

Pemanfaatan Limbah Lumpur yang Distabilisasi Menggunakan MICP sebagai Lapisan Penutup Sementara Tempat Pembuangan Akhir

Selina Tesiana¹, Andi Marini Indriani², Gunaedy Utomo³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Balikpapan

Email: 197011405@uniba-bpn.ac.id; andi.marini@uniba-bpn.ac.id; gunaedy@uniba-bpn.ac.id

ABSTRAK

Seiring dengan berkembangnya pengolahan sampah, tempat pembuangan akhir (TPA) cenderung memicu berbagai dampak lingkungan. Untuk meminimalkan dampak sampah TPA terhadap pencemaran lingkungan sekitarnya, sampah tersebut ditutupi oleh bahan untuk mengisolasi dari lingkungan. Oleh karena itu dibutuhkan pemanfaatan dengan menggunakan lumpur water treatment guna menghambat dan mengurangi dampak lindi sehingga juga mendapatkan nilai koefisien permeabilitas penutup TPA Sementara. Metode pembuatan penutup TPA sementara menggunakan material lumpur IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Balikpapan yang diperkuat dengan MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) dan juga memanfaatkan bakteri *Bacillus subtilis* untuk memperkecil nilai permeabilitas tanah sehingga lapisan penutup yang dihasilkan dapat memperkecil kemungkinan kerusakan lingkungan dan pencemaran air tanah oleh air lindi dari pembusukan sampah. Setelah dilakukan penelitian dapat disimpulkan bahwa Permeabilitas tanah tanpa campuran menunjukkan nilai permeabilitas sebesar $5,04E4$ cm/s dimana permeabilitas limbah lumpur PDAM dapat memenuhi kriteria sebagai penutup TPA sementara, adapun batas spesifikasi permeabilitas antara 10^{-4} sampai 10^{-5} cm/dtk. Setelah dilakukan penambahan dengan metode MICP diperoleh permeabilitas terdapat pada sampel larutan bakteri 16 % dengan kultur 2 hari pada masa pemeraman 7 hari yaitu sebesar $4,19E-4$ cm/s dan permeabilitas terendah yang didapatkan adalah $1,49E-4$ cm/s dengan konsentrasi larutan bakteri 16 % kultur 3 hari pada masa pemeraman 28 hari.

Kata Kunci: Permeabilitas, MICP, Limbah lumpur, *Bacillus subtilis*, TPA

ABSTRACT

*The development of waste management, landfills tend to trigger various environmental impacts. To minimize the impact of landfill waste on the surrounding environment pollution, the landfill waste are covered by materials to isolate them from the environment. Therefore, it is necessary to use water treatment sludge to inhibit and reduce the impact of leachate so as to obtain the permeability coefficient value of the temporary landfill cover. The method of making temporary landfill cover using sludge material of IPAM Perumda Tirta Manuntung Km.8 Balikpapan, reinforced with MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) and also utilizing *Bacillus subtilis* bacteria to reduce the permeability value of the soil so that the resulting cover layer can minimize the possibility of environmental damage and groundwater pollution by leachate water from waste decomposition. After the research, it can be concluded that the permeability of soil without mixture shows a permeability value of 5.04×10^{-4} cm/s where the permeability of PDAM sludge waste can meet the criteria as a temporary landfill cover, as for the permeability specification limit between 10^{-4} to 10^{-5} cm/s. After addition with the MICP method, the highest permeability was obtained in the sample of 16% bacterial solution with 2-day culture at a 7-day curing period which amounted to $4.19E-4$ cm/s and the lowest permeability obtained was $1.49E-4$ cm/s with a concentration of 16% bacterial solution with 3-day culture at a 28-day burial period.*

Key words: Permeability, MICP, Sludge waste, *Bacillus subtilis*, sanitary landfill

Submitted:	Reviewed:	Revised	Published:
28 Agustus 2023	31 Agustus 2023	15 Desember 2023	01 Februari 2024

PENDAHULUAN

Berdasarkan perubahan permeabilitas dan kekuatan lapisan lapisan penutup perantara, hukum migrasi air lindi di tempat pembuangan sampah pada kondisi tersebut lapisan lapisan penutup antara dianalisis. Hubungan antara keamanan lereng TPA, kondisi iklim dan kerusakan lapisan lapisan penutup tengah dieksplorasi lebih lanjut. Oleh karena itu,

menjaga permeabilitas dan kekuatan lumpur kota yang dipadatkan pada tingkat tertentu diperlukan untuk menjamin keamanan dan stabilitas lereng TPA. (Taqwa dkk, 2017; Sari & Hamdhan, 2019) Untuk meminimalkan dampak sampah TPA terhadap lingkungan sekitarnya, maka sampah tersebut ditutupi oleh bahan untuk mengisolasi dari lingkungan. Ada tiga penutup umum bahan

yaitu tanah penutup akhir, tanah penutup tengah dan tanah penutup harian (Sun, et al., 2023)

