

PEMANFAATAN BATU APUNG (*PUMICE*) LOMBOK DAN BAKTERI (*BACCILLUS SUBTILIS*) SEBAGAI AGENT PERBAIKAN KERUSAKAN RETAK PADA BETON

Ida Rochani¹, Agus Prasetyo² dan Agus Kurniawan³

SMK Negeri, Kuripan Lombok Barat ¹, Depatemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Teknik Sipil, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia^{2,3}
idarochani77@gmail.com

Diterima : Agustus 2015 ; Direvisi : Januari 2016 ; Dipublikasikan: Maret 2016

ABSTRAK Batu apung (*pumice*) merupakan bahan lokal yang banyak terdapat di wilayah Lombok, Nusa Tenggara Barat. Komposisi batu apung mengandung silika tinggi yaitu antara 52,30% - 65,60% dapat digunakan sebagai pozolan. Penggunaan batu apung (*pumice*) sebagai campuran pada penyusunan beton ringan yang mempunyai kuat tekan dan kuat lentur yang baik. Beton juga rentan terhadap kerusakan yang dapat bersumber dari beban ekstrim, serangan kimia dan kondisi lingkungan. Faktor kualitas beton berpengaruh terhadap proses terjadinya keretakan beton. Produksi semen dalam penggunaan campuran beton dapat memberikan kontribusi 10% emisi CO₂ ke atmosfer. Retak mikro merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, akan tetapi retak kecil dapat diatasi yang disebut *penyembuhan autogenous* atau *self-healing* beton. Metode yang digunakan dalam perbaikan mandiri pada keretakan beton adalah pemanfaatan peranan bakteri *Bacillus subtilis* yang terenkapsulasi. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan enkapsulasi bakteri *B. subtilis* dalam campuran beton dengan campuran pozolan batu apung (*pumice*) terhadap kemampuan menutup retak beton. Metode analisis penelitian *self-healing* beton berdasarkan tinjauan kimia, mekanik, fisis dan keberlanjutan secara ekonomi, toksikologi lingkungan, sosial. Tinjauan kimia pozolan batu apung Lombok mengandung SiO₂ sebesar 56,56% dan Al₂O₃ sebesar 14,77% apabila bercampur dengan *B. subtilis* kurang signifikan sebagai *self-healing* beton dengan kadar perbaikan hanya 5,6%. Kuat lentur tertinggi terjadi dalam persentase enkapsulasi 3% dan diameter enkapsulasi 4 mm sebesar 1.497 KPa. Kuat tekan beton sebesar 21,053 MPa dalam persentase enkapsulasi 3% dan diameter enkapsulasi 2 mm. Analisis SEM menyatakan bahwa peranan bakteri *B. subtilis* dan pozolan batu apung terlihat adanya serabut-serabut kecil yang menghubungkan antar partikel beton. Kadar persentase perbaikan mandiri dalam retak beton mencapai 5,6% dalam diameter enkapsulasi 4 mm dan persentase enkapsulasi 7%. *Self-healing* dalam kerusakan beton dapat mengurangi produksi semen sehingga akan mengurangi emisi CO₂ di atmosfer. *Self-healing* dapat menghemat biaya Rp.442.725 / m³ karena tanpa adanya biaya perawatan beton apabila terjadi kerusakan. Pengurangan emisi CO₂ akibat pengurangan produksi semen berpengaruh terhadap kesehatan pernafasan sehingga akan mengurangi biaya perawatan kesehatan sehingga tidak menambah biaya kesehatan.

Kata kunci: batu apung; *bacillus subtilis*; *self-healing*; keberlanjutan.

ABSTRACT *Pumice* is a local material which is widely found in Lombok, West Nusa Tenggara. This stone has high silica content, approximately 52,30% - 65,60% therefore it can be used as a pozzolan. Using *pumice* as materials for making light concrete will produce good high compressive strength and bending strength concrete. A concrete is also prone to crack due to extreme load, chemical effects and environmental condition. The quality of concrete has affects the present of concrete cracks. The production of cement in the concrete mix may contribute 10% of CO₂ emissions into the atmosphere. Micro cracking is a phenomenon that cannot be avoided, but small cracks can be overcome by the so-called autogenous healing or self-healing of concrete. The method for concrete cracks self-healing is using encapsulated bacteria of *Bacillus subtilis*. This research aimed to investigate the effects of adding encapsulated bacteria of *B. subtilis* into concrete mix with a mixture of *pumice* pozzolan on the ability to close cracked concrete. The research analysis technique of self-healing concrete was based on the perspectives of chemical, mechanical, physical and economic sustainability, environmental toxicity, and social. In reference to the chemical perspective, *pumice* pozzolan from Lombok contains 56,56% SiO₂ and 14,77% Al₂O₃. If they are mixed with *B. subtilis*, they will not significant concrete self-healing with levels of refinement only 5,6%. The highest flexural strength is in the encapsulation of 3% and 4 mm diameter of 1.497 kPa. Strong concrete press is 21,053 MPa within encapsulation of 3% and 2 mm diameter. SEM analysis depict that the role of the bacteria of *B. subtilis* and *pumice* pozzolan show small fibers that connect the concrete particles. The percentage of self-healing for cracked concrete reached 5,6% in 4 mm diameter and encapsulation percentage is 7%. *Self-healing* in cracked concrete could reduce the production of cement, therefore it reduces CO₂ emissions to the atmosphere. *Self-healing* could save costs up to Rp.442.725/m³ since there is no maintenance cost for concrete when it cracks. The reduction of CO₂ emissions due to reduced production of cement influences respiratory health. Therefore, it reduces health care costs or doesn't increase healthcare cost.

