

ANALISIS EFEKTIFITAS KEMAMPUAN PULIH MANDIRI MICRO CRACK PADA SELF-HEALING CONCRETE

Erfin Setiawan¹, Yuni Sri Wahyuni² dan Nia Kartika³

¹Mahasiswa S1, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sukabumi

^{2,3}Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Instansi, Universitas Muhammadiyah Sukabumi

Corresponding Author: Netrisierfin@gmail.com

ABSTRACT

The development of Self-Healing Concrete technology is a solution to overcome anomalies in concrete structures such as Micro Crack and is a preventive measure to prevent concrete damage. This study analyzes the effectiveness of Self-Healing Concrete which has the ability to recover independently when Micro Crack occurs in exposed concrete. The ability to recover independently of micro cracks was analyzed using Laboratory-based Visual Research Methods (VRM). The results showed that the application of *Bacillus Subtilis* bacteria as a Healing Agent on exposed concrete was effectively used to overcome Micro Crack below 0.607 mm with self-recovery of 93.98% at the age of the test sample of 56 days. And the value of the ability to recover independently was strengthened by SEM-EDX data which showed the morphological structure of the development of mycobacterial spores that filled the Micro Crack cavity was Calcium Carbonate (Ca-K) compound.

Keyword: *Bacillus Subtilis*, Effectiveness Test, Micro Crack, Self-Healing Concrete, Visual Research.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material bangunan yang paling banyak digunakan di dunia, hal ini karena beton memiliki kekuatan dan kemudahan pekerjaan (*workability*) yang tinggi. Menurut pernyataan Colin R.Gagg (2014), terdapat keraguan bahwa beton akan menjadi material yang masih banyak digunakan dimasa depan apabila ditinjau dari perspektif biaya *maintenance*, resiko keselamatan dan isu ketersediaan material [1]. Dari beberapa isu tersebut, diperlukan banyak pengkajian ilmiah dan teknis untuk mengembangkan teknologi material beton, yang harus memiliki nilai *sustainability* yang tinggi tanpa menghasilkan *environmental impact* besar.

Operasional *maintenance* bangunan beton sangat berpengaruh terhadap usia rencana struktur bangunan. perawatan secara berkala mampu mengurangi risiko kerusakan dengan tindakan preventif berupa pencegahan terjadinya kerusakan lebih besar dengan perawatan berkala pada kerusakan kecil.

Anomali kerusakan beton diawali dengan adanya keretakan yang sangat kecil dan

umumnya disebut retak rambut atau retak mikro (*micro crack*), proses retakan mikro merupakan proses yang progresif yang terus terbentuk, interaksi keretakan mikro akan memberntuk retakan yang lebih besar dan mengganggu kinerja struktur beton [2]. Karena *micro crack* memiliki dimensi yang sangat kecil, sehingga secara umum diabaikan karena tidak dianggap berbahaya serta letak *micro crack* pada struktur beton umumnya tidak terekspos karena terhalang elemen Arsitektur. Perubahan dimensi *micro crack* seiring waktu dapat mengakibatkan kegagalan struktur bangunan akibat dimensi keretakan yang meluas, hal tersebut terjadi karena elemen struktur beton sudah tak mampu menerima pembebanan secara kontinu dan tidak mampu melindungi besi tulangan dari korosi dan berakibat pada berkurangnya dimensi inti struktur.

Hingga saat ini perkembangan teknologi *material science* bangunan teknik sipil berlomba-lomba untuk membuat dirinya semakin "*sustainable*" atau semakin "*green*"

atau semakin ramah lingkungan disebabkan adanya tekanan-tekanan pemanasan global yang dipicu oleh meningkatnya emisi *Green House Gases* (GHG) ke atmosfer, utamanya dari sektor transportasi dan industri. Pada kesempatan ini, penulis akan mendiskusikan terkait aspek *performance* dan *environmental impact* dari material bangunan teknik sipil yang sering kita jumpai yaitu beton [3]. Seiring dengan perkembangan teknologi Material Beton di dunia dan isu yang berkembang tentang beton dimasa depan. Penelitian mengenai pengembangan potensi aplikasi mikrobakteri yang ramah lingkungan sebagai tindakan preventif mengatasi kekurangan beton dari permasalahan terkecil yaitu keretakan serta diharapkan mengatasi permasalahan dampak lingkungan akibat pencemaran pembangunan.

Pada tahun 2010, Jonkers, H.M dari *Delft University* Melakukan penelitian pada teknologi *Bio Concrete* yang dapat didefinisikan sebagai beton yang dibuat dengan penambahan bakteri keluarga *Bacillus* dengan kapasitas pengendapan kalsium karbonat (CaCO_3) atau *Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation* (MICP), hasil dari pengembangan teknologi tersebut menghasilkan kemampuan khusus pada Beton yang mampu pulih mandiri saat terjadi keretakan yang dikenal sebagai *Self-Healing Concrete* [4].