Kandungan dari limbah lumpur pengolahan air bersih Perumda Tirta Menuntung adalah adanya logam aluminium (dari pemakaian senyawa aluminium sulfat) di dalam lumpur tergolong sebagai limbah yang bahan beracun dan berbahaya. (Sucahyo, Firdaus, & Lintang, 2018). Penelitian tentang pengaruh pemanfaatan sludge Perumda Tirta Menuntung sebagai material pembuatan lapisan penutup sementara. Saat ini, para ahli telah memberikan beberapa saran mengenai permeabilitas tanah penutup sementara, misalnya berkisar antara 10^{-5} cm/s dan 10^{-4} cm/s (Fan, et al., 2022). Tempat Pembuangan Sampah dan mengetahui kualitas lapisan penutup sementara yang diperkuat dengan metode MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) sangat banyak dilakukan dan hasil yang positif, seperti ditunjukkan oleh (Syarif, Davino, & Ardianto, 2020). MICP adalah suatu teknik memperbaiki tanah dengan menggunakan mikroorganisme yang mampu mengubah dan meningkatkannya suatu sifat fisik dan mekanik (Indriani, Utomo, & Ryka, 2022), (Indriani & Utomo, 2023), (Indriani, Utomo, & Fadhillah, 2021). Metode presipitasi kalsit yang diinduksi mikroba MICP adalah teknik yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk stabilisasi tanah (Hadi & Seed, 2022), (Miftah, Tirkolaei, & Bilsel, 2022).

Bacillus termasuk kelompok bakteri batang dan kokus yang membentuk endospora ciri-cirinya pun mempunyai bentuk sel batang, motil yang memiliki satu flagel, gram positif, bersifat aerobik, membentuk endospore, juga memiliki habitat pada lingkup tanah, air, lingkungan akuatik, dan juga pencernaan hewan (termasuk manusia). Ada juga beberapa tindakan stabilisasi ialah menambah kerapatan tanah (Hartono, 2020).

Permeabilitas bisa didefinisikan semacam sifat bahan yang menjadikan aliran rembesan zat cair mengalir melalui rongga pori (Hardiyatmo, 2001). Permeabilitas tanah adalah suatu kondisi yang berkaitan pada ukuran butiran tanah. Karena butiran tanah lempung berukuran kecil, kemampuan meloloskan air juga kecil.

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah lumpur Perumda Tirta Menuntung sebagai material lapisan penutup sementara TPA dan juga memanfaatkan bakteri *Bacillus subtilis* untuk memperkecil nilai permeabilitas tanah sehingga lapisan penutup yang dihasilkan dapat memperkecil kemungkinan kerusakan

lingkungan dan pencemaran air tanah oleh air lindi dari pembusukan sampah (Mallawa, Rondonuwu, & Sarajar, 2022).

METODE PENELITIAN

Tahap persiapan penelitian, pengumpulan data laboratorium hingga analisis data membutuhkan waktu ± 3 bulan. Rencana lokasi pengambilan sample limbah lumpur dengan cara dimasukin ke dalam karung untuk menjaga kadar air limbah lumpur tersebut, dan lokasinya tepatnya di Perumda Tirta Menuntung KM 8 Balikpapan Utara kota Balikpapan, kemudian di test di laboratorium Universitas Balikpapan.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel
(Sumber : Google Maps 2023)



Gambar 1. Kolam Penampungan Limbah Perumda Tirta Menuntung
(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Bahan

Limbah lumpur dasar diambil dalam kondisi *disturbed* dan dipindahkan ke laboratorium dengan karung. Bahan pencampur yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*. Kadar pencampuran limbah lumpur + Bakteri *Bacillus subtilis* 12%, 14% dan 16 %