Key words: *pumice*; *bacillus subtilis*; *self-healing*; continuity.

PENDAHULUAN

Batu apung (*pumice*) merupakan bahan lokal yang banyak terdapat di wilayah Lombok, Nusa Tenggara

Barat. Potensi cadangan batu apung dilombok tersebar di beberapa kabupaten dengan jumlah total keseluruhan sebesar 2.318.433,183 m³. Komposisi batu apung mengandung silika yang tinggi yaitu sekitar 52,30% - 65,60% sehingga dapat digunakan sebagai pozzolan (Munginsidi, 2008).

Menurut Haryanto (2013), batu apung digunakan sebagai bahan berporous sehingga dapat dimanfaatkan sebagai *water carrier* dan *self-healing carrier*. Penggunaan batu apung (*pumice*) sebagai campuran mortar pada penyusunan beton ringan yang mempunyai kuat tekan lentur yang baik.

Beton rentan terhadap kerusakan yang dapat bersumber dari beban ekstrim, serangan kimia dan kondisi lingkungan. Bagian campuran dari beton adalah semen. Produksi semen dapat memberikan kontribusi 10% emisi CO₂ ke atmosfer pada proses pertambangan, transportasi dan pengolahan pada saat memproduksi bahan beton (Pelletier dkk., 2014 dan Suhendro, 2014).

Kualitas beton dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu jenis bahan penyusunnya, proses pembuatan dan perawatan. Faktor kualitas beton berpengaruh terhadap proses terjadinya keretakan beton. Retak beton dapat mengurangi daya tahan struktur beton. Retak mikro merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, akan tetapi retak kecil dapat di atasi yang disebut *penyembuhan autogenous* atau *self-healing* beton (Wiktor dan Jonkers, 2011).

Metode yang digunakan dalam perbaikan mandiri pada keretakan beton adalah pemanfaatan peranan bakteri *Bacillus subtilis* yang terenkapsulasi dan media batu apung sebagai bahan tambahan dalam beton. Enkapsulasi merupakan media perlindungan bakteri dari kerusakan pada saat pencampuran beton. Jenis bakteri yang digunakan adalah jenis bakteri alam yang ramah lingkungan yang terdapat dalam tanah.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan enkapsulasi bakteri *B. subtilis* dalam campuran beton dengan campuran pozzolan batu apung (*pumice*) terhadap kemampuan menutup retak, kuat lentur, kuat tekan pada beton dan keberlanjutan dari tinjauan ekonomi, toksisitas

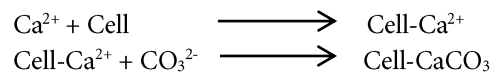
lingkungan dan sosial. Manfaat dari penambahan campuran antara enkapsulasi bakteri *B. subtilis* dengan pozzolan batu apung (*pumice*) ke dalam campuran beton diharapkan dapat memperbaiki secara mandiri pada retak beton.

Batasan yang digunakan dalam penelitian ini (1) agregat halus batu apung (*pumice*) atau pozzolan sebagai campuran agregat pada campuran beton (2) penggunaan jenis bakteri alam spesies *B. subtilis* dengan metode enkapsulasi bakteri pada campuran beton (3) Mekanisme penyembuhan retak mandiri pada jenis beton dengan enkapsulasi bakteri *B. subtilis*.

Sistem penyembuhan mandiri pada retak beton dapat menggunakan mekanisme enkapsulasi sebagai media penyembuhan mandiri dalam beton yang membentuk endapan CaCO₃. Endapan ini dapat menjanjikan untuk berbagai aplikasi teknik, perlindungan beton dan permukaan batu dalam perbaikan cacat (retak).

Menurut Jonkers dkk. (2010), bakteri berperan sebagai agen perbaikan mandiri pada retak beton dengan studi *ureolytic* dari genus *Bacillus* untuk memproduksi kalsium karbonat. Prinsip dasar penerapan mikroba dan endapan CaCO₃ untuk penyembuhan mandiri beton adalah bakteri dan agen terkait lainnya ditambahkan ke dalam matriks beton selama pengecoran. Ketika retak muncul, bakteri di sekitar permukaan retak akan diaktifkan oleh faktor kelembaban dan O₂ sehingga endapan CaCO₃ dapat memperbaiki retak oleh *B. sphaericus* melalui katalis urea secara hidrolisis (Wang dkk., 2014).

Muatan negatif yang ada pada dinding sel bakteri akan menarik kation yang berasal dari lingkungan diantaranya ion Ca²⁺ yang digunakan untuk menutup permukaan selnya. Ion Ca²⁺ akan bereaksi dengan CO₃²⁻ sehingga akan membentuk pengendapan CaCO₃ seperti pada reaksi di bawah ini (Tittelboom dkk., 2010). Mikroorganisme dapat berfungsi sebagai parameter pengendapan mikrobial karbonat berdasarkan ilustrasi Gambar 1.

