

Perbaikan sifat fisika-mekanis tanah dengan mediasi teknik hayati

Improvement of Soil Physico-mechanical Properties by Bio-Mediation Technique

Didiek Hadjar Goenadi^{*)}

Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia, Jl Taman kencana No 1 Bogor 16128, Indonesia

Diterima tgl 28 Oktober 2016 / disetujui tgl 21 maret 2017

Abstract

Soil properties unsuitable to support physical-mechanical requirements oftenly become problems in utilizing it for agricultural as well as construction purposes. Most common practice to overcome the problems is by applying chemical agent which are not only expensive but also enviromentally un-friendly. Therefore, it is imperative to seek a new, sustainable, and innovative technology to improve mechanical soil properties. Many researches gave opportunity to utilize microbes for this idea, in particular those microbes capable of producing secondary metabolite to strengthen soil particle structure such as urease enzyme. This kind of bacteria is capable of promoting the formation of calcite mineral acting as cementing substance among the soil particles. However, the direct application of this technology faces some handicaps in the field, i.e. soil and pore fluid interaction, bio-augmentation verses bio-stimulation of microbial community, controlled distribution of bio-mediated calcite precipitation, and permanence cementation. This article aims at providing a general overview regarding technological development to improve soil mechanical properties suitable for construction by applying microbes.

[Key words : soil physical properties, mechanical properties, ureolitic microbes, pore fluid, calcite precipitation]

Abstrak

Sifat tanah yang tidak mampu memberikan dukungan fisika-mekanis yang diperlukan seringkali menjadi kendala dalam pemanfaatannya baik untuk pertanian maupun konstruksi. Cara-cara yang umum adalah dengan aplikasi bahan kimia yang tidak saja mahal, tetapi

juga tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu diperlukan teknologi baru, berkelanjutan, dan inovatif untuk memperbaiki sifat-sifat mekanis tanah. Beberapa penelitian telah memberikan peluang untuk memanfaatkan mikroba untuk tujuan ini, khususnya mikroba yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan senyawa metabolit sekunder penguat struktur partikel tanah seperti enzim urease. Bakteri penghasil enzim ini mampu mendorong pembentukan mineral kalsit yang berfungsi sebagai perekat antar partikel tanah. Bagaimanapun juga, aplikasi teknologi ini secara langsung di lapangan menghadapi beberapa kendala, seperti interaksi tanah dan cairan ruang pori, bioaugmentasi vs biostimulan dari komunitas mikroba, penyebaran terkendali dari pengendapan kalsit yang dimediasi, dan sementasi permanen. Tulisan ini menyajikan secara singkat pengembangan teknologi perbaikan sifat fisik mekanis tanah melalui aplikasi mikroba untuk memenuhi persyaratan pekerjaan konstruksi.

[Kata kunci : sifat fisika tanah, sifat mekanis, mikroba ureolitik, cairan ruang pori, pengendapan kalsit]

Pendahuluan

Kebutuhan infrastruktur sipil untuk pertanian dan non-pertanian membuka peluang untuk teknologi yang berkelanjutan yang memenuhi persyaratan sosial dengan pembiayaan yang efisien dan berdampak negatif rendah. Pengendalian dan modifikasi sifat-sifat tanah sangat penting untuk aplikasi geoteknik, geolingkungan, pertanian, dan yang lainnya. Praktek yang umum digunakan di bidang konstruksi adalah dengan menyuntikkan bahan sintetik ke dalam lapisan bawah permukaan melalui teknik pengisian celah dengan aliran bahan kimia untuk mengikat partikel tanah dan

^{*)} Penulis korenspondensi: dhg.rpn@gmail.com

meningkatkan sifat-sifat tanah untuk keteknikan, seperti kekuatan, daya tahan beban, dan permeabilitas. Bagaimanapun juga, bahan sintetik mahal, sulit didistribusikan secara merata dan dapat memasukkan bahan berbahaya ke dalam tanah. Perbaikan sifat geoteknik tanah dapat dicapai dengan memanfaatkan proses biologi alami (DeJong *et al.*, 2009).

Pemikiran tentang pemanfaatan mikroba untuk perbaikan sifat mekanis tanah didasarkan pada kenyataan bahwa beberapa jenis mikroba mampu memantapkan agregat (Santi & Goenadi, 2012) melalui perekatan partikel tanah oleh ekstrapolisakarida yang diproduksinya. Di sisi lain, ada mikroba sejenis yang mampu mengendapkan senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) atau kalsit (mineral liat CaCO_3). Masing-masing proses tersebut yang pertama disebut dengan istilah *microbial induced calcite precipitation (MICP)* (DeJong *et al.*, 2009) sedang yang kedua disebut sebagai *microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICCP)* (Williams *et al.*, 2016). Proses yang sebenarnya sama ini mengacu pada pemanfaatan mikroba penghasil enzim urease (*ureolytic bacteria*) (Wei *et al.*, 2015; Putra *et al.*, 2016).

Perbaikan tanah yang dimediasi secara hayati memiliki sifat-sifat yang unik dengan keunggulan potensial lebih baik dibandingkan dengan teknik perbaikan tanah secara konvensional. Keunggulan dari teknik ini terletak pada proses bio-geo-kimia yang secara efektif memacu pengendapan mineral. Teknik MICCP tersebut dianggap salah satu teknik yang menjanjikan untuk perbaikan tanah yang dimediasi oleh mikroba (DeJong *et al.*, 2011; Martinez *et al.*, 2013). Bagaimanapun juga, hasil-hasil penelitian yang dipublikasikan masih memaparkan tingkat awal dan belum ada yang sampai mencobanya pada tingkat aplikasi. Besarnya peluang aplikasi dari teknologi ini mendorong kalangan ilmuwan konstruksi (teknik sipil) bekerjasama dengan ilmuwan biologi (mikrobiologi tanah) untuk menciptakan teknologi yang dibutuhkan. Suatu kolaborasi yang tidak pernah terpikirkan pada satu atau dua dekade yang lalu.