Peralatan

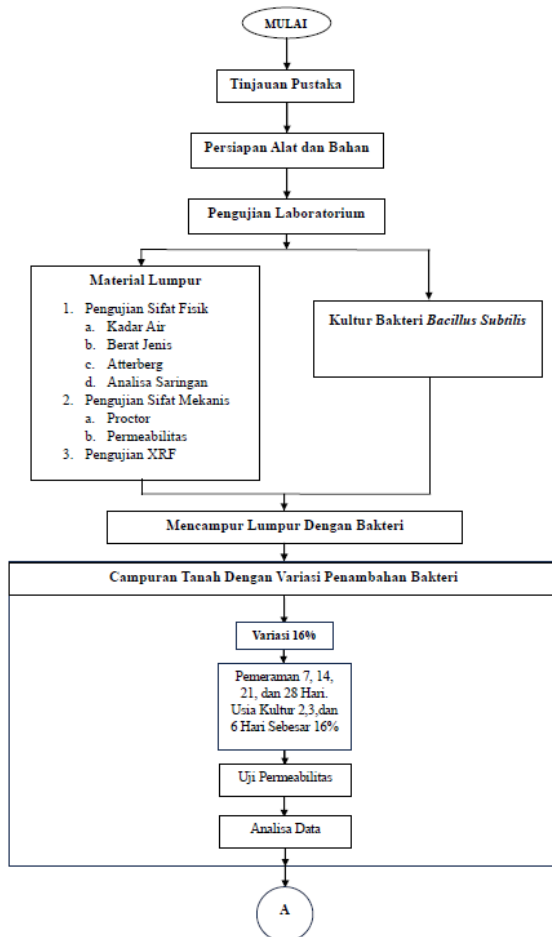
Peralatan yang dipakai untuk menjadi penunjang penyelesaian penelitian stabilisasi tanah dasar ini merupakan dari ,berdasarkan laboratorium Universitas Balikpapan, antara lain alat-alat berdasarkan uji test kadar air, analisa saringan, atterberg limit, berat jenis (*spesifik gravity*) berdasarkan percobaan picnometer, *standard proctor test*, permeabilitas.

Pelaksanaan

Pelaksanaan pengujian pada penelitian ini ada 2 (dua) pengujian yaitu pengujian terhadap lumpur yang akan digunakan dan kultur bakteri *Bacillus subtilis*.

Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart Penelitian
 (Sumber: Hasil Pengujian)

Kultur Bakteri *Bacillus subtilis* dan Pembuatan Larutan Sementasi

Kultur mikrobiologi ialah suatu metode yang memperbanyak mikroba pada media kultur dengan cara pembiakan di laboratorium yang terkendali secara aseptis, untuk menentukan suatu jenis dari organisme (Widiastiti, 2020). Menurut (Indriani, Utomo, & Fitriyani, 2023) Komposisi yang digunakan untuk perkembangbiakkan bakteri *Bacillus subtilis* antara lain:

1. 10 gr NH_4Cl
2. 2,12 gr NaHCO_3
3. 3 gr Nutrien Brouth (NB)
4. 4,14 gr $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
5. 20 gr Urea

Proses pembuatan dan pencampuran Media B4 untuk kultur bakteri *Bacillus subtilis* adalah sebagai berikut.

1. Campurkan 1 liter air dengan 20 gr Urea, 3 gr NB, 2,12 gr NaHCO_3 , 10 gr NH_4Cl dan 4,14 gr $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ke dalam sebuah panick yang sudah dicuci bersih dan panaskan hingga larutan mendidih setelah itu biarkan hingga dingin.
2. Kemudian campurkan bakteri ke dalam cairan media B4.
3. Tuangkan ke dalam tabung erlenmeyer dan tutup rapat.
4. Setelah itu lalu melakukan proses pengocokan (shaking). Proses yang dilakukan selama 72 jam atau 3 hari.

Pada suatu proses pembuatan larutan sementasi dibutuhkan campuran urea dengan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dengan komposisi sebagai berikut.

1. 15,1 gr Urea
2. 36,75 gr $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Proses pembuatan larutan sementasi adalah sebagai berikut.

1. Campurkan air dengan 15,1 gr Urea dan 36,75 gr $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ aduk hingga bahan-bahan tersebut larut sempurna dengan konsentrasi 0,25M.
2. Kemudian tuangkan ke dalam tabung Erlenmeyer dan tutup rapat.
3. Setelah itu biarkan larutan sementasi pada suhu ruang selama 48 jam atau 2 hari.

Pengujian Tanah

Pelaksanaan pengujian hasil dan analisa tanah di laboratorium dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu.

