



Tersedia Secara Online di

<http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmateks/index>

JURMATEKS

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i2.4989>

Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai *Temporary Landfill Cover* yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi

A. Rahmadi¹, A. M. Indriani^{2*}, G. Utomo³

^{1,2*,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Balikpapan, Balikpapan, Indonesia

Email : ¹197011423@uniba-bpn.ac.id, ^{2*}andi.marini@uniba-bpn.ac.id, ³gunaedy@uniba-bpn.ac.id.

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 28 – 08 – 2023
Artikel revisi : 05 – 09 – 2023
Artikel diterima : 29 – 12 – 2023

Keywords :

Bacillus Subtilis, MICP, Permeability, Sludge.

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

A. Rahmadi, A. M. Indriani, and G. Utomo, "Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai *Temporary Landfill Cover* yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi," *Jurmateks*, vol.6, no.2, pp. 154-168 2023, doi: 10.30737/jurmateks.v6i2.4998

ABSTRACT

*In the development of waste management, piles of rubbish can produce liquid waste called leachate. Leachate from landfills can affect human health and pollute the environment and aquatic biota because leachate contains various chemical compounds and many pathogenic bacteria. To minimize the impact of landfill waste on the surrounding environment, the waste is covered with material that can isolate it from the surrounding environment. This research aims to determine the optimal level of cementation solution addition to waste sludge as temporary landfill cover using the MICP method. The research results reveal that the sample permeability meets the criteria for a temporary cover landfill, where the permeability specification limits are between 10^{-4} to 10^{-5} cm/s. The research revealed that 0.25M cementation solution and *Bacillus Subtilis* bacteria had the lowest permeability. Soil without cementation solution has a permeability coefficient value of 5.04×10^{-4} cm/s, and decreases to 6.67×10^{-5} cm/s with a cementation solution concentration of 0.25M over a 28-day peram period. Variations in the 0.25M cementation solution showed its ability to reduce soil permeability by up to 86.7%. Permeability has decreased, which means the soil pores are getting smaller. Thus, this addition can reduce soil permeability and minimize the possibility of environmental damage by leachate.*

1. Pendahuluan

Seiring bertambahnya limbah sampah, manajemen pengelolaan sampah menjadi hal yang sangat perlu diperhatikan. Hal ini menekankan pentingnya keberadaan TPA (Tempat Pembuangan Akhir) sebagai fasilitas utama pengelolaan dan pembuangan akhir sampah. TPA cenderung memicu berbagai dampak negatif terhadap lingkungan. Di TPA Manggar Balikpapan, volume sampah pada tahun 2023 mengalami peningkatan signifikan, sampai 30

hingga 50 ton per hari, yang sebelumnya berkisar antara 380 sampai 420 ton. Saat ini, volume telah mencapai 400 hingga 450 ton. Akumulasi sampah ini dapat menghasilkan limbah cair yang dikenal sebagai air lindi. Air lindi terbentuk dari infiltrasi air hujan dan hasil dekomposisi sampah padat [1], [2]. Lindi dari TPA dapat berdampak serius pada kesehatan manusia dan dapat mencemari lingkungan serta biota perairan karena mengandung berbagai senyawa kimia organik dan anorganik serta sejumlah bakteri patogen. Komponen lainnya dari air lindi mencakup amonia, timbal dan mikroba parasit seperti kutu air yang mengakibatkan iritasi kulit [3], [4].

Untuk mengurangi dampak sampah TPA terhadap lingkungan sekitarnya, penggunaan penutup dengan bahan yang mampu mengisolasi sampah dari lingkungan sekitar menjadi solusi krusial [5]. Sistem penutup akhir harus dirancang secara teliti, dan mencakup lapisan pengendali erosi tanah, lapisan pelindung, lapisan drainase, lapisan kedap air, lapisan pembuangan, lapisan pondasi, dan elemen lainnya [5], [6]. Penggunaan *Temporary landfill cover* dapat digunakan untuk meminimalkan infiltrasi cairan ke dalam limbah guna menghindari terbentuknya air lindi [7]. Salah satu pendekatan untuk mengurangi emisi air lindi dari TPA sampah yaitu dengan memodifikasi lapisan penutup. Sistem *Sanitary Landfill* yang melibatkan pembuangan dan penimbunan sampah di lokasi tertentu dengan pemadatan menggunakan tanah juga menjadi solusi untuk mengurangi bau serta populasi lalat yang umumnya ada di area di TPA. Proses penutupan ini dapat mempercepat dekomposisi tanah.