Secara umum teknologi *Self-Healing Concrete* yang telah dikembangkan saat ini yaitu dengan menambahkan campuran mikroba yang berperan sebagai *healing agent* atau agen yang memberikan kemampuan beton dalam memulihkan keretakan (*crack*) akibat proses konversi metabolisme kalsium laktat ke kalsium karbonat (CaCO_3), melalui aktivitas metabolismenya, bakteri akan membentuk presipitasi kalsium karbonat dari lingkungan di sekitarnya yang mampu mengisi celah retakan pada beton. Apabila celah sudah terisi, maka bakteri akan kembali pada fase dormansi dan akan aktif kembali apabila terjadi retakan baru [5].

Pada tahun 2021, M. Roig-Flores melakukan pengkajian terhadap hasil efektifitas *Self-Healing Concrete* yang diaplikasikan Proyek Skala besar di berbagai negara diantaranya, *prefabricated wastewater treatment tank* dan *in situ cast self-healing concrete water reservoir, anti-floating slab* dan *wave-type coverage*. Hasilnya penelitian skala

besar tersebut belum menunjukkan hasil atau laporan yang menunjukkan nilai Efektifitas secara rinci mengenai kelayakannya saat diaplikasikan, karena lingkup penelitian pada *Self-Healing Concrete* masih sangat luas dan perlu banyak pengembangan [6].

Di Indonesia, beragam penelitian untuk menguji potensi aplikasi *Self-Healing Concrete* dengan aplikasi mikrobakteri *Bacillus Subtilis* yang meninjau peningkatan kekuatannya, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Pangeran (2016) menunjukkan peningkatan kekuatan tekan *Self-Healing Concrete* sebesar 10,21% [7]. Serta pengujian kuat lentur oleh Siti Afifah (2017) menunjukkan peningkatan kekuatan lentur sebesar 5,2% pada *Self-Healing Concrete*, serta penelitian terkait juga menunjukkan peningkatan pada kekuatan tekan dan lentur pada *Self-Healing Concrete*. [8]. Namun dari beragam hasil tersebut, belum ada penelitian Visual yang mampu mengukur dan menunjukkan secara detail perkembangan kemampuan pemulihan mandiri pada retak yang menunjukkan efektifitas *Self-Healing Concrete*.

Oleh karena itu, Pada penelitian ini dilakukan *Mapping* berskala secara berkala selama 7 hari, 14 hari, 21 hari, 28 hari dan 56 hari pada *micro crack* untuk mengetahui secara detail perubahan dimensi dan visual akibat kemampuan pulih mandiri. Serta dilakukan uji karakterisasi bahan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive Spectroscopy*) untuk mengetahui morfologi dari permukaan dan unsur yang terbentuk pada sampel *Self-Healing Concrete* pada kondisi ekspos.

2. MATERIAL

Komposisi material *self-healing concrete* yang digunakan dalam penelitian merupakan beton normal, dengan material *Portland Composite Cement* (PCC), pasir sebagai agregat halus, split sebagai agregat kasar, dan air. serta Isolat bakteri Murni *Bacillus Subtilis* produksi *Food & Nutrition Culture Collection* (FNCC), Universitas Gadjah Mada, yang diaplikasikan sebagai *Healing Agent* pada campuran beton yang mensubstitusikan kebutuhan air sebesar 5%.

3. PENELITIAN EKSPERIMEN

3.1. Persiapan dan Pengujian Material

Medode penelitian ini bersifat eksperimental berskala laboratorium, pada tahap awal

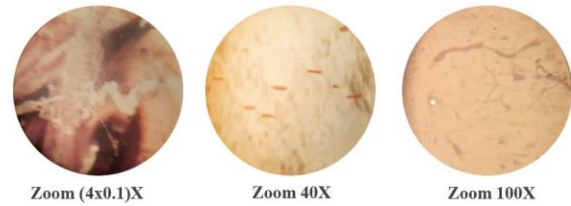
dilakukan beberapa tahapan pengujian untuk memastikan material beton normal yang digunakan sesuai standar, diantaranya pengujian Zat Organik, Kadar Lumpur, Berat Volume, *Specific Gravity*, Absorpsi, Ph Air, Densitas Semen dan Analisa Saringan. Serta digunakan metode analisis data efektifitas *self-healing* pada *micro crack* menggunakan beberapa tahapan *Visual Research Methods* (VRM) berbasis laboratorium.