1. Pengujian mengenai karakteristik kimia melalui pengujian XRF (X Ray Fluoresence Spectrometer Tanah).
2. Pengujian mengenai karakteristik fisik Tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Pengujian Karakteristik Fisik Tanah

No	Pengujian	Standar
1	Kadar Air	ASTM D 2216-71
2	Batas – Batas Atterberg	ASTM D 4318
3	Berat Jenis (GS)	SNI 03-1964-1990
4	Analisa Saringan	ASTM D 1241

(Sumber : Penulis)

3. Pengujian mengenai sifat mekanis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar Pengujian Karakteristik Mekanis Tanah

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

(Sumber : Penulis)

4. Rancangan penelitian untuk benda uji permeabilitas dengan penambahan bakteri dengan variasi sebesar 12%, 14%, dan 16% dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rancangan Benda Uji Stabilisasi

PENGUJIAN PERMEABILITAS				
Persentasi Bakteri Umur Kultur 16%				
Umur Kultur	Jumlah Sampel dan Masa Peram			
	7	14	21	28
2	3	3	3	3
3	3	3	3	3
6	3	3	3	3

(Sumber : Penulis)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Analisa Sample Lumpur Sebelum Distabilisasi

Karakteristik Kimiawi

Berdasarkan hasil uji XRF (*X-Ray Fluorescence Spectrometer*) yang dilakukan di laboratorium kimia menggunakan alat Horiba Scientific (Ayalew, 2023) yang dilakukan pada sample lumpur yang diuji, diperoleh hasil sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian XRF Tanah

Element	Concentration	Unit
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)

Pengujian Karakteristik Fisik Lumpur

Hasil pengujian menunjukkan kandungan tertinggi terdapat unsur Fe yaitu sebesar 89,4394% dan Ca sebesar 4,0651%. Unsur Ca inilah yang diharapkan dapat bereaksi dengan

bakteri *Bacillus subtilis* sehingga membentuk kalsium (CaCO_3) (Indriani, Utomo, & Syahputra, 2023), (Indriani A. M., Utomo, Djamaluddin, & Arsyad, 2021).

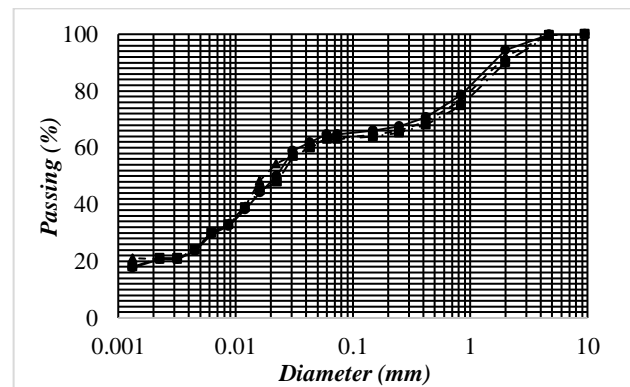
Untuk mengetahui karakteristik fisik dilakukan pengujian lumpur terhadap berat jenis, kadar air, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, dan analisa saringan (Bowles, 1991). Hasil dari pengujian karakteristik fisik lumpur dapat ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji karakteristik Fisik Lumpur

Jenis Pengujian	Hasil
Berat jenis (<i>Specific Gravity, G_s</i>)	2,62 gr/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 Pengujian)

Hasil analisa uji saringan dan hydrometer ditampilkan seperti pada Gambar IV.1

**Gambar 4.** Grafik Hasil Uji Hidrometer (Sumber: Hasil Pengujian)

Dari hasil Analisa sifat fisik 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% sampel adalah lempung.

Pengujian Sifat Mekanis

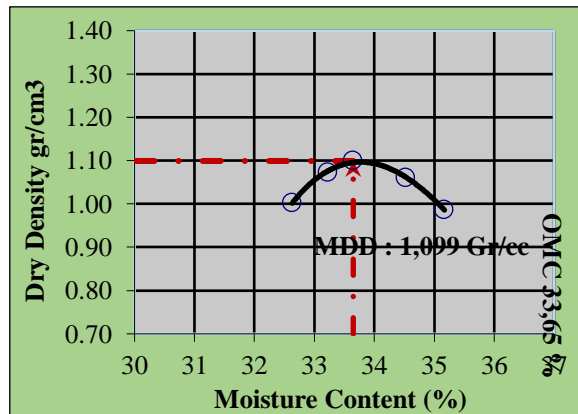
Untuk mengetahui karakteristik sifat mekanis dilakukan pengujian lumpur terhadap uji *standard proctor test* dan permeabilitas. Hasil dari pengujian karakteristik mekanis lumpur dapat ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Sifat Mekanis Tanah