Kolaborasi antara ahli konstruksi dan ahli mikroba dimulai dengan ditemukannya aplikasi bakteri pembentuk spora yang mampu menutup retakan mikro pada beton. Edvardsen (1999); Li & Yang (2007) melaporkan bahwa penutupan retakan beton oleh bakteri hanya terkait dengan retakan mikro berukuran 0,1-0,2 mm. Kemudian peneliti dari Belanda, yaitu Henk Jonker sejak tahun 2007 mempelajari teknologi aplikasi mikroba untuk penutupan retakan mikro pada beton (Jonker, 2007). Sejak saat itu minat peneliti untuk mempelajari aplikasi mikroba pada kegiatan konstruksi makin meningkat (Xu & Yao, 2014); deKoster *et al.* (2015), and Zhang *et al.* (2016). Di dalam negeri laporan hasil penelitian

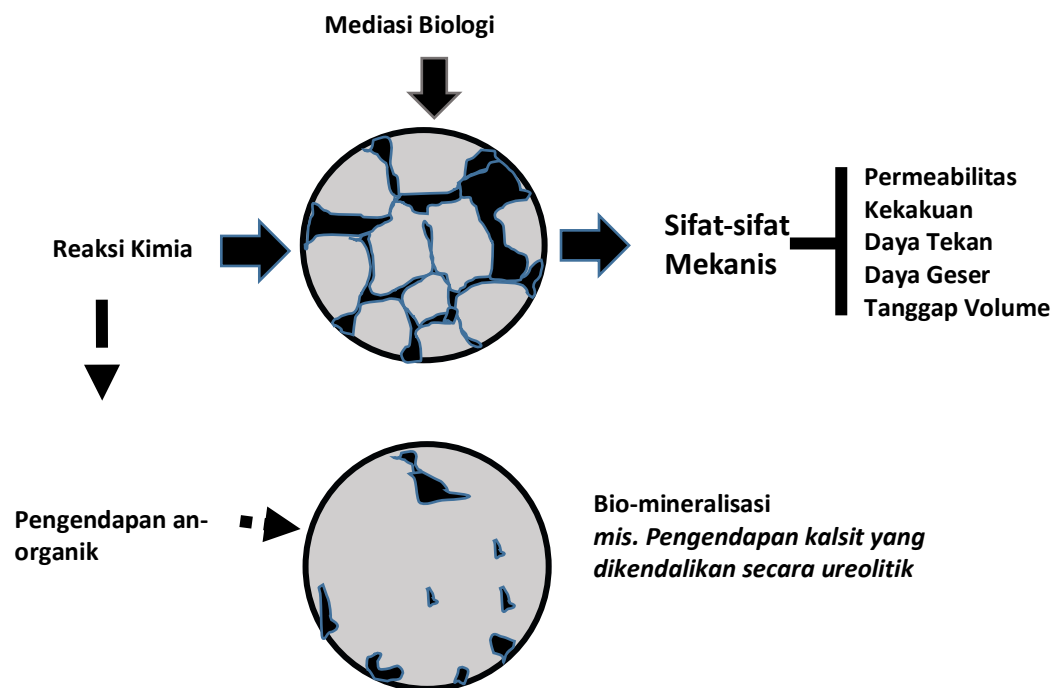
tentang teknologi ini masih sangat terbatas, walaupun publikasi non-ilmiahnya cukup banyak. Salah satunya adalah hasil penelitian Adriyati (2014) yang mempelajari komposisi bakteri *Bacillus subtilis* dengan metode pengkapsulan hidrogel dalam aplikasinya di beton pulih-sendiri (*self-healing concrete*).

Tulisan ini bertujuan mengulas aplikasi teknologi mikroba sebagai media hayati untuk meningkatkan mutu sifat-sifat mekanik tanah yang dibutuhkan dalam upaya peningkatan daya dukungnya terhadap pembangunan infrastruktur secara umum termasuk sektor pertanian. Pemikiran yang dikembangkan dalam ulasan ini adalah untuk menunjukkan luasnya keragaman aplikasi mikroba, khususnya dalam perbaikan sifat tanah untuk mendukung aktivitas di atasnya, yang bukan hanya untuk tujuan pertanian semata.

Sistem Perbaikan Tanah yang Dimediasi oleh Mikroba

Perbaikan sifat tanah dengan menggunakan agensia hayati sudah banyak diteliti. Sifat tanah yang ditargetkan untuk diperbaiki dengan pemanfaatan mikroba ini terutama adalah sifat fisiknya, yang dalam hal ini adalah kemantapan agregat. Kemantapan agregat tanah akan mendorong terciptanya kemampuan tanah menahan air, memasok oksigen bagi akar tanaman, ketahanan tanah terhadap pukulan butir-butir hujan yang pada gilirannya tahan terhadap erosi, dan perkolasi dan permeabilitas yang lebih efektif. Dalam kondisi tersedianya larutan tanah yang cukup, maka aktivitas mikroba berjalan secara optimal yang kemudian mampu memfasilitasi berlangsungnya proses bio-kimia di dalam tanah secara efisien. Dalam proses pembentukan agregat sekunder, Santi & Goenadi (2013) melaporkan adanya peran metabolit sekunder berupa eksopolisakarida dari bakteri pemantap agregat. Senyawa tersebut berfungsi sebagai perekat partikel tanah primer (pasir, debu, dan liat) dan bahan organik. Proses ini kemudian akan memunculkan ruang pori di antara partikel sekunder yang berfungsi sebagai saluran pertukaran oksigen dengan senyawa-senyawa gas organik hasil dekomposisi bahan organik dan/atau diisi oleh air/larutan tanah.

