

DISERTASI

**DESAIN LAPISAN KEDAP AIR PENUTUP AKHIR LANDFILL
DENGAN METODE BIOGROUTING**

**Design of an Impermeable Layer for the Landfill
Final Cover with Biogrouting Method**

RONA RESKI

D013171022



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN LAPISAN KEDAP AIR PENUTUP AKHIR LANDFILL
DENGAN METODE BIOGROUTING*****Design of an Impermeable Layer for the Landfill Final Cover
with Biogrouting Method***

Disusun dan Diajukan oleh

**RONA RESKI
NIM. D013171022**Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
Pada tanggal 16 Januari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusanMenyetujui
Komisi Penasehat**Prof. Dr. H. M. Natsir Djide, MS.Apt.**
Promotor**Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST.,MT.**
Co-Promotor**Dr. Eng. Ir. Irwan Ridwan R., ST.,MT.**
Co-PromotorDekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**Prof. Dr. Eng. Ir. M. Isran Ramli, ST.,MT.IPM.**Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil**Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST.,MT.**

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rona Reski
Nomor Pokok : D013171022
Program Studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan, atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti dan dapat dibuktikan bahwa sebagian atau seluruh isi disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 24 Januari 2023

Yang menyatakan,



Rona Reski

PRAKATA

Puji syukur penulis Panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena atas perkenaanNYA sehingga penelitian dan penulisan dengan judul **Desain Lapisan Kedap Air Penutup Akhir Landfill dengan Metode Biogrouting** dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa berbagai kendala yang dihadapi dalam penelitian dan penyusunan naskah disertasi ini tidak dapat penulis selesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu penulis dengan tulus menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. **Prof. Dr. M. Natsir Djide, MS.Apt.** selaku Ketua Komisi Penasehat (Promotor), **Dr.Eng. Ir. Tri Harianto, ST., MT.** selaku Co-Promotor 1, dan **Dr.Eng. Ir. Irwan Ridwan Rahim, M.Eng.** selaku Co-Promotor 2 atas bimbingan dan arahan selama melakukan penelitian dan penulisan naskah disertasi ini.
2. **Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc., Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D., Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc., dan Dr.Eng. Ir. Ardy Aryad, ST., M.Eng.Sc.,** selaku dosen penguji internal dan **Dr.Eng. Ir. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT.,** selaku penguji eksternal atas semua saran dan untuk kesempurnaan penulisan naskah disertasi ini.
3. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.,** selaku Rektor Universitas Hasanuddin dan Jajarannya, **Prof. Dr. Budu, Ph.D., Sp.M(K),**

M.Meded, selaku Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin dan jajarannya, **Prof Dr.Eng. Ir. M. Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN.Eng.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan jajarannya, **Prof. Dr.Eng. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin dan **Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT.**, selaku Ketua Program S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin dan jajarannya.

4. Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Laboratorium Mikrobiologi Departemen Farmasi Universitas Hasanuddin, Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin, dan Laboratorium Mikrostruktur Universitas Muslim Indonesia.
5. Rektor Universitas Al Asyariah Mandar dan Jajarannya, Rekan-rekan Dosen dan Staf Universitas Al Asyariah Mandar, dan kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
6. Kepada rekan-rekan mahasiswa S3 Teknik Sipil terkhusus teman-teman mahasiswa angkatan 2017 Universitas Hasanuddin.
7. Orang tua penulis, H. Muhammad Arfah Kile, S.Sos., dan Hj. Rahmawati, SKM., yang telah membesarkan dan mendidik serta memberikan dukungan doa untuk keberhasilan penulis.

8. Saudara kandung penulis, Mayor Chk. Nugroho Muhammad Nur, SH., (Kepala Hukum Divisi Infanteri 3 Kostrad - jabatan saat ini), dan Ahmad Maulana, SM., M.Si., Saudari ipar penulis, Hervyna SE., dan Ayu Wandira, SE., untuk dukungan dan doanya.
9. Anak-anakku, Shafiira Amabel Alifatunnisa, Aurelya Mutmainnah, Muhammad Nugraha Ramadhan, dan Rayyan Muhammad Alfatih. Seluruh keluarga besar yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih untuk dukungan dan doanya.

Semoga segala yang dikerjakan bermanfaat dan mendapatkan keberkahan dari Allah Subhanahu Wa Taala. Aamiin.

Makassar, 24 Januari 2023

Rona Reski
D013171022

ABSTRACT

RONA RESKI, *Design of an Impermeable Layer for the Landfill Final Cover with Biogrouting Method*, Supervised by **M. Natsir Djide** (Promotor), **Tri Harianto** (Co-Promotor), dan **Irwan Ridwan Rahim** (Co-Promotor).

Leachate accumulation is mainly caused by water seeping through the top of the landfill, whether from direct precipitation or inflow runoff. Surface water infiltration, such as from precipitation, is prevented by an impermeable layer. Utilization of dredged material from the Bili-Bili Dam in Gowa, South Sulawesi, and the pure culture bacteria of *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* ATCC 6633 to improve soil engineering properties. This study aims to find out how the pure culture of the bacterium *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* ATCC 6633 improves the engineering properties of sedimentary soil as an impermeable layer for the landfill's final cover through physical, mechanical, and chemical characteristics tests in the laboratory. Pure cultures were inoculated with an incubation period of 24 hours at 37 °C (Celsius). while the nutrients used by *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* bacteria are $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ and CaCl_2 . The molarity of the solution used was 0.8 M (mol/L). The maximum dry density and the optimum moisture content were achieved when the bacterial variation was 12%. A 12% bacterial variation reduced soil permeability, crack intensity factor, and volume shrinkage. Based on a chemical approach, a bacterial variation of 8% showed an increase in alumina. In comparison, mineralogy found aragonite carbonate crystal minerals (CaCO_3) at 8.8%, increase soil's unconfined compressive strength, cohesion, and friction angle. The decrease in soil strength when 10% and 12% bacteria were added was justified due to the destruction of the carbonate crystal mechanism on the soil specimen.

Keywords: *Landfill, Impermeable layer, Sedimentary soil, Bacillus subtilis, ATCC 6633*

ABSTRAK

RONA RESKI, *Desain Lapisan Kedap Air Penutup Akhir Landfill Dengan Metode Biogrouting*, Dibimbing oleh **M. Natsir Djide** (Promotor), **Tri Harianto** (Co-Promotor), dan **Irwan Ridwan Rahim** (Co-Promotor).

Akumulasi lindi sebagian besar disebabkan oleh air yang merembes melalui bagian atas TPA. Presipitasi langsung maupun dari limpasan air permukaan dicegah oleh lapisan kedap air. Pemanfaatan material hasil pengerukan waduk Bili-bili gowa, Sulawesi Selatan dan kultur murni bakteri *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* ATCC 6633 adalah salah satu upaya perbaikan tanah untuk meningkatkan sifat-sifat rekayasa tanah dengan penekanan sosial saat ini pada keberlanjutan yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menemukan pengaruh bakteri *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* ATCC 6633 untuk meningkatkan sifat-sifat rekayasa tanah sebagai lapisan kedap air penutup akhir landfill, melalui uji karakteristik fisik, mekanis, kimia, mineral dan mikrostruktur di laboratorium. Kultur murni diinokulasi dengan masa inkubasi 24 jam pada suhu 37 °C (Celsius). Nutrisi yang digunakan untuk bakteri *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* adalah $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ dan CaCl_2 . Kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum dicapai saat variasi bakteri 12%. Variasi bakteri 12% mereduksi permeabilitas tanah 2.8 kali, faktor intensitas retakan tanah 1.5 kali, dan penyusutan volume tanah 1.7 kali. Variasi bakteri 8%, berdasarkan pendekatan kimia menunjukkan peningkatan unsur alumina 2.14 kali, sedangkan mineralogy menemukan mineral kristal karbonat aragonit (CaCO_3) 8.8%, meningkatkan kuat tekan bebas 10.5 kali, kohesi 2.18 kali, dan sudut geser dalam 1.41 kali. Penurunan kekuatan tanah saat penambahan bakteri 10% dan 12% dijustifikasi karena adanya proses destruksi mekanisme kristal karbonat terhadap spesimen tanah.

