebut sebagai polimerisasi yang mempunyai empat langkah cepat yaitu : (i) pelarutan ion, (ii) difusi ion, (iii) pengembangan gel melalui polimerisasi senyawa Si dan Al dengan aktivator, dan (iv) pengawetan gel. Menurut Romadhon et al (2022), alumina dan silikat saja tidak dapat digunakan sebagai bahan pengikat, perlu adanya penambahan aktivator yang bersifat basa seperti NaOH, Na_2SiO_3 dan air. Adanya penambahan aktivator mengakibatkan bahan silika pozzolan akan bereaksi secara kimiawi untuk membentuk ikatan polimer[3][8].

Gel yang tercipta dari hasil reaksi polimerisasi antara senyawa silikat dan aluminat dengan aktivator yang nantinya berperan sebagai pengikat partikel-partikel tanah dan mengisi pori-pori tanah. Oleh karena itu, tanah gambut yang sebelumnya memiliki daya dukung rendah dan porositas tinggi akan mengalami peningkatan daya dukung dan penurunan porositas.

Adapun kebaharuan dari penelitian ini adalah tanah yang digunakan diambil dari Desa Dendang Kabupaten Tanjung Jabung Timur Provinsi Jambi. Penelitian ini dilaksanakan dengan variasi persen penambahan pada campuran geopolimer-POFA yaitu sebesar 10%, 15%, 20% dan 25% dengan waktu pemeraman selama 7 dan 14 hari. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi inovatif untuk stabilisasi lahan gambut menggunakan bahan lokal yang ramah lingkungan. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung penggunaan limbah industri kelapa sawit sebagai bahan konstruksi alternatif, yang menawarkan manfaat ekonomi, lingkungan, dan teknis terkhusus di daerah Jambi.

2. Metode Penelitian

a) Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan eksperimentasi dengan melakukan pengujian terhadap sampel untuk mengetahui pengaruh dari stabilisasi campuran geopolimer-POFA terhadap perilaku kepadatan tanah gambut dengan variasi persen penambahan campuran geopolimer-POFA adalah 10%, 15%, 20% dan 25% dengan waktu pemeraman selama 7 dan 14 hari. Berdasarkan pengujian terdahulu mengenai stabilisasi tanah gambut dengan campuran geopolimer-POFA penambahan campuran geopolimer-POFA di bawah 10% mendapatkan hasil yang kurang efektif sedangkan penambahan lebih dari 25% dapat menimbulkan permasalahan pada saat pengujian. Sedangkan pemeraman selama 7 dan 14 hari dikarenakan waktu pemeraman mempengaruhi proses stabilisasi tanah gambut dengan campuran. Konsentrasi aktivator alkali yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya dimana konsentrasi 12 M menunjukkan kondisi yang cukup optimum.

b) Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat dilakukannya penelitian adalah di UPTD Balai Laboratorium Bahan dan Konstruksi yang berlokasi di Jalan R.B. Siagian No.1, Pasir Putih, Kecamatan Jambi Selatan, Kota Jambi, Provinsi Jambi. Waktu penelitian dilakukan selama 2-3 minggu. Penelitian ini dilakukan dalam kondisi laboratorium terkendali.

c) Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan melawati beberapa tahapan, diantaranya adalah identifikasi masalah, studi literatur, eksperimen (pengujian), analisis dan pengolahan data.

d) Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan merupakan data primer yang didapat dari pengujian diantaranya adalah data tanah gambut asli dan data komposisi kimia POFA yang didapat dengan mengikuti prosedur pada SNI yang berlaku. Data tanah gambut asli dapat dilihat pada **Tabel 1** dan data komposisi kimia POFA pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Data Tanah Gambut

Pengujian	Hasil	Standar Pengujian
Kadar air (%)	298,93	SNI-1965-2019
Berat jenis, Gs	1,378	SNI-1964-2008
Pemadatan standar:		
a. Berat kering maksimum (MDD)	5,299 kN/m ³	SNI-1743-2008
b. Kadar air optimum (OMC)	78,03%	
Kadar abu tanah (%)	11,46	SNI-13-6793-2002
Kadar organik tanah (%)	88,54	SNI-13-6793-2002
Nilai pH	5,25	

Tabel 2. Data Uji XRF, Komposisi Kimia pada *Palm Oil Fuel Ash* (POFA)