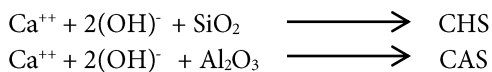


Gambar 1. *Bacillus Subtilis* Membentuk CaCO₃

Sumber : [Reinhardt dkk. \(2013\)](#)

Spora bakteri *B. sphaericus* yang berada dalam hidrogel dan terenkapsulasi dapat mempertahankan hidupnya sehingga enkapsulasi spora hidrogel yang memiliki karbonat dapat membentuk kalsium karbonat CaCO_3 pada matriks hidrogel sesuai dengan Gambar 2 ([Wang dkk., 2014](#)). Menurut [Tjokrodimuljo \(2007\)](#), penggunaan pozzolan dapat mengurangi pemuaihan beton dan retak-retak beton sebagai akibat proses reaksi alkali agregat atau reaksi alkali dalam semen dengan silika. Pozzolan adalah bahan yang mempunyai kandungan unsur-unsur silikat (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) tinggi. Penggunaan pozzolan dalam campuran beton dapat mengurangi penggunaan semen.

Bahan pozzolan yang bereaksi dengan kapur dan air akan membentuk suatu ikatan. Reaksi pozzolan akan terjadi seiring berjalannya waktu. Terbentuknya material pengikat berasal dari kalsium dalam tanah yang bereaksi dengan silikat (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) sehingga dapat menghasilkan partikel tanah (Muchtaranda, 2003).



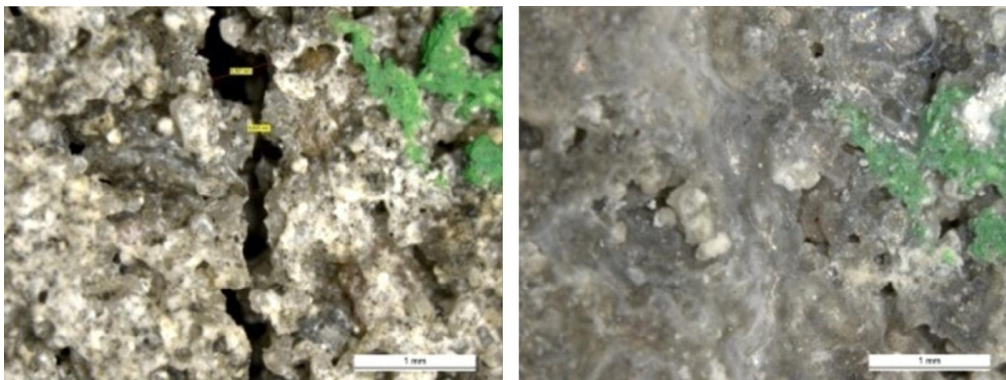
dengan keterangan sebagai berikut :

C : CaO ; S : SiO_2 ; H : H_2O ; A : Al_2O_3

Enkapsulasi bakteri merupakan metode perlindungan hidrogel bakteri dari pengaruh luar pada saat pencampuran dalam beton. Enkapsulasi polimer menjadi sarana yang dapat melindungi dalam proses pencampuran beton. Jenis polimer yang dapat digunakan berasal dari kaca, serat alami, gelatin, paraffin, lilin, poliuretan sesuai Gambar 3 yang menyertakan air dalam pencampurannya ([Hilloulin dkk., 2015](#)).

Penyembuhan mandiri pada retak beton mempunyai mekanisme secara skematik sesuai Gambar 4. Pada saat partikel semen berada dalam pasta semen yang bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ maka secara bertahap ion Ca^{2+} ion akan dilepaskan. Pembentukan pengendapan akan berhenti ketika ketersediaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terbatas ([Huang dkk., 2014](#)).

[Wiktor dan Jonkers \(2011\)](#), menyatakan bahwa terbentuknya pengendapan kalsium karbonat CaCO_3 disebabkan oleh aktifitas bakteri yang pengamatan dilakukan secara langsung sebelum dan sesudah perendaman dalam air selama 100 hari. Seperti dalam Gambar 5.



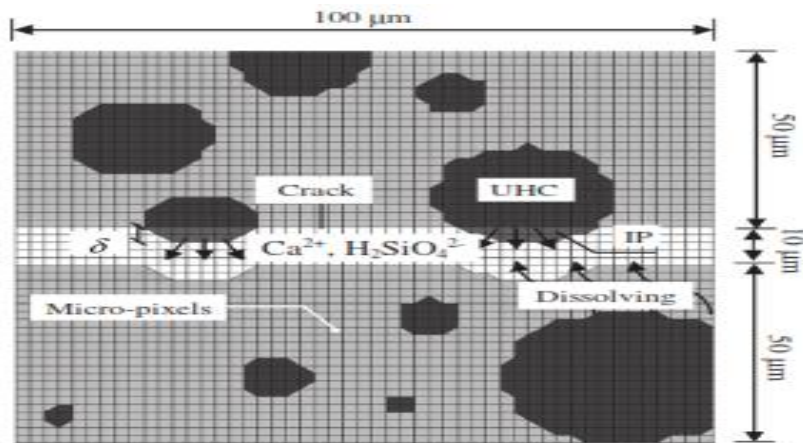
Gambar 2. Lebar Retak dan Penyembuhan Mandiri Oleh Hidrogel Enkapsulasi