Kata kunci: Landfill, Lapisan kedap air, Tanah sedimen, *Bacillus subtilis*, ATCC 6633

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI.....	iii
PRAKATA	iv
ABSTRACT.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	4
E. Batasan Penelitian	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Bio-Stabilisasi.....	7
B. Bakteri	10
C. Landfill	16
D. Matriks Penelitian Terdahulu	23
E. Kerangka Pikir Penelitian	29

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A.	Waktu Penelitian dan Lokasi Pengambilan Sampel	31
B.	Rancangan Desain dan Pengujian	33
C.	Definisi Operasional dan Variabel Penelitian.....	36
1.	Kultur murni.....	36
2.	Suspensi bakteri dan Nutrisi.....	38
3.	Pengujian propertis tanah sedimen	41
4.	Uji kompaksi.....	42
5.	Uji kuat tekan bebas dan Geser langsung	45
6.	Uji konduktivitas hidrolik	47
7.	Uji retakan dan penyusutan volume tanah	50
8.	Uji SEM, XRF, dan XRD	53

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A.	Karakteristik Fisik, dan Mekanis tanah	56
1.	Kompaksi	57
2.	Kuat tekan bebas.....	58
3.	Geser langsung	60
4.	Konduktivitas hidrolik	62
5.	Retakan dan penyusutan volume tanah.....	64
B.	Karakteristik Mikrostruktur, Kimia, dan Mineral Tanah Sedimen..	65
1.	Mikrostruktur tanah sedimen	65
1.1.	Topografi permukaan specimen tanah sedimen	65
1.2.	Morfologi bentuk dan ukuran spesimen tanah sedimen..	69

2. Kimia tanah sedimen	71
3. Mineral tanah sedimen	73
C. Temuan Empirik	76
D. Kebaruan (novelty)	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	77
B. Saran	77
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1.	Fase-fase pertumbuhan bakteri	13
2.	Kultur murni <i>Bacillus subtilis</i> subs. <i>spizizenii</i>	15
3.	Fasilitas perlindungan lingkungan TPA	18
4.	Kerangka pikir penelitian	29
5.	Lokasi waduk Bili-bili	31
6.	Kapal keruk	32
7.	Sampel tanah	33
8.	Bagan alir tahapan penelitian	34
9.	Kultur murni <i>Bacillus subtilis</i> subsp. <i>spizizenii</i> ATCC 6633	37
10.	Hasil inokulasi bakteri ATCC 6633	38
11.	(a) McFarland, dan (b) Suspensi bakteri	39
12.	Urea dan Kalsium klorida	41
13.	Alat uji kompaksi	44
14.	Sketsa cetakan sampel kuat tekan bebas	45
15.	Sketsa cetakan sampel geser langsung	46
16.	Alat uji kuat tekan bebas dan geser langsung	47
17.	Sketsa cetakan sampel konduktivitas hidrolik	47
18.	Sketsa pengujian konduktivitas hidrolik	49
19.	Sketsa alat uji konduktivitas hidrolik	50
20.	Sketsa cetakan sampel retakan dan penyusutan volume tanah	51

Nomor	Halaman
21. (a) Sampel tanah, dan Sampel tanah variasi bakteri 12%	52
22. Alat uji SEM	54
23. Alat uji XRF	54
24. Alat uji XRD	55
25. Grafik hubungan berat isi kering tanah dengan variasi bakteri	57
26. Grafik hubungan kadar air dengan variasi bakteri	58
27. Grafik hubungan kuat tekan bebas dengan variasi bakteri setelah masa pemeraman	59
28. Grafik hubungan kohesi dengan variasi bakteri setelah masa pemeraman	61
29. Grafik hubungan peningkatan sudut geser dalam dengan variasi bakteri setelah masa pemeraman	62
30. Grafik hubungan waktu dan volume air dengan tekanan 50 kPa	63
31. Grafik hubungan penyusutan volume sampel tanah dengan siklus pengeringan	64
32. Topografi tanah sedimen	65
33. Topografi variasi bakteri 4%	66
34. Topografi variasi bakteri 6%	67
35. Topografi variasi bakteri 8%	67
36. Topografi variasi bakteri 10%	68
37. Topografi variasi bakteri 12%	69
38. Morfologi bentuk dan ukuran tanah	70
39. Grafik hubungan komposisi alumina dengan variasi bakteri	72
40. Grafik pola difraksi tanah sedimen	74

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1.	Penelitian terkait	23
2.	Massa molekul relatif ($M_{r_{zat}}$) senyawa	40
3.	Standar pengujian sifat fisik dan mekanis tanah	42
4.	Sampel uji	42
5.	Komposisi campuran sampel kuat tekan bebas	45
6.	Komposisi campuran sampel geser langsung	46
7.	Komposisi campuran sampel konduktivitas hidrolik	48
8.	Komposisi campuran sampel retakan dan penyusutan volume tanah	51
9.	Karakteristik fisik dan mekanis tanah sedimen	56
10.	Hasil pengujian x-ray fluorescence tanah sedimen	71
11.	Mineralogy tanah	73

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tempat Pembuangan Akhir dengan sistem timbun sangat sesuai dengan kondisi Indonesia, karena sebagian besar sampahnya adalah sampah organik. Tempat pembuangan akhir sampah dengan sistem Landfill harus direncanakan. Kota besar dan metropolitan harus sesuai metode lahan urug saniter (*sanitary landfill*), sedangkan kota kecil dan sedang minimal direncanakan metode lahan urug terkendali (*controlled landfill*).

Undang-Undang Nomor 18 tahun 2008 pasal 44 ayat (1): Pemerintah Daerah harus membuat perencanaan penutupan tempat pemrosesan akhir sampah yang menggunakan sistem pembuangan terbuka paling lama 1 (satu) tahun terhitung sejak berlakunya Undang-Undang ini dan ayat (2): Pemerintah Daerah harus menutup tempat pemrosesan akhir sampah yang menggunakan sistem pembuangan terbuka paling lama 5 (lima) tahun terhitung sejak berlakunya Undang-Undang ini. Pada tahun 2013 semua daerah seharusnya sudah memiliki TPA sampah dengan sistem timbun tetapi kenyataannya peraturan tersebut belum dijalankan oleh seluruh Pemda Kota/Kabupaten di Indonesia dengan alasan hal tersebut masih sulit dilakukan karena biaya pengelolaan yang dibutuhkan sangat besar.

Hujan memiliki dampak yang besar terhadap pembentukan lindi TPA. Infiltrasi dan perkolasi merembes melalui limbah yang disimpan dan mengikat komponen limbah terlarut dan tidak larut melalui reaksi fisik dan kimia. Limpasan permukaan (*runoff*), biodegradasi, dan kandungan air tanah juga berkontribusi terhadap pembentukan lindi. Setelah sel tertentu terisi penuh, sistem tutup multi-komponen segera dibangun di atas limbah untuk menyediakan penutup tempat pembuangan sampah.

Seperti diketahui, sifat dan berat sampah cenderung semakin tidak stabil semakin banyak plastik yang ada di tempat pembuangan. Karakteristik ini memiliki hubungan yang erat dengan kekuatan geser sampah di tumpukan, yang bergantung pada kohesi (kohesi, c) dan sudut geser (Φ) partikel. Untuk menentukan karakteristik kekuatan geser tanah (kohesi dan sudut geser) yang diperlukan untuk menilai stabilitas atau daya dukung tanah, dilakukan uji geser langsung.

