

Studi Eksperimental Kemampuan Biosementasi Bakteri Lokal pada Tanah Pasir Lepas

Aswin Lim

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat. Kode Pos: 40141
E-mail: aswinlim@unpar.ac.id

Dary Aulia Muhammad

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat. Kode Pos: 40141
E-mail: dary.aulia@gmail.com

Anastasia Sri Lestari

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat. Kode Pos: 40141
E-mail: unpargeo@yahoo.co.id

Abstrak

Makalah berikut menyajikan hasil penelitian biosementasi menggunakan bakteri lokal yang hidup di tanah pasir lepas yang diambil dari kota Padang. Biosementasi adalah suatu metode perbaikan tanah dengan memanfaatkan kemampuan bakteri yang memang hidup di dalam tanah untuk menghasilkan enzim urease. Aplikasi dari biosementasi ini dapat dimanfaatkan untuk menurunkan potensi terjadinya likuifaksi akibat gempa karena kuat geser tanah akan meningkat drastis. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan spesies bakteri dengan kemampuan urease yang diisolasi dari pasir Padang, menentukan kadar CaCO_3 dari setiap sampel tersementasi, dan untuk menentukan kuat tekan bebas tanah setelah masa perlakuan. Bakteri urease positif dari tanah pasir Padang diisolasi dan ditumbuhkan dalam syringe 100 ml berisi tanah pasir Padang selama 4-6 hari. Hasil isolasi menunjukkan bahwa spesies bakteri teridentifikasi sebagai *Sporosarcina sp.* Selama masa perlakuan, sampel-sampel diberikan nutrisi setiap 12 jam sekali. Hasil pengujian menunjukkan kadar CaCO_3 yang terukur pada uji eksperimental adalah berkisar antara 23.4% hingga 45.8%. Sedangkan untuk nilai kuat tekan bebas (q_u) tanah yang tersementasi berkisar diantara 150 kPa hingga diatas 500 kPa. Selanjutnya, keberadaan CaCO_3 diobservasi menggunakan Scanning Electron Microscope dan uji X-Ray Diffraction.

Kata Kunci: Biosementasi, *sporosarcina Sp.*, tanah pasir lepas perbaikan tanah

Abstract

This paper presents the experimental results of biocementation using a local bacteria which originally live in Padang loose sand. Biocementation is a soil improvement method using the microbial ability to produce urease enzyme. Biocementation method could be applied for reducing the liquefaction susceptibility because the soil shear strength would increase significantly. The objectives of this research are to identify the species of bacteria isolated from Padang sand, to determine the amount of CaCO_3 of the cemented samples, and to determine the unconfined compressive strength (q_u) of the samples after the treatment period. The bacteria which is isolated from Padang sand were grown in Padang sand in a 100 ml syringe for 4 – 6 days. The bacterial isolate of Padang sand was identified as *Sporosarcina sp.* During the experimental work, the samples were given the nutrition for every 12 hours. The results indicate that the measured CaCO_3 in the samples were in the range of 23.4% to 45.8%. In addition, the unconfined compressive strength was around 150 kPa to larger than 500 kPa. Furthermore, the existence of CaCO_3 was proofed by observation using Scanning Electron Microscope and X-Ray Diffraction test.

Keywords: Biocementation, *sporosarcina Sp.*, loose sand, soil improvement

1. Pendahuluan

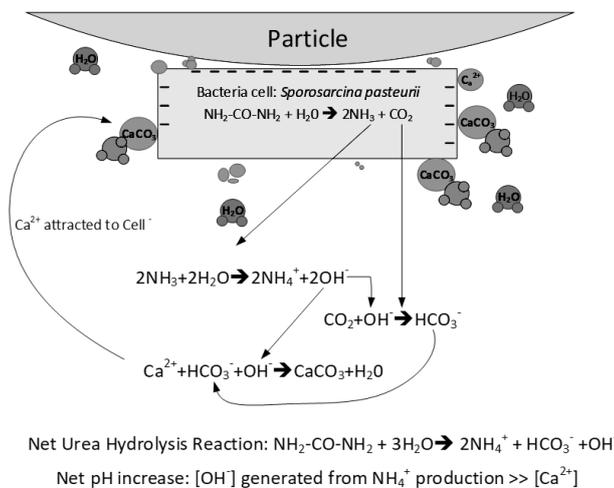
Indonesia masuk kedalam kategori negara dengan tingkat kerawanan gempa bumi yang cukup tinggi. Gempa bumi memang suatu bencana yang terjadi secara alami dan sangat merusak. Seringkali gempa bumi hanya diperhitungkan dampaknya terhadap struktur bagian permukaan tanah saja, padahal kenyataannya gempa bumi ini dapat menyebabkan suatu kerusakan sebagai akibat dari hilangnya stabilitas tanah. Kegagalan stabilitas tanah tersebut biasanya terjadi pada tanah lanau pasir yang bersifat jenuh

dengan gradasi yang seragam. Peristiwa tanah pasir yang kehilangan kuat gesernya saat terjadi gempa ini kemudian dikenal dengan istilah likuifaksi.

Ancaman kerusakan struktur dan korban jiwa sebagai dampak dari likuifaksi di beberapa daerah di Indonesia tergolong tinggi. Berkaca pada likuifaksi yang terjadi di Padang sebagai dampak dari gempa pada 30 September 2009, terlihat bahwa titik-titik bencana tersebar didaerah dekat aliran sungai dan tepi pantai. Menurut Hakam dan Darjanto (2013), kedalaman tanah yang berpotensi likuifaksi di kawasan Pantai Padang

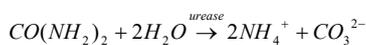
berada pada kisaran 4 – 12 m, dengan potensi yang sangat besar terjadi pada kedalaman 4 - 8 m. Sampai saat ini, masih banyak riset yang dilakukan dalam upaya untuk meminimalisir kemungkinan likuifaksi ini terjadi lagi.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk memperbaiki dan memperkuat struktur tanah, namun seringkali metode yang digunakan berpotensi mencemari lingkungan, seperti kontaminasi air tanah Contohnya adalah metode *chemical grouting*, dimana materi kimia seperti semen, dan sodium silikat diinjeksikan kedalam tanah dengan maksud untuk memperkuat struktur tanah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa materi-materi kimiawi tersebut dapat berdampak buruk karena berpotensi mengontaminasi tanah dan aliran air tanah karena bersifat racun dan berbahaya bagi ekosistem secara umum (Karol, 2003). Hal ini mendorong para peneliti untuk mengembangkan teknologi yang lebih ramah lingkungan, seperti *Microbial-induced Calcite Precipitation* (MICP).



