

DISERTASI

**PERBAIKAN KARAKTERISTIK MEKANIS TANAH
DENGAN TEKNOLOGI BIOSEMENTASI BAKTERI**

*(Soil Mechanical Characteristics Improvement with Bacterial
Biocementation Technology)*

**ALKADRI
D013191005**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI

**PERBAIKAN KARAKTERISTIK MEKANIS TANAH
DENGAN TEKNOLOGI BIOSEMENTASI BAKTERI**

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**ALKADRI
D013191005**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI

**PERBAIKAN KARAKTERISTIK MEKANIS TANAH DENGAN
TEKNOLOGI BIOSEMENTASI BAKTERI**

**ALKADRI
D013191005**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 24 April 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT

NIP. 195910101987031003

Co-Promotor



Prof. Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., MT., IPU., A.E.R
NIP. 197203092000031002

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc
NIP. 197607072005011002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT.
IPM., ASEAN.Eng
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Alkadri
Nomor mahasiswa : D013191005
Program studi : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul **“PERBAIKAN KARAKTERISTIK MEKANIS TANAH DENGAN TEKNOLOGI BIOSEMENTASI BAKTERI”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof Dr. Ir. Abdul Rachman Djameluddin, MT, Prof Dr. Ir. Tri Harianto, ST., MT., IPU., A.E.R, dan Dr. Eng Ardy Arsyad, ST.,MT., A.S.C.E Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (International Journal of GEOMATE, March., 2024 Vol.26, Issue 115, pp.27-33, ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2024.115.4160>, Geotechnique, Construction Materials and Environment. dengan judul **“SOIL MECHANICAL CHARACTERISTICS IMPROVEMENT WITH BACTERIAL BIOCEMENTATION TECHNOLOGY”**

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, April 2024

Yang menyatakan

Alkadri



KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya dan sholawat dan salam kepada junjungan nabi Muhammad SAW yang telah mencerahkan kita dengan ilmu, iman dan amal kepada penulis sampai saat ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan Disertasi yang berjudul “Perbaikan Karakteristik Mekanis Tanah dengan Teknologi Biosementasi Bakteri”.

Disertasi ini disusun dengan dasar pemikiran perbaikan karakteristik mekanis tanah dengan menggunakan biosementasi bakteri *bacillus subtillis* guna memenuhi persyaratan geoteknis dan ramah terhadap lingkungan, biosementasi bakteri merupakan alternative perbaikan tanah seperti pergantian tanah dan penggunaan semen, dan bahan-bahan lainnya yang tidak ramah pada lingkungan serta tidak efektif. Kami berharap bahwa disertasi ini dapat memberikan kontribusi pada pengembangan salah satu alternatif perbaikan tanah dengan metode stabilisasi biosementasi bakteri dan memberikan kontribusi pengembangan ilmu geoteknik, khususnya teknologi stabilisasi biosementasi bakteri

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T sebagai promotor, Prof Dr. Eng Tri Harianto. ST.,MT., IPU., ASEAN.Eng sebagai co-promotor-1, dan Dr. Eng Ardy Arsyad. ST.,M.Eng.Sc.A.S.C.E sebagai co-promotor-2, atas segala bimbingan, arahan, waktu dan ilmu hingga pada tahap pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi ini.
2. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
3. Bapak Prof Dr. Eng Tri Harianto. ST.,MT., IPU., ASEAN.Eng Selaku kepala Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil yang telah mengizinkan kami untuk melaksanakan penelitian di lapangan, dan

kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium

4. Seluruh teman-teman mahasiswa S3 teknik sipil, rekan-rekan mahasiswa konsentrasi Geoteknik serta laboran dan Asisten di Laboratorium Geoteknik
5. Kepada orang tua tercinta kami ayahanda Abd Azis Tabara, ibunda Gunawati serta mertua kami Kapten (P) Drs. Parji, dan Andi Raehan saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan.
6. Kepada saudara-saudara saya (Yoserisal Tabara. ST, Risnawati Tabara. SE, Ir. Ridwan Tabara. ST., M.Si, Alhadis Tabara. SE. M.E, Alpian Tabara. SP, Novi Asmilawati. SP. Jupi Samdias Tabara. S.STP, dan Muh Gibran Tabara S. Ft. Physio serta keluarga atas segala bantuan, nasihat, motivasi dan doanya yang tak putus selama saya menempuh pendidikan
7. Terkhusus untuk istri tercinta Andi Rahmaniar Suciani Pujiningrum, S. Ft, Physio., M.Kes dan ananda Andi Al Izzatul Ahnaf Shaqeel Tabara, Andi Qiana Al Khaela Tabara, terima kasih banyak atas segala dukungan, kesabaran dan pengorbanannya.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna karena disebabkan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan kami, semoga disertasi ini dapat memberi manfaat khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita

Penulis

Alkadri

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN DISERTASI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR	
viii	
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN	
2.1 Kerangka Konseptual	7
2.2 Hipotesis Penelitian.....	18
2.2.1 Penelitian terdahulu.....	19
Daftar Pustaka	29
BAB III KARAKTERSITIK FISIS DAN MEKANIS TANAH DENGAN BIOSEMENTASI BAKTERI	
3.1 Abstrak	32
3.2 Pendahuluan	33
3.3 Metodologi	35
3.3.1 Penyiapan material dan rencana model uji.....	35
3.3.2 Uji pertumbuhan bakteri	37
3.3.3 Pengujian sifat fisik dan mekanis.....	40
3.4 Hasil dan Pembahasan.....	40
3.4.1 Hasil uji sifat fisis tanah	40

3.4.2 Hasil uji sifat mekanis tanah	43
3.4.2.1 Uji kuat tekan bebas	43
3.4.2.2 Uji geser langsung (<i>direct shear test</i>)	52
3.4.2.3 Uji <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	55
3.4.3 Pengujian mikrostruktur	58
3.5 Kesimpulan	60
Daftar Pustaka	61
BAB IV KARAKTERISTIK MEKANIS CAMPURAN TANAH KOHESIF DAN ORGANIK STABILISASI BAKTERI	
4.1 Abstrak	63
4.2 Pendahuluan	64
4.3 Metodologi penelitian.....	68
4.3.1 Penyiapan material	68
4.3.2 Uji pertumbuhan bakteri	70
4.3.3 Pengujian sifat fisik dan mekanis.....	70
4.4 Hasil dan Pembahasan.....	71
4.4.1 Karakteristik tanah organik.....	72
4.4.2 Pengujian kompaksi tanah dan tanah organik.....	73
4.4.3 Uji kuat tekan bebas tanah dan bakteri variasi 10, 20 dan 30% organik	75
4.4.4 Uji <i>direct shear test</i> tanah dan bakteri variasi 10, 20 dan 30% organik	77
4.4.5 Perubahan struktur pada sampel <i>direct shear</i>	79
4.5 Kesimpulan	79
Daftar Pustaka	81
BAB V KINERJA LAPISAN TANAH STABILISASI BAKTERI DENGAN UJI SKALA PENUH LAPANGAN	
5.1 Abstrak	83
5.2 Pendahuluan	84
5.3 Metodologi	88

5.3.1	Penyiapan material	88
5.3.2	Proses pencampuran dan pembuatan media B4	89
5.3.3	Rancangan uji siklus basah kering	90
5.3.4	Pengalihan bak uji lapangan	92
5.3.5	Pengambilan sampel pada bak uji	94
5.4	Hasil dan Pembahasan.....	96
5.4.1	Siklus basah kering tanah dengan sementasi bakteri	96
5.4.1.1	Siklus basah kering dengan umur sampel 0 hari	96
5.4.1.2	Siklus basah kering dengan umur sampel 28 hari.....	97
5.4.1.3	Perubahan struktur permukaan sampel basah kering.....	99
5.4.2	Hasil pengujian kinerja lapis tanah stabilisasi bakteri	100
5.4.2.1	Hasil pemeriksaan karakteristik tanah bak uji	100
5.4.2.2	Hasil uji UCT lapis tanah stabilisasi bakteri	102
5.4.2.3	Hasil uji CBR lapangan biosementasi bakteri.....	106
5.4.2.4	Hasil uji DST lapangan biosementasi bakteri	109
5.5	Kesimpulan	110
	Daftar Pustaka	112
	BAB VI PEMBAHASAN UMUM.....	114

ABSTRAK

Studi ini bertujuan mengembangkan lapisan *subgrade* dengan uji skala lapangan dengan teknologi stabilisasi biosementasi bakteri, larutan bakteri 6%, variasi umur kultur bakteri yaitu 4 hari dengan pemeraman selama 180 hari. Pengujian dilakukan dalam skala lapangan, penelitian ini diawali uji propertis tanah, pengujian bak uji, siklus basah kering, uji pertumbuhan bakteri dan uji mekanis tanah menggunakan larutan bakteri, hasil penelitian menentukan bahwa pengujian sementasi bakteri menunjukkan pola peningkatan nilai kuat tekan pada siklus kering, sedangkan pada siklus basah peningkatan nilai kuat tekan sangat kecil, pada siklus basah 1 masa peram 3 hari nilai q_u 21,62 kN/m², pada masa peram 28 hari, terjadi peningkatan pada siklus basah 1 nilai q_u meningkat 2 kali menjadi 49.25 kN/m², pada siklus kering 1 pemeraman 3 hari, nilai q_u 26.19 kN/m² sedangkan pada siklus kering 1 pemeraman 28 hari nilai q_u meningkat 3 kali yaitu 62.33 kN/m², pada siklus basah 4 umur pemeraman sampel 3 hari nilai q_u 32.65 kN/m², sedangkan pada pemeraman 28 hari nilai q_u 79.98 kN/m², atau meningkat 3 kali. Biosementasi CaCO₃ pada siklus kering cenderung meningkat pada siklus kering, sedangkan pada siklus basah kenaikan nilai q_u sangat rendah. Pengujian Skala model lapangan menemukan bahwa nilai kuat tekan, meningkat seiring pertambahan masa peram, akan tetapi dipengaruhi oleh curah hujan, curah hujan tinggi berakibat pada turunya daya dukung tanah, perbedaan daya dukung terjadi antara layer 1 (0-15 cm) dan layer ke 2 (15-30 cm) pada pengujian 14 hari sampai 45 hari layer 1 memiliki q_u yang tinggi di bandingkan layer 2. sedangkan pada pengujian 60-90 hari layer 2 memiliki nilai q_u yang lebih tinggi. Pada pengujian 180 hari nilai q_u 601 kN/m² dari tanah untrated 36,73 kN/m² atau meningkat 16 kali Pengujian daya dukung dengan alat DCP menemukan bahwa peningkatan nilai CBR terjadi akibat sementasi bakteri, tapi curah hujan tinggi mempengaruhi nilai CBR, seperti pada pengujian 28, 35 dan 45 hari, CBR 3 %. pengujian *direct shear* menunjukkan peningkatan nilai kohesi akibat sementasi bakteri.