Stabilisasi tanah merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah yang ada. Tujuan dari stabilisasi tanah adalah untuk menata kembali partikel-partikel tanah agar lebih rapat dan saling mengunci.

Meningkatkan sifat fisik bahan keruk (*Dredger material*) dengan menstabilkan DM tanah liat dengan produk kapur, semen portland (PC), atau fly ash (FA). Kemudian, bahan ini dapat digunakan sebagai bahan konstruksi pengisi lokal yang murah, baik untuk lingkungan dan

menghemat penggunaan produk semen secara keseluruhan (Nguyen dkk, 2018).

Desain penutup mengurangi emisi CH₄ dari tempat pembuangan sampah. Bahan hasil limbah dapat digunakan kembali untuk penutup akhir konstruksi. Penggunaan bahan tambahan untuk memperbaiki tanah dan meningkatkan ketahanannya terhadap retakan. Alasan lainnya biaya yang lebih rendah juga menjadi pertimbangan (Pehme dkk, 2020).

Sebagai penutup akhir TPA, penggunaan material tanah lunak yang distabilisasi dengan fly ash dan diperkuat dengan serat tandan sawit dapat meningkatkan daya dukung tanah, menurunkan pembengkakan, penyusutan, dan keretakan lempung plastisitas rendah (CL), dan menurunkan nilai konduktivitas hidrolis tanah (Nurdin dkk, 2016). Impermeabilitas lapisan penutup akhir (*final cover layer*) merupakan topik utama dari penelitian ini.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik fisik, mekanis, mikrostruktur, kimia, dan mineral tanah sedimen?.
2. Bagaimana pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap karakteristik mekanis, mikrostruktur, kimia, dan mineral tanah sedimen?.

3. Bagaimana pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap permeabilitas tanah sedimen sebagai lapisan kedap air penutup akhir landfill?.
4. Bagaimana pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap retakan dan penyusutan tanah sedimen?.

C. Tujuan Penelitian

1. Menginvestigasi karakteristik fisik, mekanis, mikrostruktur, kimia, dan mineral tanah sedimen.
2. Menemukan pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap karakteristik mekanis, kimia, dan mineral tanah sedimen.
3. Menemukan pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap permeabilitas tanah sedimen sebagai lapisan kedap air penutup akhir landfill.
4. Menemukan pengaruh kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* terhadap retakan dan penyusutan tanah sedimen.

D. Manfaat Penelitian

1. Memberikan alternatif pilihan untuk digunakan dalam mendesain lapisan kedap air penutup akhir landfill menggunakan mikroba sebagai metode baru yang ramah lingkungan.
2. Memberikan informasi seberapa besar pengaruh mikroba terhadap tanah sedimen dalam meningkatkan sifat-sifat rekayasa tanah.

3. Memberikan informasi untuk pengembangan inovasi rekayasa geoteknik yang berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan serta kelestarian lingkungan dalam hal pemanfaatan material tanah sedimen hasil pengerukan waduk Bili-bili gowa, sulawesi selatan dan kultur murni *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* berasal dari ATCC 6633.

E. Batasan Penelitian

1. Penutup akhir (*final cover layer*) mengacu pada SNI 03-3241-1994 tentang persyaratan teknis penutupan TPA sampah.
2. Desain penelitian satu layer dengan hanya berfokus pada lapisan kedap air penutup akhir landfill.
3. Seluruh pengujian dilakukan di laboratorium
4. Desain sampel permeabilitas tanah berdasarkan berat isi kering maksimum (MDD) yang dicapai pada kadar air optimum (OMC).
5. Pengujian permeabilitas tanah tanpa bakteri (*untreated soil*) menggunakan metode falling head.
6. Pencampuran bahan stabilisasi dengan sampel tanah dilakukan dengan metode pencampuran langsung.
7. Material tanah yang digunakan adalah tanah sedimen hasil pengerukan waduk Bili-bili, gowa sulawesi selatan.
8. Bakteri yang digunakan adalah kultur murni ATCC 6633.
 - a. Kategori: bakteri

- b. Klasifikasi: Bacilli, Bacillales
 - c. Former name: *Bacillus subtilis subsp. spizizenii* (Nakamura, dkk dan Dunlap, dkk).
9. Nutrisi yang digunakan yaitu: urea $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ dan kalsium klorida (CaCl_2) .

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Bio-stabilisasi

Untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah granular dapat dilakukan metode perbaikan tanah secara biologi yang dikenal dengan biogrouting yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menginduksi presipitasi karbonat (CaCO_3) dibawah permukaan tanah (Whiffin dkk, 2007 dan van Paasen dkk, 2010). Perbaikan tanah melalui presipitasi CaCO_3 yang diinduksi dengan mikroba, MICP (*Microbially Induced CaCO_3 Precipitation*), presipitasi CaCO_3 yang diinduksi dengan enzim, EICP (*Enzyme Induced CaCO_3 Precipitation*), desaturasi dan presipitasi yang diinduksi dengan mikroba, MIDP (*Microbially Induced Desaturation and Precipitation*).

Umumnya MIDP dilakukan dalam proses pembersihan pada tanah dan air yang terkontaminasi polutan dengan menggunakan mikroorganisme. Pendekatan MIDP menggunakan enzim ekstraseluler untuk mempercepat degradasi polutan menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau tidak beracun. Mikroorganisme yang digunakan dalam bioremediasi seperti kapang, khamir dan bakteri diperoleh dari hasil isolat tanah dan air yang tercemar.

MICP dan EICP adalah teknik yang mengandalkan hidrolisis urea yang dikatalisis oleh enzim urease. Urea dapat dihidrolisis oleh enzim

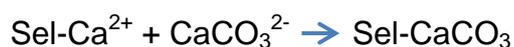
urease, yang ditemukan pada bakteri ureolitik, untuk menghasilkan amonia dan karbon dioksida. (Burbank dkk, 2012).

Hidrolisis urea untuk menghasilkan kalsit dipilih karena cepat menyiapkan lingkungan jenuh dan dapat dipertahankan (DeJong dkk, 2010). Oleh karena itu, presipitasi kalsium karbonat merupakan proses yang utama dalam teknik MICP dan EICP. Kelompok bakteri yang cocok digunakan untuk menghidrolisis urea dengan konsentrasi tinggi dalam proses sementasi adalah kelompok yang aktivitas enzimnya tidak ditekan oleh ammonium, seperti: *Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus pasteurii*), *Proteus vulgaris*, *Helicobacter pylori* (Lisdiyanti dkk, 2011).

Pengendapan karbonat secara teoritis dapat terjadi di lingkungan alami dengan meningkatkan/menurunkan konsentrasi kalsium karbonat dalam larutan. Beberapa teori pembentukan kalsit oleh para ahli (Lisdiyanti, 2012) diantaranya:

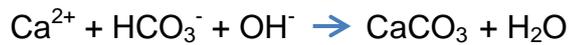
1) Lappin-Scott (1998) dan Deo (1997)

Presipitasi kalsit merupakan fungsi dari konsentrasi sel, kekuatan ion, dan pH media. Mikroorganisme (permukaan sel bermuatan negatif) menarik kation termasuk Ca^{2+} dari lingkungan dan dibentuk pada permukaan sel. Beberapa reaksi yang ditinjau adalah:

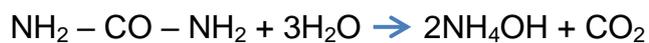


2) Ramakrishnan dkk, 2000

Menurut teori ini, beberapa reaksi dalam presipitasi kalsit adalah:



Reaksi-reaksi tersebut dipengaruhi oleh perubahan pH yang meningkat akibat aktivitas bakteri, seperti yang ditunjukkan pada reaksi berikut:



Oleh karena itu, bakteri berperan sebagai katalis dalam presipitasi kalsit.

