

Pengaruh Penambahan Limbah Keramik pada Tanah Laterit Tombang Langda yang Distabilisasi Zeolit Alam terhadap Kuat Tekan Bebas dan Modulus Elastisitas

Mika Tappi¹, Godelifa Tulak Lebang²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

corresponding author : mikatappi@gmail.com

ABSTRAK

Kata Kunci:

Tanah Laterit
Zeolit Alam
Limbah Keramik
Kuat Tekan Bebas
Modulus Elastisitas

Tanah laterit di Toraja Utara banyak digunakan sebagai tanah dasar, tetapi kekuatannya dalam kondisi terganggu relatif rendah. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh penambahan limbah keramik pada tanah laterit Tombang Langda, Kecamatan Sopai, yang distabilisasi zeolit alam Sangkaropi terhadap sifat fisik, kepadatan, kuat tekan bebas (q_u), dan modulus elastisitas sekan (E_{50}). Kadar zeolit alam ditetapkan 9% dan limbah keramik divariasikan 0%, 3%, 6%, dan 9% dari berat kering tanah, dengan masa pemeraman 1 hari dan 3 hari. Pengujian meliputi berat jenis, batas-batas Atterberg, pemadatan standar, dan uji tekan bebas. Tanah asli memiliki batas cair 49,29%, indeks plastisitas 16,45%, kadar air optimum 34,0%, dan berat isi kering maksimum 1,14 g/cm³. Penambahan zeolit dan limbah keramik meningkatkan berat isi kering maksimum hingga 1,32 g/cm³ dan menurunkan kadar air optimum hingga 32,0%. Nilai q_u meningkat dari 0,295 kg/cm² pada tanah asli menjadi 10,812 kg/cm² (pemeraman 1 hari) dan 11,107 kg/cm² (pemeraman 3 hari) pada campuran 9% zeolit dan 9% limbah keramik. Peningkatan q_u terhadap kadar limbah keramik bersifat hampir linear ($R^2 = 0,99$ dan $0,99$). Nilai E_{50} meningkat dari 48,27 kg/cm² menjadi 55,23 kg/cm² dan 57,80 kg/cm², atau naik 14,4% dan 19,7%. Kombinasi zeolit alam dan limbah keramik berpotensi sebagai bahan stabilisasi tanah laterit, namun peningkatan q_u yang jauh lebih besar daripada E_{50} perlu dikonfirmasi dengan jumlah benda uji dan masa pemeraman yang lebih panjang.

Keywords:

Lateritic Soil
Natural Zeolite
Ceramic Waste
Unconfined Compressive Strength
Elastic Modulus

ABSTRACT

Lateritic soil in North Toraja is widely used as subgrade, but its strength in a disturbed state is relatively low. This study aims to determine the effect of adding ceramic waste to Tombang Langda lateritic soil, Sopai District, stabilized with Sangkaropi natural zeolite on its physical properties, compaction, unconfined compressive strength (q_u), and secant elastic modulus (E_{50}). The natural zeolite content was fixed at 9%, and ceramic waste was varied at 0%, 3%, 6%, and 9% of the dry soil weight, with curing periods of 1 and 3 days. Tests included specific gravity, Atterberg limits, standard compaction, and unconfined compression. The natural soil had a liquid limit of 49.29%, a plasticity index of 16.45%, an optimum moisture content of 34.0%, and a maximum dry density of 1.14 g/cm³. Adding zeolite and ceramic waste increased the maximum dry density to 1.32 g/cm³ and reduced the optimum moisture content to 32.0%. The q_u increased from 0.295 kg/cm² for the natural soil to 10.812 kg/cm² (1-day curing) and 11.107 kg/cm² (3-day curing) for the mixture with 9% zeolite and 9% ceramic waste. The increase in q_u with ceramic waste content was nearly linear ($R^2 = 0.99$ and 0.99). The E_{50} increased from 48.27 kg/cm² to 55.23 kg/cm² and 57.80 kg/cm², an increase of 14.4% and 19.7%. The combination of natural zeolite and ceramic waste has potential as a stabilizing agent for lateritic soil, but the much larger increase in q_u than in E_{50} should be confirmed with more specimens and longer curing periods.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



I. Pendahuluan

Tanah laterit terbentuk melalui pelapukan intensif di daerah tropis dan banyak dijumpai di Toraja Utara. Tanah ini sering digunakan sebagai tanah dasar jalan dan timbunan, tetapi sifat teknisnya sangat dipengaruhi oleh kadar air dan tingkat gangguan; dalam kondisi terganggu, kekuatannya dapat menurun cukup besar [1], [2]. Oleh karena itu, perbaikan tanah melalui stabilisasi kimiawi atau penambahan bahan pengisi sering diperlukan sebelum tanah laterit digunakan sebagai bagian dari konstruksi.