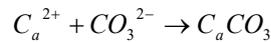
Gambar 1. Proses ureolisis dan pembentukan CaCO₃ dalam Biosementasi (Digambar ulang dari DeJong dkk., 2010)

Microbial-induced Calcite Precipitation (MICP) merupakan suatu metode perbaikan tanah yang relatif baru dan merupakan cabang dari metode *Biomediated Soil Improvement*. MICP adalah suatu metode yang melibatkan bakteri tanah dengan kemampuan hidrolisis urease sehingga dapat mengendapkan kalsium karbonat (CaCO₃) sebagai bahan perekat antar butir tanah untuk memperkuat struktur tanah itu sendiri, seperti pada **Gambar 1** (DeJong dkk., 2010). Ada beberapa jenis bakteri yang diketahui memiliki kemampuan tersebut seperti *Sporosarcina pasteurii*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus pasteurii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, dan masih banyak lagi (Whiffin, 2004). Berikut adalah proses hydrolysis urease yang diakibatkan oleh bakteri dalam tanah :



Pelepasan NH₄⁺ ke lingkungan akan menyebabkan kenaikan kadar pH lingkungan, yang kemudian akan menciptakan kondisi lingkungan yang ideal bagi presipitasi kalsium karbonat ketika asupan ion kalsium

(Ca²⁺) tersedia. Dalam hal ini, penting untuk ditambahkan kalsium klorida sebagai sumber nutrisi Ca²⁺ bagi bakteri. Kalsium karbonat yang terbentuk merupakan bahan utama biosementasi yang merekatkan antar butir tanah, dan meningkatkan kekuatan struktur tanah. Berikut adalah proses terbentuknya kalsium klorida saat kenaikan pH lingkungan dan sumber Ca²⁺ tersedia:



Keseluruhan proses ureolisis tersebut terjadi di ruang antar butir tanah oleh bakteri. Bakteri disini selain menjadi fasilitator dalam meningkatkan pH, juga menjadi pusat pembentukan kalsium karbonat. Pergerakan bakteri yang bebas diantara butir tanah akan menyebabkan presipitasi kalsium karbonat untuk terjadi secara merata pula.

Di Indonesia sendiri, penelitian yang membahas tentang *Biosementasi* maupun kemampuan bakteri asli Indonesia sebagai agen biosementasi masih jarang dilakukan. Putra., dkk (2018) memanfaatkan *Enzyme-Mediated Calcite Precipitation* sebagai metode perbaikan tanah. Namun keberadaan enzim tersebut masih jarang ditemukan di Indonesia. Hasriana., dkk (2018) menggunakan bakteri *Bacillus Subtilis Sp* untuk meningkatkan nilai CBR pada tanah lunak secara signifikan. Namun, penggunaan bakteri ini pada tanah pasir lepas belum diteliti lebih lanjut.

Bakteri yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah bakteri asli yang berasal dari tanah di Indonesia, yaitu yang diisolasi dari pasir lepas yang diperoleh di kota Padang, Sumatera Barat. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan spesies bakteri dengan kemampuan enzim urease yang diisolasi dari pasir Padang, menentukan kadar CaCO₃ dari setiap sampel tersementasi, dan untuk menentukan kuat tekan bebas tanah setelah masa perlakuan dengan uji *Pocket Penetrometer* (ASTM WK27337).

2. Metode Penelitian

2.1 Isolasi dan identifikasi bakteri

Isolasi dilakukan terhadap bakteri asli tanah pasir Padang. Metode isolasi yang dilakukan merupakan metode standar, seperti isolasi bakteri menggunakan larutan NaCl 0,85%, *pour plate*, dan *four-way streak*. Koloni bakteri tunggal yang didapatkan dari metode *four-way streak* kemudian diuji lanjutan dengan uji biokimia urease. Koloni bakteri yang diketahui urease positif kemudian akan digunakan sebagai agen biosementasi, dan proses indentifikasi spesies dilakukan oleh lembaga *Macrogen* di Korea Selatan.

2.2 Pembuatan larutan sementasi, kultivasi bakteri, dan masa perlakuan

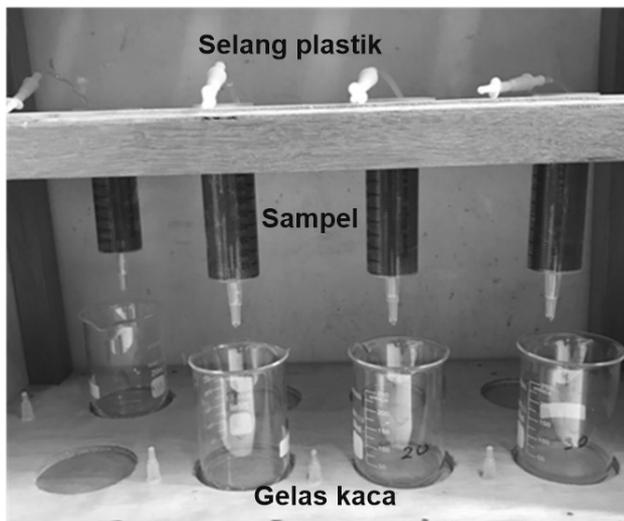
Reagen sementasi yang digunakan sebagai nutrisi bakteri terdiri atas 0,5 M urea dan kalsium klorida, 3g *nutrient broth*, 10 g NH₄Cl, dan 2.12 g NaHCO₃ (Lee dkk., 2012; Soon dkk., 2014). Larutan sementasi ini akan digunakan

sebagai medium pertumbuhan bakteri dan juga diberikan secara berkala pada tanah uji yang sudah dicampur bakteri maupun sampel kontrol.