Limbah lumpur dari IPAM Perumda Km. 8 Balikpapan merupakan produk samping dari proses pengolahan air minum yang berasal dari air permukaan. Lumpur tersebut terbentuk karena endapan partikel koloid yang dipercepat untuk mengendap dengan menggunakan bahan kimia aluminium [8], [9]. Sejumlah penelitian telah meneliti pemanfaatan sludge sebagai bahan untuk *temporary landfill cover*, dan hasilnya menunjukkan kualitas yang positif saat diperkuat dengan metode MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) [10], [5]. MICP merupakan teknik yang menggunakan mikroorganisme untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik tanah [11]–[13]. Metode MICP melalui presipitasi kalsit yang diinduksi oleh mikroba dianggap sebagai pendekatan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk stabilisasi tanah [14], [15].

Dalam metode pembuatan *temporary landfill cover* menggunakan material sludge instalasi pengolahan air minum yang diperkuat dengan MICP penting untuk mengetahui pengaruh larutan sementasi yang ditambahkan [16]. Beberapa penelitian *temporary landfill cover* menggunakan material sludge telah banyak dilakukan. Penelitian Sun, T 2023 yang mengkaji mengenai dampak lumpur kota yang memadat sebagai *temporary landfill cover*

menemukan bahwa permeabilitas lapisan penutup mempengaruhi distribusi air lindi dan ketinggian genangan air [5]. Penelitian Nor A., 2020 dengan fokus penambahan *red gypsum* pada limbah lumpur sebagai *temporary landfill cover* menemukan bahwa komposisi limbah lumpur dan gypsum merah tidak mempengaruhi konduktivitas hidrolis temporary landfill cover, yang berada pada kisaran 10^{-5} cm/s untuk semua campuran [17].

Namun, belum terdapat penelitian yang mengkaji mengenai kadar molaritas larutan sementasi pada limbah lumpur sebagai *temporary landfill cover* dengan metode MICP. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan tingkat penambahan larutan sementasi yang paling optimal pada limbah lumpur sebagai *temporary landfill cover* dengan metode MICP. Tingkat penambahan terbaik dilihat dari nilai koefisien permeabilitas tanah terkecil. Sehingga, permeabilitas tanah yang kecil dapat meminimalkan kemungkinan kerusakan lingkungan oleh air lindi.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan pembuatan sampel tanah di Laboratorium Universitas Balikpapan. Sampel penelitian dibuat untuk mengetahui dampak dari penambahan larutan sementasi terhadap permeabilitas limbah lumpur IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Kota Balikpapan. Variasi dilakukan pada konsentrasi larutan sementasi untuk melihat bagaimana hal tersebut mempengaruhi karakteristik temporary landfill cover yang dihasilkan. Analisis mencakup evaluasi permeabilitas limbah lumpur, sifat kimia, sifat fisik dan mekanik tanah.

2.1 Material

Material yang digunakan yaitu tanah lumpur IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Kota Balikpapan, bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai pencampur, dan Larutan Sementasi dengan variasi 0,25M, 0,5M, 0,75M sebanyak 2%. Proses stabilisasi aditif melibatkan pencampuran tanah lumpur IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Balikpapan dengan bakteri *Bacillus Subtilis* yang dikultur selama umur 3 hari, dengan prosentase sebanyak 6%. dan



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 1. Limbah Lumpur IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Balikpapan

Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai *Temporary Landfill Cover* yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi
<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i2.4998>

2.2 Kultur Bakteri

Berdasarkan Marini Indriani, 2023 [18] campuran yang digunakan untuk perkembangbiakkan bakteri *Bacillus Subtilis* antara lain 20 g Urea, 3 g *Nutrient Broth* (NB), 2,12 g NaHCO_3 , 4,14 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 10 g NH_4Cl . Semua bahan dimasukkan ke dalam gelas Erlenmeyer dan dilarutkan dengan menggunakan air (aquades) sebanyak 1000 ml. Larutan tersebut kemudian disterilkan ke dalam *autoclave* dengan suhu 121°C .