3) Castanier dkk, 2000 dan Zavarzin 2002

Kalsium karbonat bereaksi dengan amonia hasil produksi bakteri sehingga terjadi presipitasi kalsit dengan reaksi berikut:



Banyak faktor yang dapat memengaruhi proses MICP (*microbially induced calcite precipitation*) termasuk jenis bakteri, konsentrasi larutan, ukuran partikel tanah, nutrisi, pH, durasi, dan suhu perawatan (DeJong dkk, 2006; DeJong dkk, 2010; Harkes dkk, 2010; Gat dkk 2014; dan Wu dkk, 2019). MICP melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk menginduksi presipitasi kalsit yang membantu mengikat partikel tanah bersama-sama dan meningkatkan sifat rekayasa tanah. Propertis rekayasa tanah termasuk kekuatan gesernya, kuat tekan bebas, kekakuan, mengurangi permeabilitas, dan meningkatkan kepadatan tanah dengan pengisian pori, pengerasan partikel, dan pengikatan antar partikel (DeJong dkk, 2006; van Paassen, 2009; DeJong

dkk, 2010; van Paassen dkk, 2010; Chou dkk, 2011; Chu dkk, 2012; Harianto dkk, 2013; Soon dkk, 2014; Montoya dan DeJong, 2015; Hasriana dkk, 2016; Deng dan Wang, 2018; Wang dkk, 2019; dan Cheshomi dan Mansouri, 2019).

Mikroorganisme telah digunakan secara luas dalam usaha perbaikan struktur tanah dengan berbagai cara, diantaranya: memperkuat atau menstabilkan tanah untuk memfasilitasi stabilitas terowongan atau konstruksi bawah tanah, meningkatkan daya dukung pondasi bertiang, mengurangi potensi pencairan (likuifaksi) tanah, merawat permukaan jalan, memperkuat bendungan tailing/penampungan limbah untuk mencegah erosi dan kegagalan lereng, mengikat partikel debu pada permukaan yang terbuka untuk mengurangi tingkat debu, meningkatkan ketahanan struktur lepas pantai terhadap erosi sedimen di dalam atau di bawah fondasi gravitasi dan jalur pipa, mengontrol erosi di wilayah pesisir dan sungai, menstabilkan polutan di tanah melalui pengikatan.

B. Bakteri

Bakteri yang bersifat *aerob* atau *anaerob* kebanyakan hidup pada bahan organik yang mati (*saprophyt*). Organisme pengurai biasanya mikroba (jamur dan bakteri). Mereka akan menguraikan makhluk hidup yang mati menjadi komponen yang lebih kecil dan lebih mikroskopis. Pengolahan sampah dan limbah memanfaatkan bakteri pengurai ini (Djide dan Sartini, 2016).

1. *Bacillus subtilis*

Genus *Bacillus* termasuk dalam kategori bakteri ureolitik (Ningsih dkk, 2017 ; Novanti dan Zulaika, 2018 ; Linda dkk, 2022). Bakteri *Bacillus subtilis* adalah bakteri *saprobe/saprofit* yaitu organisme pengurai (*decomposer*) bangkai, tumbuhan yang sudah mati dan sampah. Tanah, air, udara, dan bahan tumbuh yang terdegradasi semuanya berfungsi sebagai media perantara bagi pertumbuhan *Bacillus subtilis*. Dapat bertahan hidup di lingkungan dengan atau tanpa oksigen, *Bacillus subtilis* sering disebut sebagai bakteri aerob dan anaerob fakultatif. Bakteri aerob menggunakan oksigen untuk melakukan metabolismenya, sedangkan anaerob fakultatif dapat beralih dari respirasi aerobik ke fermentasi tanpa adanya oksigen. Bakteri aerobik menghasilkan ATP (*Adenosine Triphosphate*) melalui proses ini. (Nakano dan Zuber, 1998; Zheng dkk, 2015).

Bakteri *Bacillus subtilis* juga disebut organisme tanah manusia (*Human Soil Organism*) dan memiliki kemampuan luar biasa untuk bertahan hidup di lingkungan yang keras. Bakteri *Bacillus subtilis* telah banyak digunakan dalam bioteknologi, merupakan bakteri gram positif berbentuk batang penghuni lapisan atas tanah yang memiliki kemampuan untuk mengeluarkan protein dalam kisaran gram per liter (van Dijk dan Hecker, 2013).

Bacillus subtilis mampu membentuk endospora yang protektif dan memberi kemampuan bakteri tersebut untuk mentolerir keadaan yang

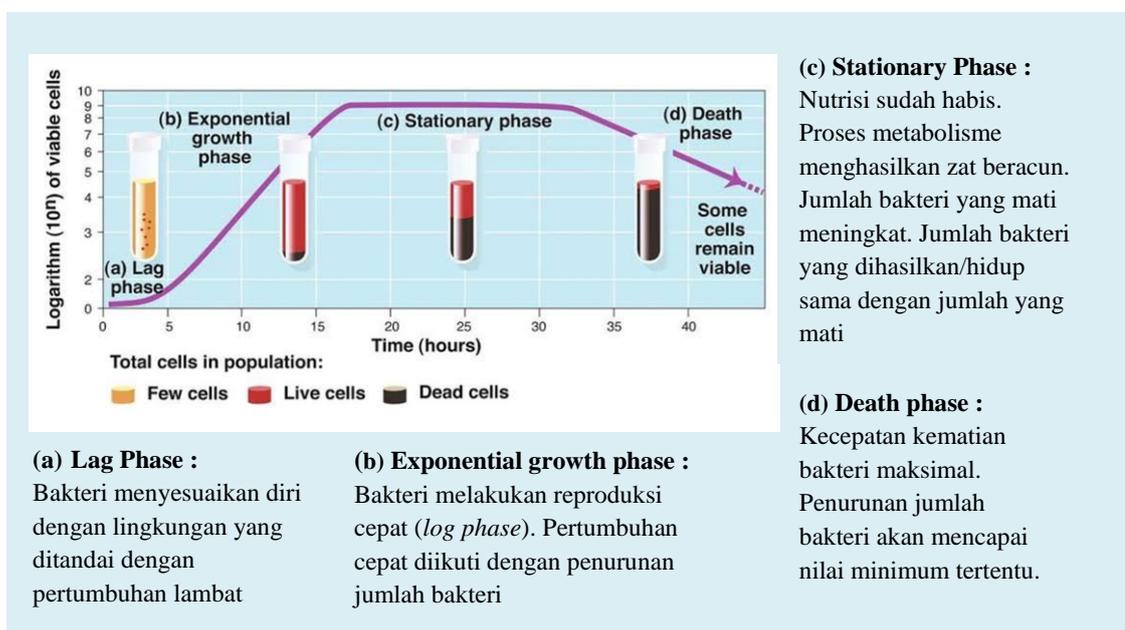
ekstrim seperti panas, kekeringan, kelembaban, asam dan mampu tumbuh pada konsentrasi garam tinggi (>10%), mampu tumbuh pada suhu kurang dari 5 derajat celcius sampai 75 derajat celcius, dengan tingkat pH antara 2 sampai 8, mampu bertahan terhadap *pasteurisasi* (sterilisasi kuman melalui pemanasan pada suhu 600 derajat celcius selama 30 menit dengan tujuan membunuh bakteri patogen).

Iturin adalah salah satu antibiotik lipopeptida yang mampu diproduksi oleh *Bacillus subtilis*. Iturin membunuh atau memperlambat pertumbuhan mikroorganisme yang bersaing, memungkinkan bakteri *Bacillus subtilis* mengalahkan mereka. Selain itu, iturin memiliki efek fungisida pada patogen.