Kata Kunci :

Biosementasi, siklus basah kering, Uji Model, DCP, UCT dan DST

ABSTRACT

This study aims to develop a subgrade layer using field scale tests using bacterial biocementation stabilization technology, 6% bacterial solution, varying the age of bacterial culture, namely 4 days with curing for 180 days. Testing was carried out on a field scale, this research began with soil property tests, test tank testing, wet-dry cycles, bacterial growth tests and soil mechanical tests using bacterial solutions. The results of the research determined that bacterial cementation testing showed a pattern of increasing compressive strength values, in the dry cycle, whereas in the wet cycle the increase in the compressive strength value is very small, in the wet cycle 1 curing period of 3 days the value of q_u is 21.62 kN/m², curing period of 28 days, there is an increase in the wet cycle 1 q_u value increases 2 times to 49.25 kN/m², in the dry cycle 1 curing for 3 days, the q_u value is 26.19 kN/m² while in the dry cycle 1 curing 28 days the q_u value increases 3 times, namely 62.33 kN/m², in the wet cycle 4 sample curing ages 3 days the q_u value is 32.65 kN/m², while for 28 days of curing the q_u value was 79.98 kN/m², or an increase of 3 times. CaCO₃ biocementation in the dry cycle tends to increase in the dry cycle, whereas in the wet cycle the increase in q_u value is very low. Field model scale testing found that the compressive strength value increased with increasing drying time, but was influenced by rainfall, high rainfall resulted in a decrease in the soil's bearing capacity, differences in bearing capacity occurred between layer 1 (0-15 cm) and layer 2 (15-30 cm) in the 14 day to 45 day test layer 1 had a higher q_u compared to layer 2. Meanwhile in the 60-90 day test layer 2 had a higher q_u value. In the 180 day test the q_u value was 601 kN/m² from untreated soil 36.73 kN/m² or increased 16 times. Testing the bearing capacity with the DCP tool found that the increase in the CBR value occurred due to bacterial cementation, but high rainfall affected the CBR value, as in the test 28, 35 and 45 days, CBR 3%. Direct shear testing shows an increase in cohesion values due to bacterial cementation.

Keyword

Biosmentation, wet dry cycle, Model Test, DCP, UCT and DST

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan dasar pondasi suatu bangunan yang sangat penting dalam konstruksi, baik untuk konstruksi jalan ataupun konstruksi struktur akan tetapi dalam kenyataannya tidak semua jenis tanah mempunyai sifat baik yang dapat digunakan dalam kegiatan konstruksi jalan ataupun konstruksi struktur. Sifat-sifat dan perilaku tanah akan menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan dan pelaksanaan suatu pekerjaan. Beberapa tahun terakhir ini, perbaikan tanah telah menjadi bagian yang sangat penting dan harus di pikirkan karena kelangkaan tanah yang sesuai semakin sulit untuk di dapatkan serta tingkat pertumbuhan populasi manusia yang terus meningkat.

Karakteristik tanah satu lokasi berbeda dengan tanah di lokasi yang lainnya. Hal inilah yang menjadikan kekuatan dan stabilitas tanah sebagai bagian dari sistem konstruksi sangatlah diperlukan, karakteristik mekanis tanah mempengaruhi besarnya daya dukung tanah serta terhadap beban di atasnya. Beberapa masalah tanah yang kurang baik sehingga menimbulkan masalah Geoteknik diantaranya adalah ketidakstabilan, penurunan jangka panjang, kuat geser rendah, kompresibilitas yang tinggi, ditambah dengan memiliki sifat kembang susut, ketika di musim hujan maupun musim kemarau, akibat dari daya dukung yang rendah dapat menyebabkan kerugian, mulai dari kerugian dari sisi biaya konstruksi yang semakin mahal, terancamnya keselamatan konstruksi, yaitu struktur yang dibuat tidak mampu berdiri secara stabil dan mengurangi umur rencana.

Bowles (1986) menyatakan bahwa tanah merupakan salah satu bahan konstruksi yang langsung tersedia di lapangan, dan apabila tanah dapat dipergunakan secara langsung akan menjadi sangat ekonomis. Konstruksi jalan sering menggunakan tanah dasar dengan daya dukung rendah dan bersifat lunak. Tanah dasar prinsipnya memikul beban lalu lintas menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya kerusakan struktur perkerasan jalan. Teknik perbaikan tanah merupakan tindakan stabilisasi tanah dengan memperbaiki karakteristik tanah

yang asli, hingga memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan oleh konstruksi, seperti peningkatan daya dukung dan kuat geser tanah, penurunan kompresibilitas tanah, peningkatan atau penurunan permeabilitas tanah, dan lain sebagainya.

Secara umum stabilisasi tanah dalam rekayasa Geoteknik terbagi tiga kategori, yaitu: stabilisasi kimia, stabilisasi mekanik, konsolidasi dengan drainase. (Darwis 2017) Stabilisasi kimia prinsipnya menggunakan tambahan zat additif (*admixture*) yang dicampurkan dengan material tanah sehingga terjadi reaksi kimiawi yang mengarah kepada terbentuknya material yang mempunyai spesifikasi teknis yang lebih baik, stabilisasi mekanis meningkatkan kepadatan tanah dengan menggunakan energi mekanis eksternal dalam jangka waktu yang singkat (pemadatan) serat stabilisasi hidraulik prinsipnya mengeluarkan air pori dari dalam tanah melalui drainase, stabilisasi fisik, suatu bahan perkuatan seperti geotekstil dimasukkan atau disusun pada lapisan tanah untuk memperkuat tanah. di antara metode ini, stabilisasi kimia berupa kapur, *fly ash*, semen. Pozzolan, bentonite dan lainnya, merupakan cara yang paling banyak digunakan, dimana mineralogi struktur tanah diubah oleh zat kimia tambahan (misalnya semen atau kapur) untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik properti tanah. Jason de jong menemukan bahwa ada beberapa kekurangan yang diakibatkan oleh perbaikan tanah, seperti instalasi alat yang relatif sulit, penggunaan sebagai bahan yang tak ramah lingkungan sebab semen sebagai penghasil karbon yang besar, semen adalah sumber dari sekitar 8% emisi karbon dioksida (CO₂) dunia, menurut lembaga penelitian Chatham House (Rodgers 2018) material buatan manusia yang paling banyak digunakan, kedua terbanyak setelah air sebagai sumber daya yang paling banyak dikonsumsi di planet ini, meskipun semen adalah bahan utama dalam beton telah membentuk banyak lingkungan kita, berbagai macam penggunaan mikroorganisme dalam salah satu penggunaan bakteri seperti yang oleh Reynold mengatakan bahwa salah satu penggunaan bakteri untuk mengolah limbah secara biologi dikenal dengan biodegradasi, yaitu proses oksidasi senyawa organik oleh mikroorganisme, baik di tanah, perairan, atau pada instalasi pengolahan air limbah (Dwipayana et al. 2009) Pengolahan limbah secara biologi dipilih karena membutuhkan biaya yang relatif sedikit dan menghasilkan lumpur

hasil pengolahan yang tidak terlalu banyak bila dibandingkan dengan pengolahan secara kimia atau fisik

Biosementasi adalah cabang baru yang dikembangkan dalam bidang teknik geoteknik yang berhubungan dengan penerapan aktivitas mikrobiologi untuk meningkatkan sifat rekayasa tanah. Salah satu yang paling banyak proses yang umum diadopsi untuk mencapai biocementasi tanah adalah melalui kalsit yang diinduksi secara mikroba (MICP). Penggunaan mikroorganisme sebagai katalis potensial dalam biosementasi tanah adalah yang pertama disarankan oleh Whiffin (2004) dalam disertasinya yang berjudul *Microbial CaCo precipitation for the production of bio cement*, Murdoch University, dan Mitchell dan Santamarina (2005). Dalam artikelnya yang berjudul *Biological considerations in geotechnical engineering* sejak itu, banyak penelitian tentang pemanfaatan, mikroorganisme kemajuan pesat tinggi di bidang ini. Teknik ini memanfaatkan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit (CaCO_3) yang mengikat partikel-partikel tanah bersama-sama, menyebabkan peningkatan kekuatan dan kekakuan tanah (Mujah et al. 2017). Penelitian yang dilakukan oleh Jason de Jong *Bio-Mediated Soil Improvement* menemukan bahwa peluang baru untuk memanfaatkan proses biologis untuk memodifikasi sifat-sifat pada tanah (DeJong et al. 2010), melalui penelitian interdisipliner mikrobiologi, geokimia dan teknik sipil, bermula dari penelitian inilah kemudahan riset-riset tentang biosementasi bakteri mulai berkembang, (Mortensen dkk 2011) riset *Strength and Stiffness of MICP Treated Sand Subjected to Various Stress Paths* yang menemukan bahwa Presipitasi kalsit yang diinduksi mikroba (MICP) meningkatkan kekuatan dan kekakuan endapan pasir lepas, meningkatkan ketahanan terhadap likuifaksi tanah akibat seismik dengan menggunakan bakteri *Sporosarcina pasteurii*. beberapa riset tentang penggunaan mikroorganisme dianggap sebagai alternatif di tengah maraknya bahan-bahan kimia dan sintesis pada konstruksi sipil, studi tentang presipitasi kalsium karbonat yang diinduksi secara mikrobiologis (MICP) menunjukkan bahwa proses ini mendorong pengendapan CaCO_3 pada partikel tanah, yang menginduksi pembentukan ikatan antara partikel tanah (Oliveira et al. 2017), lalu mulai dikembangkan oleh pembentukan efektif CaCO_3 akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan lapisan subgrade dengan tetap menjaga karakteristik