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 2. Bakteri *Bacillus Subtilis*

Proses pembuatan campuran antara bakteri *Bacillus Subtilis* dan media B4 dimulai dengan menyiapkan 500 ml air (aquades) dan mencampurnya dengan *Nutrient Broth* sebanyak 3 gram, serta 500 ml air (aquades) tanpa campuran dalam gelas *erlenmeyer* yang terpisah. Kedua gelas *erlenmeyer* tersebut dimasukkan ke dalam *autoclave* pada suhu 121°C dan tekanan 1 atm selama 15 menit. Dalam kondisi medium dingi, dilakukan proses inokulasi bakteri dengan mencampurkan isolat bakteri ke dalam medium B4 yang telah disiapkan. Semua proses dilakukan di dalam alat Laminar Air flow untuk memastikan kestabilan, terkontrol, dan sterilisasi lingkungan. Suspensi bakteri diambil sebanyak 2% dari total medium B4 untuk dimasukkan ke dalam tabung *Erlenmeyer*. Media tersebut kemudian diaduk dengan alat penggetar hingga bakteri tercampur merata dengan media. Setelah itu, kultur bakteri dibiarkan selama 3 hari sebelum diaplikasikan ke tanah yang akan di stabilisasi.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 3. Kultur Bakteri *Bacillus Subtilis*

2.3 Larutan Sementasi

Berdasarkan Rajiv T, 2021 [19], proses pembuatan larutan sementasi dibutuhkan campuran urea dengan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dengan komposisi dapat ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Campuran Larutan Sementasi

Molaritas	Urea (g)	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (g)
0,25	7,5	13,875
0,5	15	27,75
0,75	22,5	41,625



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 4. Pembuatan Larutan Sementasi

Proses pembuatan larutan sementasi yaitu mencampurkan air dengan Urea dan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sesuai konsentrasi yang tertera pada **Tabel 1**. Campuran tersebut diaduk hingga semua bahan larut sempurna dengan konsentrasi masing-masing 0,25M, 0,5M, dan 0,75M. Larutan yang terbentuk kemudian dituangkan ke dalam tabung *Erlenmeyer* dan ditutup rapat. Selanjutnya, larutan sementasi dibiarkan pada suhu ruang selama 72 jam atau 3 hari sebelum digunakan.

2.4 Pengujian Tanah

Pengujian dan analisa tanah di laboratorium dilakukan dalam 3 (tiga) tahap yaitu pengujian mengenai karakteristik kimia melalui pengujian XRF (*X Ray Fluorescence Spectrometer* Tanah), pengujian mengenai karakteristik fisik (**Tabel 2**) dan pengujian sifat mekanis tanah (**Tabel 3**) [20].

Tabel 2. Standar Pengujian Karakteristik Fisik Tanah

No	Pengujian	Standar
1	Kadar Air	ASTM D 2216-71
2	Berat Jenis (GS)	SNI 03-1964-1990
3	Batas – Batas Atterberg	ASTM D 4318

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Tabel 3. Standar Pengujian Karakteristik Mekanis Tanah

No	Pengujian	Standar
1	Kepadatan (Standard Proctor Test)	ASTM D 1557
2	Permeabilitas	ASTM 2434-68

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Berdasarkan Tao Sun, 2023 saat ini, para ahli telah memberikan beberapa saran mengenai permeabilitas tanah penutup sementara, misalnya berkisar antara 10^{-4} cm/s dan 10^{-5} cm/s [5]. Rancangan penelitian untuk benda uji permeabilitas dengan penambahan larutan sementasi dengan variasi sebesar 0,25M, 0,5M, dan 0,75M sebanyak 2% sebagaimana yang ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Rancangan Benda Uji Permeabilitas

Pengujian	Umur Kultur Bakteri dan Persentasi Bakteri	Molaritas Sementasi 2%	Jumlah Sample			
			Masa Peram			
			7	14	21	28
PERMEABILITAS	3 Hari 6%	0,25M	3	3	3	3
		0,5M	3	3	3	3
		0,75M	3	3	3	3

Sumber: Hasil Penelitian (2023).



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 5. Pencampuran Sampel Dengan Rancangan Sesuai Pada Tabel 4

3. Hasil dan Diskusi

Hasil uji karakteristik kimia, fisik tanah, dan mekanis tanah dilakukan untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada sampel yang distabilisasi dengan variasi penambahan larutan sementasi dan bakteri *Bacillus Subtilis* diuraikan sebagai berikut:

3.1 Pengujian Karakteristik Kimiawi

Berdasarkan hasil pengujian XRF (*X Ray Fluorescence Spectrometer*) pada sampel lumpur yang telah dilaksanakan di laboratorium kimia diperoleh hasil pengujian sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 5**.