Jenis Pengujian	Hasil
Kadar Air Optimum (OMC)	1,099 gr/cc
Kepadatan Kering Max (MDD)	33,65 %
Permeabilitas	$5,04 \cdot 10^{-4}$ cm/s

(Sumber: Hasil Pengujian)

Hasil Uji Pemasakan tanah dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Berat Volume Kering Dengan Hubungan Kadar Air
 (Sumber: Hasil Pengujian)

Data hasil yang diperoleh pada percobaan uji *standart proctor test* kemudian di plot seperti gambar di atas, sehingga diperoleh berat volume kering maksimum (*maximum dry density*) sebesar 1,099 gr/cc dan kadar air optimum (*optimum moisture content*) sebesar 33,65%.

Permeabilitas dilakukan yaitu mendapatkan nilai koefisien. Karena tanah yang digunakan termasuk tanah berbutir halus, maka metode dalam uji permeabilitas menggunakan cara tinggi energi turun (*Falling Head*) (Chen, Han, Sarajpoo, Zhang, & Yao, 2023). Berdasarkan hasil pengujian tersebut, diperoleh nilai permeabilitas sample, sebesar $5,04 \cdot 10^{-4}$ cm/s

Hasil dan Analisa Sample Material Setelah Distabilisasi

Setelah didapat nilai berat volume kering tanah maksimum (*maximum dry density*) dan ditentukannya nilai kadar air optimum (*optimum moisture content*) dari hasil pengujian standart proctor test maka dilanjutkan pembuatan sample untuk pengujian permeabilitas dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis*.

Hasil Analisa Permeabilitas Lumpur Berdasarkan Umur Kultur Bakteri

Berdasarkan dari hasil menambahkan bakteri *Bacillus subtilis* sebesar 16% sebagai berikut.

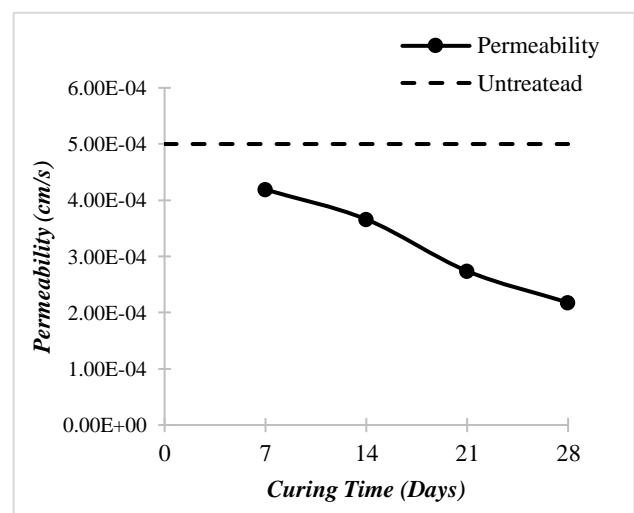
Hasil Pengujian Permeabilitas Dengan Penambahan Larutan Bakteri *Bacillus subtilis* 16% Pada Umur Kultur 2 Hari

Setelah dilakukan pengujian permeabilitas dengan penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16 % pada umur kultur 2 hari dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai Permeabilitas pada umur kultur 2 hari

Parameter	Permeabilitas (cm/s)
Umur Kultur	2 Hari
	7
	14
Masa Peram (Hari)	21
	28

(Sumber: Hasil Pengujian)



Gambar 5. Grafik Hubungan Permeabilitas pada Umur Kultur 2 Hari
 (Sumber: Hasil Pengujian)

Pada grafik Gambar 5 diperlihatkan apabila dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* mengalami penurunan permeabilitas yang artinya pori-pori tanah semakin mengecil karena efek pengisian sebagian kristal sehingga menyebabkan penurunan permeabilitas dan porositas (Sun, et al., 2023), (Song & Elsworth, 2020). Pada penambahan suatu bakteri dengan umur kultur 2 hari dan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16% pada masa peram 7 ke 14 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 12,65%. Pada masa peram 14 ke 21 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 25,16%. Sedangkan nilai permeabilitas yang terdapat pada masa peram 21 ke 28 hari terjadi penurunan sebesar 20,43%. Persentasi penurunan sample pada masa peram 28 hari jika dibandingkan dengan sample untreated terjadi penurunan hingga 56,42%. Berdasarkan penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa seiring bertambahnya

masa peram hingga 30 hari maka akan dapat menurunkan nilai permeabilitas sample (Nasution, Purwana, & Setiawan, 2017).