Penelitian terdahulu telah menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* untuk meningkatkan sifat-sifat rekayasa tanah. Injeksi bakteri *Bacillus subtilis* dengan variasi larutan 2 cc hingga 32 cc untuk stabilisasi tanah lempung berpasir dengan metode biogrouting berhasil meningkatkan kapasitas tanah, terbukti dengan meningkatnya nilai kuat tekan tanah dan penurunan permeabilitas tanah (Harianto dkk, 2013). Stabilisasi material tanah lempung lunak klasifikasi CH (lempung plastisitas tinggi) dengan penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 2% – 6% mampu meningkatkan nilai kuat tekan dan kembali saat bakteri 8%. Penggunaan larutan bakteri *Bacillus subtilis* 3,5% – 6% mampu menjustifikasi nilai modulus reaksi tanah pasca stabilisasi sebesar 70 – 110 kN/m²/mm atau setara dengan nilai CBR 20% – 40% (Hasriana dkk, 2018).

2. Fase-fase pertumbuhan bakteri

Fase lag, fase logaritmik/eksponensial, fase stasioner, dan fase kematian adalah semua tahapan fase pertumbuhan bakteri yang merupakan fase pembelahan sel. Fase pertumbuhan bakteri ditunjukkan dalam kurva pertumbuhan bakteri seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Fase-fase pertumbuhan bakteri

Pertumbuhan bakteri adalah penciptaan sel-sel baru, yang menghasilkan peningkatan massa sel. Kapasitas sel untuk membuat protoplasma baru dari nutrisi di lingkungan sekitarnya menentukan berlangsung tidaknya proses pertumbuhan. Pembelahan biner, atau pertumbuhan aseksual, adalah proses yang digunakan oleh bakteri. Pembelahan biner terjadi dengan penambahan eksponensial atau kelipatan secara berkala.

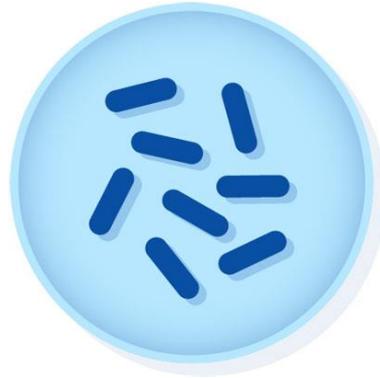
3. Nutrisi (*nutrient*)

Mikroba memerlukan nutrisi untuk memenuhi kebutuhan energi dan untuk bahan pembangun sel, untuk sintesa protoplasma dan bagian-bagian sel lain. Setiap mikroba mempunyai sifat fisiologi tertentu, sehingga memerlukan nutrisi tertentu pula. Persyaratan nutrisi bakteri terdiri dari air, karbon, energi, nitrogen, mineral, asektor elektron, dan faktor tumbuh (Hadioetomo, 1990 ; Djide dan Sartini, 2016).

4. Kultur murni

Kultur murni (*axenic*) adalah populasi sel atau organisme multiseluler yang tumbuh tanpa adanya sel lain. Kultur murni dapat dimulai dari satu sel atau organisme, sehingga ada klon gen lainnya. Kultur murni adalah kultur yang sel-sel mikroba berasal dari pembelahan satu sel tunggal, artinya mikroba dibiakkan dari bakteri yang dihomogenkan agar didapatkan bakteri murni yang dibutuhkan (Djide dan Sartini, 2016). Kultur murni ialah kultur yang sel-sel mikroba berasal dari pembelahan dari satu sel tunggal (Pelczr, 1986). Proses pemurnian dilakukan untuk memisahkan mikroba dari koloninya sehingga mempermudah proses identifikasi.

Kultur murni yang digunakan dalam penelitian ini adalah ATCC 6633 bakteri *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633 (Nakamura, dkk dan Dunlap, dkk) terlihat seperti pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Kultur murni *Bacillus subtilis subsp.spizizenii*
ATCC 6633

(sumber: www.microbiologics.com)

5. Inokulasi

Inokulasi bakteri adalah proses pemindahan bakteri dari medium yang asli ke medium nutrient yang baru. Medium yang digunakan dapat berupa medium agar yang biasa digunakan dalam bidang mikrobiologi. Proses inokulasi bakteri dilakukan dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi. Inokulasi bakteri harus dilakukan dalam media khusus yang berisi nutrisi. Teknik untuk inokulasi bakteri diantaranya: cara tebar/sebar (*spread plate method*), cara gores (*streak plate method*), cara tuang (*pour plate method*), pembiakan lapangan, pembiakan agar miring, dan pembiakan dengan tusukan. Dalam penelitian ini teknik inokulasi yang digunakan adalah pembiakan agar miring.

6. Pembiakan agar miring

Agar miring dibuat dengan membawa agar ke titik didih dan menuangkannya ke dalam tabung reaksi. Sebelum agar-agar mendingin

dan memadat, tabung reaksi diletakkan pada sisinya. Setelah agar-agar didinginkan, tabung reaksi dapat disimpan tegak, dan agar-agar di dalamnya memiliki tampilan yang miring.

Memiringkan permukaan agar-agar memberi bakteri area permukaan yang lebih besar untuk tumbuh dalam tabung reaksi. Selanjutnya, kemiringan dibuat dalam tabung reaksi yang dapat ditutup, yang meminimalkan kehilangan air. Hal ini penting karena kandungan air media agar yang tinggi.

Agar miring dapat digunakan untuk kultur sel bakteri untuk identifikasi, dimana mengidentifikasi bakteri dari sampel besar sulit dilakukan karena bakteri berukuran kecil dan sulit ditemukan. Namun, ketika ditempatkan pada agar miring nutrisi, sel bakteri akan membelah dengan cepat dan dalam beberapa jam akan menghasilkan sel yang cukup untuk diperiksa secara mikroskopis. Agar miring juga berguna dalam memelihara kultur bakteri dan lebih baik dari cawan petri. Beberapa kultur mudah ditempatkan ke dalam rak tabung reaksi dan disimpan di bawah pendingin.

C. Landfill

Landfill mengeluarkan sejumlah senyawa volatil berbahaya dan bau. Kemampuan landfill menimbulkan gas tergantung pada banyak faktor, termasuk komposisi sampah, kelembaban, ukuran sampah, umur sampah, pH, dan temperatur. Materi organik pada landfill merupakan sumber makanan bagi mikroorganisme untuk menghasilkan gas metana

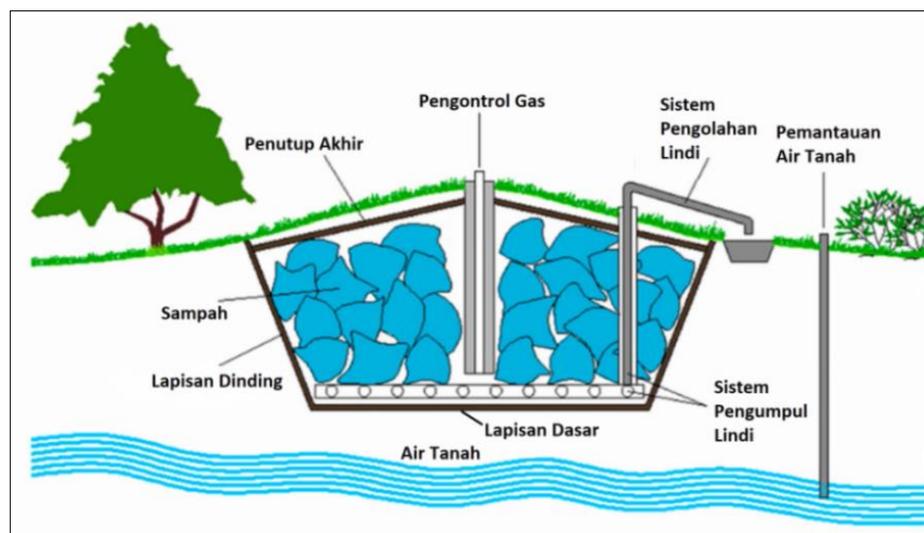
dan CO₂. Gas landfill merupakan produk normal dari dekomposisi anaerobik oleh mikroorganisme anaerob yang terdapat di landfill.