Di pihak lain dalam proses perbaikan sifat tanah yang dimediasi oleh mikroba di bidang konstruksi bangunan infrastruktur lebih menekankan pada fenomena pengendapan kalsium (Ca). Gambar 1 menunjukkan satu aliran proses yang terkait dengan perubahan sifat mekanis tanah yang dimediasi oleh mikroba. Dari gambar ini dapat dicermati bahwa perbaikan tanah yang dimediasi secara hayati tergantung pada proses-proses geo-kimia yang difasilitasi oleh aktivitas biologi. Proses ini berlangsung di dalam ruang pori dari matriks tanah dan pembentukan endapan mineral terkait yang



Gambar 1. Skema sistem perbaikan tanah yang dimediasi secara biologis (DeJong, 2009 dimodifikasi).

Figure 1. Schematic illustration of soil improvement system mediated by microbes (DeJong, 2009 modified).

mengubah sifat fisik dan kimia tanah akibat sementasi. Peningkatan pengendapan kalsit yang dikendalikan oleh mikroba ureolitik dalam penutupan ruang pori merupakan proses utama dalam fenomena ini. Hidrolisis urea oleh mikroba memunculkan ion karbonat di tempat (*in-situ*) yang kemudian bereaksi dengan kalsium membentuk endapan mineral karbonat.

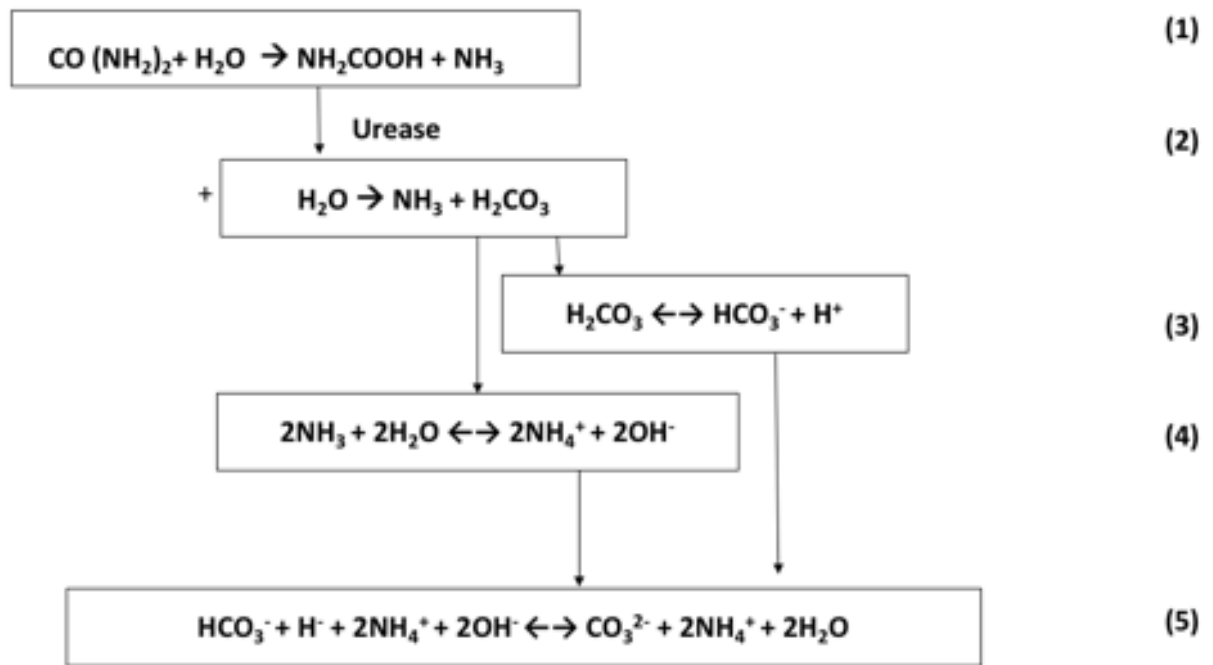
Dari proses ini mediasi mikroba mengubah sifat mekanis tanah, dalam hal ini penurunan permeabilitas (*permeability*), kemampuan tekan (*compressibility*), dan tanggap volume (*volumetric response*) and peningkatan daya kekakuan (*stiffness*) dan daya geser (*shear strength*). Aktivitas metabolisme mikroba mempengaruhi saat, laju, dan lokasi pengendapan kalsium karbonat. Di sisi lain, reaksi kimia yang terjadi di dalam ruang pori tanah akan dipengaruhi oleh pH, konsentrasi bahan terlarut, dan daya tahan (*resistivity*) yang akan menghasilkan pengendapan secara an-organik. Proses selanjutnya adalah terjadinya bio-mineralisasi yang merupakan bagian proses dari pengendapan kalsit yang dikendalikan oleh enzim ureolitik.