Zeolit alam merupakan mineral aluminosilikat berpori yang bersifat pozolanik, sehingga dapat bereaksi dan membentuk produk pengikat yang meningkatkan kekuatan tanah [3], [4]. Di sisi lain, limbah keramik dari kegiatan konstruksi merupakan material keras yang tidak terdegradasi, dan dalam bentuk serbuk telah digunakan untuk memperbaiki sifat tanah berbutir halus [5]. Kedua bahan tersedia secara lokal di Toraja Utara: zeolit alam terdapat di Sangkaropi, Kecamatan Sa'dan, sedangkan limbah keramik dihasilkan dari sisa pembangunan gedung.

Penggunaan zeolit alam untuk stabilisasi tanah laterit di Toraja telah dikaji sebelumnya, tetapi kombinasinya dengan limbah keramik belum banyak diteliti. Penelitian ini bertujuan: (1) mengetahui sifat fisik, kepadatan, kuat tekan bebas, dan modulus elastisitas tanah laterit Tombang Langda tanpa bahan tambah; (2) mengetahui pengaruh penambahan limbah keramik 0%, 3%, 6%, dan 9% pada tanah yang distabilisasi 9% zeolit alam terhadap sifat-sifat tersebut; dan (3) mengetahui pengaruh masa pemeraman 1 hari dan 3 hari terhadap kuat tekan bebas dan modulus elastisitas.

II. Metode Penelitian

A. Bahan Penelitian

Sampel tanah laterit diambil dari Tombang Langda, Kecamatan Sopai, Kabupaten Toraja Utara, sekitar 10 km dari Kota Rantepao, pada kedalaman ± 1 m. Tanah dijemur selama 2–4 hari dan diayak lolos saringan No. 4. Zeolit alam berasal dari Sangkaropi, Kecamatan Sa'dan, sedangkan limbah keramik berasal dari sisa pembangunan Kampus II Universitas Kristen Indonesia Toraja. Kedua bahan tambah dihaluskan hingga lolos saringan No. 100 (Gambar 1).



Gambar 1. Bahan Tambah yang Digunakan: (a) Zeolit Alam; (b) Limbah Keramik

B. Variasi Campuran dan Pengujian

Kadar zeolit alam ditetapkan sebesar 9% dari berat kering tanah, sedangkan limbah keramik divariasikan 0%, 3%, 6%, dan 9%. Benda uji campuran dipadatkan pada kadar air optimum dan diperam selama 1 hari dan 3 hari, dengan dua benda uji untuk setiap variasi dan masa pemeraman. Pengujian di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja meliputi analisis saringan, kadar air, berat jenis, batas-batas Atterberg [6], pemadatan standar [7], dan uji tekan bebas [8], [9].

C. Analisis Data

Pada uji tekan bebas, regangan aksial, luas penampang terkoreksi, dan tegangan aksial dihitung dengan:

$$\varepsilon = (\Delta L / L_0) \times 100\% \quad A_c = A_0 / (1 - \varepsilon/100) \quad \sigma = P / A_c \quad (1)$$

dengan ΔL adalah deformasi aksial, L_0 adalah tinggi awal benda uji, A_0 adalah luas penampang awal, dan P adalah beban aksial. Kuat tekan bebas (q_u) ditetapkan sebagai tegangan maksimum, atau tegangan pada regangan 20% apabila benda uji tidak runtuh [8]. Modulus elastisitas ditentukan dengan metode modulus sekan pada 50% kuat tekan bebas [1]:

$$E_{50} = \sigma_{50} / \varepsilon_{50} \quad (2)$$

dengan σ_{50} adalah tegangan pada 50% q_u dan ε_{50} adalah regangan pada tegangan tersebut. Pengaruh bahan tambah dinyatakan dengan rasio terhadap tanah asli, dan hubungan q_u dengan kadar limbah keramik dianalisis dengan regresi linear:

$$R_q = q_{u,\text{campuran}} / q_{u,\text{asli}} \quad q_u = a \times \text{LK} + b \quad (3)$$

dengan LK adalah kadar limbah keramik (%). Satuan tegangan dalam artikel ini dinyatakan dalam kg/cm^2 sesuai satuan proving ring yang digunakan ($1 \text{ kg}/\text{cm}^2 \approx 98,07 \text{ kPa}$).