Tabel 1. Sifat Fisik Material Hasil Uji

PARAMETER	Nilai	Standar
Agregat Halus		
Zat Organik (Warna Standar)	5	ASTM C40-99/C40M [9]
Analisa Saringan (Gradasi)	2	ASTM C136/136M [10]
Kadar Air (%)	3,68	SNI 1971:2011 [11]
Kadar Lumpur (%)	3,14	ASTM C 142/142M [12]
<i>Specific Gravity</i> (gr/cm ³)	2,96	SNI 03-1970-2016 [13]
Absorpsi (%)	1,08	SNI 03-1970-2016 [13]
Berat Isi lepas/padat (gr/cm ³)	1,25/1,36	ASTM C 29/C 29M [14]
Agregat Kasar		
Analisa Saringan (Gradasi)	20 mm	ASTM C136/136M [10]
Kadar Air (%)	3,35	SNI 1971:2011 [11]
Kadar Lumpur (%)	2,01	ASTM C 142/142M [12]
<i>Specific Gravity</i> (gr/cm ³)	3,15	SNI 03-1970-2016 [13]
Absorpsi (%)	1,06	SNI 03-1970-2016 [13]
Berat Isi lepas/padat (gr/cm ³)	1,28/1,46	ASTM C 29/C 29M [14]
Semen PCC		
<i>Specific Gravity</i> (gr/cm ³)	3,15	SNI 2531:2015 [15]
Air		
<i>Power of Hydrogen</i> (pH)	7	ASTM C1602M-04 [16]

3.2. Pengecekan Bakteri

Digunakan Isolat Murni *Bacillus Subtilis* (FNCC-0059), pengecekan dilakukan dengan pewarnaan gram positif pada preparat yang diamati dengan Mikroskop Binokuler. Sampel bakteri yang diamati, terlihat pada kondisi yang baik untuk diaplikasikan pada campuran beton.



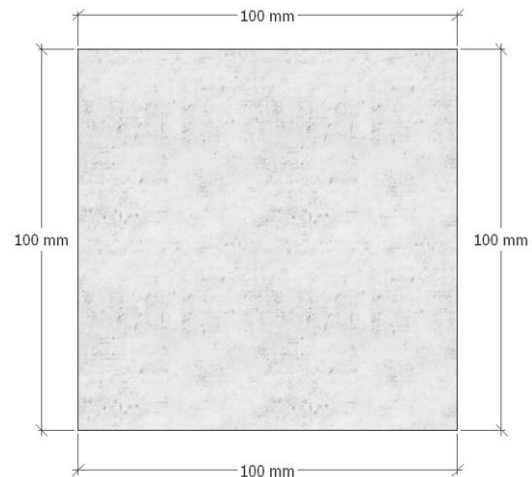
Gambar 1. Hasil Pengamatan Mikroskop

3.3. Bentuk dan Dimensi Sampel

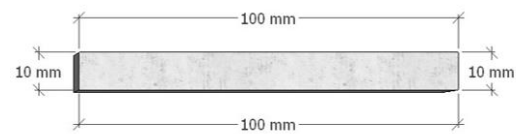
Pada penelitian ini, sampel *self-healing concrete* dibagi menjadi 2 tipe berdasarkan jenis pengujiannya :

3.3.1. Sampel A

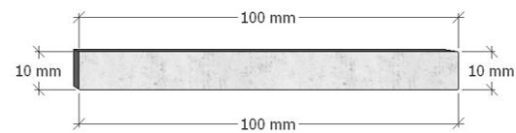
Sampel tipe A memiliki dimensi 100 mm x 100 mm x 10 mm (Panjang x lebar x tebal), Sampel ini ditujukan untuk dilakukan pemindaian *portable scanner* untuk *scaled mapping*, pengujian sifat dan karakteristik secara visual terbatas (mata)



Tampak Atas atau Bawah (Panjang x Lebar)



Tampak Samping kanan atau kiri (Tebal)

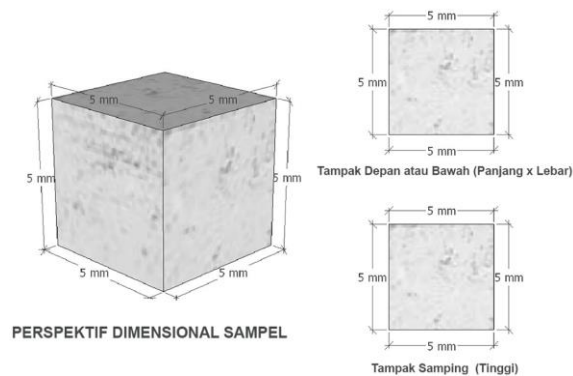


Tampak Samping Depan atau Belakang (Tebal)

Gambar 2. Dimensi Sampel A

3.3.2. Sampel B

Sampel tipe B memiliki dimensi 5mm x 5mm x 5mm (Panjang x lebar x tebal), Sampel ini ditujukan untuk pengujian pemindaian SEM (*Scanned Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) pada usia sample 56 hari pasca diberi retakan (*micro crack*).