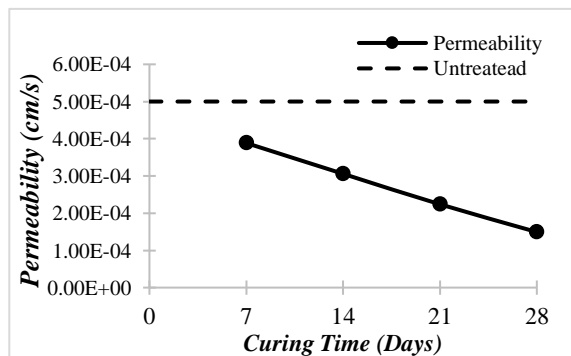
Hasil Pengujian Permeabilitas dengan Penambahan Larutan Bakteri *Bacillus subtilis* 16% Pada Umur Kultur 3 Hari

Setelah dilakukan pengujian permeabilitas dengan penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16% pada umur kultur 3 hari dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai Permeabilitas pada umur kultur 3 hari

Parameter	Permeabilitas (cm/s)	
Umur Kultur	2 Hari	
	7	3,88E-04
Masa Peram (Hari)	14	3,06E-04
	21	2,24E-04
	28	1,49E-04

(Sumber: Hasil Pengujian)



Gambar 6. Grafik Hubungan Permeabilitas pada Umur Kultur 3 Hari

(Sumber: Hasil Pengujian)

Pada Gambar 6 di atas diperlihatkan bahwa dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* mengalami penurunan permeabilitas yang artinya pori-pori tanah semakin mengecil karena efek pengisian sebagian kristal sehingga menyebabkan penurunan permeabilitas dan porositas (Sun, et al., 2023), (Song & Elsworth, 2020). Pada penambahan bakteri dengan umur kultur 3 hari dan larutan bakteri *Bacillus subtilis* pada masa peram 7 ke 14 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 21,29%. Pada masa peram 14 ke 21 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 26,78%. Sedangkan nilai permeabilitas yang terdapat pada masa peram 21 ke 28 hari terjadi penurunan sebesar 33,29%. Persentasi penurunan sample pada masa peram 28 hari jika dibandingkan dengan sample untreated terjadi penurunan hingga 70,13%. Berdasarkan penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa seiring

bertambahnya masa peram hingga 30 hari maka akan dapat menurunkan nilai permeabilitas sample (Nasution, Purwana, & Setiawan, 2017).

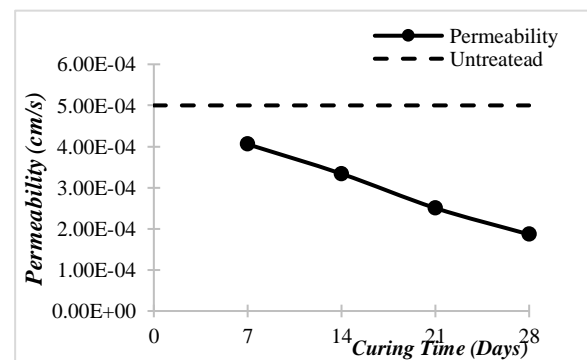
Hasil Pengujian Permeabilitas dengan Penambahan Larutan Bakteri *Bacillus subtilis* 16% Pada Umur Kultur 6 Hari

Setelah dilakukan pengujian permeabilitas dengan penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16% pada umur kultur 6 hari dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai Permeabilitas pada umur kultur 6 hari

Parameter	Permeabilitas (cm/s)	
Umur Kultur	2 Hari	
	7	4,06E-04
Masa Peram (Hari)	14	3,34E-04
	21	2,50E-04
	28	1,86E-04

(Sumber: Hasil Pengujian)



Gambar 7. Grafik Hubungan Permeabilitas pada Umur Kultur 6 Hari

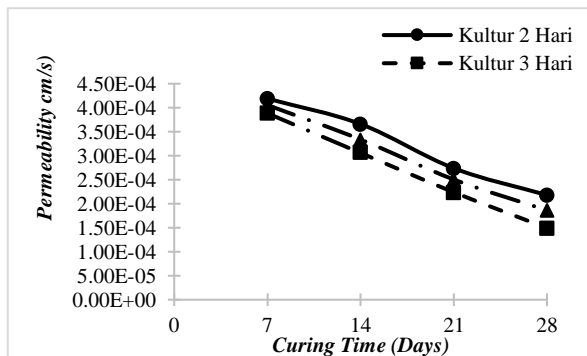
(Sumber: Hasil Pengujian)