Sumber : [Wang dkk. \(2014\)](#)

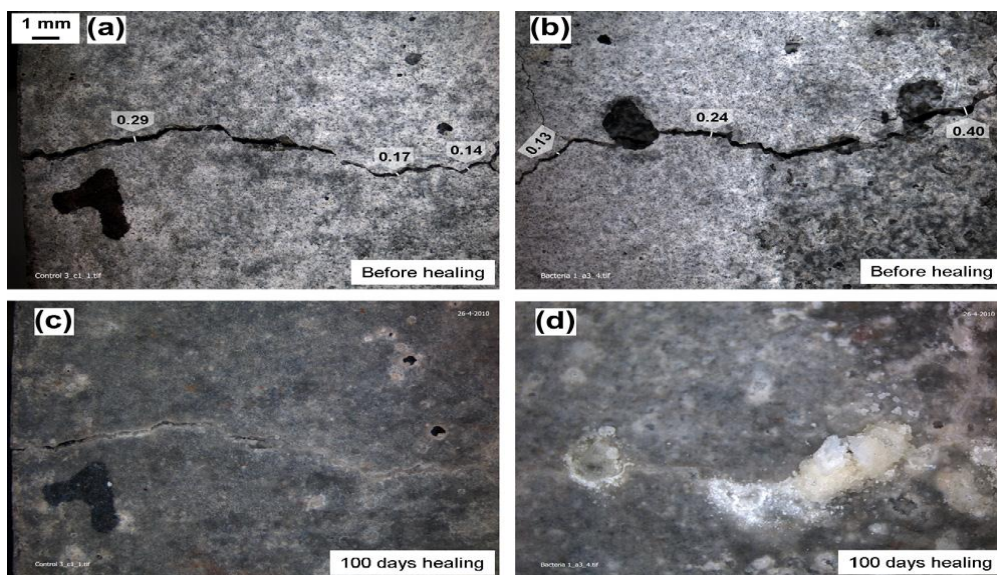


Gambar 3. Enkapsulasi Polymer Self-Healing

Sumber : [Hilloulin dkk. \(2015\)](#)



Gambar 4. Penyembuhan Mandiri pada Retak Beton
 Sumber : [Huang dkk. \(2014\)](#)



Gambar 5. Retak dan Proses *Self-Healing* dalam Mortar
 Sumber : [Wiktor dan Jonkers \(2011\)](#)

Potensi *self-healing* pada retak beton mempunyai sisi keberlanjutan yang sangat berpotensi berdasarkan dari konsep *sustainable* yaitu dari kajian lingkungan dan ekologi, tekno ekonomi dan sosial. Potensi pencemaran CO₂ pada saat memproduksi semen dapat menyumbang pencemaran udara di atmosfer. Sekitar 10 persen dari total emisi CO₂ di dunia berasal dari pabrik semen ([Suhendro, 2014](#)). Persentase emisi CO₂ sampai 50% berasal dari konstruksi bangunan dan industri ([Schlangen dan Sangadji, 2013](#)). Industri semen dapat menghasilkan partikel debu di atmosfer sehingga dapat mempengaruhi kerusakan sel pada saluran pernafasan ([Arifin, 2001](#)).

Menurut [Schlangen dan Sangadji \(2013\)](#), penerapan *self-healing* pada retak beton dapat mengurangi biaya perawatan dan pemeliharaan pada konstruksi beton. Efisiensi ini berdasarkan biaya perawatan, pemeliharaan dan konsumsi penggunaan material

semen sehingga akan menurunkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari pabrik semen. Efisiensi biaya akan berkurang apabila mekanisme *self-healing* diterapkan pada beton sesuai dengan Gambar 6.

Penerapan *self-healing* akan berpengaruh terhadap pengurangan penggunaan semen pada produksi beton. Pengurangan produksi semen akan berpengaruh pada pengurangan polusi CO₂ karena CO₂ pada produksi semen merupakan penyumbang polusi diudara. CO₂ yang dihirup secara terus menerus akan berdampak pada kesehatan manusia. Kesehatan manusia yang terganggu akan menambah biaya hidup.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian melalui tahapan persiapan bahan penyusun beton. Pengujian komposisi batu apung dilakukan untuk mengetahui kadar kandungan pozolan melalui analisis *X-ray Fluorescence (XRF)*.

Perencanaan *mix design* beton dalam pembuatan benda uji terdiri dari hidrogel bakteri : pozzolan batu apung: semen : pasir : kerikil.

Hidrogel bakteri melalui pengembangbiakan *B. subtilis* dengan media Agar dan *Nutrient Broth* sehingga diharapkan dapat berkembang biak. Menurut [Adriyati \(2014\)](#), enkapsulasi hidrogel dilakukan sebagai metode perlindungan bakteri dari kerusakan pada saat pencampuran beton dengan menggunakan media *acrylic resin* dan *Carboxy Methyl Cellulose (CMC)*.