Mekanisme Biokimia Perbaikan Sifat Tanah

Proses Biokimia

Alasan utama untuk memanfaatkan mikroba sebagai agen perbaikan sifat tanah adalah

kemampuannya di dalam melarutkan dan mengendapkan kalsit (CaCO_3) melalui aktivitas enzim penghidrolisis urea yang dihasilkannya. Teknik ini kemudian menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan, mudah, dan murah dibandingkan dengan teknologi yang tersedia dengan menggunakan bahan kimia sebagai pemantap dan penguat agregat. Selain melalui proses hidrolisis urea yang dikatalisis oleh enzim urease, mikroba termaksud yang mendorong proses bio-mineralisasi karbonat. Hidrolisis urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) yang dikatalisis oleh urease menjadi ammonium (NH_4^+) dan karbonat (CO_3^{2-}) (Tittleboom *et al.*, 2010). Wang *et al.* (2012) menyajikan urutan proses pengendapan oleh bakteri pembentuk kalsit (Gambar 2). Dalam persamaan No. 1, satu mol urea dihidrolisis secara interseluler menjadi satu mol karbonat dan satu mol ammonia. Karbonat ini secara spontan kemudian menghidrolisis untuk membentuk tambahan 1 mol ammonia dan asam karbonat (persamaan No. 2). Produk hidrolisis ini kemudian secara bertahap menghasilkan 1 mol bikarbonat dan 2 mol ammonium dan ion hidroksida (persamaan No. 3 dan 4). Persamaan dua terakhir menyebabkan peningkatan pH, yang pada gilirannya menggeser kesetimbangan bikarbonat, yang menghasilkan pembentukan ion karbonat (persamaan No. 5).

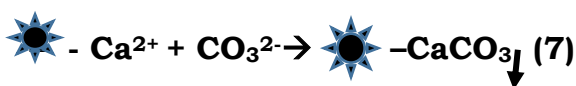


Gambar 2. Reaksi tahapan hidrolisis urea yang dikatalisasi oleh enzim urease.
 Figure 2. Reaction steps in hydrolysis of urea catalyzed by urease enzyme.

Oleh karena dinding sel bakteri bermuatan negatif, maka bakteri ini dapat menyerap kation basa dari lingkungan mikro setempat, termasuk Ca^{2+} , untuk dikumpulkan di permukaan sel. Selanjutnya secara bertahap Ca^{2+} berreaksi dengan ion CO_3^{2-} yang mengakibatkan pengendapan CaCO_3 di permukaan sel yang bertindak sebagai situs nukleasi seperti dalam persamaan No. 6 dan 7 (Kashyap & Radhakrishna, 2013). Endapan CaCO_3 (kalsit) yang berlangsung secara kontinyu inilah yang kemudian menumpuk dan akhirnya menutup ruang retakan atau menghubungkan ujung dua partikel primer tanah (Gambar 3).



Sel bakteri

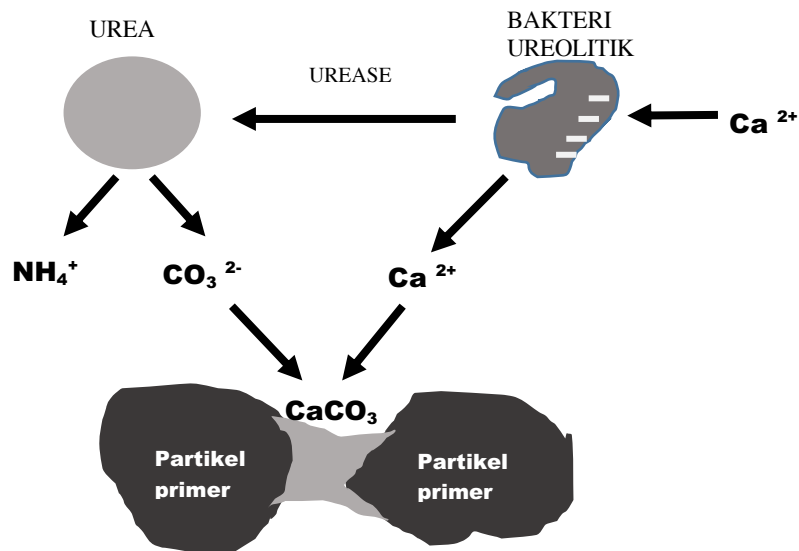


Jenis Mikroba Pembentuk Kalsit

Seperti halnya pada aplikasi mikroba untuk menutup retakan beton, mediasi mikroba untuk perbaikan sifat mekanis tanah memanfaatkan kemampuan mikroba-mikroba, yang umumnya adalah bakteri pembentuk spora (Gambar 3), dalam mendorong terbentuknya bahan penyemen

seperti kalsit. Dalam uraian sebelumnya disajikan bahwa pembentukan kalsit oleh bakteri penghasil enzim urease menghasilkan karbonat hasil hidrolisis urea yang berikatan dengan kation kalsium yang dijerapnya. Sementasi dalam proses ini prinsipnya adalah mengikat ujung-ujung partikel primer tanah menjadi satu kesatuan agregat yang lebih stabil. Dalam bidang pertanian tanaman, proses ini disebut dengan istilah pematangan agregat (Santi & Goenadi, 2013). Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mempelajari kemampuan berbagai jenis bakteri yang mampu mendorong pembentukan kalsit.

Hasil penelitian Zhang *et al.* (2016) menunjukkan bahwa mikroba dengan kemampuan aktivitas pengendapan kalsit (APK) 94,8% tergolong spesies *Bacillus sp.* DeJong *et al.* (2006) menggunakan isolate *Bacillus pasteurii*, yang kemudian dinamakan *Sporosarcina pasteurii* (Williams *et al.*, 2016), untuk membentuk stabilitas pasir. Hasilnya menunjukkan bahwa sementasi terjadi pada matrik pasir dengan pemusatan kalsit membentuk ikatan pada ujung pertemuan dua partikel. Fenomena ini tentu menjadi sebuah harapan dalam bidang konstruksi di tanah-tanah berpasir yang memerlukan kekompakan partikelnya. Jenis *Bacillus* lainnya yang dilaporkan memiliki kemampuan pembentukan kalsit adalah *Bacillus sphaericus* (Tittelboom *et al.*, 2010 & Ersan *et al.*, 2016).