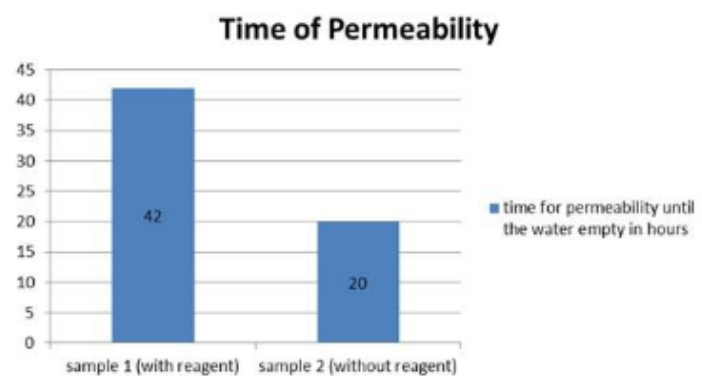
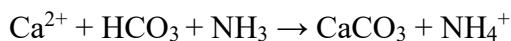
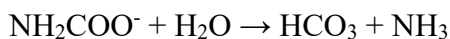
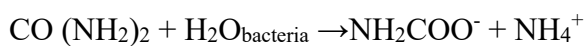
Tabel 5. Hasil Pengujian Karakteristik Kimia (XRF) Tanah

Element	Concentration (%)
Fe	89,4394
Ca	4,0651
Si	2,9910
Al	2,2701
S	0,4957
K	0,3366
Mn	0,2343
Ti	0,1354
Cl	0,0164
Cu	0,0117
V	0,0042

Sumber: Hasil Pengujian XRF (2023).

Hasil pengujian menunjukkan kandungan Ca yaitu sebesar 4,0651%. Unsur Ca inilah yang diharapkan dapat bereaksi dengan bakteri *Bacillus Subtilis* sehingga membentuk kalsium (CaCO_3) [21]–[23]. Dalam konteks stabilisasi tanah, reaksi ini dapat berperan dalam mengubah sifat fisik dan mekanik tanah, potensialnya untuk meningkatkan kekuatan serta mengurangi permeabilitas tanah.

Penambahan Ca yang diambil dari $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ yang secara hidrolisis spontan membentuk 1 mol amonia dan asam karbonat sebagai berikut



Sumber: *Applicability of Biocementation Technique by Bacillus Subtilis and Its Effect of permeability in Organic Soil* [10].

Gambar 6. Waktu Permeabilitas dari Dua Sampel.

Berdasarkan **Gambar 6** sampel dengan campuran CaCO_3 memiliki waktu yang lebih lama dibandingkan dengan sampel tanpa campuran CaCO_3 . Hal ini menunjukkan bahwa Penambahan CaCO_3 pada benda uji akan mengurangi permeabilitas pada tanah. Hal ini disebabkan oleh bakteri *Bacillus Subtilis* yang mengisi pori tanah [10]. Proses hidrolisis Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai *Temporary Landfill Cover* yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi

spontan dari $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ menghasilkan dua komponen utama yang berperan dalam reaksi dengan bakteri *Bacillus Subtilis*, yaitu amonium (NH_4^+) dan karbonat (HCO_3^-). Bakteri dalam reaksi ini akan merubah urea menjadi ion amonium (NH_4^+) dan ion karbonat (HCO_3^-). Ion-ion ini kemudian berinteraksi dengan kalsium (Ca^{2+}) yang ada di lingkungan tanah. Proses interaksi ini menghasilkan pembentukan kalsium karbonat (CaCO_3) serta amonium (NH_4^+). Pembentukan CaCO_3 ini menjadi titik fokus dalam proses stabilisasi tanah. CaCO_3 membantu mengisi pori-pori tanah, meningkatkan kepadatan, dan mengurangi permeabilitasnya.