permeabilitas (Mujah et al. 2019). Bakteri *Pararhodobacter Sp* mampu mereduksi logam timbal (Pb) dan meningkatkan nilai kuat tekan bebas (Mwandira et al. 2017). Penambahan bakteri untuk stabilisasi tanah lempung berpasir dengan metode bio-grouting berhasil meningkatkan daya dukung tanah (Harianto et al. 2020), Tanah organik tropis beserta penambahan pasir dengan menggunakan metode perlakuan pra-pencampuran dengan masa pemeraman 3 hari. Nilai *unconfined compressive strength* (UCS) meningkat. (Phang et al. 2018). Penggunaan mikroorganisme untuk mendegradasi polutan ternyata juga memberikan dampak yang positif dalam bidang geoteknik, karena beberapa mikroorganisme yang digunakan ternyata juga menghasilkan mineral kalsium yang dapat meningkatkan sifat-sifat geoteknik tanah atau yang dikenal dengan istilah biosementasi. Saat ini alternative biostabilisasi ramah lingkungan semakin berkembang dengan pemanfaatan mikroorganisme, metode biostabilisasi tanah lunak dengan bakteri *bacillus subtilis* diyakini dapat memperbaiki karakteristik tanah dengan meningkatkan kekuatan tanah pondasi bangunan, mengurangi kompressibilitas dan permeabilitas, dan mengurangi variasi volume dari pengembangan

Penggunaan bakteri *Bacillus subtilis* pada penelitian ini disebabkan bakteri jenis ini merupakan salah satu bakteri tanah yang memiliki membran sel luar yang sangat tebal sehingga mampu bertahan hidup pada lingkungan dengan kondisi basa yang cukup tinggi dan dapat membentuk spora (Nicholson et al. 2000). Iklim tropis di Indonesia dipengaruhi oleh dua faktor musim yaitu musim kemarau dan musim hujan yang dapat berpengaruh pada karakteristik tanah maupun perilaku mekanis tanah, sehingga peneliti mencoba melakukan pengujian siklus basah dan siklus kering untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada tanah dengan penambahan bakteri dan pengujian lapangan (*full scale*) diperlukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanis pada tanah.

Beberapa penelitian terkait dengan biosementasi bakteri, diantara yang dilakukan oleh Hasriana (2018) menemukan bahwa daya dukung tanah lempung plastisitas tinggi dengan stabilisasi bakteri (*Bacillus subtilis*). Pertumbuhan bakteri dengan fase 3 dan 6 hari digunakan sebagai bahan stabilisasi. Penilaian daya dukung didasarkan pada nilai kuat tekan bebas, *California Bearing Ratio*

(CBR), dan modulus reaksi tanah sebagai lapisan *subbase*. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan cenderung meningkat dengan penambahan 2% sampai 6% bakteri dan menurun dengan 8% bakteri. Fenomena ini sesuai dengan peningkatan nilai CaO akibat pengendapan kalsit yang diinduksi mikroba (MICP) (Hasriana et al. 2018) penelitian ini juga dilakukan oleh Andi marini (2021) menemukan bahwa hasil uji tekan bebas untuk melihat pengaruh presipitasi kalsit CaCO_3 terhadap perilaku kuat tekan bebas pasir terkontaminasi batubara, variasi konsentrasi *Bacillus subtilis* diaplikasikan sebanyak 3%, 4.5%, dan 6% pada pasir yang terkontaminasi batubara. Bakteri yang digunakan adalah kultur 3 hari masih dalam fase stasioner dan 6 hari kultur dalam fase mati. Setelah 28 hari pemeraman, terdapat peningkatan yang signifikan pada nilai UCS dari tanah yang distabilkan dengan MICP dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan (Indriani et al. 2021) ke dua penelitian tersebut dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga perlu dilakukan pengembangan penelitian selanjutnya terkait dengan sementasi bakteri *Bacillus subtilis* dengan pengujian siklus basah kering dan model pengujian lapangan (*full scale*). Berdasarkan uraian tersebut maka kami tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “Perbaikan Karakteristik Mekanis Tanah dengan Teknologi Biosementasi Bakteri”

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang masalah, rumusan masalah yang akan dikaji adalah :

1. Bagaimana karakteristik fisik, mekanis dan mikrostruktur tanah dengan biosementasi bakteri?
2. Bagaimana pengaruh biosementasi bakteri terhadap karakteristik mekanis campuran tanah kohesif dan organik ?
3. Bagaimana kinerja model tanah dengan teknologi stabilisasi biosmentasi bakteri sebagai lapisan tanah dasar?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik fisis, mekanis dan mikrostruktur tanah dengan biosementasi bakteri

2. Menganalisis pengaruh biosementasi bakteri terhadap karakteristik mekanis campuran tanah kohesif dan organik
3. Mengembangkan lapisan subgrade dengan teknologi stabilisasi biosementasi bakteri sebagai lapisan tanah dasar dengan uji skala lapangan

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini mencakup pengujian eksperimental laboratorium dan skala lapangan (*full scale*) dalam pelaksanaannya dilakukan beberapa pembatasan masalah yaitu :

- 1 Tanah yang digunakan berasal dari tanah sekitar kampus teknik (Gowa) dan tanah organik yang di gunakan merupakan tanah organik kadar tinggi
- 2 Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*
- 3 Bak uji lapangan digunakan dengan ukuran panjang 200 cm, lebar 50 cm dan kedalaman 30 cm dan waktu pengujian selama 180 hari

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

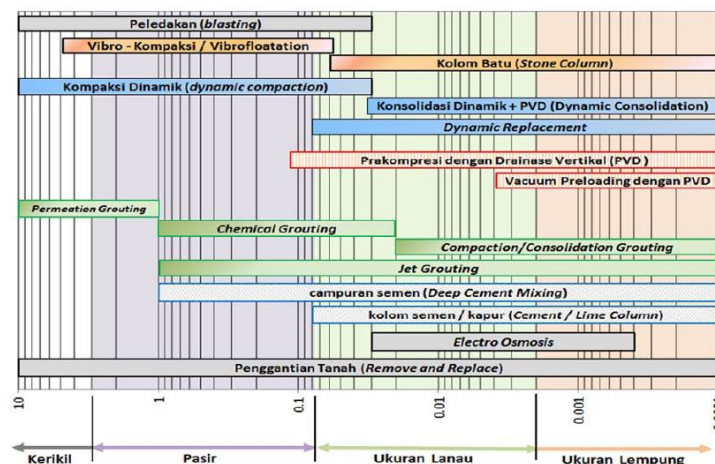
1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan salah satu alternatif perbaikan tanah dengan metode stabilisasi biosementasi bakteri
2. Hasil analisis dapat memberikan kontribusi pengembangan ilmu Geoteknik, khususnya teknologi stabilisasi biosementasi bakteri

BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

2.1 Kerangka Konseptual

Salah satu cabang baru dalam bidang teknik geoteknik adalah biosementasi, yang berkaitan dengan penggunaan aktivitas mikrobiologi untuk meningkatkan sifat rekayasa tanah. Kalsit yang secara mikrobiologis presipitasi kalsium karbonat (MICP) adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mencapai biosementasi tanah. Proses ini menggunakan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit (CaCO_3), yang mengikat partikel tanah bersama-sama, meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah. Sifat-sifat dan perilaku tanah akan menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan dan pelaksanaan suatu pekerjaan, perbaikan tanah telah menjadi bagian yang sangat penting dan harus di pikirkan karena kelangkaan tanah yang sesuai semakin sulit untuk di dapatkan serta tingkat pertumbuhan populasi manusia yang terus meningkat. Beberapa cara yang digunakan dalam perbaikan mekanis tanah seperti yang di atur dalam SNI 8460 persyaratan dan perancangan Geoteknik. Sistem perbaikan tanah meliputi penyuntikan semen (*grouting*), *deep mixing*, pemadatan dalam, teknik prakompresi dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), dan metode hampa udara (*vacuum preloading*), (Badan Standarisasi Nasional 2017), seperti terlihat pada Gambar 1.