Berdasarkan komposisi sampah, secara umum sampah di Indonesia adalah tergolong sampah organik dengan kisaran 60% dari 64 juta ton sampah yang dihasilkan setiap tahunnya (sumber data: KLHK tahun 2017) dari total sampah. Sampah organik menggambarkan komponen sampah yang cepat terdegradasi terutama yang berasal dari sisa makanan. Sampah yang membusuk adalah sampah yang dengan mudah terdekomposisi karena aktivitas mikroorganisme. Salah satu mikroorganisme yang hidup di TPA sampah adalah bakteri yang kebanyakan bersifat heterotrofik (memerlukan senyawa organik sebagai sumber energi dan karbon). Tujuan dibuatnya *sanitary landfill/controlled landfill* adalah untuk menimbun atau mengubur sampah dan residu sampah agar pergerakan *leachate* dan gas yang keluar dari sampah dapat dibatasi. Selain itu, bisa mencegah gangguan lingkungan berupa sisa-sisa sampah yang beterbangan karena angin, dan mengurangi bau sampah.

Dalam PERMEN PUPR 03/PRT/M/2013, Pasal 37 menjelaskan prasarana dan sarana TPA sampah, yaitu:

- 1) Fasilitas dasar: jalan masuk, jalan operasional, listrik atau genset, drainase, air bersih, pagar, dan kantor
- 2) Fasilitas dasar: jalan masuk, jalan operasional, listrik atau genset, drainase, air bersih, pagar, dan kantor

- 3) Fasilitas perlindungan lingkungan: lapisan kedap, saluran pengumpul lindi, instalasi pengolahan lindi, zona penyangga, sumur uji atau pantau dan penanganan gas, seperti ditunjukkan Gambar 3.
- 4) Fasilitas operasional: alat berat, truk pengangkut tanah, dan tanah
- 5) Fasilitas penunjang: bengkel, garasi, tempat pencucian alat angkut dan alat berat, alat pertolongan pertama pada kecelakaan, jembatan timbang, laboratorium, dan tempat parkir.
- 6) Selain itu, TPA sampah dapat dilengkapi dengan fasilitas pendauran ulang, pengomposan, dan atau gas bio.



Gambar 3. Fasilitas perlindungan lingkungan TPA

Cover soil landfill dirancang untuk meminimalkan efek negatif dari peningkatan lindi dan untuk mengurangi efek negatif dari bertambahnya timbulan sampah. Segera setelah unit atau sel tertentu terisi penuh, sistem penutup multi-komponen yang disebut penutup TPA

segera dibangun di atas sampah. Berdasarkan kegunaannya, cover soil landfill dapat dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

a. Daily Cover

Daily cover adalah lapisan penutup pada permukaan timbunan sampah (umumnya 200mm-300mm dalam keadaan padat) yang ditutup pada setiap akhir dari hari kerja/ operasi. Umumnya material seperti tanah, tanah dalam, batuan, dan limbah konstruksi dapat digunakan sebagai penutup harian.

b. Intermediate Cover

Intermediate cover yang sering disebut sebagai lapisan penutup antara, mengacu kepada penempatan material (umumnya 300mm-500mm dalam keadaan padat) untuk suatu periode waktu pemulihan atau pembuangan lanjut dari timbunan sampah pada suatu area. Lapisan ini dilakukan setelah terjadi tiga lapis sel harian. Lapisan antara ini dapat dibiarkan selama 6 bulan sampai 1 tahun. Untuk perancangan ini biasanya direncanakan pelapisan setebal 30 cm.

c. Final Cover

Lapis penutup akhir merupakan penutupan tanah terakhir setelah kapasitas terpenuhi. Lapisan ini disesuaikan dengan tata guna lahan pasca operasi. Ketebalan minimum yang disyaratkan adalah 50-60cm dalam keadaan padat. Tanah penutup akhir ini juga

akan berfungsi sebagai tempat dari akar tumbuhan penutup bukit.

Penutup tanah akhir terdiri dari:

- 1) Lapisan pendukung, berfungsi untuk meratakan muka tanah penutup timbunan antara sebelumnya dan memberikan kemiringan permukaan bukit. Memiliki ketebalan sampai dengan 10 cm dan menggunakan jenis tanah yang ada di sekitar lahan (tanpa memiliki persyaratan khusus).
- 2) Lapisan kedap air, berfungsi untuk mencegah resapan air hujan atau air permukaan lainnya. Terdiri dari tanah lempung atau bentukannya dengan persyaratan yang sama dengan pembentukan lapisan dasar, sebaiknya memiliki ketebalan lapisan 20 cm.
- 3) Lapisan penutup, berfungsi untuk menunjang perkembangan tumbuhan penutup bukit. Kualitas tanah penutup yang diharapkan adalah mudah dalam pengerjaan, ikatan partikel cukup baik dan kuat. Untuk bahan yang sesuai adalah campuran antara pasir, lanau dan lempung dengan persentase perbandingan antara lanau, lempung, dan pasir yang hampir sama. Tanah ini harus memiliki kapasitas kelembaban (*Moisture holding capacity*) yang tinggi dengan tebal lapisan minimal 15 cm. Sebaiknya lapisan ini diberikan tambahan kandungan bahan organik (pupuk). Namun demikian, pada pasca operasi direncanakan penanaman pohon dengan akar yang dalam, maka

ketebalan harus mencapai (150-200cm) agar kondisi pohon cukup kuat dan pertumbuhan akarnya tidak terganggu oleh gas yang terperangkap dalam lapisan sampah.

Tanah dengan liquid limit (LL) yang tinggi cenderung menimbulkan retak (*crack*), sedangkan tanah dengan plasticity index (PI) atau plastic limit (PL) sangat rendah juga tidak bekerja baik. Bila tanah setempat (tanah sekitar TPA) tidak layak, tanah dari luar perlu mendapat perhatian. Lapisan tanah sebaiknya memenuhi beberapa kriteria meliputi: Tanah yang dapat mencapai permeabilitas sampai 1×10^{-7} cm/det, bila dipadatkan 90-95% densitas kering proctor dapat digunakan sebagai lapisan. Plasticity Indeks = 10-15%, Liquid Limit = 25-30% ; Butir tanah lebih kecil dari 0,074mm = 40-50% ; Kandungan liat = 18-25% ; dan Tanah penutup merupakan campuran antara clay, silt dan sand dengan perbandingan yang kurang lebih sama.

Ketika ditambahkan ke tanah akaboku yang dipadatkan untuk sistem penghalang akhir TPA, serat C_3H_6 (*polypropylene*) dapat meningkatkan kekuatan dan keuletan tanah, meningkatkan kerapatan kering tanah, dan mengurangi keretakan tanah (Harianto dkk, 2008). Sedangkan penggunaan material tanah lunak yang distabilisasi *fly ash* dan perkuatan serat tandan sawit dapat meningkatkan kapasitas dukung tanah sebagai lapis penutup akhir landfill, berpotensi mereduksi pengembangan (*swelling*), penyusutan (*shrinkage*) dan keretakan (*cracking*) tanah lempung plastisitas rendah (CL), dan dapat menurunkan

nilai konduktivitas hidrolik tanah (Nurdin dkk, 2016). Studi literatur terhadap penelitian terdahulu ditunjukkan dalam Tabel 1.