Senyawa	Konsentrasi	Senyawa	Konsentrasi
Mg	0,36	V	0,01
Al	2,13	Cr	0,02
Si	48,37	Mn	0,46
P	4,99	Fe	7,01
S	0,83	Ni	0,02
Cl	1,05	Cu	0,28
K	13,19	Zn	0,14
Ca	20,32	Rb	0,16
Sc	0,01	Sr	0,12
Ti	0,52	Zr	0,03

Berdasarkan hasil pengujian pemadatan pada tanah gambut asli didapatkan data berat kering maksimum (MDD) sebesar 5,299 kN/m³ dan kadar air optimum (OMC) sebesar 78,03%. Konsentrasi NaOH yang digunakan adalah 12 Mol dan Na₂SiO₃ adalah 60%. Kemudian didapat perhitungan *mix design* yang dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. *Mix Design Sampel*

No. Spesimen	Curing	Berat Total (%)	Tanah (%)	POFA (%)	Berat Air	
					NaOH	Na ₂ SiO ₃
10%	0 hari	100	90	10	2	1
	7 & 14 hari					
15%	0 hari	100	85	15		
	7 & 14 hari					
20%	0 hari	100	80	20		
	7 & 14 hari					
25%	0 hari	100	75	25		
	7 & 14 hari					

e) Teknik Analisis Data

Data tanah gambut awal yang didapat akan dibandingkan dengan data tanah gambut yang telah distabilisasi menggunakan campuran geopolimer-POFA dengan variasi persentase penambahan adalah 10%, 15%, 20% dan 25%. Kemudian dilakukan analisa dan pembahasan dari hasil yang didapatkan sehingga bisa didapatkan kesimpulan dan saran yang berhubungan dengan tujuan dari penelitian ini.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Berdasarkan **Tabel 1**, diketahui bahwa tanah gambut yang digunakan memiliki kadar organik yang tinggi sebesar 88,54% sedangkan kadar abu hanya 11,46%. Tingginya kadar organik pada gambut mempengaruhi sifat tanah gambut seperti memiliki pH asam, porositas tinggi, berat isi rendah dan kadar air yang tinggi. Penambahan campuran geopolimer-POFA diharapkan mampu memperbaiki struktur dan meningkatkan kekuatan tanah gambut agar lebih layak untuk dilakukan pekerjaan konstruksi di atasnya.

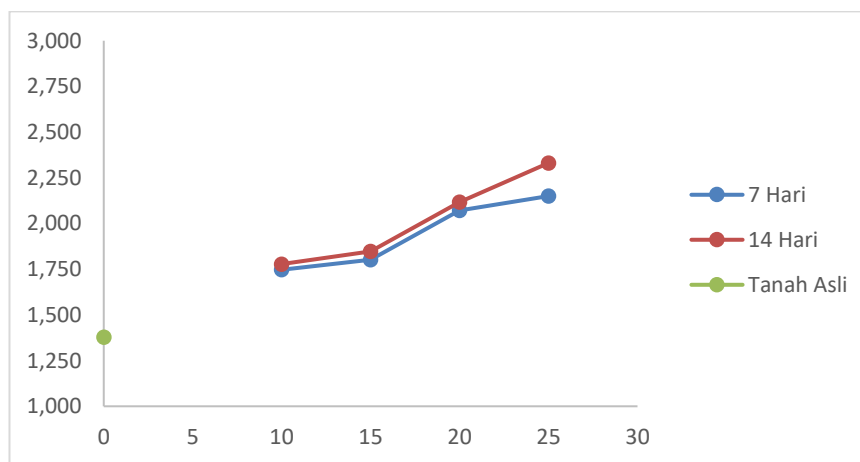
Hasil Uji Berat Jenis

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis yang telah dilakukan terhadap tanah gambut, nilai berat jenis setelah dilakukan stabilisasi dengan campuran geopolimer-POFA menunjukkan peningkatan yang dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Berat Jenis Pada Tanah Gambut Sebelum dan Setelah Distabilisasi

No	Waktu Curing	Persen Penambahan Geopolimer-POFA				
		Tanah Asli	10%	15%	20%	25%
1.	7 Hari	1,378	1,747	1,801	2,071	2,150
2.	14 Hari		1,778	1,848	2,117	2,331

Berdasarkan **Tabel 4**, kemudian data tersebut dijadikan ke dalam bentuk grafik hubungan antara berat jenis dan variasi persentase penambahan geopolimer-POFA dengan waktu pemeraman selama 7 dan 14 hari yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Grafik Hubungan Berat Jenis dan Variasi Persen Penambahan Geopolimer-POFA