3.2 Pengujian Karakteristik Fisik Lumpur

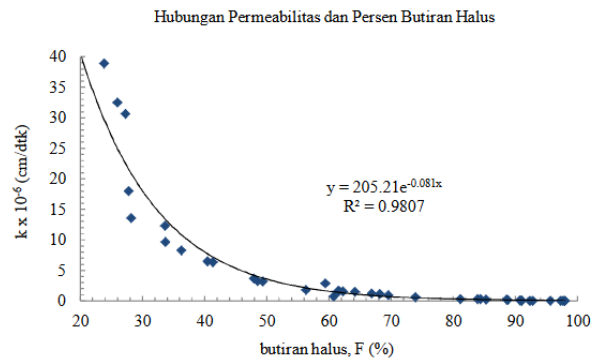
Untuk mengetahui karakteristik fisik dilakukan pengujian lumpur terhadap kadar air, analisa saringan, berat jenis, batas plastis, batas cair, dan indeks plastisitas. Hasil dari pengujian karakteristik fisik lumpur dapat dilihat pada **Tabel 6**. Dari hasil Analisa sifat fisik yang telah dilakukan, diketahui bahwa sample termasuk jenis kategori tanah berbutir halus karena 63% lolos saringan no.200 dengan kadar air yang cukup tinggi yaitu 42,54%. Dari hasil uji hydrometer diketahui bahwa sebesar 39,8% sample adalah lanau dan 25% sample adalah lempung.

Tabel 6. Hasil Pengujian Karakteristik Fisik Tanah

Jenis Pengujian	Hasil
Berat jenis (<i>Specific Gravity, G_s</i>)	2,62 g/cm ³
Kadar air (<i>Water Content</i>)	42,54 %
Batas cair (<i>Liquid Limit, LL</i>)	45,65 %
Batas plastis (<i>Plastic Limit, PL</i>)	32,32 %
Indeks Plastisitas (<i>Plasticity index, IP</i>)	13,33%
Lolos saringan no.200	63 %

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Karakteristik fisik tanah menunjukkan bahwa tanah tersebut cenderung memiliki kemampuan untuk mengalami perubahan volumetrik yang signifikan dengan perubahan kadar airnya. Lebih lanjut, batas cair dan batas plastis yang relatif dekat menunjukkan tanah ini kurang stabil terhadap perubahan kelembaban. Kadar air yang tinggi juga dapat mempengaruhi permeabilitas tanah, di mana tanah dengan tingkat kelembaban yang tinggi cenderung memiliki permeabilitas yang rendah. Meskipun lolos saringan no. 200 sebesar 63%, yang menunjukkan komposisi butiran yang halus, nilai berat jenis yang relatif tinggi, yaitu 2,62 g/cm³, menandakan adanya kemungkinan partikel-partikel berukuran besar. Namun, secara umum, kadar air yang tinggi menandakan bahwa tanah ini memiliki potensi untuk memiliki permeabilitas yang rendah. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan dan tertera pada **Gambar 7**.



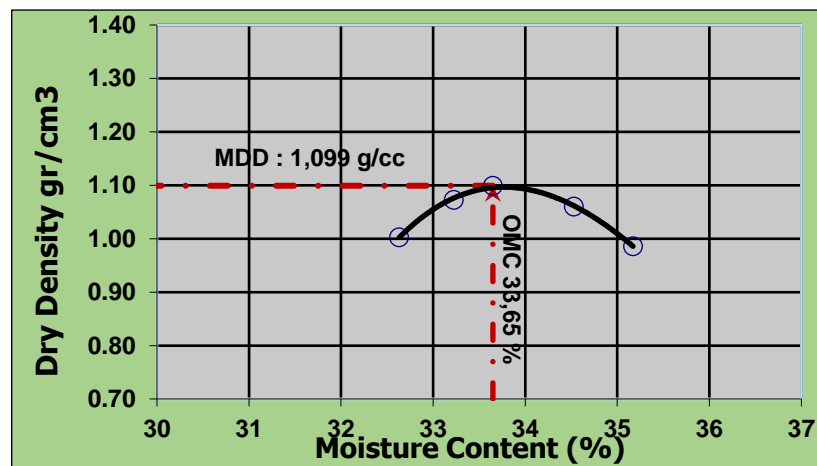
Sumber: Korelasi Permeabilitas Berdasarkan Ukuran Butiran dan Plastisitas Tanah [24]

Gambar 7. Hubungan Permeabilitas dengan Persen Butiran Halus

Dari **Gambar 7** menunjukkan bahwa semakin banyak butiran halus yang terkandung dalam tanah maka koefisien permeabilitas tanah tersebut semakin kecil. Nilai Koefisien permeabilitas tanah yang kecil menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki permeabilitas yang rendah [24].