D. Matriks Penelitian Terdahulu

Tabel 1. Penelitian Terkait

Peneliti	Fokus dan metode penelitian	Hasil yang dicapai
DeJong dkk, 2006	<ol style="list-style-type: none"> 1) Metode <i>Biogrouting</i>, MICP 2) Bakteri dari genus <i>Bacillus</i>, spesies <i>Bacillus pasteurii</i> 3) Larutan sementasi: urea dan $\text{CaCl}_2 = 400\text{mL}$, persedian (140 gr/L) 	<p>[1] Sementasi substansial dalam struktur pasir lepas dapat direkayasa melalui pemanfaatan dan pengendalian proses biologis alami menggunakan bakteri tanah. Peningkatan kekakuan tanah (<i>Shear Wave Velocity</i> dan <i>Undrained Shear Strength</i>).</p> <p>[2] Faktor-faktor yang mempengaruhi proses sementasi mikroba meliputi : pH, suplai oksigen, konsentrasi mikroba dan ion kalsium dalam proses biologis serta urutan injeksi.</p>
Hariato dkk, 2008	<ol style="list-style-type: none"> 1) Sistem penghalang penutup akhir TPA 2) Material yang digunakan: Serat aditif C_3H_6 (<i>polypropylene</i>) terhadap tanah Akaboku yang dipadatkan 	<p>Penggunaan serat C_3H_6 (<i>polypropylene</i>) sebagai aditif untuk meningkatkan kekuatan tanah Akaboku yang dipadatkan. Isi serat 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,0%, dan 1,2% berat dipilih.</p> <p>Uji kompaksi, uji kuat tekan bebas, dan uji tarik dilakukan dalam penelitian ini:</p> <p>[1] Kandungan serat ditemukan sebagai faktor utama yang mempengaruhi kekuatan spesimen tanah.</p> <p>[2] Kepadatan kering meningkat dengan peningkatan kandungan serat hingga 1,0% dari kandungan serat dan terjadi sedikit penurunan untuk kadar serat 1,2%.</p> <p>[3] Kekuatan dan daktilitas meningkat secara signifikan dengan meningkatnya kandungan serat.</p>

Peneliti	Lingkup Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian Terdahulu
		<p>[4] <i>Crack intensity factor</i> (CIF) dari sampel tanah mengindikasikan bahwa persentase perubahan volume tanah yang dipadatkan menurun dengan penambahan serat, yang mengakibatkan volumetric regangan susut menurun.</p> <p>CIF untuk tanah tanpa serat (FC = 0,0%) secara signifikan lebih tinggi dari tanah dengan serat tambahan. CIF tanah di FC = 0,0% menurun dari 2,75% menjadi 0,6% untuk tanah di FC = 0,2%.</p>
Harianto dkk, 2013	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metode <i>Biogrouting</i>, MICP ▪ Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> ▪ Masa pemeraman: 3,7,14, dan 28 hari ▪ Jumlah volume bakteri <i>Bacillus subtilis</i> yang diinjeksi ke dalam spesimen tanah adalah 2cc hingga 32cc 	<p>[1] Jenis pemeriksaan yang dilakukan adalah uji kuat tekan bebas, permeabilitas, dan geser langsung.</p> <p>[2] Nilai kuat tekan bebas pada skala laboratorium menunjukkan pengujian tanpa injeksi bakteri adalah pada 0,13 kg/cm², untuk sampel yang disuntikkan dengan bakteri adalah pada 0,35 kg/cm².</p> <p>[3] Nilai permeabilitas tanpa bakteri memiliki nilai koefisien $2,49 \times 10^{-4}$ cm/detik dan sampel dengan injeksi bakteri memiliki nilai koefisien $4,91 \times 10^{-6}$ cm/detik.</p> <p>[4] Nilai geser langsung tanpa injeksi bakteri, sudut gesekan internal 4,46° dan untuk hasil dengan injeksi bakteri adalah 35,07°.</p> <p>Penambahan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> untuk stabilisasi tanah liat berpasir dengan metode <i>biogrouting</i> berhasil meningkatkan kapasitas tanah. Ini telah terbukti dengan meningkatnya nilai kuat tekan tanah dan penurunan permeabilitas tanah.</p>

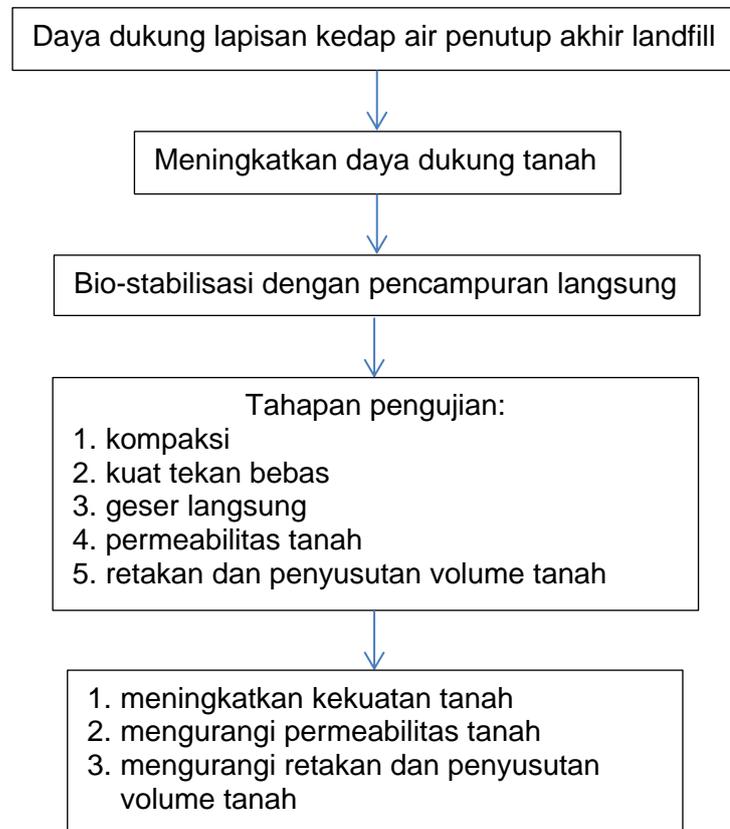
Peneliti	Lingkup Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian Terdahulu
Nurdin dkk, 2016	<ol style="list-style-type: none"> 1) Penutup akhir TPA 2) Material yang digunakan: Tanah lunak yang distabilisasi <i>fly ash</i> dan perkuatan serat tandan sawit 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Penambahan <i>fly ash</i> 10% dan serat tandang buah sawit 1,0% dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas dari 39,4 kPa menjadi 89,0 kPa (naik 29%). 2) Meningkatkan nilai kepadatan kering tanah dari 1.97r/cm³ menjadi 1.99 gr/cm³. 3) Mampu menurunkan nilai konduktivitas hidrolik tanah menjadi $1,2 \times 10^{-7}$ dari nilai awal $1,17 \times 10^{-6}$. 4) Menaikkan sudut gesek dalam tanah dari 8.55 menjadi 24 (meningkat 64,38%). 5) Menurunkan batas cair tanah dari 33.48% menjadi 24.5% (turun 26,82%). 6) Mengurangi potensi pengembangan dari 8% menjadi hanya 1.5% pada akhir siklus pembasahan. 7) Mengurangi potensi intensitas keretakan (<i>Crack Intensity Factor</i>) dari 1,96% menjadi tanpa retakan. <p>Secara spesifik penelitian ini menemukan bahwa stabilisasi tanah dengan perkuatan serat <i>fly ash</i> dan perkuatan serat alami (serat tandang buah sawit) dapat meningkatkan kapasitas dukung tanah sebagai lapis penutup landfill; berpotensi mereduksi pengembangan; penyusutan; dan keretakan tanah lempung plastisitas rendah (CL); dan dapat meningkatkan perilaku penempatan tanah pada kondisi jenuh akibat pengaruh kekentalan cairan.</p>