Gambar 3. Proses pembentukan jembatan dua ujung partikel primer tanah oleh kalsit yang terbentuk oleh hidrolisis urea.

Figure 3. Formation of soil primary particles' bridged by newly formed calcite from urea hydrolysis.

Isolat yang digunakan tersebut adalah yang memiliki kemampuan memproduksi enzim urease yang diperlukan untuk menghidrolisis urea sehingga menghasilkan karbonat yang kemudian bereaksi dengan kalsium membentuk kalsit yang mengendap. Dengan kata lain, kinerja enzim urease ini sangat penting untuk menghasilkan proses yang efisien. Oleh karena itu, banyak peneliti yang melaporkan tentang berbagai aspek tentang kinerja enzim ini (Fisher *et al.*, 2016; Kissel *et al.*, 2014; Garcia *et al.*, 2014).

Sifat Tanah yang Penting Diperbaiki

Dari berbagai sifat fisik tanah yang mempengaruhi daya dukung tanah yang utama dalam kegiatan konstruksi adalah kompatibilitas, komposisi pori larutan, bio-stimulasi vs bio-augmentasi, keseragaman, dan persistensi.

Kompatibilitas tanah

Keanekaragaman dan heterogenitas alami tanah, seperti ukuran partikel dan mineralogi, dapat mempengaruhi bagaimana pembenah biokimia dan reaksi yang ditimbulkannya didistribusikan. Kondisi batas hidrolis dan geometri ruang pori mempengaruhi transport mikroba dan unsur hara, dan sifat-sifat cairan, larutan, dan suspensi (misalnya mikroba) mempengaruhi difusi campuran dari reaktan. Di samping itu peningkatan kekuatan geser (*shear strength*) terjadi saat sementasi pada ujung-ujung partikel yang bersentuhan. Oleh karena itu keseimbangan saluran pori cukup besar untuk memungkinkan transportasi mikroba dan kontak-kontak partikel relatif banyak diperlukan agar

perbaikan tanah yang dimediasi oleh mikroba bisa efektif (DeJong *et al.*, 2008).

Mineralogi tanah dapat mempengaruhi pengendapan kalsium. Mineral yang berbeda dapat menyediakan situs nukleasi yang lebih memungkinkan untuk pengendapan kalsit karena mineralogi partikel dapat secara langsung mempengaruhi termodinamika dari reaksi pengendapan/pelarutan di dalam sistem. Sebagai contoh, partikel tanah yang kaya kalsium karbonat menyediakan permukaan yang ideal untuk pertumbuhan kalsit tambahan. Percobaan dengan kolom tanah menunjukkan bahwa pengendapan kalsit yang dimediasi oleh mikroba dapat terjadi pada pasir yang banyak mengandung silika, kalsit, dan besi oksida (Cheng *et al.*, 2013). Hasil ini menunjukkan bahwa pengendapan kalsit oleh mikroba dapat terjadi pada berbagai jenis tanah mineral. Hasil penelitian DeJong *et al* (2009) menunjukkan bahwa penggunaan bahan pasir yang mengandung kalsit hingga 7.7% mendorong pembentukan senyawa kalsit tambahan yang lebih tinggi daripada yang kandungan kalsitnya lebih rendah.

Komposisi larutan pori

Komposisi kimia larutan di dalam ruang pori dapat membantu atau menghalangi rangkaian reaksi perlakuan hayati. Air tanah yang mengandung banyak kalsium bertindak sebagai cadangan kalsium untuk kalsit untuk pengendapan kalsit, sedang air tanah yang kaya bahan organik dapat menghambat pengendapan kalsit (Lebron & Suarez, 1996). Pemahaman terhadap kimia larutan dari air tanah dan cairan

yang akan diinjeksikan sangat esensial sebelum implementasi di lapangan.

Air tanah di wilayah pantai dapat dipengaruhi oleh intrusi air garam yang mengakibatkan suatu peningkatan salinitas larutan di dalam ruang pori. Percobaan dengan kolom tanah menunjukkan bahwa lebih cepat peningkatan kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity*) dengan peningkatan konsentrasi air garam larutan dalam ruang pori. Peningkatan kadar air garam dari 0% hingga 100% setelah 4 jam meningkatkan secara linier nilai kecepatan gelombang geser. Hal ini terjadi akibat konsentrasi yang lebih tinggi dari kation yang tersedia untuk mengendapkan dengan karbonat yang dihasilkan oleh mikroba di dalam contoh dengan salinitas lebih tinggi (DeJong *et al.*, 2009).