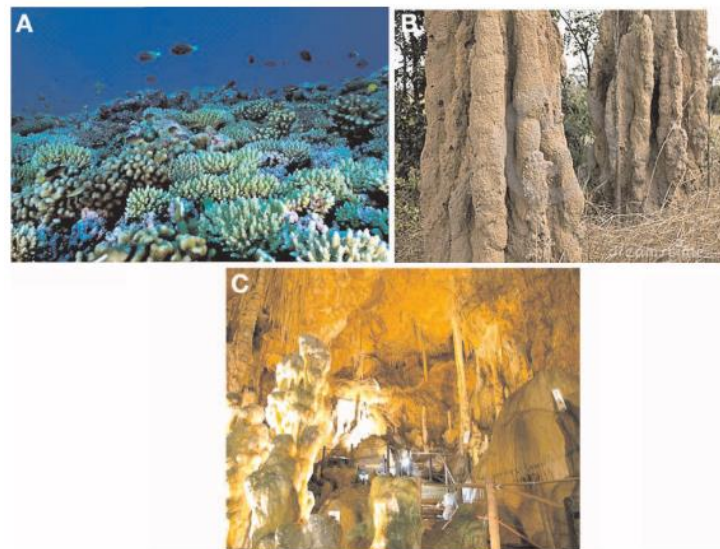


Gambar 1. Jenis-jenis perbaikan tanah (SNI 8460:2017)

Tujuan utama perbaikan tanah adalah untuk meningkatkan kepadatan, kuat geser tanah, dan/atau ketahanan likuifaksi; serta untuk mengurangi kompresibilitas, permeabilitas, dan penurunan tanah. Perbaikan tanah dilakukan hingga karakteristik tanah setempat tersebut berubah secara permanen dan memiliki karakteristik yang memadai, mencapai tingkat aman yang diharapkan. Menurut Jason de Jong ada beberapa masalah yang ditimbulkan dalam teknik perbaikan tanah, yaitu instalasi alat yang relatif besar, biaya mobilisasi, waktu pemasangan, yang kedua adalah terjadinya pencemaran yang di akibatkan oleh material yang tidak ramah lingkungan dengan menyuntikkan bahan buatan sintetis, seperti semen, epoksi, akrilamida, fenoplast, silikat, dan poliuretan ke dalam ruang pori untuk mengikat partikel tanah, (DeJong et al. 2010) yang ketiga adalah pergantian material di anggap tidak ekonomis dan sejalan yang di temukan oleh Bowles menyatakan bahwa tanah merupakan salah satu bahan konstruksi yang langsung tersedia di lapangan, dan apabila tanah dapat dipergunakan secara langsung akan menjadi sangat ekonomis. Sehingga dibutuhkan alternatif cara baru dalam hal meningkatkan sifat-sifat tanah yang ramah lingkungan, Biosementasi adalah suatu metode perbaikan tanah dengan memanfaatkan kemampuan bakteri yang hidup di dalam tanah untuk menghasilkan enzim urease, enzim mengkatalisis satu hidrolisis dari urea menjadi karbon dioksida dan amonia (Mujah et al. 2017)

Pesatnya perkembangan sektor konstruksi telah menyebabkan penggunaan konstruksi secara masif bahan dasar alam yang beresiko habis. Industri konstruksi berkontribusi terhadap pembangunan ekonomi dan sosial yang masif di dunia. Namun, ia memiliki dampak yang luas karena konsumsi energi yang tinggi, dari tahap produksi bahan baku sampai pada tahap konstruksi struktur. Di seluruh dunia, produksi semen terus meningkat, dan itu diketahui sekitar empat miliar ton semen dihasilkan per tahun, beton merupakan material kedua yang paling banyak digunakan di dunia setelah air (Krishnapriya et al. 2015). Implikasi dari masalah tersebut sehingga para pemimpin industri semen berada di Polandia dalam konferensi perubahan iklim PBB membahas cara-cara memenuhi persyaratan perjanjian Paris tentang perubahan iklim, salah satu kesepakatannya adalah penggunaan semen harus turun 16% pada tahun 2030 (Rodgers 2018). Presipitasi kalsium karbonat yang diinduksi mikroba (MICP), metode perbaikan tanah yang

berkelanjutan dan efektif, telah mengalami perkembangan yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. metode bio-mediated yang menggunakan proses metabolisme bakteri untuk menyebabkan pengendapan CaCO_3 di ruang pori tanah (Yu et al. 2021). Teknik ini memiliki potensi besar dalam bidang rekayasa geoteknik untuk meningkatkan sifat tanah. Kristal kalsium karbonat (CaCO_3) yang terbentuk dari teknologi ini akan menjadi jembatan antara butiran pasir sehingga menyebabkan proses sementasi, dan mengubah pasir menjadi batuan pasir. Secara alami, proses ini memerlukan waktu hingga jutaan tahun, oleh karena itu digunakan bakteri untuk mempercepat proses pembentukan kalsit dengan memanfaatkan proses presipitasi karbonat hasil aktivitas metabolisme bakteri seperti terlihat pada Gambar 2

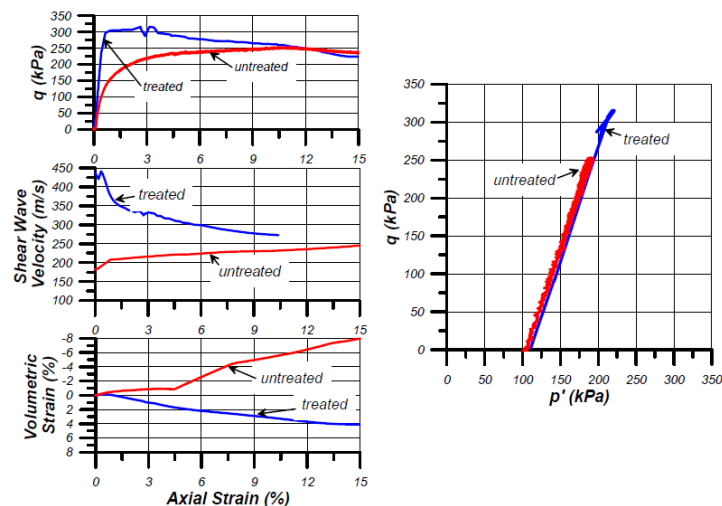


Gambar 2. Biomineral alam (Dhami et al. 2013)

Pada gambar 2 (a) Coral (b) rumah semut (c) batu kapur, dalam kondisi alami merupakan hasil biomineral alam dengan pengendapan karbonat terjadi sangat lambat dalam waktu yang lama tetapi, para peneliti menemukan jenis organisme yang mampu menghasilkan karbonat dalam jumlah besar dalam waktu singkat, beberapa bakteri yang mampu pengendapan presipitasi kalsium karbonat melalui hidrolisis urea, bakteri tersebut antara lain *Bacillus pasteurii*, *Sporosarcina pasteurii*, *Pseudomonas sp.*, *Variovorax sp.*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Micrococcus sp.*, *Bacillus subtilis*, *Deleya halophila*, *Halomonas eurihalina* dan *Myxococcus xanthu* (Dhami et al. 2013). Penelitian yang dilakukan oleh Anjaa

Royne 2019 menemukan bahwa Produksi beton untuk keperluan konstruksi merupakan sumber utama Emisi CO₂. Salah satu alternatif yang menjanjikan menuju industri konstruksi yang lebih berkelanjutan adalah untuk memanfaatkan interaksi mineral-mikroba yang terjadi secara alami, seperti yang diinduksi oleh mikroba karbonat presipitasi (MICP), untuk menghasilkan bahan padat dengan menggunakan bakteri *Sporosarcina pasteurii* (Røyne et al. 2019)

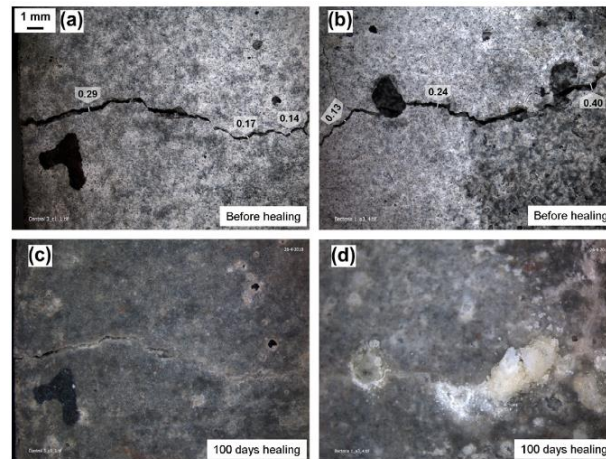
Presipitasi kalsit yang diinduksi mikroba (MICP) dengan menggunakan bakteri *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859) meningkatkan kekuatan dan kekakuan endapan pasir lepas, meningkatkan ketahanan terhadap likuifaksi tanah akibat seismik. Tes triaksial digunakan untuk mengevaluasi evolusi kekakuan dan kekuatan pada spesimen yang mengalami tegangan peningkatan geser normalisasi puncak kekuatan hingga sekitar 1,5 kali dari sampel yang diperlakukan. (Mortensen. DeJong 2011) seperti terlihat pada Gambar 3



Gambar 3. Uji kompresi triaksial spesimen yang diberi perlakuan MICP dan tidak terstabilisasi (Mortensen et al.,2011)

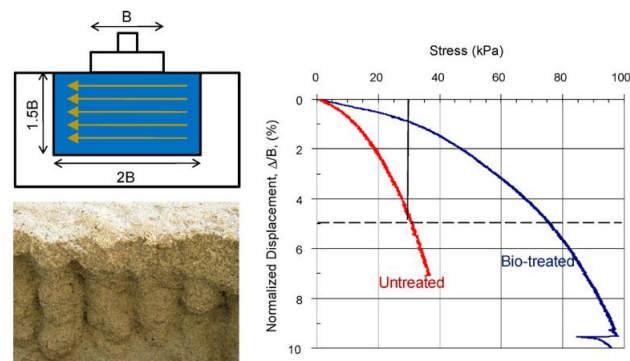
Penelitian yang dilakukan oleh Virginie Wiktor dkk terkait tentang Pembentukan retakan pada adalah fenomena yang biasa terjadi struktur beton. Meskipun retak mikro hampir tidak mempengaruhi sifat struktural konstruksi, permeabilitas meningkat karena retak mikro jaringan secara substansial dapat mengurangi daya tahan struktur beton karena risiko masuknya zat aktif terutama di lingkungan lembab. Sejumlah penelitian menemukan, retakan kecil pada beton dapat diatasi Fenomena ini dikenal sebagai 'penyembuhan autogenous' atau

'penyembuhan diri' dari beton. Penyebab utama penyembuhan autogenik berdasarkan kimia, fisik, dan mekanik proses, namun, presipitasi kalsium karbonat memiliki faktor paling signifikan yang mempengaruhi pemeraman autogen beton seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Foto stereomikroskopis proses pemeraman retak pada spesimen mortar. (a) dan (b) sebelum pemeraman, (c) dan (d) setelah pemeraman 100 hari (Wiktor et al., 2011)

Pada gambar 4 komponen biokimia terdiri campuran kalsium laktat dan spora bakteri *bacillus alkalinitrilicus* bakteri diperoleh dari tanah danau bakteri tanah, menunjukkan pemeraman retakan hingga 0,46 mm lebar retakan pada bakteri beton tetapi hanya retakan selebar 0,18 mm pada spesimen kontrol setelah 100 hari perendaman dalam air, seperti terlihat pada gambar (Wiktor et al. 2011). DeJong 2010 mencoba memodelkan experimental lapangan pada pondasi dangkal dengan pemanfaatan biosementasi bakteri pada Gambar 5.