Gambar 3. Dimensi Sampel B

3.4. Mix Design Beton

Perencanaan campuran beton normal, perhitungan mengacu pada SNI 7656:2012 dan SNI 2847:2019, dengan berat jenis Beton normal rencana 2540,8 kg/m³. Rasio campuran material beton normal ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Mix Design Beton

Material	Persentase (%)	Berat Jenis (Kg/m ³)
Semen	11,49	292
Air	12,27	311,8
Agregat Halus (<i>Dry</i>)	31,53	801
Agregat Kasar (<i>Dry</i>)	44,71	1136
Jumlah	100	2540,8

Untuk pengaplikasian mikrobakteri sebagai *Healing Agent*, Isolat bakteri murni ditimbang sebanyak 5 gram dan dilarutkan pada 1000 ml aquades hingga larutan homogen. Selanjutnya bakteri yang telah menjadi larutan mensubstitusikan 5% dari kebutuhan air campuran beton normal.

3.5. Metode Pembuatan *Micro Crack*

Sampel uji *self-healing concrete* dikondisikan untuk mengalami kehilangan air akibat penguapan selama 7 hari pasca dilepas dari *mold* hingga terjadi *micro crack* (*crackling* dan *crazing*) pada permukaan sampel.

3.6. Curing

Pada proses eksperimen, dipilih metode perawatan sampel beton pasca diberikan *micro crack* adalah *Spray Curing* pada permukaan sampel dengan *Sprayer* air, karena *Wet Curing* secara langsung dapat berisiko melarutkan bakteri dan menurunkan jumlah bakteri yang telah terikat pada sampel beton dan berpotensi memperlebar dimensi *micro crack* akibat tekanan air.



Gambar 4. Proses *Spray Curing*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengamatan Visual Terbatas

hasil pengamatan visual terbatas dengan bantuan kamera makro untuk mengambil foto sampel *Self-Healing Concrete* yang berhasil pulih mandiri pada hari ke 56.



Gambar 5. Hasil Pengamatan Visual Terbatas

Pada permukaan sampel terjadi perubahan warna sampel menjadi lebih putih dibandingkan dengan beton normal, hasil sentuhan jari pada permukaan sampel dengan penekanan, terdapat serbuk putih yang

menempel dan diketahui merupakan Endapan Kalsit atau Zat Kapur yang terbentuk dari aktivitas bakteri *Bacillus Subtilis*.

4.2. Pengecekan Kesalahan Relatif

Kesalahan Relatif (KR) Perbedaan dimensi sampel uji A pada *Mapping Berskala* dengan meninjau perbedaan dimensi pada Lebar arah (Lx) dan Lebar arah Y (Ly) hasil pemindaian *Portable Scanner* dan Jangka Sorong ditunjukkan dalam tabel berikut:

Tabel 3. Nilai Kesalahan Relatif

Sampel B Persegi (mm)						
Nomor	Jangka Sorong		Portable Scanner		% Kesalahan	
	Lx	Ly	Lx	Ly	Lx	Ly
I	99,85	98,97	99,90	101,45	0,05	2,51
II	99,95	99,93	101,30	101,55	1,35	1,62
III	99,93	99,91	101,75	101,25	1,82	1,34
Rata-Rata KR (%)					1,448	

Sehingga dapat disimpulkan nilai Kesalahan Relatif (KR) Perbedaan Dimensi sampel A pada *Scaled Mapping* sebesar 1,448%.

4.3. Mapping Berskala

4.3.1. Luas Dan Persentase Pulih Mandiri

Hasil Analisa pada *mapping* berskala dengan AutoCAD pada Sampel A pada gambar hasil pemindaian *portable scanner* dengan dimensi yang telah dikoreksi (KR), menunjukkan berkurangnya luas *micro crack* akibat proses pemulihan mandiri. pada interval usia pengujian sampel 7 hari, 14 hari, 21 hari, 28 hari dan 56 hari. Data ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4. Nilai Luas *Micro Crack* 7 - 56 hari

Nomor Sampel	Luas <i>Micro Crack</i> (mm ²)				
	Hari				
	7	14	21	28	56
I	47,072	28,830	19,065	4,460	3,286
II	32,123	13,356	10,846	6,793	2,953
III	50,505	22,139	20,232	4,390	0,959

