

## KARAKTERISTIK TANAH TERKONTAMINASI BATUBARA TERSTABILISASI BAKTERI SEBAGAI LAPIS PONDASI JALAN

Andi Marini<sup>1</sup>, Tri Harianto<sup>2</sup> dan A.Rachman Djamaluddin<sup>3</sup>, Ardy Arsyad<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipi, Universitas Hasanuddin, email: [marini\\_sabrina@yahoo.com.sg](mailto:marini_sabrina@yahoo.com.sg)

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, email: [triharianto@hotmail.com](mailto:triharianto@hotmail.com)

<sup>3</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, email: [jamaluddinabdulrahman@yahoo.co.id](mailto:jamaluddinabdulrahman@yahoo.co.id)

<sup>4</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, email: [ardyarsyad@gmail.com](mailto:ardyarsyad@gmail.com)

### ABSTRAK

Indonesia memiliki ratusan ribu hektar lahan bekas tambang batubara yang dibiarkan terbengkalai begitu saja tanpa ada pengelolaan yang baik dari instansi yang berwenang. Material batubara dan tanah sisa tambang ini sebenarnya masih dapat dipergunakan sebagai material konstruksi jalan tetapi harus dilakukan proses stabilisasi terlebih dahulu untuk meningkatkan propertiesnya sehingga layak digunakan sebagai material konstruksi yang sesuai dengan standar bina marga. Untuk aplikasi geoteknik, grouting bakteri banyak digunakan untuk memperkuat tanah ekspansif dengan cara meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah melalui biomineralisasi kristal  $\text{CaCO}_3$  yang berfungsi sebagai pengikat partikel. Tetapi pada tanah bekas tambang batubara atau disebut tanah terkontaminasi batubara belum banyak dilakukan sehingga penelitian ini berfokus pada membangun sumber bahan organik in-situ dengan menggunakan bakteri yang berasal dari tanah terkontaminasi batubara sebagai bahan stabilisasi. Dalam penelitian ini bakteri dicampurkan kedalam tanah yang terkontaminasi batubara dengan prosentasi batubara 5%, 10% dan 15%. Prosentasi bakteri yang di grouting sebanyak 6%, kemudian dilakukan pemeraman selama 3, 7, 14 dan 28 hari. Pengamatan terhadap nilai kuat geser dan CBR dilakukan guna mengetahui perilaku mekanis. Pendekatan mikrostruktur SEM dan XRD, dilakukan untuk mengetahui spectrum karakteristik fisik. Hasil yang diharapkan mampu mereduksi besarnya penurunan, sebagai material lapis base pondasi jalan dan meningkatkan kapasitas dukung pondasi.

**Kata Kunci** : Stabilisasi, Biosementasi, Batubara, Bakteri, Mikrostruktur

### PENDAHULUAN

Indonesia memiliki ratusan ribu hektar lahan bekas tambang batubara yang dibiarkan terbengkalai begitu saja tanpa ada pengelolaan yang baik dari instansi yang berwenang. Luas wilayah dan mahalnya biaya reklamasi menyebabkan lahan bekas tambang batubara dibiarkan begitu saja. Lahan bekas tambang batubara umumnya masih mengandung sisa-sisa batubara yang tidak dapat terangkut pada saat proses penambangan walaupun jumlahnya sudah tidak banyak, tetapi tentu memberikan dampak pada tanah. Batubara yang mengandung sulfur diudara terbuka akan mengalami oksidasi yang jika bercampur dengan air akan menimbulkan air asam tambang atau yang dikenal dengan istilah *acid rock drainage* (ARD). ARD akan memberikan serangkaian dampak yang saling berkaitan, yaitu menurunnya pH, ketersediaan dan keseimbangan unsur hara dalam tanah terganggu, serta kelarutan unsur-unsur mikro yang umumnya merupakan unsur logam meningkat (Widyati, 2007), menyebabkan perubahan struktur tanah sehingga pemanfaatannya menjadi terbatas. Terganggunya keseimbangan unsur hara ini menyebabkan tanaman sebagai pelindung tidak dapat tumbuh akibatnya tanah mudah mengalami erosi dan infiltrasi air hujan sangat besar sehingga kekuatan tanah akan menurun. Salah satu pendekatan dalam pemulihan sifat geoteknik tanah mulai dikembangkan proses stabilisasi tanah menggunakan teknik presipitasi mikroba yang diinduksi kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) (microbially induced calcite precipitation MICP) yang ramah lingkungan.