Gambar 5. Eksperimen stabilisasi tanah biosementasi pada pondasi dangkal (DeJong et al. 2010)

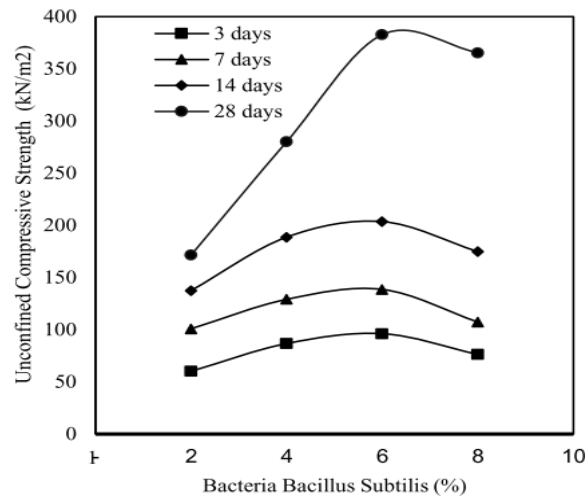
Gambar 5 menunjukkan zona tanah di bawah pondasi mengakibatkan penurunan yang disebabkan oleh pembebanan pondasi dangkal dengan stabilisasi biosementasi berkurang hingga lima kali lipat yaitu 30 kPa, di bandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi (*untreated*). Grouting adalah salah satu proses sementasi yang dapat meningkatkan stabilitas pada konstruksi. Teknik ini dapat diaplikasikan dengan cara memasukan bahan grouting ke dalam lubang yang dibuat menggunakan bor maupun retakan pada konstruksi yang tidak stabil seperti yang dilakukan oleh Van Paassen (2011), tes skala besar di atas pasir dengan volume 100 m³, menggunakan bakteri *Sporosarcina pasteurii*, spesies bakteri yang mengandung sejumlah besar enzim urease. Uji penguatan grouting bakteri mikroba larutan, sementasi dari sumur injeksi, selama 12 hari, ditemukan pasir yang tersementasi 43 m³ berhasil diikat sebagai badan pasir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Biogrouting sementasi(a) pasir sebanyak 100 m³ dan (b) pasir yang tersementasi sebanyak 43 m³ (Van Paassen 2011)

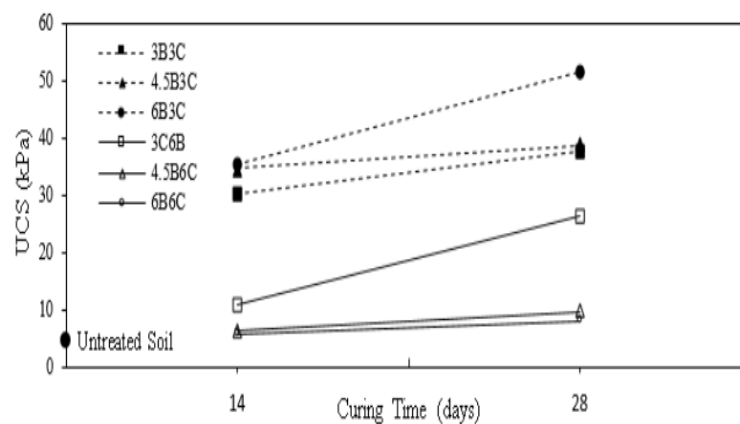
Hasriana 2018 menemukan bahwa terjadi peningkatan signifikan dengan penggunaan bakteri setelah umur pemeraman 28 hari, seperti terlihat pada Gambar 7. menunjukkan kekuatan tanah lempung dengan stabilisasi bakteri *bacillus subtilis* pada konsentrasi 2%-8% Nilai kuat tekan meningkat secara signifikan seiring dengan penambahan bakteri dan peningkatan waktu pemeraman. Dengan Ca²⁺ terlarut + di lingkungan sekitarnya, itu menghasilkan kristal padat kalsit/kalsium karbonat (CaCO₃) yang akan berikatan erat dan menyebabkan tanah menjadi keras. Nilai kuat tekan meningkat secara optimal selama

penggunaan bakteri sebesar 6% tersebut adalah 382 kN/m², karena peningkatan partikel kepadatan disebabkan oleh MICP (Hasriana et al. 2018)



Gambar 7. Hasil uji tekan bebas pada tanah (Hasriana et al., 2018)

Penelitian yang di lakukan oleh Andi Marini dkk menemukan bahwa material tanah bekas tambang dapat digunakan kembali sebagai material konstruksi jalan dengan meningkatkan sifat mekanik dengan Presipitasi kalsit yang diinduksi mikroba (MICP) adalah teknik perbaikan tanah dengan menggunakan mikroorganismen yang mampu mengubah dan meningkatkan sifat mekanik dan fisik mereka, dengan uji UCT, digunakan untuk melihat pengaruh presipitasi kalsit terhadap perilaku kuat tekan bebas pasir yang terkontaminasi batubara. Variasi konsentrasi *bacillus subtilis* yang diaplikasikan sebanyak 3%, 4,5%, dan 6% pada pasir yang terkontaminasi batubara, seperti Gambar 8



Gambar 8. Hubungan nilai UCS dengan pengaruh kandungan batubara, kultur, konsentrasi, dan masa pemeraman (Marini et al., 2021)

Pada gambar 8 menggambarkan setelah 28 hari pemeraman, terjadi peningkatan yang signifikan nilai UCS dari tanah yang distabilkan MICP dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan. Pada kondisi optimum, Nilai UCS meningkat hingga 15 kali lipat setelah masa pemeraman 28 hari. sehingga bahan lahan bekas tambang setelah diolah dengan MICP menggunakan *Bacillus subtilis*, dapat digunakan kembali dan memenuhi syarat sebagai bahan konstruksi jalan. (Indriani et al. 2021)

Penelitian yang dilakukan oleh Dwipayana 2019 menemukan bahwa laju pertumbuhan mikroorganisme diukur dengan menumbuhkan isolate setiap kultur bakteri murni dan campuran dalam media kaldu nutrisi (NB), diinkubasi pada 37°C dan dilakukan pengukuran nilai OD setiap satu jam sekali selama 24 jam. Kurva pertumbuhan dari kultur murni dan campuran diplot pada skala logaritmik, waktu generasi dan konstanta laju pertumbuhan untuk masing-masing bakteri

Tabel 1. Waktu generasi dan konstanta laju pertumbuhan untuk masing-masing bakteri (Dwipayana et al. 2009)

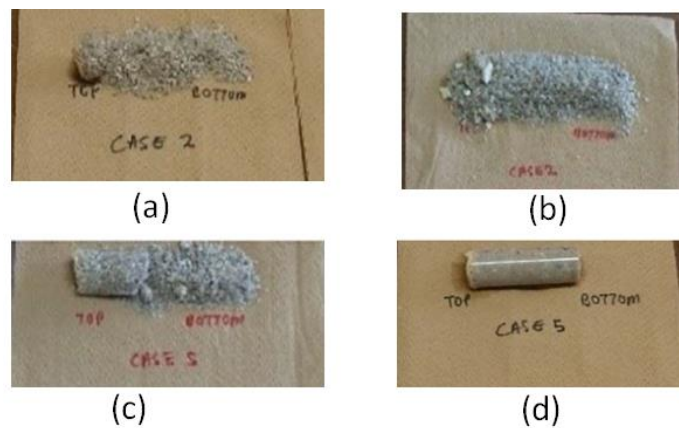
Bakteri	Waktu generasi (menit)	Konstanta laju pertumbuhan (jam-1)
Pseudomonas		
Flourescens	44,67	0,93
Bacillus subtilis	45,04	0,92
Bacillus licheniformis	35,42	1,17
Bacillus cereus	18,29	2,27
Bacillus megaterium	19,04	2,18
Bakteri konsorsium	52,70	0,79

Waktu generasi dari masing-masing bakteri memiliki nilai yang berbeda dan berkisar antara 18,29 menit hingga 52,70 menit. Konstanta laju pertumbuhan dari masing-masing bakteri juga memiliki nilai yang berbeda, yang tergantung pada kemampuan metabolisme masing-masing bakteri (Dwipayana et al. 2009). Proses pengendapan kalsium karbonat (CaCO_3) sangat mudah. Mekanisme MICP yang dapat dikontrol yang dapat menghasilkan CaCO_3 dalam konsentrasi tinggi dan waktu yang singkat (Dhami et al. 2013). Kalsium karbonat, CaCO_3 , yang diinduksi dari mikroba dipengaruhi oleh 4 faktor yaitu (Hammes et al. 2002):

1. Konsentrasi kalsium,
2. Konsentrasi karbon anorganik terlarut (DIC),

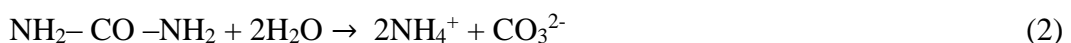
3. pH (Potensial of Hydrogen) derajat keasaman
4. Ketersediaan nukleasi.