Tabel 5. Persen Pemulihan *Micro Crack*

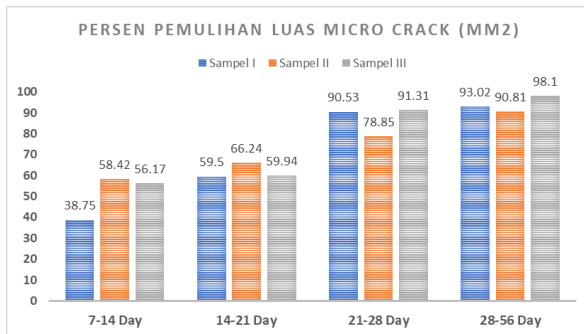
Nomor Sampel	Pemulihan Luas <i>Micro Crack</i> (%)			
	Hari			
	7-14	14-21	21-28	28-56
I	38,75%	59,50%	90,53%	93,02%
II	58,42%	66,24%	78,85%	90,81%
III	56,17%	59,94%	91,31%	98,10%
Rata-rata pemulihan di hari ke 56				93,98%

Hasil *Mapping Berskala* Dideskripsikan Sebagai Berikut :

- Berdasarkan hasil *Scaled Mapping* didapat luas Pada Sampel A I, luas *Micro Crack* buatan memiliki luas awal sebesar 47,072 mm² pada hari ke 7, pada hari ke 14 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 28,830 mm² (7-14 hari *Micro Crack* Pulih 38,75%), pada hari ke 21 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 19,065 mm² (14-21 hari *Micro Crack* Pulih 59,50%), pada hari ke 28 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 4,460 mm² (21-58 hari *Micro Crack* Pulih 90,53%), pada hari ke 56 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 3,286 mm² (28-56 hari *Micro Crack* Pulih 93,02%).
- Berdasarkan hasil *Scaled Mapping* didapat luas Pada Sampel A II, luas *Micro Crack* buatan memiliki luas awal sebesar 32,123 mm² pada hari ke 7, pada hari ke 14 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 13,356 mm² (7-14 hari *Micro Crack* Pulih 58,42%), pada hari ke 21 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 10,846 mm² (14-21 hari *Micro Crack* Pulih 66,24%), pada hari ke 28 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 6,793 mm² (21-58 hari *Micro Crack* Pulih 78,85%), pada hari ke 56 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 2,953 mm² (28-56 hari *Micro Crack* Pulih 90,81%).
- Berdasarkan hasil *Scaled Mapping* didapat luas Pada Sampel A III, luas *Micro Crack* buatan memiliki luas awal sebesar 50,505 mm² pada hari ke 7, pada hari ke 14 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 22,139 mm² (7-14 hari *Micro Crack* Pulih 56,17%), pada hari ke 21 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 20,232 mm² (14-21 hari *Micro Crack* Pulih 59,94%), pada hari ke 28 luas *Micro Crack* berkurang menjadi 4,390 mm² (21-58 hari *Micro Crack* Pulih 91,31%), pada hari ke 56 luas *Micro Crack*

berkurang menjadi 0,959 mm² (28-56 hari *Micro Crack* Pulih 98,10%).

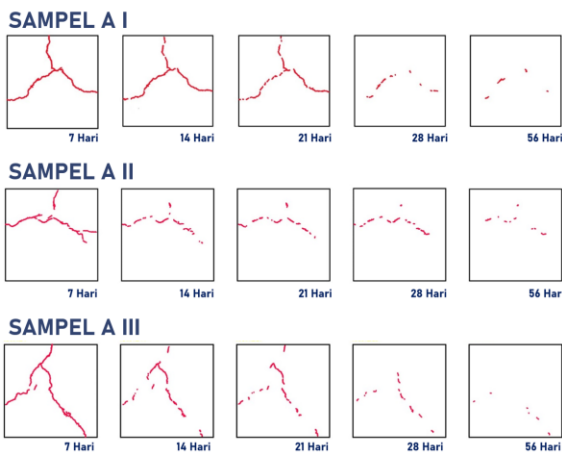
Sehingga luas rata-rata *micro crack* yang berhasil pulihkan mandiri pada ketiga sampel yang teleti sebesar 93,98% pada hari ke 56. Data persentase proses pulih mandiri pada *micro crack* disajikan dengan grafik pada berikut :



Gambar 6. Grafik Proses *Self-Healing* 56 hari

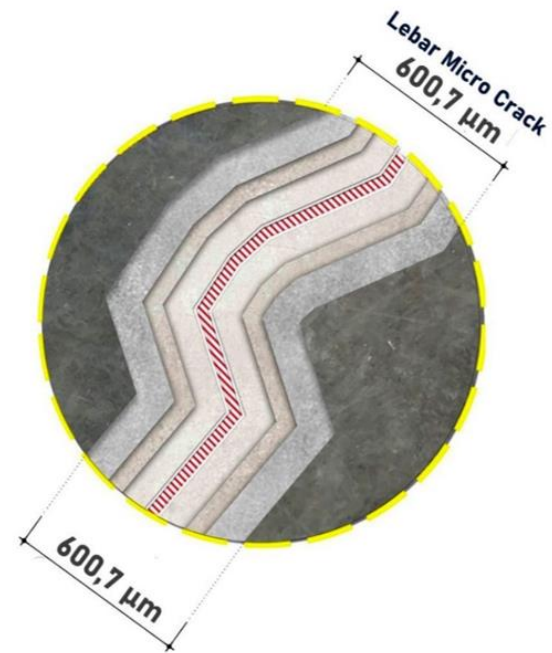
4.3.2. Luas Dan Persentase Pulih Mandiri