Meningkatnya berat jenis pada tanah gambut yang telah distabilisasi dengan campuran geopolimer-POFA dapat terjadi karena peran dari produk hasil reaksi polimerisasi antara senyawa silika dan alumina dan aktivator yang berupa gel aluminosilikat. Gel tersebut berperan sebagai pengikat dan mengisi pori-pori pada tanah gambut sehingga menurunkan porositas dan meningkatkan daya dukung tanah gambut yang digunakan pada pengujian. Salah satu dampak dari menurunnya porositas tanah gambut adalah meningkatnya nilai berat jenis pada tanah gambut. Meningkatnya berat jenis pada tanah gambut akan mempengaruhi perilaku kepadatan tanah gambut tersebut.

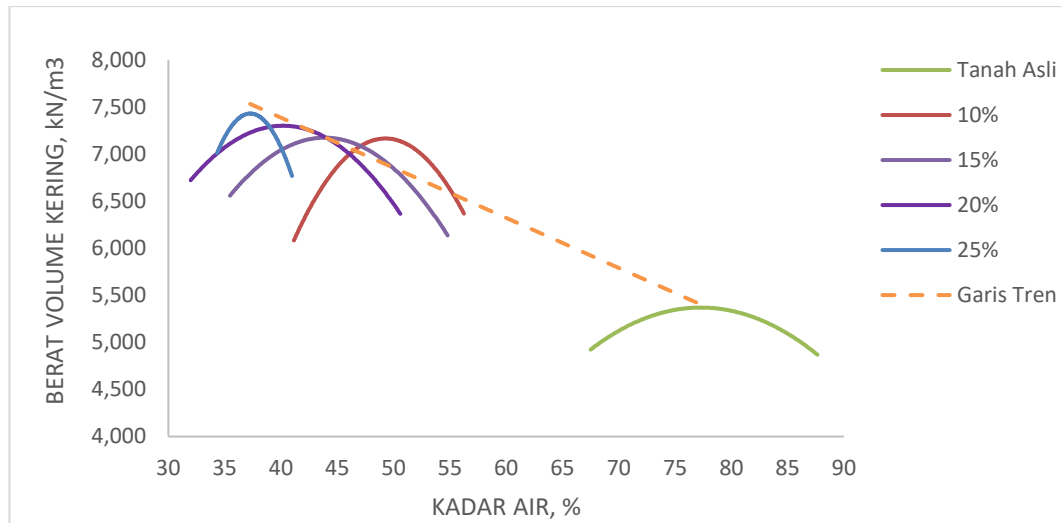
Hasil Uji Pemadatan

Hasil pengujian pemadatan pada tanah gambut sebelum dan setelah dilakukan stabilisasi dengan campuran geopolimer-POFA dapat dilihat pada **Tabel 5**.

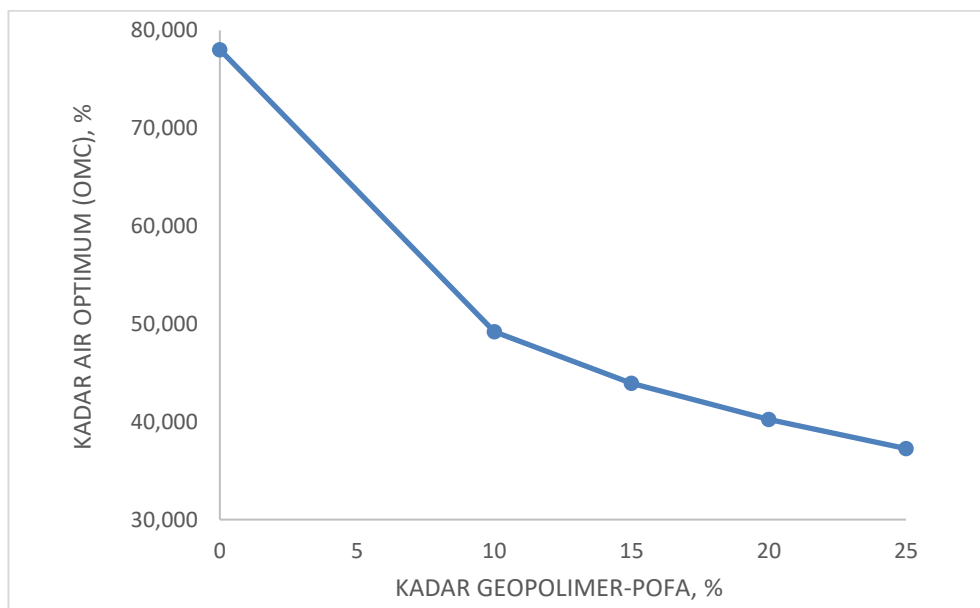
Tabel 5. Data Hasil Pengujian Pemadatan Pada Tanah Gambut Sebelum dan Setelah Distabilisasi