Kalsium karbonat dalam bentuk vaterit dan kalsit yang terbentuk saat proses biomineralisasi melalui mediasi oleh bakteri (Cheng et al. 2014). Mwandira dkk meneliti dengan membandingkan hasil injeksi perbedaan polimorf kalsium karbonat dalam bentuk kalsit yang terbentuk ketika terjadi biomineralisasi melalui mediasi oleh bakteri seperti pada Gambar 9



Gambar 9. Perubahan struktur pasir setelah distabilisasi bakteri (a) satu kali injeksi (b) dua kali injeksi (c) empat kali injeksi (d) tujuh kali injeksi (Mwandira et al., 2017)

Gambar 9 menampilkan sampel tanah pasir yang telah distabilisasi oleh biosementasi bakteri terlihat perbedaan tekstur kekerasan tanah akibat sementasi bakteri dengan injeksi yang variatif dari 1 sampai 7 kali injeksi, umur pemeraman 14 hari. Proses sementasi pada umur 14 hari terlihat struktur permukaan pasir terlihat kaku dan keras. Mekanisme MICP berbasis ureolisis adalah Bakteri penghasil urease dapat menyerap Ca^{2+} di permukaan sel dari lingkungan sekitar, dan pada saat yang sama, urea dapat diuraikan menjadi CO_3^{2-} , HCO_3^- , NH_4^+ oleh urease disekresikan dari sel. Saat Ca^{2+} mengikat CO_3^{2-} , sejumlah besar kristal kalsium karbonat dapat di bentuk pada permukaan sell (tang et al. 2020). Reaksi utama persamaan adalah sebagai berikut (DeJong dan Fritzges 2006):

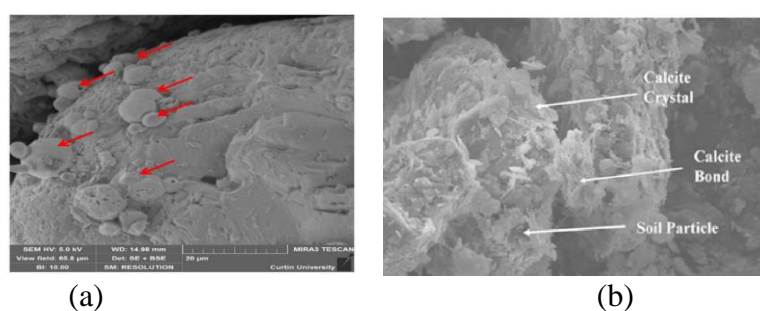




Biosementasi memanfaatkan kemampuan bakteri yang ada di dalam tanah untuk menghasilkan enzim urease, enzim ini menghidrolisis urea menjadi amonia dan karbon dioksida.

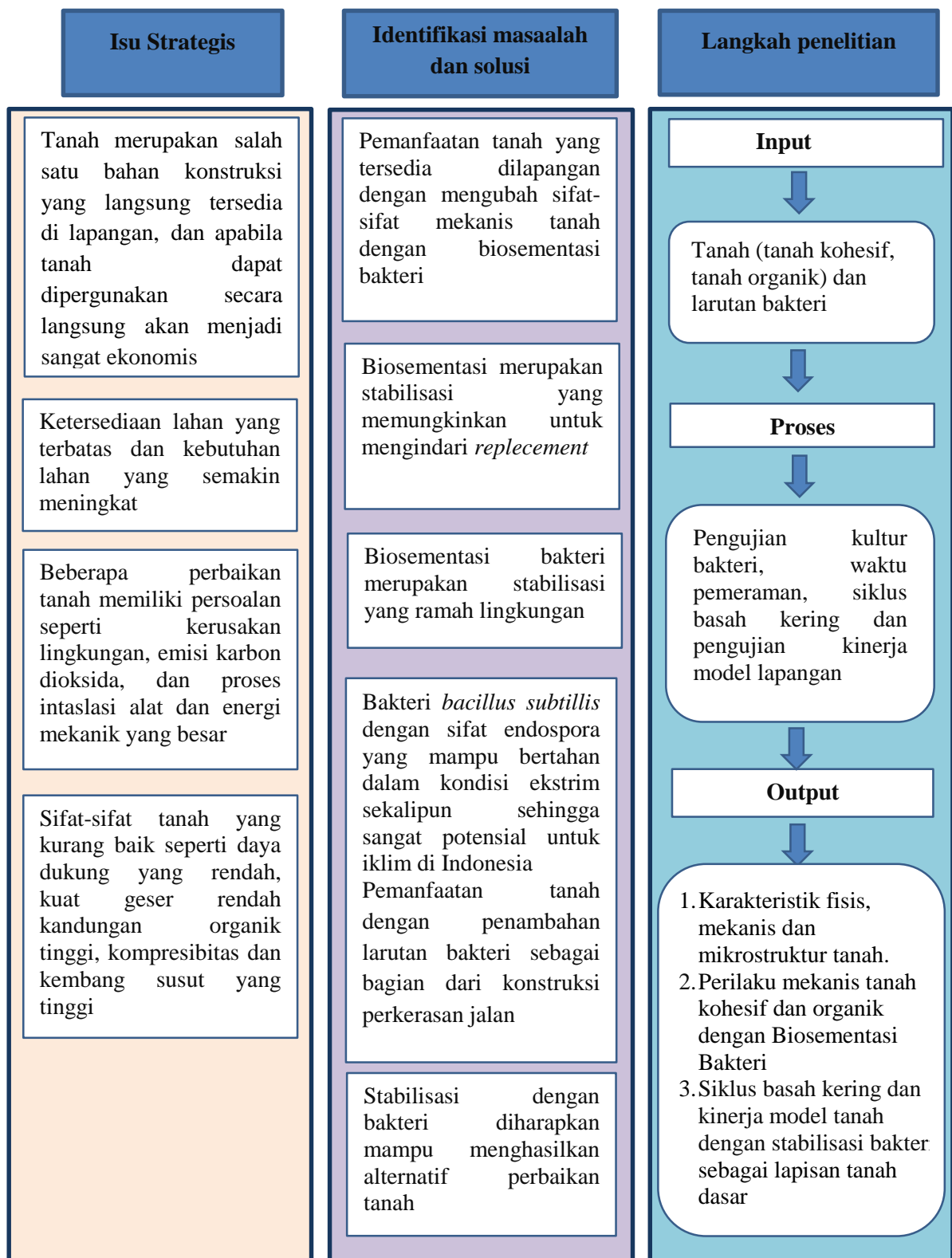


Disribusi sebaran calsit pada partikel tanah menurut Mujah (2019) dan Soon (2014) dapat dilihat pada Gambar 10



Gambar 10. Hasil Uji SEM (a) Pembentukan endapan *calcite* pada pasir berbentuk bola (Mujah et al. 2019) (b) Distribusi kalsium karbonat (Soon et al., 2014)

Gambar 10 menampilkan hasil pengujian mikrostruktur SEM pada tanah terlihat ikatan *calcite* yang mengikat partikel tanah dan crystal *calcite* yang berwarna agak keputihan, pertumbuhan kristal yang ditunjukkan oleh panah merah yang gugus kristal yang menghasilkan mesokristal yang berturut-turut membentuk kristal CaCO_3 sehingga membuat tanah menjadi kaku dan keras. Dalam penelitian ini secara umum kerangka penelitian dijabarkan seperti pada Gambar 11. Menurut Donovan dkk dalam arielnya yang berjudul *state of the art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization* penerapan pengujian lapangan biocementasi tanah lebih sangat perlu dilakukan dan sedang disesuaikan untuk memeriksa efek peningkatan proses MICP pada kolom tanah yang lebih panjang dan area perbaikan yang lebih besar, beberapa penerapan pada penelitian masa depan seperti, *Self healing soils, Slope stabilization, Settlement reduction, Erosion control, Liquefaction prevention*. sangat penting untuk dilakukan.



Gambar 11. Kerangka pikir penelitian perbaikan karakteristik mekanis tanah dengan teknologi biosementasi bakteri

2.2 Hipotesis Penelitian

Hipotesis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan karakteristik fisis, mekanis dan mikrostruktur tanah dengan biosementasi bakteri
2. Perilaku mekanis pencampuran tanah dan tanah organik kadar tinggi terstabilisasi bakteri
3. Perilaku mekanik tanah terstabilisasi bakteri akibat variasi kondisi basah kering
4. Mendapatkan model lapisan subgrade dengan uji skala lapangan stabilisasi biosementasi bakteri

2.2.1 Penelitian terdahulu

Penelitian - penelitian terdahulu yang dipublikasikan dan terkait dengan topik rencana penelitian

Tabel 2. Penelitian terdahulu yang di publikasikan terkait dengan topik penelitian

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Output dan Outcome
1	Wilson Mwandiraa, Kazunori Nakashimab, Satoru Kawasakib (2017)	<i>Bioremediation of lead-contaminated mine waste by Pararhodobacter sp. based on the microbially induced calcium carbonate precipitation technique and its effects on strength of coarse and fine grained sand</i>	Ecological Engineering 109 (2017) 57–64 http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.011	Pengaruh penggunaan bakteri Pararhodobacter sp. berdasarkan teknik pengendapan kalsium karbonat yang diinduksi secara mikroba dan pengaruhnya terhadap kekuatan pasir kasar dan berbutir halus	Dengan injeksi bakteri Pararhodobacter sp. sebanyak tujuh kali mampu meningkatkan nilai unconfined compressive strength (UCS) sebesar 1,33 MPa untuk pasir halus, 2,87 MPa untuk pasir kasar dan 2,80 MPa untuk pasir campuran
2	Donovan Mujah, Liang Cheng, and Mohamed A. Shahin, (2019)	<i>Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Process.</i>	J. Mater. Civ. Eng., 2019, 31(4): 04019025 DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002660	Perbedaan kultur bakteri (BC) dan larutan sementasi (CS) untuk mengevaluasi kombinasi BC dan CS yang optimal yang menghasilkan kekuatan tanah tertinggi.	Sampel pasir yang diuji dengan perbedaan kultur bakteri (BC) dan larutan sementasi (CS) untuk mengevaluasi kombinasi BC dan CS yang optimal yang menghasilkan kekuatan tanah tertinggi. Ditemukan bahwa untuk kondisi CS yang lebih rendah (0,25 M), BC yang lebih tinggi menghasilkan sampel yang lebih kuat, sedangkan untuk kondisi CS yang lebih tinggi (0,5 M atau 1 M), BC yang lebih rendah lebih dominan dalam meningkatkan kekuatan tanah
3	Siddhartha Mukherje,	<i>Application of Microbial-Induced Carbonate</i>	Ground Improvement	Mengetahui efektivitas MICP teknik pada	Dalam penelitian ini, tiga spesies bakteri aerob alkaliphelic positif urease, yaitu