Pada Gambar 7 di atas diperlihatkan bahwa dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* mengalami penurunan permeabilitas yang artinya pori-pori tanah semakin mengecil karena efek pengisian sebagian kristal sehingga menyebabkan penurunan permeabilitas dan porositas (Sun, et al., 2023), (Song & Elsworth, 2020). Pada penambahan bakteri dengan umur kultur 6 hari dan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16% pada masa peram 7 ke 14 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 17,70%. Pada masa peram 14 ke 21 hari mampu menurunkan nilai permeabilitas sebesar 24,97%. Sedangkan nilai permeabilitas yang terdapat pada masa peram 21 ke 28 hari terjadi penurunan sebesar 25,64%. Persentasi penurunan sample pada masa peram 28 hari jika dibandingkan dengan sample untreated terjadi penurunan hingga 62,76%. Berdasarkan penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa seiring bertambahnya masa peram hingga 30 hari maka akan dapat

menurunkan nilai permeabilitas sample (Nasution, Purwana, & Setiawan, 2017).

Hasil Perbandingan Nilai Permeabilitas Penambahan Larutan Bakteri *Bacillus subtilis* 16%

Berdasarkan dari hasil penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* sebesar 16% maka hasil permeabilitas sampel dengan penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 16% dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Hasil Uji Permeabilitas pada Umur Kultur 2,3, dan 6 Hari (Sumber: Hasil Pengujian)

Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa terjadi perbedaan penurunan permeabilitas dengan perbedaan masing-masing umur kultur. Penyebab terjadinya perbedaan ini terjadi karena apabila umur kultur 2 hari jumlah bakteri yang dihasilkan sedikit jika dibandingkan dengan umur kultur 3 dan 6 hari. Pada masa kultur 3 hari, perkembangan jumlah bakteri cenderung lebih banyak karena bakteri sudah berada pada fase stationer atau puncak perkembangbiakan, kalau pada masa kultur 6 hari bakteri sudah pada masa mati sehingga nilai yang diakibatkan pada permeabilitas dengan umur kultur bakteri 3 hari nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan umur kultur 2 hari dan 6 hari.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian dapat disimpulkan bahwa Permeabilitas tanah tanpa campuran menunjukkan nilai permeabilitas sebesar $5,04 \times 10^{-4}$ cm/s dimana permeabilitas limbah lumpur PDAM dapat memenuhi kriteria sebagai penutup TPA sementara, adapun batas spesifikasi permeabilitas antara 10^{-4} sampai 10^{-5} cm/dtk. Setelah dilakukan penambahan dengan metode MICP diperoleh permeabilitas tertinggi terdapat pada sampel larutan bakteri 16 % dengan kultur 2hari pada masa pemeraman 7 hari yaitu sebesar $4,19 \times 10^{-4}$ cm/s dan permeabilitas terendah yang

didapatkan adalah $1,49 \times 10^{-4}$ cm/s dengan konsentrasi larutan bakteri 16 % kultur 3 hari pada masa pemeraman 28 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayalew, A. A. (2023). Physiochemical Characterization of Ethiopian Mined Kaolin Clay through Beneficiation Process. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2023/9104807>
- Bowles, J. (1991). *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.
- Chen, Y., Han, Y., Sarajpoor, S., Zhang, S., & Yao, X. (2023). Experimental Study on Permeability and Strength Characteristics of MICP-Treated Calcareous Sand. *Biogeotechnics*, 100034. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100034>
- Fan, X., Xu, H., Jin, L., Lv, Y., Wu, S., & Wu, T. (2022). Regional differences in influence of intermediate cover permeability on perched leachate in landfill. *Urban Climate*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101094>
- Hadi, Z., & Seed, K. (2022). Effect of microbial-induced calcite precipitation (MICP) on the strength of soil contaminated with lead nitrate. *Journal of The Mechanical Behavior of Materials*, 143-49. doi:<https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0016>
- Hartono, A. (2020). Studi Eksperimental Perbaikan Sifat Fisik Tanah Gambut Menggunakan Campuran Pasir dan Teknik Bio-grouting Dengan Batuan Bakteri *Bacillus subtilis*. *Universitas Islam Riau*. <http://repository.uir.ac.id/id/eprint/9541>
- Indriani, A. M., & Utomo, G. (2023). Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara. *CIVED*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.24036/cived.v10i1.122318>
- Indriani, A. M., Utomo, G., & Fadhillah, M. (2021). Pengaruh Semen pada Tanah Lempung Plastisitas Rendah terhadap Nilai CBR. *Transukma*, 4(1). doi: <https://doi.org/10.36277/transukma.v4i1.107>
- Indriani, A. M., Utomo, G., & Fitriyani, N. (2023). Pengaruh Kultur Bakteri Pada Proses Biosementasi Tanah Laterit Terhadap Nilai CBR. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(2). <https://doi.org/10.33084/mits.v11i2.4590>