Stabilisasi tanah dengan bahan organik atau bakteri telah banyak dilakukan tetapi lebih pada tanah ekspansif atau tanah lempung lunak. Penggunaan bakteri pada tanah yang mengandung limbah tambang batubara untuk meningkatkan sifat geotekniknya belum banyak dilakukan. Hal ini dikarenakan unsur logam dan pH tanah yang rendah menyebabkan bakteri sulit untuk tumbuh. Sehingga harus menggunakan bahan organik in-situ untuk memudahkan proses stabilisasi.

Beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan bakteri sebagai bahan stabilisasi mengungkapkan keuntungan dan kelebihan bakteri sebagai bahan stabilisasi dibandingkan material lain. Penelitian yang dilakukan Mujah, menyatakan penggunaan bakteri dengan umur kultur rendah dan konsentrasi cairan tinggi sebagai biosemen memberikan hasil yang lebih baik dari pada penggunaan semen (PC) untuk meningkatkan kekuatan tanah dan menurunkan permeabilitas, (2019). Injeksi bakteri *Pararhodobacter* sp. pada tanah yang dilakukan Mwindra (2017) 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. Pengujian dilakukan pada tanah pasir yang mengandung limbah timbal dari tambang. Pengujian Omar (2018) menggunakan bakteri dari limbah sayur sebagai bahan stabilisasi untuk mengurangi pengikisan tanah lereng juga berhasil dilakukan. Pada percobaan skala laboratorium dengan menginjeksi bakteri kedalam tanah yang dibentuk lereng kemiringan 45 derajat, dilakukan pemeraman selama 30 hari dan diuji dengan rainfall simulator ternyata mampu mengurangi pengikisan dari 34,6 g menjadi 13,5 g. Penyelidikan sifat geoteknik pasir bio-semen dengan berbagai tingkat kejenuhan juga telah di selidiki oleh Cheng (2013). Percobaan laboratorium dilakukan, termasuk analisis saringan, permeabilitas, *unconfined compressive strength*, *consolidated undrained triaxial*, dan *durability*. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan tanah yang lebih tinggi dapat diperoleh pada konten CaCO<sub>3</sub> yang sama ketika perawatan dilakukan di bawah tingkat kejenuhan yang rendah.

Produksi kalsium karbonat melalui hidrolisis urea oleh bakteri ureolitik adalah mekanisme MICCP yang paling mudah dikontrol dan berpotensi menghasilkan sejumlah besar kalsium karbonat dalam waktu singkat. Tetapi kinerja mekanik tanah yang distabilkan MICCP sangat tergantung pada struktur mikro kristal CaCO<sub>3</sub> yang diendapkan, yang dipengaruhi oleh berbagai parameter kimia, lingkungan, dan fisik. Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memperkaya wawasan tentang karakteristik fisik, mekanis dan mikrostruktur biosementasi tanah yang terkontaminasi batubara terhadap parameter geoteknik.

## MATERIAL DAN METODE

### Tanah Dan Batubara

Material yang digunakan dalam penelitian diambil di daerah Kota Balikpapan Propinsi Kalimantan Timur, Indonesia. Tanah dan batubara diambil pada lokasi yang sama dengan cara konvensional menggunakan skop, selanjutnya material ditempatkan dalam karung sampel dan dibungkus dengan plastik untuk menjaga kondisi kadar air asli.



**Gambar 1.a,b Lokasi Pengambilan Sampel Tanah dan Batubara**

## Kultur Bakteri

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini adalah bakteri yang diisolat dari batubara yang digunakan. Kondisi pH air asam tambang batubara yang berkisar, 2-3 Choudhury (2017) membuat tanah bersifat asam sehingga tidak semua mikroorganisme bisa tumbuh dengan baik sehingga perlu membuat isolat bakteri yang berasal dari batubara itu sendiri. Kultur bakteri adalah metode memperbanyak bakteri pada media kultur dengan pembiakan dilaboratorium yang terkendali. Pada proses kultur, isolate bakteri yang berumur 24 jam diinokulasikan pada media *nutrient broth* dengan masa inkubasi pada *shaker* selama 24 jam dengan kecepatan putaran adalah 150 rpm (M. Fauzul Imron, 2016). Teknik inokulasi yang digunakan adalah teknik gores dengan sebelumnya dilakukan pengenceran terlebih dahulu agar hasil koloni yang didapat berupa biakan murni (Hasriana, 2018). Uji laju pertumbuhan bakteri dilakukan untuk mengetahui sifat pertumbuhan bakteri melalui kurva pertumbuhan bakteri. Kurva pertumbuhan bakteri dibuat untuk mengetahui fase pertumbuhan bakteri yaitu fase lag, eksponensial, stasioner, dan kematian (Dwipayana, 2009).