Akibat berkurangnya *micro crack* secara bertahap pada 56 hari, perubahan pola retak ditunjukkan pada gambar *mapping* berikut :



Gambar 7. Proses *Self-Healing* 7 - 56 Hari

Karena kemampuan pulih mandiri sampel A I, II dan III hampir sama diatas 90% pada dimensi retak maksimal 0,607 mm, detail dimensi pemulihan dari hasil *mapping* berskala digambarkan sebagai berikut:



KETERANGAN :



Gambar 8. Dimensi Pemulihan *Micro Crack*

Pada Sampel A I, Pola retak hasil pemulihan mandiri diperjelas pada dimensi pembeesaran pada area 30 mm x 30 mm untuk menunjukkan gambar hasil pemindaian dan *mapping* berskala pada Gambar 9.

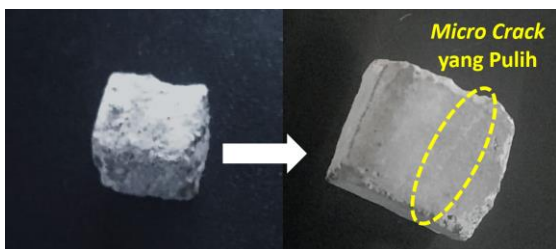


Gambar 9. Perubahan Pola Retak Sampel A I

Dimensi *micro crack* diambil pada file original *mapping* berskala pada AutoCAD dengan satuan unit milimeter (mm) dengan ketelitian 0,000.

4.4. Hasil Uji SEM dan EDX

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada beton pulih mandiri tipe B pada *micro crack* yang telah pulih.

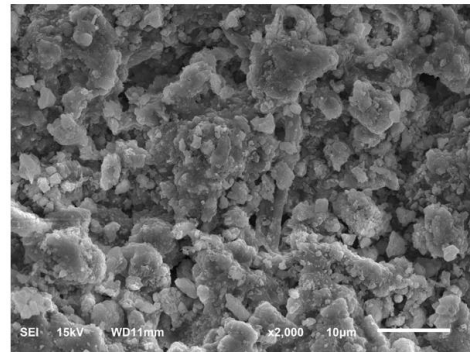


Gambar 10. Sampel B untuk SEM dan EDX

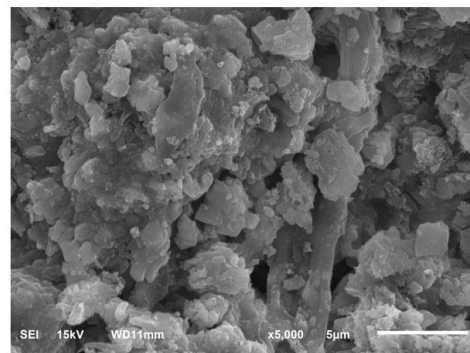
4.4.1. Hasil Uji SEM

Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada sampel *self-healing concrete* B dengan hasil pencitraan permukaan sampel dengan pembesaran x2000 dan x5000 menunjukkan perkembangan dari spora bakteri

bacillus Subtilis menghasilkan senyawa Kalsium pengisi rongga *micro crack* pada *self-healing concrete* yang ditunjukkan pada bagian yang berwarna putih pada Gambar 10 hasil pencitraan SEM di Laboratorium SEM FMIPA ITB:



SEM x2000 Self-Healing Concrete



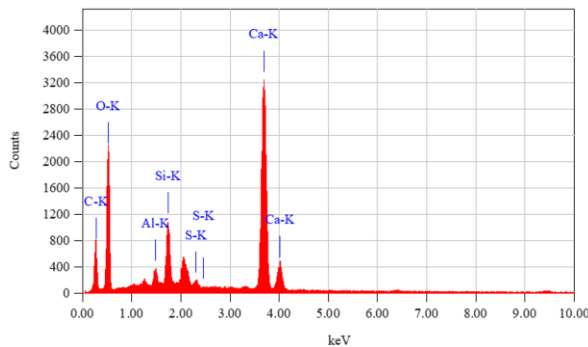
SEM x5000 Self-Healing Concrete

Gambar 11. SEM x2000 dan x5000

karakterisasi yang terbentuk pada sampel *self-healing concrete* menunjukkan perubahan warna permukaan sampel dibanding beton biasa, permukaan beton terlihat lebih putih dan cerah akibat rongga dan retakan mikro (μ) pada beton terisi oleh Senyawa Kalsium selama proses pemulihan mandiri.