3.3 Pengujian Sifat Mekanis

Hasil pengujian sifat mekanis tanah lumpur meliputi uji *standar proctor test* dan permeabilitas. Hasil Uji Proctor Test dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 8. Grafik Hubungan Antara Kadar Air Dengan Berat Volume Kering Sample

Hasil uji didapatkan berat volume kering maksimum (MDD) sebesar 1,099 g/cc dan kadar air optimum (OMC) sebesar 33,65%. Hal ini mengindikasikan titik di mana tanah mencapai kepadatan tertinggi dengan kelembaban tertentu. Pada titik MDD, tanah mencapai kepadatan maksimumnya, yang berarti kekuatan dan stabilitasnya pada tingkat tertinggi. Sedangkan OMC mengacu pada tingkat kelembaban optimal yang diperlukan untuk mencapai kepadatan tanah yang maksimum



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 9. Uji Permeabilitas

Untuk menilai permeabilitas tanah berbutir halus dilakukan uji menggunakan metode tinggi energi turun (*Falling Head*) [25]. Hasil uji menunjukkan nilai koefisien sebesar $5,04 \times 10^{-4}$ cm/s. Nilai tersebut menunjukkan karakteristik permeabilitas yang cenderung tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah tersebut memiliki kemampuan tanah untuk membiarkan pergerakan air melaluinya dengan relatif mudah. Dalam konteks ini, tanah tersebut cenderung memiliki kemampuan untuk mengalirkan air dengan lebih lancar dan cepat. Hal ini dapat memiliki implikasi pada potensi terjadinya pergerakan cairan di dalamnya, yang mungkin mempengaruhi proses filtrasi atau pergerakan limbah dalam suatu lingkungan tertentu.

3.4 Hasil Stabilisasi

Setelah mendapatkan nilai berat volume kering tanah maksimum (*maximum dry density*) dan menentukan nilai kadar air optimum (*optimum moisture content*) dari hasil uji *proctor test* dilakukan pengujian permeabilitas dengan variasi penambahan larutan sementasi dan bakteri *Bacillus Subtilis*.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 10. Sample Tanah Sebelum Distabilisasi Dengan Metode MICP



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

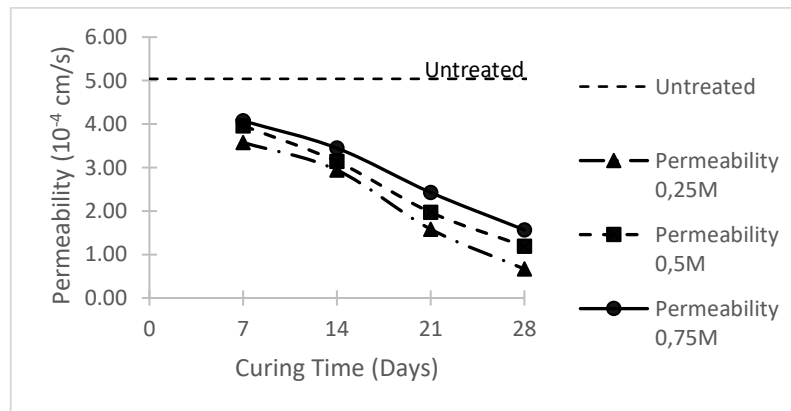
Gambar 11. Sample Tanah Setelah Distabilisasi Dengan Metode MICP

Hasil pengujian permeabilitas dengan penambahan larutan sementasi dan bakteri *Bacillus Subtilis* pada umur kultur 3 hari dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 7. Hasil Nilai Uji Permeabilitas

Parameter Uji	Konsentrasi	Masa Peram Sample (Hari)			
		7	14	21	28
Permeabilitas (cm/s)	0,25M	$3,58 \times 10^{-4}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$1,58 \times 10^{-4}$	$6,67 \times 10^{-5}$
	0,5 M	$3,96 \times 10^{-4}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$1,97 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-4}$
	0,75 M	$4,07 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	$2,43 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-4}$

Sumber: Hasil Penelitian (2023).



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Gambar 12. Grafik Perbandingan Hasil Uji Permeabilitas Pada Campuran Larutan Sementasi Dengan Variasi 0,25M, 0,5M, 0,75M

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan penurunan permeabilitas dengan berdasarkan variasi campuran larutan sementasi yang ditambahkan. Hasil uji menegaskan bahwa sampel yang dioptimalkan dengan larutan sementasi dan bakteri *bacillus subtilis* memiliki permeabilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang tidak diberi perlakuan. Dalam grafik (**Gambar 12**), terlihat bahwa nilai permeabilitas paling rendah terdapat pada

sampel dengan campuran larutan sementasi sebesar 0,25M. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang sebelumnya yang menunjukkan bahwa kristal CaCO_3 yang efektif dapat diproduksi melalui kombinasi larutan sementasi dengan konsentrasi rendah (0,25 M) [16].