Pengujian beton dengan bakteri dilakukan melalui pengujian secara kimia, fisis, mekanik dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Analisis keberlanjutan *self-healing* pada retak beton berdasarkan dari konsep *sustainable* yaitu dari kajian lingkungan dan ekologi, tekno ekonomi dan sosial.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Menurut [Tjokrodinuljo \(2007\)](#), komposisi mineral semen Portland kalsium pada semen Portland lebih tinggi daripada batu apung akan tetapi komposisi SiO₂ pada batu apung lebih tinggi dibandingkan semen Portland. Kandungan mineral SiO₂ yang ada di batu

apung (*pumice*) dapat dijadikan sebagai pozzolan karena mineral tersebut merupakan mineral yang dibutuhkan dalam semen sebagai bahan pengikat beton. Perbandingan komposisi mineral batu apung dan mineral semen berdasarkan pada Tabel 1.

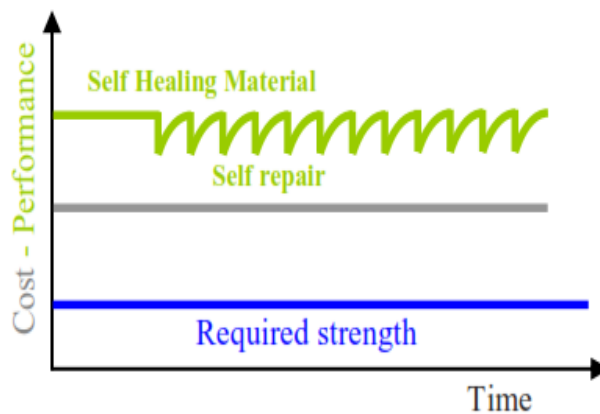
Kadar persentase perbaikan mandiri dalam retak beton dengan menggunakan batu apung mencapai 5,6% dalam diameter enkapsulasi 3 mm dan persentase 7% berdasarkan dari Tabel 2. Sedangkan hubungan antara kadar perbaikan mandiri terhadap persentase dan diameter dapat dilihat pada Gambar 7, Gambar 8 dan Tabel 2.

Tabel 1. Perbandingan Komposisi Mineral Antara Batu Apung dan Semen Portland

No	Parameter	Persentase (% Berat)	
		Batu Apung	Semen Portland
1	CaO	3,1 %	60 -65%
2	MgO	2,51%	0,5 - 4%
3	Fe ₂ O ₃	4,4%	0,5 - 6%
4	Al ₂ O ₃	14,7 %	3 - 8%
6	SiO ₂	56,56%	17 - 25%
7	K ₂ O	7,21%	0,5 - 1%

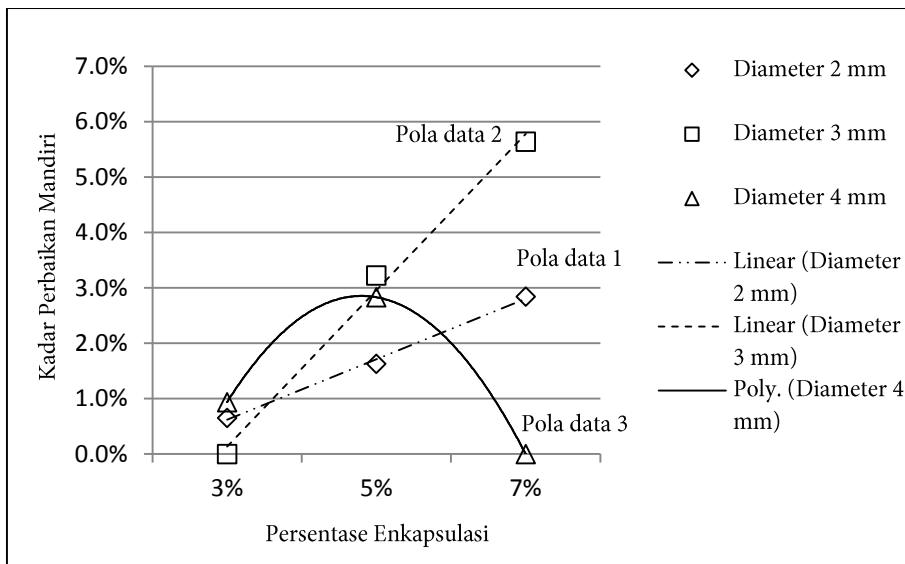
Tabel 2. Kadar Perbaikan Mandiri berdasarkan Persentase dan Diameter Enkapsulasi

Persentase Perbaikan Mandiri	Persentase Enkapsulasi			Persentase Perbaikan Mandiri	Diameter Enkapsulasi		
	3%	5%	7%		2 mm	3 mm	4 mm
Diameter 2 mm	0,7%	1,6%	2,8%	Enkapsulasi 3%	0,7%	0,0%	0,9%
Diameter 3 mm	0,0%	3,2%	5,6%	Enkapsulasi 5%	1,6%	3,2%	2,8%
Diameter 4 mm	0,9%	2,8%	0,0%	Enkapsulasi 7%	2,8%	5,6%	0,0%