4.4.2. Hasil Uji EDX

Hasil Pengujian Karakterisasi dengan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) pada sampel *self-healing concrete* B menunjukkan bahwa material yang paling banyak terbentuk dan berperan mengisi celah *micro crack* adalah senyawa kalsium karbonat (Ca-K) atau kapur. Dimana material tersebut terbentuk akibat aktivitas bakteri *Bacillus Subtilis*, Detailnya ditunjukkan oleh Gambar 11. Spektrum EDX dan Tabel 6 Senyawa EDX. Sehingga dapat dibuktikan bahwa sampel beton merupakan *self-healing concrete*.



Gambar 12. Spektrum EDX Hasil

Tabel 6. Senyawa EDX Hasil

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	15.40	0.08	24.10				9.4589
O K	0.525	49.79	0.26	58.48				36.7598
Al K	1.486	1.04	0.09	0.72				1.1427
Si K	1.739	3.90	0.09	2.61				4.9803
S K	2.307	0.69	0.09	0.41				1.0379
Ca K	3.690	29.17	0.19	13.68				46.6206
Total		100.00		100.00				

4.5. PEMBAHASAN

Untuk mencapai tingkat efektifitas pemulihan mandiri *micro crack* diatas 90% pada dimensi 0,607 mm dan Ketelitian Data Hasil yang Akurat, untuk mencapai hal tersebut penulis mencatatkan hal-hal berikut:

4.5.1. Tahap Persiapan dan Perlakuan Khusus Material

Pada proses eksperimen pembuatan sampel, keseluruhan agregat halus dan kasar yang akan digunakan sebagai campuran *self-healing concrete* dilakukan pencucian untuk benar-benar menghilangkan lumpur dan mengurangi resiko material tercemar bakteri lain atau zat-zat yang beresiko mengakibatkan kegagalan pemulihan mandiri pada *Micro Crack*. Serta, air yang digunakan untuk campuran beton harus dengan pH 7 (Netral), karena pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya sudah membuktikan untuk Bakteri *Bacillus subtilis* berkembang optimal pada pH 7.

4.5.2. Perawatan dan Pengaruh Pada Proses Self-Healing

Pada proses eksperimen sampel memerlukan perawatan khusus, perawatan sampel beton yang dipilih adalah *Dry Curing* dengan bantuan *Sprayer* air pada permukaan

sampel, karena *Wet Curing* dapat berisiko melarutkan bakteri dan menurunkan jumlah bakteri yang telah terikat pada sampel beton dan berpotensi memperlebar dimensi *micro crack* akibat tekanan air.

4.5.3. Pemilihan Metode untuk Proses Pengukuran Efektifitas

Proses pengolahan data hasil eksperimen untuk menguji kemampuan pulih mandiri pada sampel *self-healing concrete* digunakan *Visual Research Methods (VRM)* dengan standar laboratorium, dengan 3 tahap Pengujian:

1. *Mapping* Berskala (*Portable Scanner, Excel* dan *AutoCAD*)
2. *Scanning Electron Microscope (SEM)*
3. *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)*

Namun pada awalnya penulis hanya akan menggunakan *mapping* berskala untuk memperoleh data primer efektifitas meliputi data luas retak, proses perubahan pola retak dan persentase pemulihan mandiri. data primer hasil pengujian *mapping* berskala sebenarnya sudah menghasilkan nilai angka efektifitas yang akurat, namun data pengujian ini bisa saja menciptakan keraguan, sehingga Sampel Beton perlu dibuktikan secara ilmiah merupakan *self-healing concrete* yang berhasil sesuai rencana *mix design* dengan kesesuaian prosedur perawatan yang dipilih juga berhasil dan tepat.

Karena dugaan tanpa pembuktian secara ilmiah bisa saja salah besar, sehingga dibuktikanlah dengan pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* untuk melihat karakteristik beton bakteri secara detail dan akurat pada permukaan *micro crack* yang berhasil pulih murni karena aktifitas bakteri, hal ini terbukti dengan hasil foto topografi permukaan spesimen uji SEM pada pembesaran x2000 dan x5000, terlihat *micro crack* yang telah pulih terisi oleh spora *bacillus subtilis* yang terlihat berwarna putih dan menyebabkan perubahan warna pada sampel *self-healing concrete* menjadi lebih putih. sehingga dapat dibuktikan bahwa retak yang berhasil pulih mandiri murni hasil aktifitas mikrobakteri.