Bio-stimulasi vs bio-augmentasi

Bio-stimulasi dan bio-augmentasi adalah dua metode yang digunakan dalam teknologi bio-remediasi. Yang pertama berupa penambahan unsur hara dan atau oksigen ke dalam tanah atau air yang tercemar untuk penguatan pertumbuhan mikroba remediasi yang sudah ada di dalamnya, sedang yang kedua adalah penambahan mikroba ke dalam tanah atau air yang tercemar untuk mendekomposisi kontaminan. Dalam hubungannya dengan dekomposisi kalsit populasi, bagian mikroba yang melekat, atau tingkat aktivitas mikroba perlu ditingkatkan untuk pengendapan kalsit secara efisien. Hal ini dapat ditempuh dengan mendorong pertumbuhan mikroba asli (Fujita *et al.*, 2008) atau mengaugmentasi lapisan tanah bawah permukaan dengan menginjeksikan mikroba ureolitik (DeJong *et al.*, 2009). Pendekatan yang dapat diambil tergantung pada dugaan terhadap aktivitas enzim ureolitik di dalam tanah tertentu. Kemampuan untuk menghidrolisis urea merupakan hal yang umum dijumpai pada beberapa mikroba di permukaan tanah. Bagaimanapun juga, keberadaannya perlu dikonfirmasi. Jika mikroba dimaksud memang banyak dijumpai di dalam tanah, maka penambahan nutrisi dan/atau oksigen akan mampu mendorong pertumbuhannya. Metode ini lebih sesuai dengan mikroba yang ada karena sudah ada sebelumnya. Sebaliknya dengan pendekatan augmentasi mikroba yang ditambahkan belum tentu sesuai dengan kondisi tanah yang diaplikasi. Hal lainnya adalah dengan menggunakan bio-stimulasi hambatan distribusi mikroba yang ditambahkan ke tanah dapat dihindari. Namun, bio-augmentasi bisa lebih efektif untuk jumlah material yang terkendali jumlahnya kecil dan mudah dicampurkan.

Keseragaman

Membuat penyemenan seragam merupakan hal yang esensial bagi perbaikan tanah yang dimediasi dengan mikroba untuk keperluan aplikasi infrastruktur sipil. Ketika mikroba

diinjeksikan ke permukaan tanah maka sel mikroba akan tersaring oleh matriks tanah. Menurut Ginn *et al.* (2002) filtrasi sel mikroba tersebut umumnya menurunkan konsentrasi mikroba sepanjang aliran injeksi. Perbedaan (gradien) konsentrasi mikroba biasanya berkaitan dengan gradien laju reaksi dan oleh karenanya laju penyemenan, dan sebaliknya konsentrasi mikroba yang lebih tinggi mendorong laju pengendapan yang lebih tinggi. Derajat penyemenan berkaitan langsung dengan kekakuan (*stiffness*) tanah dan oleh karenanya gradien penyemenan menghasilkan gradien kekakuan.

Selain hal tersebut di atas, optimasi kimia dari media yang diperlakukan juga berpengaruh terhadap pengendapan kalsit secara seragam. Pengendapan kalsit dipicu oleh peningkatan pH dan produksi karbonat. Aktivitas metabolik mikroba meningkatkan pH larutan pori. Kalsit secara tipikal mengendap ketika pH larutan pori meningkat ke 8.8 hingga 9.0 (Stocks-Fisher *et al.*, 1999). Mengatur konsentrasi kimia di dalam media memungkinkan untuk mengendalikan laju perubahan pH.

Daya tahan jangka panjang

Ketahanan dari pengendapan kalsit yang didorong dengan mikroba merupakan aspek yang sangat penting dalam proses perlakuan. Untuk beberapa aplikasi penyemenan yang didorong harus mampu bertahan selama horizon waktu yang setara dengan disain kehidupan realistik apapun. Untuk alasan ini, kompatibilitas dari kalsit yang mengendap dengan lingkungan jangka panjang menjadi sangat kritis. Proses perlakuan ini sangat baik di bawah kondisi di mana kalsit sudah dalam keadaan stabil, yaitu dalam fase larutan pekat sekali; kemudian ketika perlakuan rekayasa berhenti dan kondisi geo-kimia pra-perlakuan kembali, jumlah kalsit pengendapan baru harus dipertahankan. Dalam kasus stabilitas kalsit tidak menentu, observasi kontinyu oleh pelaksana lapangan selama waktu pemeliharaan dari tanah yang diperlakukan mungkin dibutuhkan. Pengamatan ini dapat dilakukan dengan perangkat geofisik, seperti gelombang seismik dan potensial listrik. Faktor yang diamati meliputi kecepatan gelombang geser, kecepatan gelombang kompresi, dan resisifitas (DeJong *et al.*, 2009).

Prospek Aplikasi ke Depan

Aplikasi teknologi ini ke depan dipandang sangat prospektif mengingat kebutuhan pembangunan fisik yang meningkat terus-menerus dan hambatan-hambatan sifat tanah yang tidak mampu mendukung persyaratan yang dibutuhkan. Dibandingkan dengan teknologi konvensional yang menggunakan bahan-bahan kimia, teknologi mediasi dengan mikroba ini dianggap jauh lebih murah dan tidak berbahaya sehingga mengurangi atau meniadakan

dampak negatif terhadap lingkungan. Melalui mekanisme produksi enzim, tingkat perekatan partikel tanah dan panjang waktu perlakuan dapat diselaraskan untuk mencapai tingkat perekatan yang optimal (DeJong *et al.*, 2009).

Keunggulan dari proses bio-kimia adalah memungkinkannya diaplikasikan untuk tujuan yang beragam. Untuk infrastruktur manfaat tersebut mencakup pencegahan pelarutan dan mitigasi kerusakan, penurunan bangunan tempat tinggal, perlindungan pipa untuk dam dan tanggul, pemantaban tanah sebelum konstruksi terowongan, dan pemantaban lereng. Aplikasi lainnya menyangkut perlindungan air tanah dari kontaminan, penghalang untuk tidak tembus/reaktif dalam bioremediasi, imobilisasi darurat kontaminan berbahaya untuk aplikasi keamanan, dan fasilitas bawah permukaan untuk energi dan seskuistrasi (perosot) karbon (DeJong *et al.*, 2007). Bagaimanapun juga, hingga dasawarsa terakhir ini belum ada publikasi tentang aplikasi teknologi ini secara komersial (Williams *et al.*, 2016 & Zhang *et al.*, 2016).