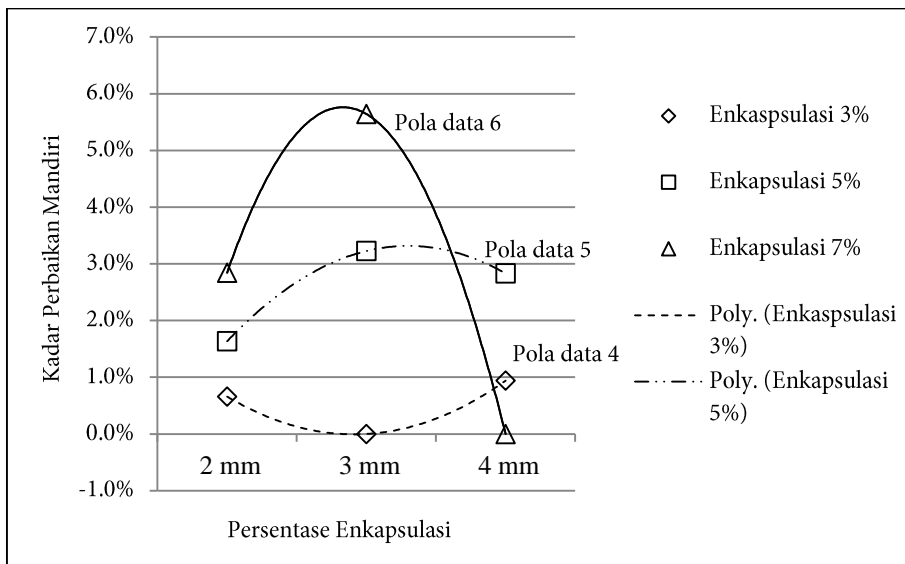


Gambar 6. Perbandingan kinerja pada *self-healing* beton antara biaya dan waktu

Sumber : [Schlangen dan Sangadji \(2013\)](#)



Gambar 7. Hubungan Diameter Enkapsulasi dan Variasi Persentase terhadap Kadar Perbaikan Mandiri

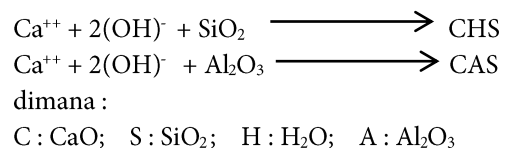


Gambar 8. Hubungan Persentase Enkapsulasi dan Variasi Diameter terhadap Kadar Perbaikan Mandiri

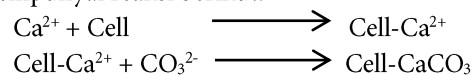
Kadar perbaikan mempunyai persentase tinggi pada persentase enkapsulasi tertinggi pada 7% dengan diameter 2 mm dan 3 mm sesuai pola data 3 dan pola data 6. Besarnya persentase enkapsulasi juga mempengaruhi benda uji tidak mengalami perbaikan dengan persentase 0%, hal ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor penyebab kerusakan pada beton menurut [Mulyono \(2003\)](#), diantaranya (1). proporsi bahan-bahan penyusun beton, (2). metode perancangan *mix design*, (3). perawatan beton dan (4). keadaan pada saat pelaksanaan yang dipengaruhi oleh lingkungan. Ketidak perbaikan mandiri dalam pola data 3 dan pola data 6 kemungkinan dipengaruhi oleh persentase enkapsulasi yang besar sehingga butir-butir agregat sebagai bahan campuran yang terdiri dari jenis partikel enkapsulasi tidak baik dalam hal pengikatan (*interlocking*) terhadap campuran beton. Menurut [Murdock dan Brook \(1999\)](#) porositas yang besar dapat

mempengaruhi keuletan yang menentukan ketahanan terhadap beban kejut yang berpengaruh terhadap lebar retak.

Hubungan persentase enkapsulasi dan diameter enkapsulasi terhadap perbaikan mandiri mempunyai persentase perbaikan kecil yaitu sebesar 5,6%. Hal ini kemungkinan pengaruh dari penambahan batu apung yang mempunyai reaksi terhadap partikel berikut.



Menurut Tittelboom dkk., (2010), unsur kalsium juga diperlukan dalam kebutuhan sel dalam bakteri yang mempunyai reaksi berikut.