	0%	10%	15%	20%	25%
OMC (%)	78,035	49,213	43,931	40,238	37,261
MDD (kN/m ³)	5,300	7,114	7,192	7,321	7,411

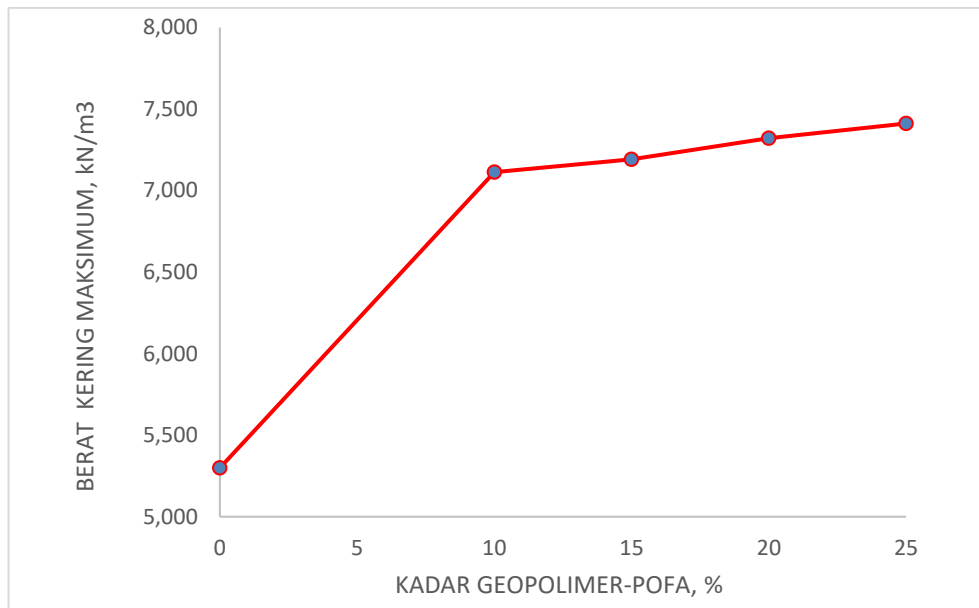
Berdasarkan **Tabel 5**, kemudian data tersebut dijadikan ke dalam bentuk grafik hubungan antara berat volumer kering dan kadar air seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Hubungan Kadar Air dan Berat Volume Kering Antara Tanah Gambut Asli dan Tanah Gambut yang Distabilisasi



Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Geopolimer-POFA Terhadap Kadar Air Optimum (OMC) Tanah Gambut Terstabilisasi



Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Geopolimer-POFA Terhadap Berat Kering Maksimum (MDD) Tanah Gambut Terstabilisasi

Gambar 2 menunjukkan adanya perubahan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat volume kering maksimum (MDD) pada tanah gambut sebelum dan setelah distabilisasi. Terjadi peningkatan nilai berat volume kering maksimum (MDD) pada tiap-tiap variasi penambahan campuran geopolimer-POFA, peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan 25%. Sedangkan kadar air optimum (OMC) mengalami penurunan pada tiap-tiap variasi penambahan geopolimer-POFA. Hubungan antara kadar geopolimer-POFA terhadap nilai OMC dan MDD dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.

Menurut teori Terzaghi, kadar air optimum adalah kadar air di mana tanah mencapai berat volume kering maksimum saat proses pemadatan. Ketika kadar air di bawah kadar air optimum, tanah terlalu kering sehingga partikel sulit bergerak dan mengisi ruang pori secara rapat. Sedangkan pada kadar air di atas kadar air optimum, air akan mengisi pori-pori tanah sehingga berat volume kering menurun porositas efektif yang tersedia untuk udara berkurang karena air menggantikan sebagian volume padatan tanah.

Penambahan campuran geopolimer-POFA meningkatkan kerapatan kering tanah gambut dengan cara mengisi pori-pori dan mengikat partikel tanah dengan produk hasil reaksi polimerisasi yang berupa gel, sehingga nilai berat kering maksimum (MDD) meningkat. Sementara itu, karena tanah menjadi lebih padat dan lebih sedikit ruang pori yang tersedia untuk air, kebutuhan air untuk mencapai kepadatan maksimum berkurang, sehingga nilai kadar air optimumnya menurun.