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium untuk menguji karakteristik tanah terkontaminasi batubara yang telah distabilisasi dengan biosementasi. Batubara yang digunakan dalam penelitian ini terlebih dahulu ditumbuk dan disaring hingga lolos saringan No. 100 (0,149 mm) untuk memudahkan proses pencampuran dengan tanah dan diperoleh gradasi yang baik nantinya. Beberapa tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut; pertama, melakukan kajian literatur dan survey pendahuluan untuk mengidentifikasi masalah dan identifikasi lokasi pengambilan sampel; kedua, melakukan uji pendahuluan terhadap sampel yang telah diambil untuk mengetahui karakteristik tanah dan batubara. Uji laboratorium untuk mengetahui sifat-sifat fisik yang meliputi kadar air, gradasi, dan spesifik grafiti, sedangkan uji sifat mekanis meliputi uji pemadatan, uji kuat geser, dan uji daya dukung.

Hasil uji mekanik selanjutnya digunakan untuk menentukan komposisi tanah terkontaminasi batubara yang efektif untuk dimanfaatkan sebagai lapisan pondasi jalan. Dalam penelitian ini presentase batubara yang dicampurkan dalam tanah dibuat dalam 3 variasi yaitu 5%, 10% dan 15%. Variasi pencampuran untuk mengetahui pengaruh batubara dalam tanah terhadap karakteristik fisik dan mekanik tanah. Pengujian gradasi tanah dilakukan dengan uji analisa saringan, untuk pengujian pemadatan dilakukan dengan pemadatan Proctor standar, uji kuat geser dilakukan dengan pengujian Direct Shear, dan daya dukung tanah dilakukan dengan pengujian CBR laboratorium. Standard pengujian sifat-sifat dasar tanah (fisik dan mekanik) yang digunakan seperti pada Tabel 1. Rancangan Benda Uji di tampilkan dalam Tabel 2.

**Tabel 1. Standard Pengujian Yang Digunakan**

No	Jenis Pengujian	Jenis Standard	
		ASTM	SNI
1	Analisa Saringan	C-136-06	SNI 03-1968-1990
2	Berat Jenis Tanah (Gs)	D-162	SNI 03-1964-1990
3	Kadar Air (Wc)	D-2216-98	SNI 03-1965-1990
4	Berat Isi Kering ( $\gamma_{dry}$ )	D-854-72	SNI 03-1970-2008
5	Uji Kuat Geser Langsung (Cu)	E-736-00	SNI 03-3420-1994
6	Uji Pemadatan	D-698	SNI 03-1742-1989
7	Daya Dukung Tanah (CBR)	D-1833	SNI 03-6796-2002

**Tabel 2. Persiapan Benda Uji Sebelum Stabilisasi**

Jenis Pengujian	Jenis Material	Jumlah Benda Uji				Data
		% Batu Bara				
		0	5	10	15	
1. Uji Analisa Saringan 2. Uji Standard Proktor 3. Uji Geser Langsung 4. Uji CBR	Tanah + Batu Bara	3	3	3	3	Parameter Sifat Fisis dan Mekanis
Uji Mikrostruktur (SEM dan XRD)	Tanah + Batu Bara	1	1	1	1	Parameter mineralogi mikro-struktur dan komposisi

Tanah, batubara dan air ditimbang dengan komposisi rencana untuk menghasilkan campuran material benda uji sesuai dengan yang telah ditetapkan, pencampuran dilakukan secara teliti dan diperam selama 24 jam sampai mencapai kondisi setimbang sebelum dilakukan pengujian. Hasil setelah pencampuran dapat dilihat pada Gambar 6. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran dimensi  $H=2D$ , dalam kondisi kadar air optimum Proctor. Dimasukkan dalam cetakan yang telah diolesi minyak pelumas, selanjutnya dilakukan penumbukan tiap sepertiga bagian dengan jumlah tumbukan 25 kali selanjutnya diuji dan ditentukan kadar airnya. Data hasil pengujian diolah untuk menghasilkan hubungan antara kadar air, kepadatan, dan kekuatan tanah, selanjutnya dianalisis secara deskriptif kualitatif

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebanyak 3%, dan 6% dari beratsampel tanah terkontaminasi batubara yang digunakan. Baik untuk pengujian direct shear maupun pengujian CBR. Rancangan jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah ini.