Perbaikan dari sifat mekanis tanah sudah banyak dilaporkan dari hasil-hasil riset skala laboratorium (DeJong *et al.*, 2006; Whiffin *et al.*, 2007; Martinez *et al.*, 2013). Hasilnya menunjukkan bahwa perbaikan sifat tanah melalui mediasi mikroba memiliki potensi untuk perbaikan sifat tanah *in-situ* untuk beragam kegunaan dan kondisi bawah permukaan. Untuk meningkatkan dari laboratorium ke skala lapangan diperlukan pemahaman tentang dasar-dasar geo-teknik, hidrologi, biologi, dan kimia. Untuk dapat mengimplementasikan teknologi ini di lapangan diperlukan satu rangkaian yang saling terkait dari penelitian skala laboratorium, pemantauan geofisik dari tanah yang diaplikasi, dan pembuatan model merupakan bagian yang penting karena melibatkan pertimbangan sifat-sifat hidrologi, kimia, biologi, dan geoteknik dari sistem perlakuan dan memungkinkan untuk melakukan optimasi perlakuan di tempat (*in-situ*).

Hal lain yang tidak kalah menariknya adalah teknik aplikasi yang tepat langsung di lapangan. Beberapa hasil riset dalam aspek ini telah dilaporkan dan secara umum bertujuan mencari alternatif paling efisien dalam mengaplikasikan formula bakteri yang digunakan. Pengalaman dalam aplikasi perlakuan hayati untuk pemulihan retak beton perlu dijadikan acuan di dalam memilih alternatif terbaik (Wang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2015; DeKoster *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016). Para peneliti ini mengembangkan berbagai teknik aplikasi antara lain berupa tablet, granular, mikrokapsul, dan gel silika atau poliuretiran. Untuk perbaikan sifat tanah, khususnya yang bertekstur berpasir, teknik enzimatik adalah yang paling umum dikembangkan (Cheng *et al.*, 2013; Neupane *et*

al., 2013; Neupane *et al.*, 2015; Putra *et al.*, 2016). Larutan campuran reagen enzim (yaitu larutan CaCl₂-urea-urease) yang menghasilkan endapan kalsit setelah reaksi kimia berlangsung, diinjeksikan ke dalam tanah. Endapan kalsit akan membentuk jembatan antar butiran pasir, membatasi pergerakannya, sehingga memperbaiki kekakuan dan kekuatan tanah (Yasuhara *et al.*, 2011). Bagaimanapun juga teknik ini masih memerlukan pemantaban khususnya dalam aplikasinya skala luas di lapangan (van Paassen *et al.*, 2010). Di pihak lain, hasil penelitian Putra *et al.* (2016) menunjukkan bahwa magnesium (Mg) meningkatkan rasio pengendapan karbonat hingga 90% dengan konsentrasi urease 1.0 g/L. Keberadaan Mg mengubah bentuk dan ukuran kristal yang diendapkan dan memungkinkan terbentuknya mineral aragonit di samping kalsit.

Kesimpulan

Aplikasi mikroba terbukti tidak hanya terbatas di dalam bidang pertanian dan semua turunannya (pangan, kesehatan, dan lingkungan), tetapi terbukti juga memiliki peran penting di bidang keteknik sipil. Perakitan teknologi yang ramah lingkungan, mudah, dan murah menjadi sangat penting untuk mencapai efisiensi dan manfaat yang optimal. Pemanfaatan mikroba khususnya bakteri penghasil enzim urease yang memfasilitasi pembentukan kalsit dan/atau aragonit sangat prospektif untuk perbaikan sifat mekanis atau keteknik tanah. Keanekaragaman bakteri yang tinggi memberi peluang untuk memilih isolat yang paling unggul untuk dikembangkan menjadi produk komersial yang kompetitif. Bagaimanapun juga, penelitian perlu terus dilanjutkan guna menjawab tantangan ke depan khususnya menyangkut aplikasi secara luas dari perlakuan setempat dan ketahanan kinerja jangka panjang sementara yang didorong dengan penggunaan mikroba.

Daftar Pustaka

- Adriyati M (2014). Komposisi bakteri *Bacillus subtilis* dengan metode enkapsulasi hidrogel untuk aplikasi *self healing concrete*. Tugas Akhir Program D3, Univ. Gadjah Mada. Yogyakarta. p.69.
- Cheng L, R Cord-Ruwisch & MA Shahin (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Can Geotech J* 50,81-90.
- DeJong JT, M Fritzges & K Nusslein (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *J Geotech Geoenviron Eng* 132(11), 1381-1392.