Peneliti	Lingkup Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian Terdahulu
Hasriana dkk, 2018	<ol style="list-style-type: none"> 1) Metode <i>Biogrouting</i>, MICP 2) Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> 3) Persentase bakteri <i>Bacillus subtilis</i>: 4 %, 6 %, dan 8 % tanah lempung sebagai lapisan <i>Subbase</i> jalan 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Stabilisasi material tanah lempung lunak klasifikasi CH (lempung plastisitas tinggi) dengan penambahan larutan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> 2% - 6% mampu meningkatkan nilai kuat tekan dan kembali saat bakteri 8%. 2) Penggunaan bakteri 3,5% - 6% ini mampu menjustifikasi nilai modulus reaksi tanah pasca stabilisasi sebesar 70-110 kN/m²/mm atau setara dengan nilai CBR 20% - 40%.
Deng dan Wang, 2018	<ol style="list-style-type: none"> 1) Metode <i>Biogrouting</i>, MICP 2) Asumsi awal konsentrasi larutan (M) urea dan kalsium klorida : 1 mol/L 3) Bakteri dari genus <i>Bacillus</i> spesies <i>Sporosarcina pasteurii</i> 4) Konsentrasi larutan urea dan CaCl₂ yang disiapkan adalah: 0.5 mol/L, 1.0 mol/L, dan 1.5 mol/L. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Studi ini menjelaskan pengaruh pH dan suhu terhadap pertumbuhan bakteri, distribusi ukuran partikel tanah, dan konsentrasi larutan terhadap permeabilitas dan kekuatan tanah. 2) pH memiliki pengaruh yang lebih kecil pada pertumbuhan bakteri dibandingkan dengan suhu. Bakteri dapat tumbuh dengan baik pada pH lebih dari 8 dan suhu lebih tinggi dari 20°C. 3) Tanah yang terdegradasi dengan baik memiliki kuat tekan bebas yang lebih tinggi (1,91-2,61 MPa) dibandingkan dengan tanah yang terdegradasi buruk (1,31 MPa). 4) Tren yang serupa juga ditemukan dalam pengurangan permeabilitas. 5) Nilai kuat tekan bebas meningkat ketika konsentrasi larutan biosemen meningkat menjadi 1 mol/L dan kemudian menurun pada 1,5 mol/L.

Peneliti	Lingkup Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian Terdahulu
Hataf dan Baharifard, 2019	Metode <i>Biogrouting</i> , MICP 1) Lapis dasar dan dinding TPA shiraz, Iran. 2) Material yang digunakan tanah sekitar TPA 3) Mikroorganismen yang digunakan bakteri dari genus <i>Bacillus</i> , spesies <i>Bacillus sphaericus</i>	1) Konsentrasi bakteri dikaitkan dengan rendahnya permeabilitas, dan semakin tinggi konsentrasi bakteri dalam media yang mengandung media kultur dan bakteri, semakin rendah permeabilitas yang diamati. Pengurangan permeabilitas maksimum diperoleh dengan mencampurkan bakteri dengan OD 2 untuk tanah yang diuji. 2) Waktu pemeraman optimal ditemukan 5 hari, memiliki efek yang signifikan untuk mengurangi permeabilitas. 3) Hasil SEM menunjukkan pembentukan kalsit Kristal pada partikel tanah, dan juga menunjukkan bahwa kristal yang terbentuk tetap pada partikel tanah setelah 10 hari. 4) Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa kalsit meningkat setelah perlakuan mikroba tanah. 5) Perubahan pH tanah selama perlakuan Menunjukkan bahwa pH meningkat dengan penambahan bakteri dan larutan kalsium klorida dan menurun dengan aktivitas bakteri dan pembentukan kalsit. Sebagian besar perubahan terjadi dalam 3 hari pertama.
Wang dkk, 2019	1) Metode <i>Biogrouting</i> , MICP 2) Bakteri dari genus <i>Bacillus</i> , spesies <i>Sporosarcina pasteurii</i>	1) Berdasarkan perlakuan adalah terjadi peningkatan kekuatan dan kekakuan pada pasir kasar. 2) Mampu mempertahankan nilai permeabilitas tanah dalam kisaran $3,76 \times 10^{-6}$ cm/det.

Peneliti	Lingkup Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian Terdahulu
Cheshomi dan Mansouri, 2019	<ol style="list-style-type: none"> 1) Metode <i>Biogrouting</i>, MICP 2) Bakteri dari genus <i>Bacillus</i> spesies <i>Sporosarcina pasteurii</i> 	<p>Dalam penelitian ini, pengaruh ukuran butir, metode infiltrasi, volume suspensi bakteri terinfiltrasi dan larutan fiksasi terinfiltrasi, dan larutan semen pada kekuatan geser pasir kuarsa diselidiki.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Empat metode infiltrasi yang berbeda, Infiltrasi terus menerus memiliki efek terkuat pada kekuatan geser. 2) Kekuatan geser dua ukuran pasir yang berbeda berdasarkan uji geser langsung menunjukkan bahwa pasir dengan ukuran efektif yang lebih besar dan permeabilitas yang lebih tinggi memiliki kekuatan geser 6,2 kali dibandingkan dengan pasir yang tidak diberi perlakuan. 3) Tanah dengan volume bakteri yang di infiltrasi lebih sedikit memiliki kekuatan geser yang lebih tinggi.
Wu dkk, 2019	<ol style="list-style-type: none"> 1) Metode <i>Biogrouting</i>, MICP 2) Bakteri dari genus <i>Bacillus</i> spesies <i>Sporosarcina pasteurii</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Untuk meningkatkan efisiensi <i>biogrouting</i> untuk pasir kasar atau kerikil, metode injeksi premiks dengan atau tanpa pH. 2) Untuk proses <i>biogrouting</i> agregat dengan ukuran butiran mulai dari 0,75 hingga 10 mm, metode injeksi premix yang dilakukan adalah dengan menyuntikkan suspensi bakteri dan larutan sementasi bersama-sama. 3) Peningkatan nilai kuat tekan pada aggregate kasar dengan ukuran butir lebih besar dari 2 mm sedangkan agregat halus dengan ukuran butir 0,75-2 mm perlu mendapatkan perlakuan yang berbeda dalam tahapan injeksi (penyesuaian pH sebelum injeksi).

E. Kerangka Pikir Penelitian

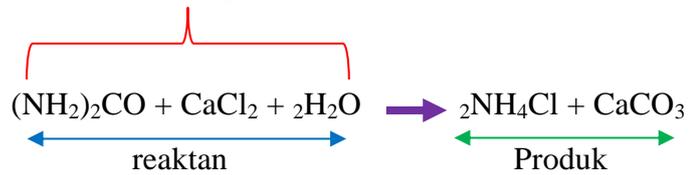


Gambar 4. Kerangka pikir penelitian

Hal utama yang menjadi pertimbangan saat mendesain lapisan kedap air penutup akhir landfill adalah daya dukung tanah. Untuk meningkatkan daya dukung tanah metode perbaikan tanah yang dilakukan adalah dengan bio-stabilisasi menggunakan bakteri. Proses pencampuran ke sampel tanah dengan metode pencampuran langsung. Kemampuan menghasilkan enzim urease adalah syarat utama yang dibutuhkan bakteri untuk memfasilitasi terjadinya presipitasi CaCO_3 dalam proses sementasi. Kalsium karbonat yang terbentuk merupakan bahan utama yang

merekatkan antar butiran tanah, dan meningkatkan kekuatan struktur tanah itu sendiri.

Katalis Biologi = enzim urease bakteri ATCC 6633



Dari hasil pengujian fisik dan mekanis tanah diharapkan kekuatan tanah meningkat, mengurangi permeabilitas tanah, mengurangi retakan dan penyusutan volume tanah.