**Tabel 3. Persiapan Benda Uji Proses Stabilisasi**

Jenis Pengujian	Jenis Material	Waktu Peram (Hari)	Jumlah Benda Uji				Data
			% Batu Bara				
			0	5	10	15	
1. Uji Geser Langsung 2. Uji CBR a. soaked b. unsoaked	Tanah + Batu Bara + Bakteri umur kultur 3 hari sebanyak 3%	3	3	3	3	Parameter Sifat Mekanis	
		7	3	3	3		
		14	3	3	3		
		28	3	3	3		
	Tanah + Batu Bara + Bakteri umur kultur 3 hari sebanyak 6%	3	3	3	3		
		7	3	3	3		
		14	3	3	3		
		28	3	3	3		
	Tanah + Batu Bara + Bakteri umur kultur 6 hari sebanyak 3%	3	3	3	3		
		7	3	3	3		
		14	3	3	3		
		28	3	3	3		
Tanah + Batu Bara + Bakteri umur kultur 6 hari sebanyak 6%	3	3	3	3			
	7	3	3	3			
	14	3	3	3			
	28	3	3	3			
Uji Mikrostruktur (SEM dan XRD)	Tanah + Batu Bara + Bakteri umur kultur (optimum hari) sebanyak 6%		1	1	1	1	Parameter mineralogi mikro-struktur dan komposisi

## Alat Uji Penelitian

### 1. Pengujian Perilaku Fisik, Mekanis dan Perilaku Mikrostruktur

Uji laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat fisik meliputi kadar air, gradasi butiran spesifik gravity, sedangkan uji sifat mekanis meliputi uji pemadatan, kuat geser dan daya dukung. Pengujian pemadatan dilakukan menggunakan pemadatan *proctor standard*, kuat geser menggunakan *direct shear*, dan daya dukung tanah dengan uji CBR.

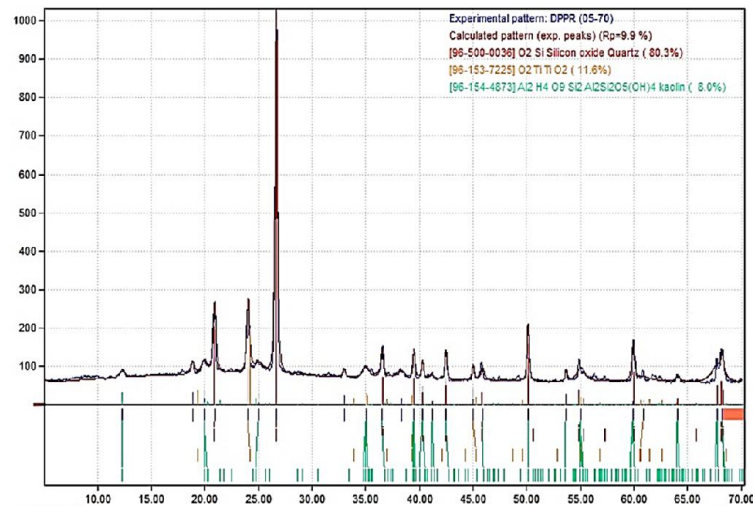
Alat yang akan digunakan sebelumnya diperiksa kondisi dan kemampuannya serta dikalibrasi. Sampel tanah dipersiapkan sesuai dengan standar prosedur pengujian.

#### a. Parameter Uji Mineralogi dan Mikrostruktur Tanah

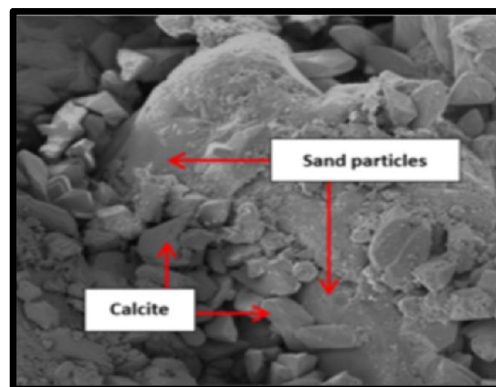
Parameter mineralogi diuji menggunakan metode X-Ray Difraksi (XRD) sesuai standard ASTM D3906-03 (2013) dan parameter mikro-kimia diuji dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) sesuai standard ASTM E986-04 (2010),.