Setelah pengujian SEM, penulis juga menambahkan pengujian karakterisasi pada sampel yaitu *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)* Untuk mengetahui dan memastikan material pengisi keretakan yang terbentuk adalah senyawa kalsium karbonat

yang terbentuk dari aktifitas Mikrobakteri dan hasil uji EDX pada sampel menunjukkan senyawa paling banyak terbentuk pada *micro crack* yang pulih adalah kalsium karbonat (Ca-K), sehingga dengan selesainya pada tiga tahapan pengujian efektifitas telah membentuk data penelitian yang jauh lebih kompleks, yang telah berhasil membuktikan hasil kajian literatur dan *output* data hasil penelitian yang faktual.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil Penelitian Menunjukkan bahwa Kemampuan pulih mandiri pada *Micro Crack* yang dilakukan dengan *Scaled Mapping* didapat luas rata-rata *Micro Crack* yang berhasil pulih mandiri pada ketiga sampel (A I, A II dan A III) yang teliti adalah sebesar 93,98%. Karakterisasi yang terbentuk pada sampel *self-healing concrete* dengan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) menunjukkan dengan detail gambar topografi permukaan celah retak yang telah pulih mandiri serta perkembangan dari spora bakteri *Bacillus Subtilis*. Serta, material yang paling banyak terbentuk dan berperan mengisi celah *micro crack* adalah senyawa Kalsium Karbonat (Ca-K), Sehingga dapat dibuktikan bahwa sampel beton merupakan *Self-Healing Concrete*.

5.1. Saran

Perlu dilakukan uji efektivitas pulih mandiri pada *Self-Healing Concrete* dengan metode lain untuk menghasilkan data perbandingan, karena seiring waktu teknologi yang digunakan akan mampu menghasilkan data yang lebih akurat.

6. ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian ini telah diberi dukungan oleh:

1. Laboratorium SEM, Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam (FMIPA), Institut Teknologi Bandung.
2. Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi (FST), Universitas Muhammadiyah Sukabumi
3. Laboratorium Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP), Universitas Muhammadiyah Sukabumi

Dengan adanya dukungan tersebut, Penulis sangat berterima kasih dan menghargai

dukungan mereka.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Colin R.Gagg, *Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis*, Journal of Engineering Failure Analysis, Volume 40, 2014: 114-140.
- [2] Y.A. Syed¹, Ahmed Loukili², *Effect of micro-macro crack interaction on softening behavior of concrete fracture*, International Journal of Solids and Structures, Volume 40, 2021: 1-25.
- [3] A. Awaludin, *Sustainable Building Materials adalah Kebutuhan*, Seminar Nasional SeNATS 2, Grup riset Innovative Sustainable Infrastructure Materials and Construction Technologies, 2017: 1-8.
- [4] Jonkers, H.M.; Thijssen, A.; Muyzer, G.; Copuroglu, O.; Schlagen, E. (2010) *Application of bacteria as Self-Healing Agent for the Development of Sustainable Concrete*, Journal of Ecological Engineering, Volume 36, Issue 2, 2010: 230-235.
- [5] M. Pavan kumar¹, J. Vinod², K. Madhu³, *To Study Self-Healing of Concrete Using Bacillus Subtilis Bacteria*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 07, Issue 08, 2020: 120-131.
- [6] M. Roig-Flores¹, S. Formaginib², P. Serna³, *Self-Healing Concrete-What Is It Good For?* Journal Materiales de Construcción, Vol 71, 2021: 02-16
- [7] Pangeran¹, K. Rahmi², *Pengaruh Kuat Tekan Beton Dengan Mencampurkan Bakteri Basillus Subtilis Yang Dikapsulisasi Dengan Kalsium Laktat*, Skripsi Jurnal Teknik Sipil Usu, Volume 6, 2017: 6-12.
- [8] S. Afifah¹, S. Bagus², D.C. Martyana³, *Pengaruh Kuat Lentur Balok Self-Healing Concrete Dengan Bacillus Subtilis Terhadap Umur Perawatan*, Skripsi Program Sarjana, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2017: 51-63
- [9] Anonim, *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. West Conshohocken, PA. United States. ASTM C40-99/C40M.
- [10] Anonim, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA. United States. ASTM C136/136M.
- [11] SNI 1971:2011, *Cara Uji Kadar Air Total Agregat Degan Pengeringan*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [12] Anonim, *Standard Test Methods for Clay Lumps and Friable Particles In Aggregates*. West Conshohocken, PA. United States. ASTM C 142/142M.

- [13] SNI 1970:2016, *Metode Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [14] Anonim, *Standard Test Method for Unit Weight and Voids In Aggregates*. West Conshohocken, PA. United States. ASTM C 29/C 29M.
- [15] SNI 2531:2015, *Metode Uji Densitas Semen Hidraulis*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [16] Anonim, *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. West Conshohocken, PA. United States. ASTM C1602M-04.