III. Hasil dan Pembahasan

A. Sifat Fisik Tanah Asli dan Campuran

Sifat fisik tanah asli dan campuran disajikan pada Tabel 1. Tanah asli memiliki kadar air lapangan 44,86%, berat jenis 2,644, batas cair 49,29%, batas plastis 32,84%, indeks plastisitas 16,45%, dan batas susut 18,05%. Dengan batas cair mendekati 50% dan posisi di bawah garis A pada bagan plastisitas, tanah ini tergolong lanau berplastisitas sedang hingga tinggi [10]. Hasil analisis saringan kering menunjukkan butiran tanah tertahan dominan pada saringan No. 10 hingga No. 40, yang mencerminkan butiran laterit yang teragregasi.

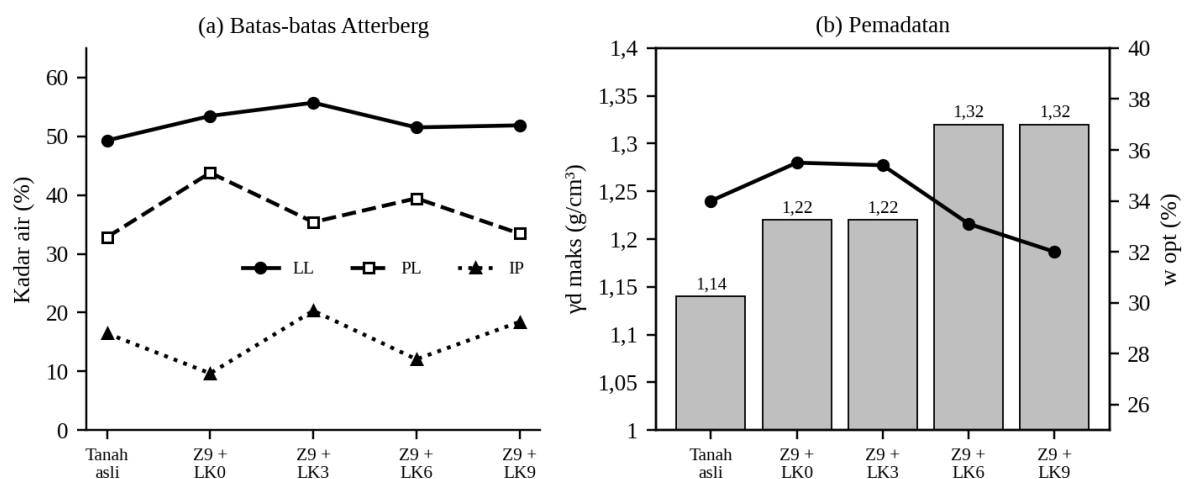
Tabel 1. Sifat Fisik dan Karakteristik Pemadatan Tanah Asli dan Campuran

Variasi Campuran	Gs	LL (%)	PL (%)	IP (%)	SL (%)	w opt (%)	γ_d maks (g/cm^3)
Tanah asli	2,644	49,29	32,84	16,45	18,05	34,0	1,14
Tanah + 9% Z + 0% LK	2,742	53,45	43,79	9,66	12,43	35,5	1,22
Tanah + 9% Z + 3% LK	2,577	55,70	35,39	20,31	8,09	35,4	1,22
Tanah + 9% Z + 6% LK	2,742	51,50	39,44	12,06	14,26	33,1	1,32
Tanah + 9% Z + 9% LK	2,486	51,85	33,44	18,41	17,01	32,0	1,32

Penambahan zeolit dan limbah keramik tidak menghasilkan pola yang konsisten pada batas-batas Atterberg (Gambar 2a). Batas cair campuran berada pada rentang 51,50–55,70% dan indeks plastisitas berfluktuasi antara 9,66% dan 20,31%. Hal ini menunjukkan bahwa dalam masa pengujian yang singkat, bahan tambah lebih banyak berperan sebagai pengisi daripada mengubah sifat plastisitas tanah secara kimiawi.