Peningkatan berat kering maksimum (MDD) menandakan bahwa tanah bisa dipadatkan dengan kepadatan lebih tinggi, artinya partikel-partikel tanah tersusun lebih rapat. Hal ini mengurangi porositas tanah dan meningkatkan kekuatan mekanik serta daya dukung tanah. Sedangkan penurunan kadar air optimum (OMC) menunjukkan bahwa tanah mencapai kepadatan maksimum pada kadar air yang lebih rendah. Ini berarti tanah membutuhkan air lebih sedikit untuk mencapai kondisi pemadatan terbaik, sehingga proses pemadatan menjadi lebih efisien. Hasil dari pengujian pemadatan yang dilakukan terhadap tanah yang distabilisasikan dengan campuran geopolimer-POFA sejalan dengan teori Terzaghi dimana campuran geopolimer-POFA yang digunakan berperan menurunkan kadar air optimum tanah sehingga berat kering maksimum tanah meningkat.

Hubungan Antar Parameter

Stabilisasi tanah gambut dengan campuran geopolimer-POFA dimulai dari produk polimerisasi antara ioin Si dan Ai yang membentuk jaringan geopolimer berupa polimer aluminosilikat yang kemudian membentuk matriks padat yang mengikat partikel-partikel menjadi material keras. Hasil reaksi dari polimerisasi yang terjadi berupa gel, gel tersebut yang akan mengikat dan mengisi pori-

pori pada tanah gambut ketika tanah gambut dicampur dengan geopolimer-POFA. Akibatnya, ruang kosong dalam tanah berkurang sehingga massa padatan per volume meningkat, sehingga berat jenis tanah menjadi lebih tinggi. Meningkatnya berat jenis tanah menandakan penambahan geopolimer-POFA mempengaruhi nilai kadar air optimum (OMC) dan berat kering maksimum tanah (MDD), dimana kadar air optimum (OMC) mengalami penurunan sedangkan berat kering maksimum (MDD) meningkat.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh stabilisasi geopolimer berbahan dasar POFA terhadap perilaku kepadatan tanah gambut, dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai berat jenis pada tanah gambut yang distabilisasi mengalami pola peningkatan dari 1,378 menjadi 2,331.
2. Penambahan campuran geopolimer-POFA mempengaruhi perilaku kepadatan tanah dimana nilai kadar air optimum (OMC) mengalami penurunan sedangkan berat kering maksimum (MDD) mengalami peningkatan. Nilai kadar air optimum (OMC) mengalami penurunan dari 78,03% menjadi 37,261%.
3. Penambahan variasi persentase geopolimer-POFA dan waktu pemeraman mempengaruhi efektifitas pengaruh geopolimer-POFA terhadap tanah gambut. Sehingga diperlukan variasi yang berbeda untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian selanjutnya.
4. Secara umum dapat disimpulkan bahwa campuran geopolimer-POFA dapat memperbaiki dan meningkatkan daya dukung tanah gambut sehingga berpotensi digunakan pada perbaikan *subgrade* jalan di daerah gambut.
5. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada penelitian ini, disarankan untuk melakukan pengujian parameter lainnya untuk penelitian selanjutnya guna mengetahui parameter lainnya akibat dari pengaruh campuran geopolimer-POFA terhadap tanah gambut.