Isolat bakteri pasir Padang yang sudah teruji kemampuan ureasenya akan ditumbuhkan dalam reagen sementasi selama 2x24 jam. Bakteri kemudian dicampurkan dengan tanah pasir Padang dan dicetak pada *syringe* 100 ml (**Gambar 2**). Sampel dibagi menjadi lima kelompok, yaitu sampel A, sampel B, sampel B10, sampel B20, dan sampel B30. Keterangan perlakuan masing-masing tersaji pada Tabel 1. Setiap 12 jam sekali, sampel perlakuan akan diinjeksikan larutan sementasi melalui selang plastik. Durasi pemberian larutan sementasi adalah selama 4-6 hari dan diukur kadar pH efluennya (Al Qabany dkk, 2012). Adapun tujuan Sampel A dan Sampel B adalah untuk kontrol dan pembandingan terhadap Sampel A10, A20, dan A30. Apabila sesuai dengan rencana, maka Sampel A tidak akan terjadi proses biosementasi karena tanah sudah disterilkan terlebih dahulu dengan cara dioven pada suhu 110° Celcius selama 24 jam. Kemudian tanah di simpan di desikator selama 24 jam sebelum larutan sementasi diberikan. Sedangkan untuk Sampel B, tanah pasir hanya dikeringkan pada suhu ruangan. Untuk Sampel B, walaupun larutan bakteri tidak berikan, bukan berarti proses biosementasi tidak akan terjadi, melainkan Sampel B sendirinya sudah memiliki bakteri alami, namun kadar dan jenisnya tidak diketahui secara pasti. Sedangkan untuk Sampel A10, A20, dan A30, sampel diberikan 10 ml, 20 ml, dan 30 ml larutan bakteri untuk menginvestigasi dosis bakteri terhadap proses sementasi

Tabel 1. Skenario pengujian sampel tanah

| No. | Kode | Keterangan |
|-----|------------|---------------------------------------|
| 1 | Sampel A | Pasir Padang yang telah disterilisasi |
| 2 | Sampel B | Pasir Padang asli (tanpa sterilisasi) |
| 3 | Sampel A10 | Sampel A + 10 ml larutan bakteri |
| 4 | Sampel A20 | Sampel A + 20 ml larutan bakteri |
| 5 | Sampel A30 | Sampel A + 30 ml larutan bakteri |



Gambar 2. Konfigurasi rangkaian alat untuk percobaan metode biosementasi

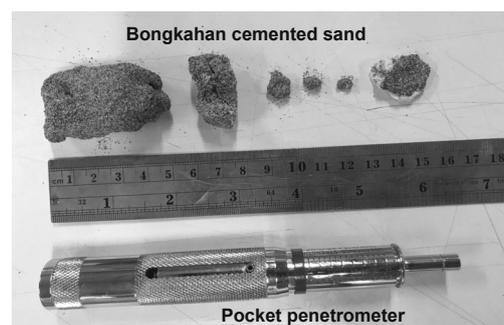
2.3 Uji index properties tanah, kuat tekan bebas, dan kadar CaCO₃

Uji yang dilakukan untuk *Index Properties* tanah yaitu uji saringan, kadar air alami (ω), Berat jenis tanah asli (G_s), Berat isi (γ), dan Berat isi kering (γ_d). Uji ini dilakukan terhadap sampel tanah pasir Padang. Seperti yang terlihat pada Gambar 3, konsentrasi bagian yang tersementasi berada di bagian atas, sedangkan pada bagian bawah, sampel tidak tersementasi dengan baik. Sampai saat ini, penulis masih menyelidiki alasan dibalik fenomena ini. Namun, kuat dugaan bahwa metode injeksi menjadi salah satu penyebab hal ini terjadi. Pada penelitian ini, larutan sementasi diinjeksikan secara manual menggunakan suntikan melalui selang plastik yang telah dilubangi sepanjang selang, sehingga kecepatan (*flow rate*) larutan injeksi cenderung lambat dan tidak teratur antara bagian atas dan bagian bawah. Bagian bawah *syringe* ditutup sehingga larutan sementasi yang diinjeksikan selalu merendami sampel selama 12 jam. Sebelum masuk ke fase pemberian larutan sementasi selanjutnya, tutup *syringe* dibuka sehingga larutan sementasi yang telah merendami sampel dapat mengalir keluar. Larutan sementasi ini ditampung pada gelas kaca, dan kemudian akan dilakukan uji pH.

Setelah masa perlakuan, sampel tanah tersementasi akan dibilas dan dioven selama 24 jam (Al Qabany dkk, 2012). Karena sampel tanah tidak tersementasi secara menyeluruh di dalam tabung (**Gambar 3**), maka bagian sampel yang tersementasi diuji kuat tekan bebasnya menggunakan alat *Pocket Penetrometer* (ASTM WK27337), seperti pada **Gambar 4**.

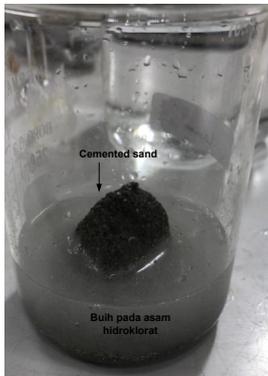


Gambar 3. Tipikal sampel setelah masa akhir percobaan.



Gambar 4. Alat uji Pocket penetrometer beserta tanah setelah dibilas dan dioven 24 jam.

Pengukuran kadar kalsium karbonat memanfaatkan metode analisis Gravimetrik. Sampel tanah uji sebanyak 20g diakhir masa perlakuan kembali dikeringkan dalam oven. Kemudian sampel dicelupkan pada larutan asam hidroklorat (2 M) hingga berbusa agar CO₂ dalam sampel menguap (dekarbonasi). Sisa sampel tanah uji kemudian kembali dikeringkan dalam oven. Kehilangan massa sampel merupakan persentase kadar kalsium karbonat didalam sampel terhadap berat awal. **Gambar 5** menunjukkan proses dekarbonasi pada sampel tersementasi.



Gambar 5. Proses dekarbonasi pada tanah pasir tersementasi

2.4 Uji SEM dan XRD

Pada eksperimen ini, alat uji SEM yang digunakan adalah tipe JEOL JSM-6510A. Uji SEM dilakukan untuk melihat sampel secara lebih jelas khususnya CaCO₃ yang terbentuk pada perbesaran x100, x200, x600, x1000, x2000, dan x6000. Sedangkan, uji XRD dilakukan untuk mengetahui komponen mineral penyusun tanah.

3. Hasil Uji dan Diskusi

Terdapat tiga bagian pembahasan dan analisis data, yaitu proses identifikasi bakteri, uji *index properties* tanah dan kuat tekan bebas, serta uji konfirmasi berupa SEM dan XRD.

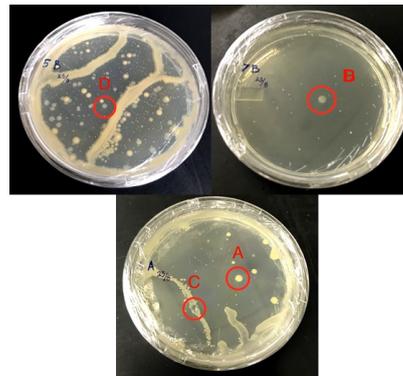
3.1 Isolasi dan identifikasi bakteri pasir Padang

Bakteri yang tumbuh membentuk koloni didalam cawan petri akan dengan mudah diamati dan dibedakan berdasarkan morfologinya (Cappuccino dan Sherman, 2014). Pengamatan lalu dilakukan setiap hari selama kurun waktu 7 hari. Dari hasil pengamatan, diperoleh 4 koloni bakteri yang diduga memiliki jenis yang berbeda, yaitu isolat bakteri A, B, C, dan D (**Gambar 6**).