#### b. Uji Perilaku Mikrostruktur

Perilaku mikrostruktur diuji dengan pengujian XRD dan SEM.



Gambar 2. Grafik Difraksi XRD



Gambar 3. Observasi Menggunakan SEM

### 2. Metode Uji Stabilisasi Tanah terkontaminasi batubara dengan Bakteri

Benda uji tanah di siapkan dengan variasi kontaminan dalam hal ini batubara dengan prosentase batubara masing – masing sebesar 0%, 5%, 10% dan 15 %. Kemudian diinjeksikan bakteri sebanyak

6% dari dari berat sampel pengujian. Kultur bakteri yang digunakan dalam pengujian di variasi dari umur 1, 3 dan 6 hari. Setelah semua sampel di injeksi dengan bakteri kemudian di curing selama 7, 14, 21 dan 28 hari lalu kemudian dilakukan pengujian kuat geser dan uji CBR.

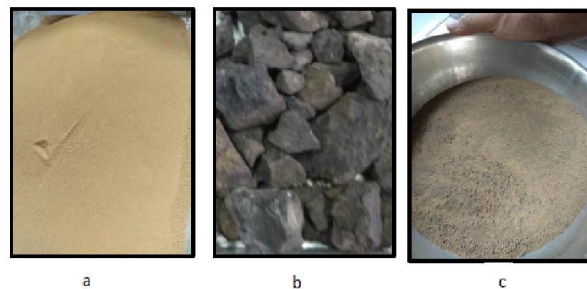


Gambar 4. (a) Alat Uji Direct Shear (b) Alat Uji CBR Test.

## HASIL YANG DIHARAPKAN

### Pengaruh Kontaminasi Batubara

Persentasi batubara yang tercampur dengan tanah asli dipapangan tidak diketahui dengan pasti sehingga dilakukan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium untuk menguji karakteristik tanah terkontaminasi batubara sebagai material alternatif pengganti lapisan pondasi jalan. Sebelum dilakukan proses stabilisasi dengan bakteri terlebih dahulu dilakukan pengujian perilaku tanah terkontaminasi batubara. Batubara yang digunakan dalam penelitian ini terlebih dahulu ditumbuk dan disaring hingga lolos saringan No. 100 (0,149 mm) untuk memudahkan proses pencampuran dengan tanah dan diperoleh gradasi yang baik nantinya. Beberapa tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut; pertama, melakukan kajian literatur dan survey pendahuluan untuk mengidentifikasi masalah dan identifikasi lokasi pengambilan sampel; kedua, melakukan uji pendahuluan terhadap sampel yang telah diambil untuk mengetahui karakteristik tanah dan batubara. Uji laboratorium untuk mengetahui sifat-sifat fisik yang meliputi kadar air, gradasi, dan spesifik grafiti, sedangkan uji sifat mekanis meliputi uji pemadatan, uji kuat geser, dan uji daya dukung.



Gambar 5. a. Pasir b. Batubara c. Pencampuran Pasir dan Batubara

Hasil uji mekanik selanjutnya digunakan untuk menentukan komposisi tanah terkontaminasi batubara yang efektif untuk dimanfaatkan sebagai lapisan pondasi jalan. Dalam penelitian ini presentase batubara yang dicampurkan dalam tanah dibuat dalam 3 variasi yaitu 5%, 10% dan 15%. Variasi pencampuran untuk mengetahui pengaruh batubara dalam tanah terhadap karakteristik fisik dan mekanik tanah. Pengujian gradasi tanah dilakukan dengan uji analisa saringan, untuk pengujian pemadatan dilakukan dengan pemadatan proctor standar, uji kuat geser dilakukan dengan pengujian *direct shear*, dan daya dukung tanah dilakukan dengan pengujian CBR laboratorium.



Sifat fisik batubara yang keras dan halus karena batubara yang dicampurkan lolos saringan No. 100 (0,149 mm) diharapkan mampu memperbaiki gradasi dan meningkatkan sifat mekanis sehingga daya dukung tanah juga meningkat walaupun belum memenuhi standar bina marga sebagai material pondasi jalan (*base course*).