B. Karakteristik Pemadatan

Hasil pemadatan disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 2b. Berat isi kering maksimum meningkat dari $1,14 \text{ g}/\text{cm}^3$ pada tanah asli menjadi $1,22 \text{ g}/\text{cm}^3$ pada campuran 9% zeolit dengan 0% dan 3% limbah keramik, dan $1,32 \text{ g}/\text{cm}^3$ pada campuran dengan 6% dan 9% limbah keramik. Kadar air optimum meningkat sedikit menjadi 35,5% pada campuran tanpa limbah keramik, kemudian menurun hingga 32,0% pada campuran 9% limbah keramik. Peningkatan kepadatan ini disebabkan oleh butiran halus zeolit dan keramik yang mengisi rongga antarbutir tanah, sedangkan sifat keramik yang tidak menyerap air menurunkan kebutuhan air untuk mencapai kepadatan maksimum.



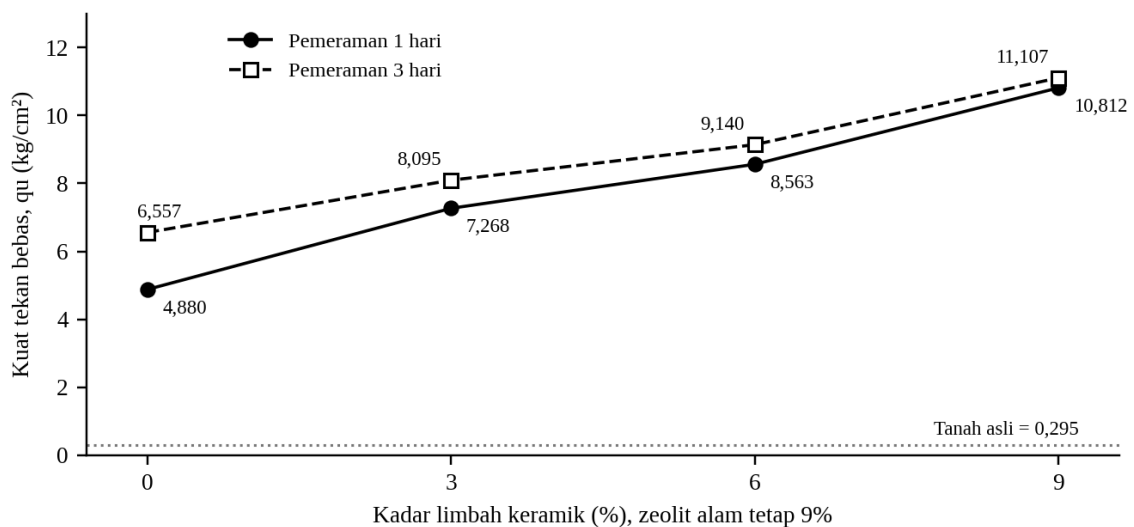
Gambar 2. Pengaruh Variasi Campuran terhadap (a) Batas-batas Atterberg dan (b) Karakteristik Pemadatan (Z9 = zeolit 9%; LK = limbah keramik)

C. Kuat Tekan Bebas

Hasil uji tekan bebas disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3; tanda * pada Tabel 2 menunjukkan nilai tanah asli tanpa pemeraman. Tanah asli memiliki q_u sebesar $0,295 \text{ kg/cm}^2$ ($\pm 28,9 \text{ kPa}$). Penambahan 9% zeolit tanpa limbah keramik meningkatkan q_u menjadi $4,880 \text{ kg/cm}^2$ setelah pemeraman 1 hari dan $6,557 \text{ kg/cm}^2$ setelah pemeraman 3 hari.

Tabel 2. Kuat Tekan Bebas dan Modulus Elastisitas Sekan pada Setiap Variasi Campuran

Variasi Campuran	q_u 1 hari (kg/cm^2)	q_u 3 hari (kg/cm^2)	Rasio q_u 3 hari	E50 1 hari (kg/cm^2)	E50 3 hari (kg/cm^2)	Kenaikan E50 3 hari (%)
Tanah asli	0,295*	—	1,0	48,27*	—	—
Tanah + 9% Z + 0% LK	4,880	6,557	22,2	49,18	49,23	2,0
Tanah + 9% Z + 3% LK	7,268	8,095	27,4	50,00	52,50	8,8
Tanah + 9% Z + 6% LK	8,563	9,140	31,0	54,11	54,40	12,7
Tanah + 9% Z + 9% LK	10,812	11,107	37,7	55,23	57,80	19,7