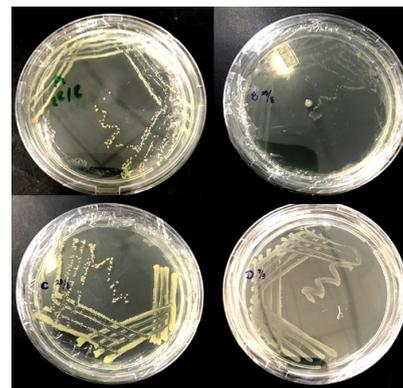
Membedakan jenis bakteri yang tumbuh dapat dimulai dengan mengamati bentuk koloni yang dihasilkan pada permukaan agar di dalam cawan petri (Gambar 6). Koloni bakteri A dan C sama-sama memiliki warna kuning, namun koloni A membentuk *circular-entire-convex* sedangkan koloni C membentuk *irregular-entire-raised*. Koloni B berwarna lebih putih dan membentuk *circular-entire-raised*, sedangkan koloni D

berwarna bening keputihan dan membentuk *circular-entire-umbonate* (Cappuccino dan Sherman, 2010).

Tahapan selanjutnya adalah melakukan metode *-four-way streak* (**Gambar 7**). Metode ini digunakan untuk mendapatkan kultur murni atau koloni tunggal dari isolat bakteri. Bakteri berada di alam tidak dalam bentuk kultur murni, namun dalam campuran berbagai macam jenis bakteri. Mendapatkan kultur murni merupakan salah satu tahapan yang penting dalam mengisolasi bakteri. Kultur murni memastikan bahwa tidak terdapat bakteri atau mikroba saat dilakukan pengujian lebih lanjut (Cappuccino dan Sherman, 2014).



Gambar 6. Hasil isolasi bakteri metode *pour plate*

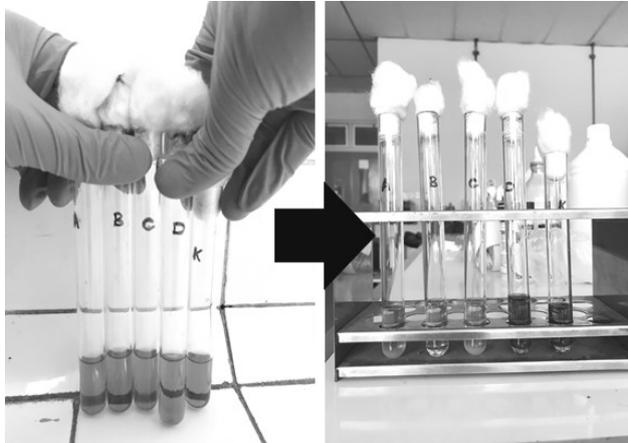


Gambar 7. Hasil isolasi bakteri metode *four-way streak*

Koloni tunggal yang ditumbuhkan berguna untuk diuji kemampuannya dalam menghasilkan enzim urease melalui uji biokimia urease. Indikator bagi keberadaan enzim urease merupakan perubahan warna pada larutan uji biokimia urease. Perubahan warna menjadi warna ungu terlihat pada medium dengan inokulasi isolat bakteri D, isolat bakteri lain menunjukkan perubahan warna menjadi warna kekuningan, dan medium kontrol (K) tidak menunjukkan perubahan warna (**Gambar 8**). Kemampuan untuk menghasilkan enzim urease adalah syarat utama yang dibutuhkan bakteri untuk memfasilitasi terjadinya presipitasi CaCO₃ dalam metode *Biosementasi*.

Bahan utama dari medium uji biokimia urease adalah *phenol red* (PR). Reagen PR ini merupakan reagen standar yang digunakan didalam penelitian sebagai

indikator pH melalui perubahan warna. Larutan medium yang memanfaatkan PR akan berwarna merah terang pada pH 7,4. Warna medium akan menjadi warna kuning pada pH asam, dan berubah menjadi warna ungu ketika pH basa. Perubahan warna pada medium mempermudah pengamatan terhadap kondisi pH dari medium karena efek dari enzim urease yang dihasilkan bakteri (Reznikov, 1972).



Gambar 8. Hasil uji biokimia urease

Prinsip kerja metode Biosementasi pada dasarnya memanfaatkan bakteri untuk meningkatkan pH lingkungan sehingga memfasilitasi pengendapan CaCO_3 . Enzim urease yang dihasilkan bakteri akan mengubah urea dan menghasilkan NH_4^+ (DeJong dkk., 2014). NH_4^+ ini kemudian yang akan meningkatkan pH lingkungan medium menjadi basa, sehingga perubahan pH dengan akan mudah diamati melalui medium uji biokimia urease.

Metode identifikasi yaitu menggunakan teknologi DNA sequencing. Bakteri yang telah ditumbuhkan selama 1-2 hari didalam cawan petri kemudian dikirimkan untuk dibaca sekuens DNA-nya di Macrogen, Korea Selatan. Sekuens DNA dari bakteri yang didapatkan, dicocokkan dengan kumpulan DNA bakteri yang sudah tercatat dalam *genebank National Center for Biotechnology Information (NCBI)*. Melalui hasil metode *Basic Local Alignment Search Tool (BLAST)*, diambil beberapa reference sequence bakteri yang memiliki kemiripan DNA tertinggi dengan isolat bakteri pasir Padang (Tabel 2). Karena isolat bakteri pasir Padang memiliki kemiripan DNA yang tinggi dengan genus *Sporosarcina*, maka disimpulkan bahwa bakteri tersebut sebagai *Sporosarcina* sp.