- Indriani, A. M., Utomo, G., & Syahputra, M. (2023). Pengaruh Siklus Basah Kering terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi dengan Bakteri *Bacillus subtilis*. *Cived*, 2622-6774. <https://doi.org/10.24036/cived.v10i2.123404>
- Indriani, A. M., Utomo, G., Djameluddin, A., & Arsyad, A. (2021). Bioremediation Of Coal Contaminated Soil As The Road Foundations Layer. *International Journal of Geomate*, 76-84.
- Indriani, A., Utomo, G., & Ryka, H. (2022). The Effect of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) On Shear Strength Of Coal Contaminated Soil. *Proceeding Of International Conference On Applied Smart And Green Innovation*. DOI: <https://doi.org/10.36277/icasgi.v1i1.6>
- Mallawa, R., Rondonuwu, S., & Sarajar, A. (2022). Analisis Self Healing Capacity (SHC) pada Geosynthetic Clay Liners (GCL) dengan Lempung Lunak sebagai Material Pengisi Melalui Uji Direct Shear. *Tekno*. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekn/article/view/44188>
- Miftah, A., Tirkolaei, H., & Bilsel, H. (2022). Bio-precipitation of CaCO₃ for soil improvement: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: 10.1088/1757-899X/800/1/012037
- Nasution, M. S., Purwana, Y. M., & Setiawan, B. (2017). Penurunan Permeabilitas dan Peningkatan Kuat Geser Tanah Lanau Menggunakan Pengaruh Mikrobakteri *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas*. *Matriks Teknik Sipil*, 5(4). DOI: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v5i4.36919>
- Salman, N., Ningsih, N. C., & Aryanti, D. (2022). Pra-Rancangan Instalasi Pengolahan Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Nangkaleah Kecamatan Wangunreja, Kabupaten Tasikmalaya. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 4(2), 75–87. <https://doi.org/10.32832/komposit.v4i2.3805>
- Sari, N. N., & Hamdhan, I. N. (2019). Analisis Stabilitas Lereng pada Timbunan TPA dengan Pendekatan Elemen Hingga. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 3(2), 45–52. <https://doi.org/10.32832/komposit.v3i2.3273>
- Song, C., & Elsworth, D. (2020). Microbially Induced Calcium Carbonate Plugging For Enhanced Oil Recovery. *Geofluids*, 2020, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/5921789>
- Sucahyo, S. E., Firdaus, N. A., & Lintang, L. (2018). Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Lumpur PDAM Cilacap. *Jurnal Georaflesia*. <https://journals.unihaz.ac.id/index.php/georaflesia>
- Sun, T., Fan, X., Xu, H., Zhang, N., Luo, H., Lv, Y., & Wang, L. (2023). Impact of Solidified Municipal Sludge as Temporary Covering Soil on the Stability of Landfill Slope. *Applied Sciences*, 13(5) 2786. doi:<https://doi.org/10.3390/app13052786>
- Syarif, F., Davino, M. M., & Ardianto, M. (2020). Penerapan Teknik Biocementation Oleh *Bacillus subtilis* dan Pengaruhnya Terhadap Permeabilitas Pada Tanah Organik *Saintis*, 20(01), 47-52. doi: [https://doi.org/10.25299/saintis.2020.vol20\(01\).4809](https://doi.org/10.25299/saintis.2020.vol20(01).4809)
- Taqwa, F. M. L., Kholik, M., & Syaiful, S. (2017). Perhitungan Faktor Keamanan dan Pemodelan Lereng Sanitary Landfill dengan Faktor Keamanan Optimum di Klapanunggal, Bogor. In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa*. Malang: Universitas Muhammadiyah Malang. <https://doi.org/10.22219/sentra.v0i3.1427>
- Widiastiti, I. G. A. A. (2020). Pengaruh Umur Simpan Kultur Kerja Bakteri Asam Laktat (*Lactobacillus Casei*) pada Medium Agar Padat di Refrigerator Terhadap Kuantitas Sel. *Repository Universitas Udayana*. <https://e-perpus.unud.ac.id/repositori/penelitian?nip=196503121994032001&tahun=2020>