	R. B. Sahu, Joydeep Mukherjee, (2018)	<i>Precipitation for Soil Improvement via Ureolysis</i>	Techniques and Geosynthetics, Lecture Notes in Civil Engineering 14	tanah berbutir halus seperti lempung atau lempung berpasir dalam memperbaiki gesernya kekuatan	Sporosarcina pasteurii, Bacillus megatarium, dan Morganella morgani digunakan untuk ureolisis dan presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba dapat menghasilkan peningkatan kekuatan tanah yang terukur.
4	Jin-Hoon Jeong ¹ , Yoon-Soo Jo, Chang-Seon Park, Chang-Ho Kang, and Jae-Seong So. (2017)	<i>Biocementation of Concrete Pavements Using Microbially Induced Calcite Precipitation</i>	J. Microbiol. Biotechnol. (2017), 27(7), 1331–1335 https://doi.org/10.4014/jmb.1701.01041	Pengaruh penambahan bakteri pada campuran beton	Bakteri pembentuk kalsit ke dalam perkerasan beton meningkatkan kinerja mekanik. Lysinibacillus sphaericus WJ-8 dan mampu menunjukkan aktivitas urease dan kalsit produksi tinggi, digunakan. Saat dianalisis melalui pemindaian mikroskop elektron (SEM) dan sinar-X difraksi, WJ-8 menunjukkan presipitasi kalsit dalam jumlah yang signifikan. Kompresi kekuatan mortar semen dicampur dengan sel WJ-8 dan media nutrisi (urea dengan kalsium laktat) meningkat 10% dibandingkan dengan kontrol. Sinar-X dispersif energi. Analisis spektroskopi menegaskan bahwa peningkatan kekuatan disebabkan oleh pembentukan kalsit
5	Periasamy Anbu, Chang-Ho Kang, Yu-Jin Shin and Jae-Seong So (2016)	<i>Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications</i>	Springer plus DOI 10.1186/s40064-016-1869-2	Bagaimana pengaruh pengendapan kalsium karbonat yang diinduksi secara mikroba (MICP) secara rinci	Pengendapan kalsium karbonat (MICP) yang diinduksi secara mikroba. Dalam proses MICP, urease mempunyai peran penting dalam hidrolisis urea oleh berbagai mikroorganisme yang mampu menghasilkan urease tingkat tinggi serta mampu menguraikan berbagai polimorf dan peran kalsium dalam pembentukan struktur kristal kalsit menggunakan berbagai sumber

					kalsium
6	I. R. K. Phang, K. S. Wong, Y. S. Chan and S. Y. Lau.(2020)	<i>Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation Towards Tropical Organic Soil</i>	AIP Conf. Proc DOI.org/10.1063/1.5062637	Menggunakan Bacteri Lysinibacillus sp, Menyelidiki MICP pada tanah organik tropis, dengan Pasir sebagai pengisi dengan persentase pasir sebesar 4%, 8%, 16 %, dengan masa curing selama 3 hari	Dari hasil penelitian didapatkan, dengan masa curing selama 3 hari dengan melakukan uji UCT respon diamati bahwa lebih dari 300% peningkatan kekuatan dicapai.
7	Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A. (2013).	<i>Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation.</i>	Canadian Geotechnical Journal, 50(1), 81–90. Doi:10.1139/cgj-2012-0023	Penelitian ini menyelidiki sifat geoteknik pasir bio-semen di bawah berbagai tingkat kejenuhan.	Hasil menunjukkan bahwa kekuatan tanah yang lebih tinggi dapat diperoleh pada CaCO ₃ yang sama ketika perawatan dilakukan di bawah tingkat kejenuhan yang rendah.
8	Shujing Ye,Guangming Zeng, Haipeng Wu,Chang Zhang,Juan Dai, Jie Liang, Jiangfang Yu, Xiaoya Ren, Huan Yi, Min Cheng and Chen Zhang, (2017)	<i>Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil</i>	Critical Reviews In Biotechnology, 2017 http://dx.doi.org/10.1080/07388551.2017.1304357	Teknologi remediasi modern telah dikembangkan untuk pengobatan yang terkontaminasi bersama tanah	Remediasi biologis, sebagai metode ramah lingkungan, telah diterima secara luas kekhawatiran karena perbaikan tanah selain remediasi. Ulasan ini merangkum penerapan teknologi biologi, yang mengandung teknologi mikroba (fungsi mikroba remediasi dan pengomposan atau penambahan kompos), biochar, teknologi fitoremediasi, teknologi rekayasa genetika dan teknologi biokimia, untuk remediasi kokontaminasi tanah dengan logam berat dan polutan

					organik. Mekanisme teknologi tersebut dan efisiensi remediasinya juga ditinjau
9	Cheng, L., M. A. Shahin, and D. Mujah. (2017)	<i>Influence of Key Environmental Conditions on Microbially Induced Cementation for Soil Stabilization</i>	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Volume. 143 (1): 04016083. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001586 .	Bagaimana efek dari beberapa parameter lingkungan utama pada tanah yang dimediasi dengan MICP ureolitik, termasuk dampak konsentrasi urease, suhu, pembilasan air hujan, kontaminasi minyak, dan siklus pembekuan-pencairan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola presipitasi kristal efektif dapat diperoleh pada aktivitas urease rendah dan suhu lingkungan, yang menghasilkan peningkatan tinggi pada nilai (UCS. mikrostruktur dari kristal tersebut menunjukkan kelompok besar yang teraglomerasi mengisi celah antara butiran tanah, menyebabkan untuk pembentukan kristal yang efektif. aktivitas urease rendah dan suhu lingkungan, yang menghasilkan peningkatan tinggi pada kuat tekan tanah
10	Cheng,L.,M.A. Shahin,andR.C ord-Ruwisch. (2016)	<i>Surfacepercolation for soil improvement by biocementation utilizing in situ enriched indigenous aerobic and anaerobic ureolytic soil microorganisms</i>	Geomicrobiology Journal. 34 (6): 546–556. https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1232766	Penggunaan bio- sementasi melalui pengendapan karbonat yang diinduksi secara mikroba (MICP)	Aktivitas bakteri sangat terkait dengan oksigen terlarut dari media pertumbuhan perkolasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas urease yang dibudidayakan in situ dapat meningkatkan kekuatan tekan bebas bervariasi antara 850–1560 kPa (untuk pasir kasar) dan 150-700 kPa (untuk pasir halus), setelah 10 kali injeksi. Hilangnya aktivitas ureolitik yang diamati selama pengaplikasian larutan sementasi yang ditemukan kembali dengan memberikan media pertumbuhan yang lebih banyak dalam kondisi pengayaan selektif, memungkinkan mikroorganisme ureolitik yang diperkaya in situ untuk meningkatkan jumlah dan aktivitas urease sedemikian rupa sehingga memungkinkan sementasi lanjutan

11	Feng,K.,and B.M.Montoya. (2016)	<i>Influence of Confinement and Cementation Level on the Behavior of Microbial-Induced Calcite Precipitated Sands under Monotonic Drained Loading</i>	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Volume. 142 https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001379	Bagaiman metode perbaikan tanah baru untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan pasir menggunakan proses biogeokimia alami	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekakuan, kekuatan geser puncak, dan pelebaran meningkat dengan peningkatan konten kalsit pada tekanan pengikat efektif yang diberikan dan pelebaran ditekan dengan peningkatan tekanan pengekangan yang efektif. menunjukkan bahwa peningkatan sudut gesekan puncak dan sisa serta elastisitas awal modulus, E_i , bergantung pada tingkat sementasi dan tekanan pembatas efektif. Keseragaman sementasi MICP di spesimen laboratorium
12	Van Paassen LA. Ghose R, Van der Linden TJM, Van der Star WRL, Van Loosdrecht MCM. (2010)	<i>Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria</i>	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Volume. 136 https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000382	Bagaimana kelayakan biogrouting sebagai metode perbaikan tanah diselidiki dengan percobaan skla besar 100 m3	Hasil percobaan skala besar (100 m3) disajikan, di mana kelayakan biogrouting sebagai metode perbaikan tanah diselidiki menggunakan teknik dan peralatan yang mirip dengan yang digunakan dalam aplikasi potensial. Pengukuran geofisika in situ digunakan untuk memantau proses biogrouting selama perawatan dan menunjukkan bahwa kekakuan telah meningkat secara signifikan setelah satu hari perawatan. Hasil tes kuat tekan tidak terbatas pada sampel yang digali setelah perawatan digunakan untuk menilai distribusi sifat mekanik di seluruh badan pasir semen, yang berkorelasi cukup baik dengan hasil pengukuran geofisika in situ.
13	I. R. K. Phang, K. S. Wong, Y. S. Chan and S.	<i>Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation Towards</i>	<i>Advances in Civil Engineering and Science Technology</i>	Bagaimana perilaku tanah organic yang di variasikan dengan	Studi menunjukkan bahwa tanah organik tropis dengan variasi pasir 4%, 8% dan 16% dimungkinkan dengan metode MICP