Tabel 2. Reference sequence untuk isolat bakteri pasir Padang (NCBI, 2018)

| Description | Max Score | Total score | Query cover | E value | Ident | Accession |
|---|-----------|-------------|-------------|---------|-------|-------------|
| <i>Sporosarcina pasteurii</i> strain NCCB 48021 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2566 | 2566 | 95% | 0 | 99% | NR 104923.1 |
| <i>Sporosarcina soli</i> strain 180 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2512 | 2512 | 100% | 0 | 97% | NR 043527.1 |
| <i>Sporosarcina koreensis</i> strain F73 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2468 | 2468 | 100% | 0 | 97% | NR 043526.1 |
| <i>Sporosarcina contaminans</i> strain CCUG 53915 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2464 | 2464 | 99% | 0 | 97% | NR 116955.1 |
| <i>Sporosarcina siberiensis</i> strain 1111S-42 16S ribosomal RNA, partial sequence | 2436 | 2436 | 100% | 0 | 96% | NR 134188.1 |
| <i>Sporosarcina aquimarina</i> strain SW28 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2436 | 2436 | 100% | 0 | 96% | NR 025049.1 |
| <i>Sporosarcina luteola</i> strain NBRC 105378 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2429 | 2429 | 100% | 0 | 96% | NR 114283.1 |
| <i>Sporosarcina luteola</i> strain Y1 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2429 | 2429 | 100% | 0 | 96% | NR 112844.1 |
| <i>Filibacter limicola</i> strain DSM 13886 16S ribosomal RNA, partial sequence | 2418 | 2418 | 100% | 0 | 96% | NR 042024.1 |
| <i>Sporosarcina terrae</i> strain LZ2 16S ribosomal RNA, partial sequence | 2403 | 2403 | 92% | 0 | 98% | NR 157634.1 |
| <i>Sporosarcina saromensis</i> strain NBRC 103571 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2396 | 2396 | 100% | 0 | 96% | NR 114249.1 |
| <i>Sporosarcina saromensis</i> strain HG645 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2392 | 2392 | 100% | 0 | 96% | NR 041359.1 |
| <i>Sporosarcina globispora</i> strain NBRC 16082 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2379 | 2379 | 100% | 0 | 96% | NR 113837.1 |
| <i>Sporosarcina psychrophila</i> strain NBRC 15381 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2374 | 2374 | 100% | 0 | 96% | NR 113752.1 |
| <i>Sporosarcina globispora</i> strain 785 16S ribosomal RNA, partial sequence | 2374 | 2374 | 100% | 0 | 96% | NR 029233.1 |
| <i>Sporosarcina psychrophila</i> strain Q16A 16S ribosomal RNA gene, partial sequence | 2351 | 2351 | 100% | 0 | 95% | NR 036942.1 |

3.2 Uji *index properties* dan kuat tekan bebas tanah

Uji terhadap tanah pasir Padang baik sebelum maupun setelah masa perlakuan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu uji *Index Properties*, pengukuran kadar pH efluen, dan uji kuat tekan bebas. pH efluen adalah nilai pH yang diukur dari larutan sementasi yang telah bercampur dengan sampel selama 12 jam.

3.2.1 Uji *index properties*

Pengujian awal terhadap tanah dilakukan terhadap sampel sebelum masa perlakuan. **Tabel 3** menyajikan hasil uji *index properties* sampel pasir lepas yang digunakan untuk pengujian.

Berat jenis tanah asli (G_s) dari sampel pasir Padang adalah 2,78. Berat isi (γ) dan berat isi kering (γ_d) berturut-turut adalah sebesar 15,07 kN/m³ dan 14,88 kN/m³. Menurut Coduto (1994), hasil pengujian berat isi yang didapatkan masuk kedalam kategori *poorly graded sand* atau pasir bergradasi buruk dengan rentang berat isi 15 – 19,5 kN/m³.

Hasil uji saringan disajikan dalam bentuk kurva untuk menggambarkan gradasi ukuran butir dari tanah pasir Padang (**Gambar 9**). Melalui hasil saringan juga, didapatkan beberapa persentase persebaran ukuran butir tanah dan koefisien keseragaman (C_u) sebagai berikut :

- Persentase *gravel* (%) : 0.002
- Persentase *coarse to medium sand* (%) : 14.096
- Persentase *fine sand* (%) : 58.846
- Persentase *silt-clay* (%) : 27.056
- C_u (*coefficient of uniformity*) : 5
- C_c (*coefficient of curvature*) : 0.488

Berdasarkan kurva gradasi (Gambar 10), sampel tanah dikategorikan sebagai *poorly graded sand* (SP) karena tidak memenuhi $C_u > 6$ dan $1 < C_c < 3$.

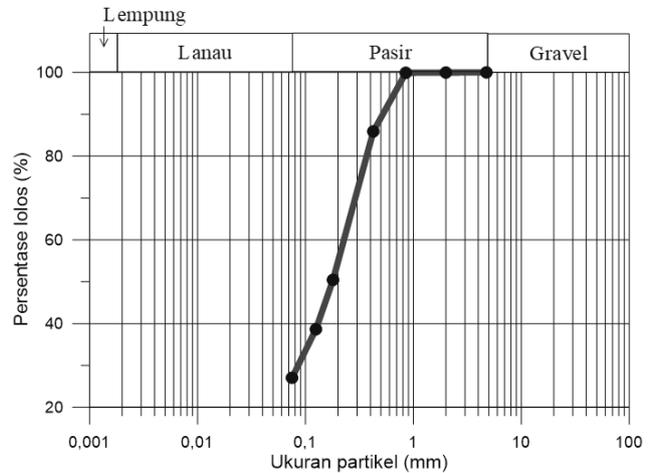
Menurut Rebata-Landa (2007), ukuran butir tanah yang paling sesuai untuk penerapan *biosementasi* adalah sebesar 0.05 – 0.4 mm, atau masuk kedalam jenis lanau kepasiran. Ukuran butir tanah pasir Padang yang didapatkan melalui uji saringan juga menunjukkan ukuran butir yang dominan pada jenis pasir dengan rentang 0.075 – 0.425 mm. Hal ini menunjukkan bahwa jenis tanah pasir Padang yang digunakan sudah sesuai sehingga dapat mendukung persebaran bakteri secara baik.

3.2.2 Pengukuran kadar pH efluen

Data pH efluen diperoleh dari larutan sementasi yang keluar dari dasar syringe 100 ml setiap 12 jam (**Gambar 10**). Pada sampel A (tanah steril), nilai pH cenderung stagnan yaitu antara 7.5 hingga 7.7 sesuai dengan pH larutan sementasi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada aktivitas urease yang terjadi pada sampel A. Pada masa perlakuan 96 jam, pH naik ke angka 8,4 dan dikelompokkan sebagai data *outlier*. Hal ini disebabkan adanya kontaminasi pada pengukuran pH efluen. Pada kenyatannya, tidak ada sementasi yang terjadi pada