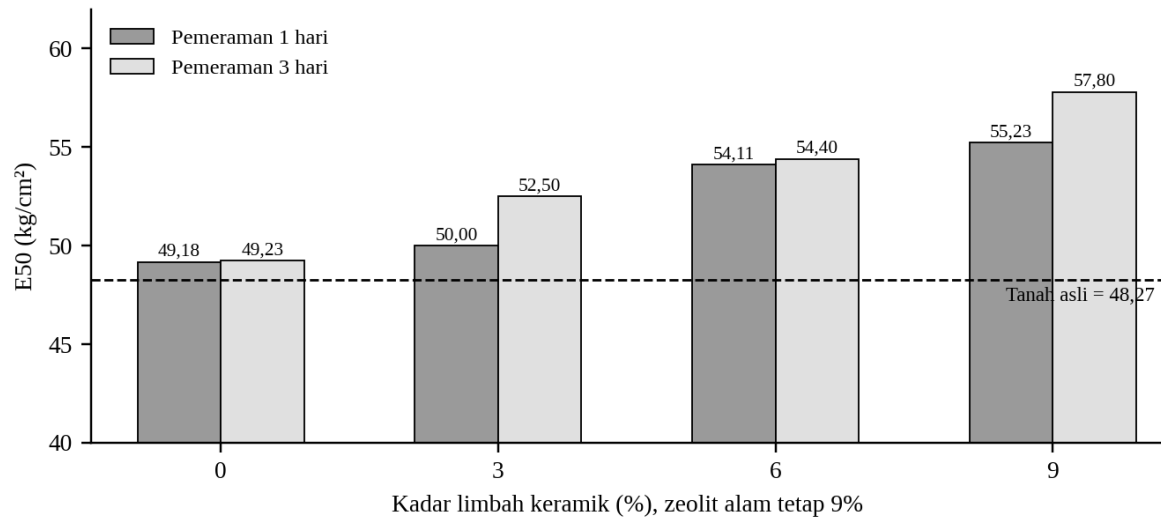
Gambar 3. Hubungan Kadar Limbah Keramik dengan Kuat Tekan Bebas pada Pemeraman 1 Hari dan 3 Hari

Nilai q_u terus meningkat seiring bertambahnya limbah keramik, dengan nilai tertinggi pada campuran 9% zeolit dan 9% limbah keramik, yaitu $10,812 \text{ kg/cm}^2$ pada pemeraman 1 hari dan $11,107 \text{ kg/cm}^2$ pada pemeraman 3 hari, atau 36,7 dan 37,7 kali q_u tanah asli. Hubungan q_u dengan kadar limbah keramik hampir linear dengan persamaan $q_u = 0,636 \text{ LK} + 5,017$ ($R^2 = 0,988$) untuk pemeraman 1 hari dan $q_u = 0,490 \text{ LK} + 6,521$ ($R^2 = 0,987$) untuk pemeraman 3 hari. Setiap penambahan 1% limbah keramik meningkatkan q_u sekitar $0,5\text{--}0,6 \text{ kg/cm}^2$.

Pengaruh pemeraman paling besar terjadi pada campuran tanpa limbah keramik, dengan peningkatan q_u sebesar 34,4% dari 1 hari ke 3 hari, dan semakin kecil pada kadar limbah keramik yang lebih tinggi (11,4%, 6,7%, dan 2,7%). Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan akibat waktu terutama berasal dari reaksi zeolit, sedangkan kontribusi limbah keramik lebih bersifat fisik, yaitu mengisi rongga dan meningkatkan kepadatan, sehingga tidak banyak dipengaruhi oleh lamanya pemeraman [4], [5].

D. Modulus Elastisitas

Nilai modulus elastisitas sekan (E50) disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 4. Tanah asli memiliki E50 sebesar $48,27 \text{ kg/cm}^2$ ($\pm 4,7 \text{ MPa}$). Nilai E50 meningkat seiring bertambahnya limbah keramik, dengan nilai tertinggi pada campuran 9% zeolit dan 9% limbah keramik, yaitu $55,23 \text{ kg/cm}^2$ (naik 14,4%) pada pemeraman 1 hari dan $57,80 \text{ kg/cm}^2$ (naik 19,7%) pada pemeraman 3 hari.