	Y. Lau.(2018)	<i>Tropical Organic Soil</i>	AIP Conf. Proc. 2020, 020011-1–020011-5; https://doi.org/10.1063/1.5062637	pasir	pra-pencampuran. Studi ini juga menyarankan bahwa peningkatan CaCO ₃ terlihat dengan kekuatan yang meningkat. Penambahan pasir terlihat meningkatkan efek MICP pada kekuatan tanah.
14	Tobler DJ, Maclachlan E, Phoenix VR. (2012)	<i>Microbially-mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies</i>	Ecological Engineering, Volume 42 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.027	cara untuk mengurangi porositas tanah dan batuan untuk mengontrol atau mencegah aliran fluida di bawah permukaan	Bakteri ureolitik <i>Sporosarcina pasteurii</i> dan cairan sementasi disuntikkan pada waktu yang sama (injeksi paralel), terjadi pengisian kalsit heterogen di sepanjang kolom, di mana sebagian besar kalsit diendapkan dekat dengan area inlet. Sebaliknya, ketika <i>S. pasteurii</i> disuntikkan pertama, diikuti oleh cairan sementasi (injeksi bertahap), distribusi yang lebih homogen dikembangkan. Selain itu, porositas yang lebih besar berkurang (hingga 54%) menggunakan injeksi bertahap dibandingkan dengan 34% untuk injeksi paralel. Selain itu, kristal kalsit yang terbentuk selama injeksi berulang dan bertahap menunjukkan tekstur mikrostromatolitik
15	A. Al Qabany_ and K. Soga (2013)	<i>Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils</i>	Geotechnique 63, No. 4, 331–339 [http://dx.doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.022]	Pengaruh konsentrasi kimia yang digunakan di perlakuan terhadap pola presipitasi kalsium karbonat dan pengaruhnya terhadap rekayasa sifat tanah yang	Uji kuat tekan bebas dilakukan pada sampel pasir yang diolah dengan menggunakan larutan urea-kalsium klorida 0,1, 0,25, 0,5 dan 1 M. Itu ditemukan bahwa, meskipun kekuatan sampel yang diuji semuanya meningkat setelah perlakuan MICP, besarnya peningkatan ini tergantung pada konsentrasi yang digunakan dalam

				disemen MICP.	perawatan dan penggunaan a larutan dengan konsentrasi kimiawi rendah (yaitu urea dan kalsium klorida) menghasilkan sampel yang lebih kuat. Hasil uji permeabilitas menunjukkan bahwa penggunaan larutan berkadar urea-kalsium klorida tinggi mengakibatkan penurunan permeabilitas yang cepat pada tahap awal presipitasi kalsit, sedangkan penggunaan a larutan dengan konsentrasi kimiawi rendah ditemukan menghasilkan penurunan yang lebih bertahap dan seragam permeabilitas
16	Aamir Mahawish, Abdelmalek Bouazza, and Will P. Gates (2018)	<i>Improvement of Soft Soils Using Bio-Cemented Sand Columns</i>	Springer Nature Switzerland AG 2018 W. Wu and H.-S. Yu (Eds.): Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, SSGG, pp. 822–825, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4_184	Menyelidiki perilaku un-cemented dan bio-cemented kolom pasir kasar dipasang di dalam dasar tanah liat lunak	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolom pasir tersemen sebagian strain vertikal berkurang secara substansial yang berada di urutan 71% dan 97% dibandingkan dengan kolom pasir tidak disemen dan tanah liat kaolin, masing-masing. penonjolan dari kolom pasir yang disemenkan secara biologis dikaitkan dengan bagian bawah kolom di mana tidak ada atau kurang bahan yang disemen.
17	Burbank, M., Weaver, T.,	<i>Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite</i>	and Geoenvironmental	bakteri eksogen dapat dimasukkan ke dalam	Bakteri asli dapat menyebabkan sejumlah besar pra-cipitasi kalsit, bahwa presipitasi

	Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013)	<i>precipitation catalyzed by indigenous bacteria</i>	Engineering Volume. 139 https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000781	tanah untuk tujuan menginduksi presipitasi kalsit	kalsit dapat mengakibatkan perubahan terukur pada sifat geoteknik tanah, dan bahwa rasio ketahanan siklik dapat ditingkatkan secara substansial dengan tingkat curah hujan kalsit sedang. Menggunakan bakteri asli untuk mengubah sifat tanah merupakan langkah penting dalam membuat biomodifikasi tanah yang layak secara ekonomi
18	T. Harianto, S. Hamzah, S. H. Nur, M. A. Abdurrahman, R.U. Latief, I. Fadliah and A. Walenna (2013)	<i>Biogrouting Stabilization On Marine Sandy Clay Soil</i>	Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2013) Bali, Indonesia, September 24-26, 2013	komposisi optimum larutan bakteri basilus subtilis stabilisasi tanah dan mengevaluasi sifat mekanik tanah yang distabilkan dengan variasi bacillus subtilis larutan bakteri dan larutan sementasi, dikombinasikan dengan variasi waktu pengawetan	Penambahan bakteri untuk stabilisasi tanah lempung berpasir dengan metode biogrouting berhasil meningkatkan kekuatan tanah. Hal ini dibuktikan dengan peningkatan kekuatan tanah dan penurunan permeabilitas dalam tanah.
19	Hasriana, Lawalenna Samang, M.Natsir Djide, dan Tri Harianto (2017)	<i>Pengaruh penambahan bakteri (Bacillus Subtilis) pada tanah lunak terhadap karakteristik kuat tekan</i>	Konferensi Nasional Teknik Sipil 11 Universitas Tarumanagara, 26-27 Oktober 2017	menentukan karakteristik tanah lunak yang dicampur larutan konsentrasi bakteri bacillus subtilis dengan melakukan pengujian kuat tekan Unconfined Compression Test (UCT	Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan optimum didapatkan pada penambahan larutan konsentrasi bakteri bacillus subtilis 6% dengan waktu pemeraman 28 hari. Peningkatan nilai kuat tekan dari 26 kN/m ² menjadi 382,86 kN/m ² atau sebesar 15 kali dari tanah tanpa stabilisasi. Hal ini menunjukkan penggunaan larutan konsentrasi bakteri bacillus subtilis cukup signifikan

					meningkatkan nilai kuat tekan.
20	B. M. Montoya, j. T. Dejong. and r. W. Boulanger (2013)	Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation	Geotechnique 63, No. 4, 302–312 [http://dx.doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.019]	Metode perbaikan tanah yang dimediasi secara biologis, dieksplorasi untuk mengurangi tanah yang rentan likuifaksi.	Sementasi pengujian integritas mengungkapkan perubahan perilaku dari 'seperti tanah' menjadi 'seperti batu', dengan peningkatan tingkat perawatan. Hasil dari pengujian dinamis menunjukkan peningkatan yang jelas dalam ketahanan terhadap likuifaksi pasir yang diolah dengan MICP dibandingkan dengan pasir lepas yang tidak diolah. Pasir MICP diperlakukan dengan bervariasi tingkat sementasi (tingkat sementasi ringan, sedang dan berat) dan dinilai menggunakan nondestructive pengukuran kecepatan gelombang geser
21	Andi Marini Indriani, Tri Harianto, Abdul Rachman Djamiluddin and Ardy Arsyad. (2021)	<i>Bioremediation of coal contaminated soil as the road foundations layer</i>	International Journal of GEOMATE, Aug., 2021, Vol.21, Issue 84, pp.76-84 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: https://doi.org/10.21660/2021.84.j2124 Geotechnique, Construction Materials and Environment	Pemanfaatan material lahan bekas tambang dapat dimanfaatkan kembali sebagai material konstruksi jalan dengan meningkatkan sifat mekaniknya	Variasi konsentrasi <i>Bacillus subtilis</i> diaplikasikan sebanyak 3%, 4,5%, dan 6% pada pasir yang terkontaminasi batubara. Bakteri yang digunakan adalah kultur 3 hari masih dalam fase stasioner dan 6 hari kultur dalam fase mati. Setelah 28 hari pemeraman, terdapat peningkatan yang signifikan pada nilai UCS dari tanah yang distabilkan dengan MICP dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan. Penggunaan kultur bakteri 3 hari lebih efektif dalam meningkatkan nilai UCS dibandingkan dengan kultur 6 hari. Pada kondisi optimum, nilai UCS meningkat hingga 15 kali lipat setelah masa pemeraman 28 hari.
22	Van Paassen	<i>Bio-mediated ground</i>	Geo-Frontiers 2011	Pengembangan	Penambahan jumlah penyuntikan

	(2011)	<i>Improvement: From laboratory experiment to pilot applications</i>	ASCE	perbaikan tanah yang dimediasi secara biosementasi di Belanda, termasuk percontohan pertama penerapan biogrouting untuk menstabilkan horizontal lubang bor melalui lapisan kerikil	biosementasi meningkatkan kuat geser pada kerikil tanah, 1 sampai 4 kali suntikan hasil uji kuat geser menemukan bahwa pasir yang di suntikan 4 kali memiliki kekuatan yang meningkat di banding 1 kali suntikan meskipun kalsium karbonat terdistribusi secara heterogen kerikil, korelasi yang jelas masih terlihat antara kekuatan geser dan jumlah suntikan.
23	Isaac Ahenkorah , Md Mizanur Rahman , Md Rajibul Karim, Simon Beecham (2022)	<i>Unconfined compressive strength of MICP and EICP treated sands subjected to cycles of wetting-drying, freezing-thawing and elevated temperature: Experimental and EPR modelling</i>	Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) and Enzyme-induced carbonate precipitation (EICP)) adalah dua teknik biosementasi, yang merupakan metode perbaikan tanah yang relatif baru. Ketika kedua teknik ini memiliki beberapa kesamaan, keduanya dapat menunjukkan perilaku keseluruhan yang berbeda karena perbedaannya dalam sumber enzim urease dan metode stabilisasi	Siklus pembasahan-pengeringan (WD), pembekuan-pencairan (FT) dan suhu tinggi (uji ketahanan api e FR dan analisis termogravimetri e TG). Rata-rata CaCO ₃ konten setelah sejumlah siklus WD atau FT tertentu (AC _n) dan UCS terkaitnya (q) berkurang sementara kehilangan massa meningkat. Spesimen pasir yang diberi tampaknya menunjukkan ketahanan yang lebih rendah terhadap Siklus WD dan FT dibandingkan spesimen yang diberi perlakuan MICP kemungkinan disebabkan oleh adanya ikatan yang tidak terikat atau longgar terikat CaCO di dalam matriks tanah, yang kemudian dihilangkan selama pembasahan (selama WD)