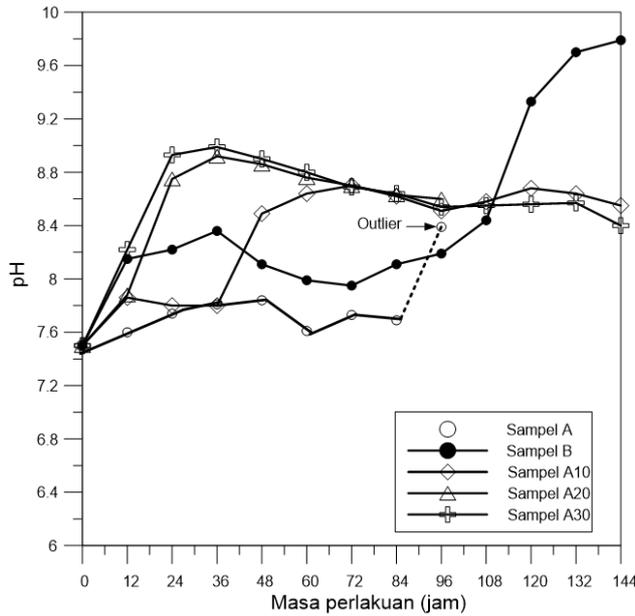
Tabel 3. *Index properties* tanah pasir Padang

| Parameter | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Kadar air (ω) | 1,24 % |
| Berat jenis tanah asli (G_s) | 2,78 |
| Berat isi (γ) | 15,07 kN/m ³ |
| Berat isi kering (γ_d) | 14,88 kN/m ³ |



Gambar 9. Persebaran ukuran butir tanah

sampel A. Sedangkan untuk Sampel B, A10, A20, dan A30 menunjukkan kenaikan tren kadar pH efluen sampai pada waktu 36 jam. Kenaikan paling tinggi terlihat pada perlakuan volume inokulasi bakteri 30 ml (A30), lalu diikuti oleh 20 ml (A20), dan terakhir 10 ml (A10). Sampel A10 terlihat baru meningkat setelah 36 jam. Kenaikan dari ketiga sampel tersebut sama-sama menjadi relatif stabil setelah 72 jam. Sedangkan untuk Sampel B terlihat sedikit penurunan pH dari 36 jam sampai 72 jam, dan mulai meningkat lagi pada 108 jam. Selain itu, terjadi loncatan pH yang cukup drastis pada sampel B di masa perlakuan 120, 132, dan 144 jam. Salah satu alasan dari loncatan pH ini diduga karena terjadi reaksi rantai dari berbagai bakteri lokal yang ada di tanah asli. Untuk menghindari reaksi dari berbagai jenis bakteri, aktivitas urease tunggal bakteri *Sporosarcina Sp* dapat diamati dengan jelas pada sampel A10, A20, dan A30. Sampel A10, A20, dan A30 menunjukkan peningkatan pH mencapai lebih dari 8,5. Proses pengendapan CaCO₃ oleh bakteri optimal pada rentang pH 8,3 – 9,3. Secara umum, aktivitas enzim urease meningkat pesat pada rentang pH 6-10, namun akan mulai menurun setelah kurang lebih pH 8. Setelah CaCO₃ sudah mulai mengendap, juga akan terjadi penurunan pH medium secara bertahap. (Stocks *dkk*, 1999; De Jong *dkk.*, 2010). Turunnya pH karena penurunan aktivitas urease dan pengendapan CaCO₃ setelah masa perlakuan selesai, diduga tidak banyak mempengaruhi sementasi oleh CaCO₃ terhadap butir tanah. Dapat disimpulkan bahwa terjadi aktivitas enzim urease oleh bakteri selama masa perlakuan melalui kenaikan kadar pH.



Gambar 10. Kadar pH effluen

3.2.3 Kadar CaCO₃ dan kuat tekan bebas sampel pasir padang tersementasi

Tabel 4 menyajikan hasil pengujian rasio sementasi, kadar CaCO₃ dan kuat tekan bebas sampel tanah. Sebelum pengerjaan uji kuat tekan bebas dari pasir Padang tersementasi, dilakukan pengukuran terhadap persentase tanah yang tersementasi. Hasil menunjukkan bahwa persentase tanah yang tersementasi paling tinggi adalah pada sampel B. Untuk Sampel A10, A20, dan A30 mengalami pertambahan persentase seiring dengan besaran volume bakteri yang diinjeksikan. Terlihat bahwa sampel A10 memiliki besaran tanah tersementasi terkecil, dan sampel A30 memiliki persentase sementasi terbesar. Sedangkan sampel A tidak menunjukkan adanya pembentukan pasir Padang yang tersementasi.

Tabel 4. Hasil pengujian rasio sementasi, kadar CaCO₃ dan kuat tekan bebas sampel tanah.

| No | Sampel | Rasio Sementasi Tanah (%) | Kadar CaCO ₃ (%) | q _u (kPa) |
|----|--------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | A | 0 | 0 | 0 |
| 2 | B | 36,1 | 23,37 | >500 |
| 3 | A10 | 17,2 | 33,12 | >500 |
| 4 | A20 | 19,4 | 42,63 | 150 |
| 5 | A30 | 22,8 | 45,79 | 425 |

Kadar CaCO₃ terukur secara umum berkorelasi positif dengan bertambahnya pemberian volume inokulum bakteri. Terlihat bahwa sampel A30 memiliki kadar CaCO₃ tertinggi, lalu diikuti oleh sampel A20, A10 dan yang terakhir sampel B. Apabila dihubungkan dengan dengan persentase tanah tersementasi, maka dapat dilihat bahwa besaran kadar CaCO₃ yang mengikat tanah tidak selalu berkorelasi positif. Pada sampel B, terlihat bahwa volume tanah tersementasi adalah yang paling besar, namun kadar CaCO₃ menunjukkan tingkat paling rendah. Hal ini diduga karena persentase tanah tersementasi lebih

dipengaruhi oleh persebaran CaCO₃ yang merata, sehingga pengikatan antar butir tanah lebih efisien.

Kuat tekan bebas yang dihasilkan oleh sampel A10 dan sampel B terbilang tinggi, dengan besaran q_u >500 kPa Untuk Sampel A30 menghasilkan kuat tekan bebas lebih kecil dengan q_u sebesar 425 kPa, sedangkan Sampel A20 hanya menghasilkan q_u 150 kPa. Walaupun sampel perlakuan yang diujikan tidak dilakukan pengulangan, namun dari keempat sampel tanah yang berhasil sementasi dapat membuktikan bahwa metode yang digunakan berpotensi untuk meningkatkan kuat tekan bebas tanah pasir secara signifikan.