Permeabilitas tertinggi terdapat pada sampel larutan sementasi 0,75M pada masa peram 7 hari yaitu sebesar $4,07 \times 10^{-4}$ cm/s, sementara permeabilitas terendah diperoleh sebesar $6,67 \times 10^{-5}$ cm/s dengan konsentrasi larutan sementasi 0,25M pada masa peram selama 28 hari. Dalam setiap variasi larutan sementasi, terjadi penurunan permeabilitas seiring meningkatnya masa pemeraman sampel. Variasi larutan sementasi 0,25M menunjukkan kemampuannya menurunkan permeabilitas tanah hingga 86,7%, sementara variasi 0,5M dan 0,75M mampu menurunkan permeabilitas tanah masing-masing hingga 76,2% dan 68,8%. Permeabilitas mengalami penurunan yang artinya pori-pori tanah semakin mengecil. Ruang pori mengecil karena efek pengisian sebagian kristal sehingga menyebabkan penurunan permeabilitas dan porositas [5].

4. Kesimpulan

Hasil penelitian mengungkapkan bahwa penambahan larutan sementasi mampu menurunkan permeabilitas tanah. Larutan sementasi 0,25M dan bakteri *Bacillus Subtilis* memiliki permeabilitas paling rendah. Tanah tanpa larutan sementasi memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar $5,04 \times 10^{-4}$ cm/s, dan turun menjadi $6,67 \times 10^{-5}$ cm/s dengan konsentrasi larutan sementasi 0,25M pada masa peram selama 28 hari. Variasi larutan sementasi 0,25M menunjukkan kemampuannya menurunkan permeabilitas tanah hingga 86,7%. Permeabilitas mengalami penurunan yang artinya pori-pori tanah semakin mengecil. Sehingga, dengan penambahan tersebut mampu membuat permeabilitas tanah menurun dan dapat meminimalkan kemungkinan kerusakan lingkungan oleh air lindi.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Universitas Balikpapan, khususnya kepada Program Studi Teknik Sipil yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian dan penyusunan laporan.

Daftar Pustaka

- [1] A. Mojiri *et al.*, “Treatment of landfill leachate with different techniques: An overview,” *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 11, no. 1, pp. 66–96, 2021, doi: 10.2166/wrd.2020.079.
- [2] S. H. Nur, “Studi Hydraulic Conductivity Clay Liner Dengan Variasi Tingkat Kepadatan Tertentu Terinfiltrasi Air Lindi,” *J. Keteknikan dan Sains (JUTEKS)-LPPM UNHAS*, vol. 1, no. 1, pp. 48–52, 2018.
- [3] F. Laili, “Analisa Kualitas Air Lindi Dan Potensi Penyebarannya Ke Lingkungan Sekitar Tpa Gunung Tugel Kabupaten Banyumas,” *Akhir, Tugas Lingkungan, Jur. Tek. Tek. Fak. Dan, Sipil Indones. Univ. Islam*, 2021.
- [4] R. P. Mallawa, S. G. Rondonuwu, and A. N. Sarajar, “Analisis Self Healing Capacity (SHC) Pada Geosynthetic Clay Liners (GCL) Dengan Lempung Lunak Sebagai Material Pengisi Melalui Uji Direct Shear,” *TEKNO*, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id/>
- [5] T. Sun *et al.*, “Impact of Solidified Municipal Sludge as Temporary Covering Soil on the Stability of Landfill Slope,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/app13052786.
- [6] N. A. Rosli, H. Abdul Aziz, A. B. H. Kueh, L. L. P. Lim, and M. H. Zawawi, “Leaching Behaviour of Synthetic Leachate through a Sewage Sludge and Red Gypsum Composite as Intermediate Landfill Cover,” *Sustain.*, vol. 15, no. 5, 2023, doi: 10.3390/su15054229.
- [7] R. Cossu and R. Stegmann, *Solid Waste Landfilling*, 1st ed. Concepts, Processes, Technology, 2018.
- [8] S. E. Sucahyo, N. A. Firdaus, and L. Lintang, “Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Lumpur PDAM Cilacap,” *J. Georafflesia*, vol. 3, no. 2, pp. 81–88, 2019.
- [9] A. S. Ruviaro, L. Silvestro, T. P. Scolaro, P. R. de Matos, and F. Pelisser, “Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 327, no. 129484, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129484>.
- [10] F. Syarif, G. Mahadika Davino, and M. Ferry Ardianto, “Penerapan Teknik Biocementation Oleh Bacillus Subtilis Dan Pengaruhnya Terhadap Permeabilitas Pada Tanah Organik,” *J. Saintis*, vol. 20, no. 01, pp. 47–52, 2020, doi: 10.25299/saintis.2020.vol20(01).4809.
- [11] A. Marini, G. Utomo, and H. Ryka, “The Effect Of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) On Shear Strength Of Coal Contaminated Soil,” *Proceeding Int. Conf. Appl. Smart Green Innov.*, vol. 1, no. 1, pp. 28–32, 2022, doi: 10.36277/icasgi.vi.6.