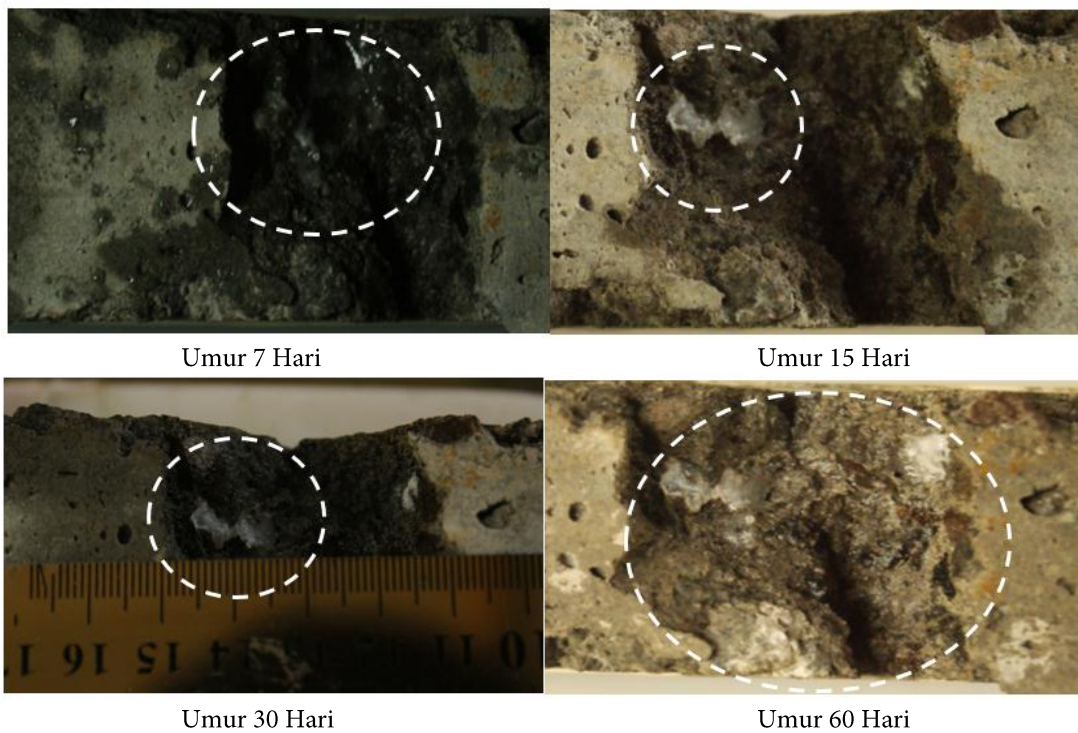
Keadaan kalsium diperlukan dalam sel dan reaksi batu apung tersebut dapat mempengaruhi nilai kuat lentur. Menurut [Mulyono \(2005\)](#), menyatakan bahwa kekuatan butir agregat dipengaruhi oleh bahan agregat. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan menggunakan batu apung dan bakteri *B. subtilis* memberikan pengaruh nilai kuat lentur yang rendah setelah retak beton.

Pengamatan pada retak beton dilakukan dengan mengamati perkembangan kemampuan kinerja bakteri *B. subtilis* terhadap retak beton sehingga dapat menyebabkan pembentukan pengendapan Kalsium karbonat, selama 60 hari pengamatan dilakukan dengan media visual. Hasil pengamatan perbaikan mandiri sesuai Gambar 9.

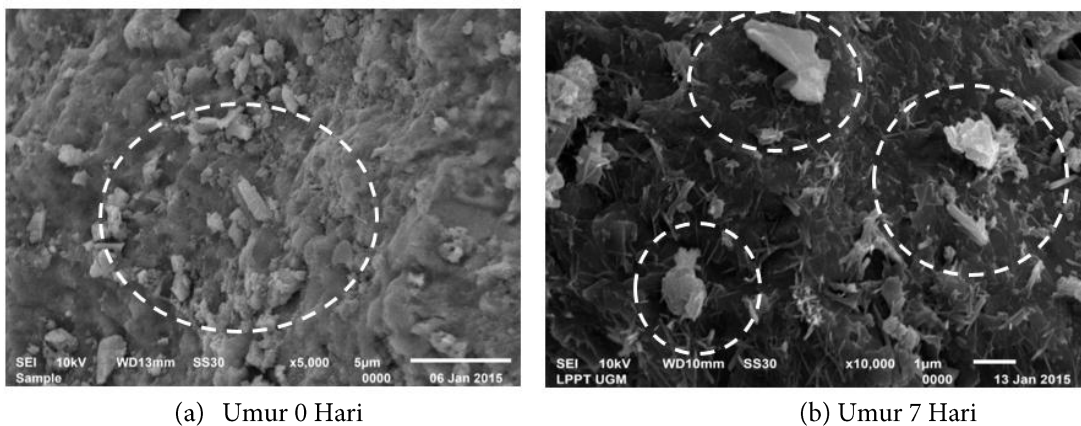
Berdasarkan Gambar 10. kepadatan pengendapan kalsium karbonat dipengaruhi umur beton. Kepadatan

pengendapan kalsium karbonat akan mempengaruhi nilai perbesaran dalam pengamatan.

Penerapan *self-healing* dapat mengurangi kebutuhan semen dan dapat mengurangi emisi CO₂. Analisis perbandingan ekonomi antara penggunaan beton biasa dan beton dengan penerapan *self-healing* terlihat bahwa beton biasa dapat menghabiskan biaya Rp. 2.802.725 sedangkan untuk biaya beton *self-healing* sebesar Rp. 2.359.295. Hal ini menyatakan bahwa penggunaan beton dengan sistem *self-healing* dapat lebih *sustainable* secara ekonomi sebesar Rp. 442.725. Pencemaran udara yang diakibatkan oleh keberadaan pabrik semen dapat berpengaruh langsung terhadap kesehatan masyarakat, semakin dekat dengan pabrik maka konsentrasi debu akan semakin tinggi sehingga akan berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat ([Arifin, 2001](#)).

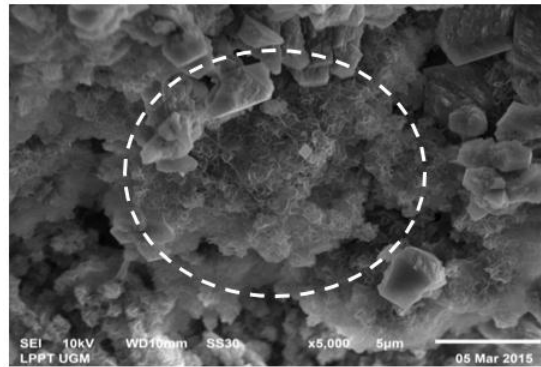


Gambar 9. Perkembangan Perbaikan Mandiri Pada Retak Beton



(a) Umur 0 Hari

(b) Umur 7 Hari



(c) Umur 7 Hari

Gambar 10. Analisis SEM pada Self-Healing Beton pada umur 0, 7, dan 60 Hari.