Selain itu, walaupun memiliki persentase tanah tersementasi paling kecil, sampel A10 menunjukkan q_u yang relatif sama dengan sampel B. Hal ini menunjukkan bahwa persentase tanah tersementasi tidak selalu berkorelasi positif dengan kuat tekan bebas dan kadar CaCO₃ dari sampel tersementasi. Diduga terdapat faktor teknis dan lingkungan lain yang lebih mempengaruhi kuat tekan bebas tanah, seperti efektivitas persebaran reagen sementasi dalam tanah, kemampuan bakteri dalam menghasilkan enzim urease, persebaran endapan CaCO₃ yang lebih merata, dan faktor lainnya yang membutuhkan penelitian lanjutan. Menurut Al Qabany dkk (2012), laju larutan saat diinjeksikan mempengaruhi kemungkinan terjadinya pembentukan CaCO₃ sehingga dapat menghambat saluran. Diduga hal ini juga dapat mempengaruhi pengendapan CaCO₃ di tanah sehingga sementasi hanya terjadi disekitar tempat injeksi larutan sementasi.

3.3 Hasil scanning electron microscope (SEM) dan uji X-ray diffraction (XRD)

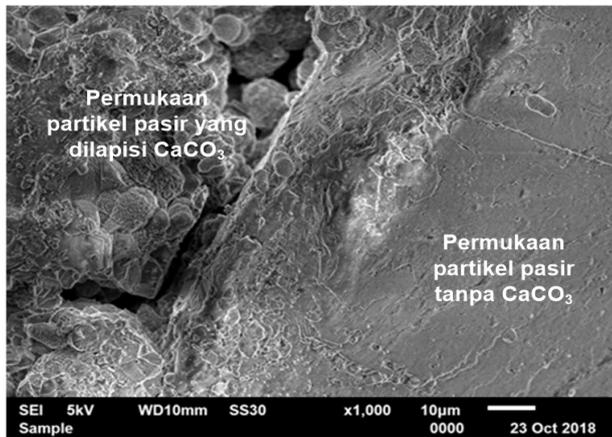
3.3.1 Uji SEM

Uji SEM diambil dari sampel tanah tersementasi A10 dengan berat sampel kurang lebih 0,5 g. Gambar 11 menyajikan hasil SEM perbandingan partikel pasir yang tidak dan yang diselubungi CaCO₃. Foto yang ditampilkan adalah perbesaran 1000 kali. Pada butiran tanah tanpa CaCO₃, terlihat jelas bahwa permukaannya lebih halus dan rata dibandingkan dengan bagian yang terlubangi CaCO₃. Permukaan butir tanah yang tersementasi terlihat lebih kasar dengan berbagai bentuk dan ukuran dari CaCO₃. Dapat disimpulkan dari Gambar 11 bahwa CaCO₃ tidak melapisi sampel tanah secara keseluruhan, karena masih menyisakan beberapa bagian butir tanah yang tidak terlubangi.

Gambar-gambar yang tersaji dalam Tabel 5 menunjukkan hasil uji SEM terhadap satu sampel A10 dari dua titik fokus pengambilan gambar berbeda, yaitu spot X dan Y. Perbesaran yang diambil yaitu 200x (X1, Y1), 600x (X2, Y2), 2000x (X3, Y3), dan 6000x (X4, Y4). Pengambilan gambar dipilih berdasarkan ikatan antar butir tanah yang dapat terlihat dengan jelas.

Pada perbesaran 200x, masih belum terlihat jelas perbedaan antara kelompok gambar X dan Y. Perbedaan baru mulai terlihat pada perbesaran 600x,

dan semakin terlihat jelas pada perbesaran 6000x. Kelompok gambar X menunjukkan persebaran bentuk CaCO_3 yang cenderung seragam antara satu dan lainnya, sedangkan kelompok gambar Y menunjukkan bentuk CaCO_3 yang beragam bahkan membentuk bulir yang menempel pada permukaan butir tanah. CaCO_3 yang terbentuk juga terlihat berbeda antara yang menyelimuti permukaan dengan yang membentuk ikatan antar butir tanah. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa terjadi pengendapan CaCO_3 yang tidak merata.



Gambar 11. Perbandingan butir tanah asli yang tidak diselimuti dan yang diselimuti CaCO_3

Tabel 5. Hasil SEM untuk sampel perlakuan 10 ml

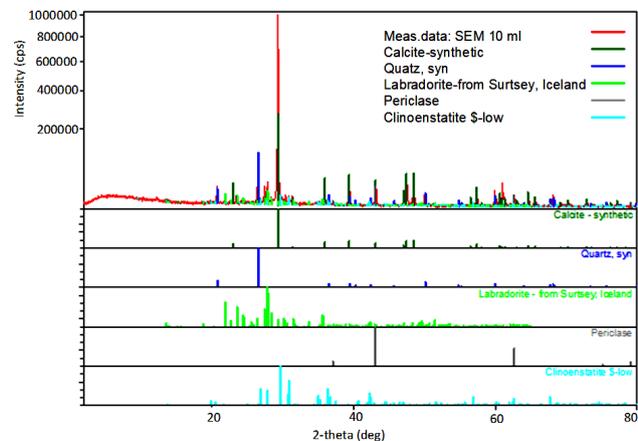
| No | Perbesaran | Spot X | Spot Y |
|----|------------|--------|--------|
| 1 | 200x | | |
| 2 | 600x | | |
| 3 | 2000x | | |
| 4 | 6000x | | |

Persebaran bentuk CaCO_3 yang tidak merata diduga dapat mempengaruhi kestabilan dan kekuatan dari struktur tanah tersementasi. Menurut penelitian dari Al Qabany dkk (2012), konsentrasi larutan sementasi

sangat mempengaruhi dalam pemerataan bentuk CaCO_3 . Semakin tinggi konsentrasi larutan sementasi (0,5 – 1 M), maka bentuk CaCO_3 akan semakin tidak seragam dibandingkan dengan penggunaan larutan sementasi yang lebih kecil (contoh: 0,25 M). Menurut Somani dkk. (2006), penggunaan larutan sementasi yang berkonsentrasi tinggi cenderung akan membentuk ukuran kristal CaCO_3 yang lebih besar pula. Penggunaan larutan sementasi dengan konsentrasi yang lebih kecil cenderung akan membentuk nukleasi CaCO_3 yang seragam. Oleh karena itu, untuk penelitian lanjutan, larutan sementasi dengan konsentrasi 0,25 M layak dipertimbangkan untuk diinjeksikan pada sampel tanah.