Daftar Pustaka

- [1] A. E. Amaludin, H. Asrah, and H. M. Mohamad, "A Review of Advances in Peat Soil Stabilisation Technology: Exploring the Potential of Palm Oil Fuel Ash Geopolymer as a Soil Stabiliser Material," *Civ. Eng. J.*, vol. 9, no. 8, pp. 2085–2104, 2023, doi: 10.28991/CEJ-2023-09-08-017.
- [2]. A. E. Amaludin, H. Asrah, H. M. Mohamad, H. Z. Bin Amaludin, and N. A. Bin Amaludin, "Physicochemical and Microstructural Characterization of Klias Peat, Lumadan POFA, and GGBFS for Geopolymer Based Soil Stabilization," *HighTech Innov. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 327–348, 2023, doi: 10.28991/HIJ-2023-04-02-07.
- [3]. A. H. J. Al-Rkaby, "Evaluating shear strength of sand-GGBFS based geopolymer composite material," *Acta Polytechnica*, vol. 59, no. 4, pp. 305–311, 2022, doi: 10.14311/AP.2019.59.0305.
- [4]. A. N. Zainuddin, M. Mukri, D. C. Lat, R. Rosli, and N. H. A. Rani, "Influence Of Different Percentage Boiler Ash-Based Geopolymer In Laterite Soil," *IJUM Eng. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 67–82, 2021, doi: 10.31436/iiumej.v22i2.1589.
- [5]. D. O. Dwina, N. Nazarudin, D. Kumalasari, and E. Fitriani, "Stabilisasi Tanah Gambut Dengan Penambahan Kapur dan Fly Ash Sisa Pembakaran Cangkang Sawit Sebagai Subgrade Jalan," *Fondasi J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 1, p. 24, 2021, doi: 10.36055/fondasi.v10i1.10275.
- [6]. Das, B.M.(1995). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), *Penerbit Erlangga, Jakarta*.
- [7]. Das, M. Braja. (1994). Mekanika Tanah II (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) jilid 1 dan 2, Erlangga, Jakarta
- [8]. E. S. Romadhon, A. Antonius, dan S. Sumirin, "Design of low alkali activator geopolymer concrete mixtures," *ASTONJADRO*, vol. 11, no. 3, pp. 627–638, 2022, doi: 10.32832/astonjadro.v11i3.7484.
- [9]. G. Wibisono, Erwin, A. Kamaldi, and M. Olivia, "Peat soil mass stabilization using geopolymeric hybrid material in early age," *MATEC Web Conf.*, vol. 276, p. 05003, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927605003.
- [10]. Hardiyatmo, C.H. 2010. Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

- [11]. Hardiyatmo, H.C. 2002. Mekanika Tanah I, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- [12]. Haris, "Experimental Investigation on Geomechanical Properties of Tropical Organic Soils and Peat," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 184–188, Jan. 2009, doi: 10.3844/ajeassp.2009.184.188.
- [13]. I. A. Khasib and N. N. Nik Daud, "Physical and mechanical study of palm oil fuel ash (Pofa) based geopolymer as a stabilizer for soft soil," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 28, no. Special Issue 2, pp. 149–160, 2020, doi: 10.47836/pjst.28.S2.12.
- [14]. B. Mohamed Jais, N. Abdullah, M. A. Md Ali, and M. A. Johar, "Peat modification integrating Geopolymer and fly ash," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 527, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/527/1/012021.
- [15]. J. Huang, R. B. Kogbara, N. Hariharan, E. A. Masad, and D. N. Little, "A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization," *Constr. Build. Mater.*, vol. 305, no. September, p. 124685, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124685.
- [16]. J. R. Dungca, K. D. Ang, A. M. L. Isaac, J. J. R. Joven, and M. B. T. Sollano, "Use of dry mixing method in fly ash based geopolymer as a stabilizer for dredged soil," *Int. J. GEOMATE*, vol. 16, no. 57, pp. 9–14, 2019, doi: 10.21660/2019.57.4523.
- [17]. K. N. Abdulhaleem, H. M. Hamada, A. Majdi, and S. T. Yousif, "Influence of palm oil fuel ash as agricultural waste on the environment and strength of geopolymer concrete," *Res. Eng. Struct. Mater.*, vol. x, no. xxxx, pp. 1–16, 2024, doi: 10.17515/resm2024.306ma0602rv.
- [18]. M. A. Faris *et al.*, "Assessment of alkali activated geopolymer binders as an alternative of portland cement," *Mater. Plast.*, vol. 54, no. 1, pp. 145–154, 2017, doi: 10.37358/mp.17.1.4806.
- [19]. N. A. Odeh and A. H. J. Al-Rkaby, "Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. February, p. e00988, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00988.
- [20]. S. Ameen, A. Abdulkareem, and N. Mahmood, "Compressibility Characteristics of an Organic Soil Treated with Fly Ash and Fly Ash-Based Geopolymer," *Iraqi J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 23–29, 2022, doi: 10.37650/ijce.2022.160203.
- [21]. V. Nilmania and M. Mawardi, "Pengaruh Rasio Na₂SiO₃/NaOH sebagai Alkali Aktivator Terhadap Hilang Pijar dan Kehalusan Butiran Semen (Blaine Analysis) Geopolimer Berbasis Tanah Napa," *J. Period. Jur. Kim. UNP*, vol. 11, no. 1, p. 18, 2022, doi: 10.24036/p.v11i1.113373.
- [22]. Y. G. Adewuyi, "Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15532–15542, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00662.