- DeJong JT, BC Martinez, BM Mortensen, DC Nelson, JT Waller, MH Weil, TR Ginn, T Weathers, T Barkouki, Y Fujita, G Redden, C Hunt, D Major & B Tanyu (2009). Upscaling of Bio-Mediated Soil Improvement. In: *Proc 17th Internat. Conf. Soil Mech Geoterm Eng Idaho*. M. Hamza et al. (ed). p.2300-2304.
- DeJong JT, K Soga, SA Banwart, WR Whalley, TR Ginn & DC Nelson (2011). Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical system for sustainable, multi-function engineering solutions. *J R Soc Interface* 8,1-15.
- De Koster SAL, RM Mors, HW Nugteren, HM Jonkers, GMH Meesters & JR van Ommen (2015). Geopolymer coating of bacteria-containing granules for use in self-healing concrete. *Proc Eng* 102, 474-484.
- Dong B, Y Wang, G Fang, N Han, F Xing & Y Lu (2015). Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution. *Cement & Conc Comp* 56, 46-50.
- Edvardsen C (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Mats J* 96(4),448-454.
- Ersan YC, E Gruyaert, L Ghislain, L Christine, N De Belie & N Boon (2015). Self-protected nitrate reducing culture for intrinsic repair of concrete cracks. *Front Microbiol* 6,1228-1244.
- Ersan YC, FB Da Silva, N Boon, W Verstraete & N De Belie (2015). Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. *Constr Build Mats* 88,196-203.
- Fisher KA, JJ Meisinger & BR James (2016). Urea hydrolysis rate in soil toposequences as influenced by pH, carbon, nitrogen, and soluble metals. *ASA-CSSA-SSSA* 45, 349-359.
- Garcia FO, DE Kissel & M Cabrera (2014). Effect of soil matrix potensial on urea hydrolysis. *Soil Sci Soc Am J* 78(6), 2078-2082.
- Jonkers HM (2007). Self healing concrete: A biological approach. *Springer Series Mats Sci* 100,195-204.
- Jonkers HM & E Schlangen (2008). Development of a bacteria-based self healing concrete. In: J. C. Walraven & D. Stoelhorst (ed). *Tailor made concrete structures*. London, Taylor & Francis Group. p.425-430
- Jonkers HM & E Schlangen (2009). A two component bacteria-based self-healing concrete. In: Alexander et al. (ed). *Concrete repair, rehabilitation, and retrofitting II*. London. Taylor & Francis Group.p.119-123
- Jonkers HM, A Thijssen, G Muyzer, O Copuroglu & E Schlangen (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecol Eng* 36, 230-235.
- Kashyap VN & Radhakrishna (2013). A study on effect of bacteria on cement composites. *Internat J Res Eng Tech* 2, 356-360.
- Kissel DE, M Cabrera, J Craig & J Rema (2014). Predicting urea hydrolysis in a loblolly pine forest floor. *Soil Sci Soc Am J* 78(6), 2071-2077.
- Lebron I & DL Suarez (1996). Calcite nucleation and precipitation kinetics as affected by dissolved organic matter at 25 degrees C and pH > 7.5. *Geochim Cosmochim Acta* 60(15), 2765-2776.
- Li VC & E Yang (2007). Self-healing in concrete materials. In: S. van der Zwaag (ed.) *Self-healing materials- An alternative approach to 20 centuries of materials science*. The Netherlands. Springer. p. 161-194
- Luo M, C-X Qian & R-Y Li (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Constr Build Mats* 87,1-7.
- Martinez BC, JT DeJong, TR Ginn, BM Montoya, TH Barkouki & C Hunt (2013). Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement. *J Geotech Geoenviron Eng* 139, 587-598.
- Neupane D, H Yasuhara, N Kinoshita & T Unno (2013). Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique. *Geotech Geoenviron Eng ASCE* 139, 2201-2211.
- Neupane D, H Yasuhara, N Kinoshita & Y Ando (2015). Distribution of mineralized carbonate and its quantification method in enzyme mediated calcite precipitation technique. *Soil Found* 55, 447-457.
- Putra H, H Yasuhara, N Kinoshita, D Neupane & CW Lu (2016). Effect of magnesium as substitute material in enzyme-mediated calcite precipitation for soil-improvement technique. *Frot Bioeng Biotechnol* 4,37-46.
- Santi LP & DH Goenadi (2013). Uji potensi *Burkholderia cenocepacia* strain KTG sebagai bahan aktif pembenah hayati pada tanah tekstur berpasir di Kalimantan Tengah. *Menara Perkebunan* 81 (1), 28-34.

- Stocks-Fisher S, JK Galinat & SS Bang (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biol Biochem* 31(11),1563-1571.
- Tittelboom KV, N De Belie, WD Muynck & W Verstraete (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement Conc Res* 40, 157-166.
- Van Paaseen LA, R Ghose, TJM Van der Linden, WRL Van der Star & MCM Van Loosdrecht (2010). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *J Geotech Geoenviron Eng* 136,1721-1728.
- Wang J, KV Tittleboom, N De Belie & W Verstraete (2012). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construct Build Mats* 26(1), 532-540.
- Wei, SH Cui, Z Jiang, H Liu, H He & N Fang (2015). Biomineralization processes of calcite induced by bacteria isolated from marine sediments. *Braz J Microbiol* 46(2), 455-464.
- Whiffin VS, LA van Paassen & MP Harkes (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiol* 24, 417-423.
- Williams S, N Sakib, MJ Kirisits & RD Ferron (2016). Flexural strength recovery induced by vegetative bacteria added to mortar. *ACI Mat J* 113(4),523-531.
- Xu J & W Yao (2014). Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. *Cement Conc Res* 64, 1-10.
- Yasuhara H, K Hayashi & M Okamura (2011). Evolution in mechanical and hydraulic properties of calcite-cemented sand mediated by biocatalyst. *Geo Front* 2011,3984-3992.
- Zhang JL, CG Wang, QL Wang, JL Feng, W Pan, XC Zheng, B Liu, X Han, F Xing & X Deng (2016). A binary concrete crack self-healing system containing oxygen-releasing tablet and bacteria and its Ca²⁺-precipitation performance. *App Microbiol Biotech*. doi: 10.1007/s00253-016-7747.
- Zhang JL, RS Wu, YM Li, JY Zhong, X Deng, B Liu, NX Han & F Xing (2016). Screening of bacteria for self-healing of concrete cracks and optimization of the microbial calcium precipitation process. *App Microbiol Biotechnol* 100(15), 6661-6670.