3.2.3 Uji XRD

Gambar 12 menunjukkan hasil uji XRD tanah tersementasi untuk sampel A10 yang didominasi oleh kadar CaCO_3 sintesis dengan puncak tertinggi. Komponen mineral tertinggi selanjutnya diikuti oleh kadar mineral kuarsa dimana kuarsa adalah komponen utama mineral tanah pasir Padang. Komponen-komponen lain seperti Labradorite, Periclase, dan Clinoenstatite juga merupakan mineral-mineral pembentuk tanah pasir Padang dan memiliki kadar yang cenderung rendah sehingga dikategorikan sebagai mineral minor.



Gambar 12. Hasil uji XRD tanah tersementasi

Berdasarkan hasil XRD, komponen dominan yang terukur adalah CaCO_3 sintesis. Menurut Kralj dkk (1990), komponen CaCO_3 akan lebih tinggi kemungkinannya untuk terbentuk dibandingkan Vaterite ketika aktivitas enzim urease cenderung rendah. Penelitian oleh Kakelar *et al.* (2016) juga menghasilkan komponen sampel tersementasi dengan kadar mineral Vaterite yang cukup tinggi, yaitu dengan perbandingan 48% Vaterite dengan 52% CaCO_3 , karena menggunakan bakteri dengan aktivitas enzim urease yang tinggi. Hasil yang didapatkan dalam penelitian melalui uji XRD ini tidak menunjukkan keberadaan kadar mineral Vaterite, sehingga dapat diduga bahwa bakteri isolat pasir Padang yang digunakan (*Sporosarcina Sp*) tidak menghasilkan aktivitas enzim urease yang tinggi.

4. Kesimpulan dan Rekomendasi

Makalah ini membahas kemampuan biosementasi oleh bakteri lokal yang teridentifikasi dari pasir lepas di

Padang, yaitu *Sporosarcina sp.* Dengan memanfaatkan proses *Microbial Induced Calcite Precipitation* (MICP), percobaan biosementasi tanah pasir lepas dengan bakteri *Sporosarcina Sp* dilakukan di laboratorium. Adapun beberapa kesimpulan dan rekomendasi yang diberikan antara lain:

Spesies isolat bakteri dari pasir lepas Padang teridentifikasi mampu melakukan biosementasi adalah *Sporosarcina sp.* Walaupun kemampuan urease bakteri *Sporosarcina sp* tidak bisa dikatakan tinggi, namun aplikasi bakteri ini untuk proses biosementasi cukup menjanjikan.

Kadar CaCO_3 dari keseluruhan tanah tersementasi yang terukur dari sampel B (tanah asli), A10, A20, dan A30 berturut-turut adalah sebesar 23,37%; 33,12%; 42,63%; dan 45,79%.

Kuat tekan bebas (q_u) untuk sampel B, A10, A20, dan A30 berturut-turut adalah >500 kPa, >500 kPa, 150 kPa, dan 425 kPa. Sedangkan sampel A (pasir steril) tidak membentuk tanah tersementasi sehingga kuat tekan bebasnya tidak dapat diukur.

Hasil SEM dan XRD secara jelas membuktikan keberadaan CaCO_3 yang terbentuk dari aktivitas urease bakteri *Sporosarcina sp.*

Pemberian larutan sementasi disarankan menggunakan mesin kompresor mini dan dengan konsentrasi 0,25 M, sehingga penyebaran larutan sementasi lebih merata dan terkontrol. Sehingga diharapkan sampel dapat tersementasi secara merata di seluruh tabung.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ikatan Alumni Teknik Sipil (IATS) Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan dukungan dana sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

6. Daftar Pustaka

ASTM official website /www.astm.org, ASTM WK27337, New Test Method for Pocket Penetrometer Test

Al Qabany, A., Soga, K., dan Santamarina, C. 2012. Factors Affecting Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation. *J. Geotech. Geoenvironment. Eng.* 138(8): 992-1001.

Cappuccino, JG. dan Sherman, N. 2010. *Microbiology: A Laboratory Manual*, 9th Ed. Benjamin Cummings.

Coduto, D P. 1994. *Foundation Design : Principles and Practices*. Prentice Hall.

DeJong, JT., Mortensen, BM., Martinez, BC., dan Nelson, DC. 2010. Bio-Mediated Soil Improvement. *Ecological Engineering*, 36:197-210.

Hakam, A., dan Darjanto, H. 2013. Penelusuran Potensi Likuifaksi Pantai Padang Berdasarkan Gradasi Butiran dan Tahanan Penetrasi Standar. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil* 20 (1):33-38.

Hasriana, SL., Harianto T., Djide MN. 2018. Bearing capacity improvement of soft soil subgrade layer with Bio Stabilized Bacillus Subtilis. *MATEC Web of Conferences*, 181, 01001

Kakelar, MM., Ebrahimi, S. dan Hosseini, M. 2016. Improvement in soil grouting by biosementasi through injection method. *Asia-Pac. J. Chem. Eng* 11: 930-938.

Karol, RH. 2003. *Chemical grouting and soil stabilization*, 3rd ed. New York: M. Dekker.

Kralj, D., Brecevic, L., dan Nielsen, AE. 1990. Vaterite growth and dissolution in aqueous solution I. *J. Cryst. Growth* 104: 793-800.

Lee, ML., Ng, WS., Tan, CK., dan Hii, SL. 2012. Bio-mediated Soil Improvement under Various Concentrations of Cementation Reagent. *Applied Mechanics and Materials* vol. 204-208: 326-329.

Ng, WS., Lee, ML., Tan, CK., dan Hii, SL. 2014. Factors Affecting Improvement in Engineering properties of Residual Soil Through Microbial-Induced Calcite Precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 140(5): GT.1943-5606.0001089

Putra H., Yasuhara H., Kinoshita N., Erizal., Sudibyo T. 2018. Improving Shear Strength Parameters of Sandy Soil using Enzyme-Mediated Calcite Precipitation Technique. *Civil Engineering Dimension*. 20(2): 91-95

Rebata-Landa, V. 2007. Microbial activity in sediments: Effects on soil behaviour. Ph.D. thesis, Georgia Institution of Technology, Atlanta.

Reznikov, B. 1972. Incubation of Brucella on solid nutrient media with a phenol red indicator. *Veterinariia*, 7: 109-110.

Stocks-Fischer, S., Galinat JK., dan Bang., SS. 1999. Microbiological precipitation of CaCO_3 . *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1563-157.

Somani, RS., Patel, KS., Mehta, AR., dan Jasra, RV. 2006. Examination of the polymorphs and particle size of calcium carbonate precipitated using still effluent (i. e., $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}$ solution) of soda ash manufacturing process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45(15) :5223-5230.

Whiffin, VS. 2004. CaCO_3 precipitation for the production of biocement. PhD Thesis, Murdoch University.