Gambar 4. Nilai Modulus Elastisitas Sekan (E50) pada Setiap Variasi Campuran dan Masa Pemeraman

Peningkatan E50 jauh lebih kecil daripada peningkatan q_u . Ketika q_u meningkat hingga sekitar 37 kali, E50 hanya meningkat kurang dari 20%. Dengan Persamaan (2), hal ini berarti regangan pada 50% q_u meningkat dari sekitar 0,3% pada tanah asli menjadi sekitar 5–10% pada tanah campuran, sehingga tanah campuran berperilaku lebih daktail dan mengalami deformasi yang lebih besar sebelum runtuh. Pola ini berbeda dari kecenderungan umum stabilisasi berbahan pozolan yang biasanya membuat tanah lebih kaku dan getas [3], [4], sehingga perlu dikonfirmasi dengan pengujian lanjutan.

E. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi 9% zeolit alam dan limbah keramik meningkatkan kepadatan, kuat tekan bebas, dan modulus elastisitas tanah laterit Tombang Langda, dengan kinerja terbaik pada kadar limbah keramik 9%. Karena peningkatan q_u masih bersifat linear hingga kadar 9%, kadar optimum limbah keramik belum tercapai dalam rentang variasi yang diuji. Pemanfaatan dua material lokal ini juga memberikan nilai tambah dari sisi lingkungan karena mengurangi limbah konstruksi.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Jumlah benda uji hanya dua untuk setiap variasi dan masa pemeraman sangat singkat (1 dan 3 hari), sehingga kontribusi reaksi pozolanik zeolit yang umumnya berlangsung dalam hitungan minggu belum teramati sepenuhnya. Besarnya lonjakan q_u dari tanah asli ke campuran juga dipengaruhi oleh perbedaan kepadatan benda uji. Selain itu, analisis saringan dilakukan secara kering sehingga kandungan butir halus kemungkinan tidak terukur dengan baik. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan lebih banyak benda uji, masa pemeraman 7, 14, dan 28 hari, kadar limbah keramik di atas 9%, analisis saringan basah dan hidrometer, serta pengujian CBR untuk menilai kelayakan sebagai tanah dasar.

IV. Kesimpulan

Tanah laterit Tombang Langda memiliki batas cair 49,29%, indeks plastisitas 16,45%, kadar air optimum 34,0%, berat isi kering maksimum 1,14 g/cm³, kuat tekan bebas 0,295 kg/cm², dan modulus elastisitas sekan 48,27 kg/cm². Penambahan 9% zeolit alam dan limbah keramik meningkatkan berat isi kering maksimum hingga 1,32 g/cm³ dan menurunkan kadar air optimum hingga 32,0%, sedangkan batas-batas Atterberg tidak menunjukkan pola yang konsisten.

Kuat tekan bebas meningkat hampir linear terhadap kadar limbah keramik dan mencapai nilai tertinggi pada campuran 9% zeolit dan 9% limbah keramik, yaitu 10,812 kg/cm² (pemeraman 1 hari) dan 11,107 kg/cm² (pemeraman 3 hari). Modulus elastisitas sekan meningkat hingga 55,23 kg/cm² dan 57,80 kg/cm², atau naik 14,4% dan 19,7% terhadap tanah asli. Pengaruh pemeraman paling besar pada campuran tanpa limbah keramik (34,4%) dan semakin kecil pada kadar limbah keramik yang lebih tinggi.

Kombinasi zeolit alam dan limbah keramik berpotensi digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah laterit. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan jumlah benda uji yang lebih banyak, masa pemeraman yang lebih panjang, kadar limbah keramik di atas 9%, serta pengujian CBR.

Daftar Pustaka

- [1] B. M. Das dan K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, ed. ke-9. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [2] M. D. Gidigas, *Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1976.
- [3] J. K. Mitchell dan K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, ed. ke-3. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] M. Mola-Abasi dan I. Shooshpasha, "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 746–752, 2016, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.01.008.
- [5] A. K. Sabat, "Stabilization of expansive soil using waste ceramic dust," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 17, pp. 3915–3926, 2012.
- [6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1967:2008 Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah dan SNI 1966:2008 Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1742:2008 Cara Uji Kepadatan Ringan untuk Tanah*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 3638:2012 Metode Uji Kuat Tekan-Bebas Tanah Kohesif*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2012.
- [9] *ASTM D2166/D2166M-16 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
- [10] *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.