KESIMPULAN

Penerapan *self-healing* dengan media pozzolan batu apung dan bakteri *B. subtilis* berdasarkan pada analisis fisik, analisis kimia, mekanik, dan keberlanjutan secara toksisitas, ekonomi, sosial.

Pozzolan batu apung Lombok mengandung SiO₂ sebesar 56,56 % dan Al₂O₃ sebesar 14,77 % apabila bercampur dengan *B. subtilis* kurang dapat berperan sebagai *self-healing* beton. Kadar persentase perbaikan mandiri dalam retak beton dengan menggunakan batu apung secara signifikan mencapai 5,6%.

Keberlanjutan *self-healing* secara lingkungan dan toksisitas menyatakan bahwa perbaikan mandiri dalam kerusakan beton dapat mengurangi produksi semen sehingga akan mengurangi emisi CO₂ di atmosfer. Tinjauan ekonomi *self-healing* dalam beton dapat menghemat biaya Rp.442.725 /m³ karena tanpa adanya biaya perawatan beton apabila terjadi kerusakan. Tinjauan sosial *self-healing* adanya pengurangan emisi CO₂ akibat pengurangan produksi semen berpengaruh terhadap kesehatan pernafasan

DAFTAR PUSTAKA

- Adriyati, M. (2014). Komposisi Bakteri Bacillus Subtilis Dengan Metode Enkapsulasi Hidrogel Untuk Aplikasi Self Healing Concrete. *Tugas Akhir*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Arifin. (2001). Faal Paru Penduduk Desa Tarjun Sekitar Pabrik Semen Tiga Roda Kecamatan Kelumpang Selatan Kabupaten Kotabaru. *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Haryanto. I. (2013). Pembuatan Dan Sifat-Sifat Teknis Self Healing/Sustaining Road Pavements Materials Berbasis Bahan Lokal Dan Limbah.
- Hilloulin, B., Tittelboom, K.V., Gruyaert, E., Belie, N.De., and Loukili, A. (2015). Design Of Polymeric Capsules For Self-Healing Concrete. *Journal Cement & Concrete Composites*. 55, 298 – 307.
- Huang, H., Ye. G., Shui, Z. (2014). Feasibility Of Self-Healing In Cementitious Materials – By Using Capsules Or A Vascular System?, *Journal Construction and Building Materials*. 63, 108 – 118.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer ,G., Copuroglu, O., dan Schlangen, E. (2010). Application Of Bacteria As Self-Healing Agent For The Development Of Sustainable Concrete, *Journal Ecological Engineering*. 36, 230 – 235.
- Munginsidi, Yusuf. (2008). Rekayasa Pemanfaatan Batuapung (Pumice) Sebagai Bahan Pembuatan Bata Ringan (Studi Kasus Pumice Ijobalit Kecamatan Labuanhaji Lombok Timur). *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Mulyono.T. (2003). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi Offset
- Murdock, L. J dan Brook, K. M. (1999). *Bahan dan Praktek Beton*. Jakarta: Erlangga
- Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., Bose, A. (2014). Self-Healing Concrete With A Microencapsulated Healing Agent. *Procedia Engineering : 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials*. 95 : 305-320.
- Suhendro, B. (2014). *Toward Green Concrete For Better Sustainable Environment*. Kingston, USA: Department of Mechanical, Industrial and Systems Engineering, University of Rhode Island; Yogyakarta : Department of Civil and Environmental Engineering.
- Reinhard, H. W., Jonkers, H., Tittelboom, K.V., Snoeck, D., Belie, N.D., Munck, W. D., Verstraete, W., Wang, J., and Mechtcherine V. (2013). Springer, Star 221-SHC Self-Healing Pnenomena In Cemen Based Material (Recovery Against Environmental Action). *Journal Cement And Concrete Research*. ISBN 978-94-007-6623-5
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.

- Schlangen, E., and Sangadji, S. (2013). *Addressing Infrastructure Durability And Sustainability By Self Healing Mechanisms : Recent Advances In Self Healing Concrete And Asphalt*, The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering. Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Wiktor, V. and Jonkers, H.M. (2011). Quantification Of Crack-Healing In Novel Bacteria-Based Self-Healing Concrete. *Journal Cement & Concrete Composites*. 33, 763 – 770.
- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., dan Belie, N.De. (2014). Self-Healing Concrete By Use Of Microencapsulated Bacterial Spores, *Journal Cement and Concrete Research*. 56, 139-152.
- Wang, J. Y., Snoeck, D., Vlierberghe, S. Van., Verstraete, W., dan Belie, N. De. (2014). Application Of Hydrogel Encapsulated Carbonate Precipitating Bacteria For Approaching A Realistic Self-Healing In Concrete. *Journal Construction and Building Materials*. 68, 110 – 119.