- [12] A. Marini, G. Utomo, and M. Nur Fadhillah, "Pengaruh Semen Pada Tanah Lempung Plastisitas Rendah Terhadap Nilai Cbr," *J. Ilm. Tek. Sipil TRANSUKMA*, vol. 4, no. 1, pp. 23–32, 2021, doi: 10.36277/transukma.v4i1.107.
- [13] A. M. Indriani and G. Utomo, "Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara," *Cived*, vol. 10, no. 1, p. 53, 2023, doi: 10.24036/cived.v10i1.122318.
- [14] A. Miftah, H. Khodadadi Tirkolaei, and H. Bilsel, "Bio-precipitation of CaCO₃ for soil improvement: A Review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 800, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/800/1/012037.
- [15] Z. S. Hadi and K. A. Saeed, "Effect of microbial-induced calcite precipitation (MICP) on the strength of soil contaminated with lead nitrate," *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 31, no. 1, pp. 143–149, 2022, doi: 10.1515/jmbm-2022-0016.
- [16] D. Mujah, L. Cheng, and M. A. Shahin, "Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Process," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 4, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002660.
- [17] N. A. Rosli, H. A. Aziz, M. R. Selamat, and L. L. P. Lim, "A mixture of sewage sludge and red gypsum as an alternative material for temporary landfill cover," *J. Environ. Manage.*, vol. 263, no. 110420, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110420>.
- [18] A. M. Indriani, G. Utomo, and N. Fitriyani, "Pengaruh Kultur Bakteri Pada Proses Biosementasi Tanah Laterit Terhadap Nilai CBR," *Media Ilm. Tek. Sipil*, vol. 11, no. 2, pp. 143–149, 2023, doi: 10.33084/mits.v11i2.4590.
- [19] Rajiv and Nirmaladevi, "Stabilization of Clay Soil by MICP using Ureolytic / Non-Ureolytic Bacteria," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 384–388, 2021, [Online]. Available: www.ijert.org
- [20] B. Susanti, Eko Indah; Prihatiningsih, "Perubahan Karakteristik Clay Liner Yang Distabilisasi Dengan Kapur Di Tpa Supit Urang Pada Konstruksi Sanitary Landfill Akibat Rembesan Leachate," *Snst 9*, pp. 28–33, 2018.
- [21] A. M. Indriani, T. Harianto, A. R. Djamaluddin, and A. Arsyad, "Bioremediation of Coal Contaminated Soil As the Road Foundations Layer," *Int. J. GEOMATE*, vol. 21, no. 84, pp. 76–84, 2021, doi: 10.21660/2021.84.j2124.

- [22] A. Marini Indriani, G. Utomo, and R. Syahputra, "Pengaruh Siklus Basah Kering terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi dengan Bakteri *Bacillus Subtilis*," *Cived*, vol. 10, no. 2, pp. 416–427, 2023, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/cived/index416>
- [23] A. A. Ayalew and I. Demir, "Physiochemical Characterization of Ethiopian Mined Kaolin Clay through Beneficiation Process," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9104807.
- [24] H. Irawan and S. AN, "Korelasi Permeabilitas Berdasarkan Ukuran Butiran dan Plastisitas Tanah," *Univ. Riau*, no. 1989, 2012.
- [25] Y. Chen, Y. Han, X. Zhang, S. Sarajpoor, S. Zhang, and X. Yao, "Experimental study on permeability and strength characteristics of MICP-treated calcareous sand," *Biogeotechnics*, vol. 1, no. 3, p. 100034, 2023, doi: 10.1016/j.bgtech.2023.100034.