**Gambar 6. Perawatan benda uji setelah dicampur bakteri**

#### **Pengaruh Penambahan Bakteri**

Hubungan antara karakteristik mikrostruktur kristal  $\text{CaCO}_3$  dan kekuatan yang sesuai dari pasca perawatan biocemented diselidiki menggunakan scanning electron microscopy (SEM) sampel hasil pengujian direct shear yang bongkahan utuh kecil digunakan untuk analisis SEM; karena itu, ikatan dan struktur mikro dari bongkahan pasir utuh tetap tak terganggu. Perilaku ikatan antara butiran tanah terkontaminasi batubara dan struktur kristal  $\text{CaCO}_3$ , serta evolusi dari morfologi kristal  $\text{CaCO}_3$  yang efektif, diperiksa. Pengujian mikrostruktur dilakukan pada sampel setelah perawatan selama 28 hari.

Efek penambahan bakteri dengan umur kultur yang berbeda dan persentasi volume bakteri yang berbeda diharapkan dapat terlihat dari hasil pengujian direct shear dan CBR sehingga dapat diketahui perubahan kekuatan tanah yang terjadi. Dari penambahan bakteri dengan umur kultur 3 hari dan 6 hari kemudian dilakukan perawatan selama 3, 7, 14 dan 28 hari lalu dilakukan pengujian direct shear dan CBR. Penambahan bakteri dengan persentasi 3% dan 6% dari berat tanah juga dilakukan dengan perawatan selama 3, 7, 14 dan 28 hari kemudian dilakukan pengujian direct shear dan CBR diharapkan dapat terlihat tren perkembangan atau perubahan kekuatan yang terjadi.

Hasil uji mekanik selanjutnya digunakan untuk menentukan komposisi tanah terkontaminasi batubara dan bakteri yang efektif untuk dimanfaatkan sebagai lapisan pondasi jalan. Parameter efektif adalah kekuatan dan daya dukung tanah terkontaminasi batubara, sedangkan variabel yang mempengaruhi adalah persentase bakteri, umur kultur dan waktu pemeraman. Analisis data hasil pengukuran uji model fisik, mekanik dan mikrostruktur dilakukan untuk melihat karakteristik geomekanik dan mikrostruktur pada biosementasi tanah terkontaminasi batubara.



**Gambar 7. a. Sebelum Perawatan b. Setelah Perawatan**

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM (1992), ASTM Standards on Soil Stabilization with Admixture, American Society Testing and Materials, Second Edition.
- Cheng, L., M. A. Shahin, and D. Mujah. 2017, "Influence of Key Environmental Conditions on Microbially Induced Cementation for Soil Stabilization", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Volume. 143
- Cheng, L., and R. Cord-Ruwisch. 2014, "Upscaling Effects of Soil Improvement by Microbially Induced Calcite Precipitation by Surface Percolation", *Geomicrobiology Journal*
- Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A (2013), "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation", *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 81–90
- Choudhury, B. U., Malang, A., Webster, R., Mohapatra, K. P., Verma, B. C., Kumar, M Hazarika, S. (2017). "Acid drainage from coal mining: Effect on paddy soil and productivity of rice", *Science of The Total Environment*, 583, 344–351.
- Donovan Mujah, Liang Cheng, Mohamed A. Shahin (2019), "Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Proces"s, *J. Mater. Civ. Eng ASCE* 04019025.
- Hardiyatmo, C.H (2010), *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hasriana, Lawalenna Samang, M.Natsir Djide, dan Tri Harianto (2017), "Pengaruh Penambahan Bakteri (*Bacillus Subtilis*) Pada Tanah Lunak Terhadap Karakteristik Kuat Tekan", *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil XI, 26-7-27 Oktober 2017*
- Periasamy Anbu, Chang-Ho Kang, Yu-Jin Shin and Jae-Seong So., (2016), "Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications". Springer.
- R.C Omar, Hairin Taha, R. Roslan, I.N.Z Baharudin (2018), "Study of bio-grout treated slope models under simulated rainfall", *International Journal of GEOMATE*, March, Vol.14.
- Shujing Ye, Guangming Zeng, Haipeng Wu, Chang Zhang, Juan Dai, Jie Liang, Jiangfang Yu, Xiaoya Ren, Huan Yi, Min Cheng and Chen Zhang, (2017), "Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil". *Critical Reviews in Biotechnology*
- SNI 03-3440 (1994), *Tata Cara Pelaksanaan Stabilisasi Tanah dengan Semen Portland untuk Jalan*, DSN.
- Wilson Mwandiraa, Kazunori Nakashimab, Satoru Kawasaki (2017), "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", *Ecological Engineering* 109 (2017) 57–64.
- Widyati (2007), "Pemanfaatan Bakteri Pereduksi Sulfat untuk Bioremediasi Tanah Bekas Tambang Batubara", *Biodiversitas*, Volume 8 No. 4