

# EVALUASI EFEKTIVITAS BAKTERI BACILLUS MEGATERIUM SEBAGAI MATERIAL INJEKSI SELF-HEALING UNTUK PERBAIKAN RETAK BETON

Baso Muhammad Ilham Alimin<sup>1)</sup>, Luthfi Muhammad Mauludin<sup>1,\*)</sup>, Gandhi Widiarnoko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung, Indonesia

<sup>2)</sup> Specification & Business Techniacl Manager PT. Vexcolt Indonesia Pratama

<sup>\*)</sup>Correspondent Author: luthfi-mm@polban.ac.id

## **Abstract**

Concrete deterioration is a significant problem in the construction industry, which can reduce the service life and structural performance of buildings. Conventional repair methods, such as the use of epoxy and other bonding materials, are commonly used to improve the durability of concrete, but often rely on synthetic materials that are not environmentally friendly. This study focuses on the use of *Bacillus megaterium* bacteria combined with epoxy as a self-healing injection material, offering an environmentally friendly and sustainable solution to overcome concrete cracking. This study explores the potential of *Bacillus megaterium* to biologically repair concrete structures by adding the bacteria to epoxy at concentrations of 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%. Concrete blocks measuring 100 mm x 100 mm x 500 mm were tested using flexural strength, ultrasonic wave velocity (UPV), and scanning electron microscopy (SEM) tests to assess the effectiveness of the repair. The results showed that at a concentration of 15%, *Bacillus megaterium* increased the flexural strength by 12.19% of the initial strength and the UPV velocity reached 3.19 km/s, which was almost equivalent to normal concrete. SEM analysis showed the formation of calcium carbonate deposits on the cracks, indicating the success of the self-healing process. This study shows that the application of *Bacillus megaterium* in epoxy provides an environmentally friendly alternative to conventional concrete repair methods, reduces dependence on synthetic chemicals, and extends the service life of concrete infrastructure. This innovation contributes to the development of more sustainable and efficient construction practices in civil engineering.

**Keywords:** injection, *Bacillus Megaterium*, self-healing, epoxy, sustainable construction

## **PENDAHULUAN**

Beton merupakan salah satu material utama dalam konstruksi karena kekuatannya yang tinggi dan daya tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan (Kurniati, 2024). Namun, retakan pada beton bertulang tetap

menjadi permasalahan yang tidak dapat dihindari. Retakan ini dapat mengurangi kinerja struktur dan mempercepat proses degradasi material, terutama jika retakan mencapai tulangan baja (Amalia et al., 2021). Ketika tulangan terpapar

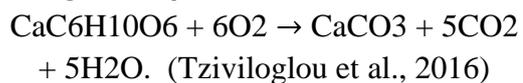
lingkungan eksternal, proses korosi dapat terjadi, yang pada akhirnya menyebabkan *delaminasi* (pelepasan lapisan beton akibat oksidasi baja tulangan) dan *spalling* (pelepasan permukaan beton akibat korosi atau benturan) (Layang, 2022). Faktor penyebab kerusakan ini meliputi perubahan temperatur, beban berlebih, kualitas material yang kurang baik, serta kesalahan dalam desain dan pelaksanaan konstruksi (Sukarto Wismogroho et al., 2022).

Salah satu metode yang umum digunakan dalam perbaikan retakan pada beton adalah injeksi menggunakan bahan *epoxy*. *Epoxy* memiliki keunggulan dalam mengisi celah dan meningkatkan daya tahan beton terhadap penetrasi air. Namun, penelitian menunjukkan bahwa injeksi *epoxy* tidak dapat sepenuhnya mengembalikan kekuatan beton ke kondisi awal, dengan penurunan kekuatan lentur hingga 16% (Griffin et al., 2017). Selain itu, perbaikan menggunakan *epoxy* hanya mampu mengembalikan sekitar 70% dari kekuatan awal, dan tidak selalu mengisi seluruh retakan secara sempurna, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai kecepatan rambat gelombang setelah perbaikan (Herlambang & Setyono, 2018). Hal ini menegaskan bahwa meskipun injeksi *epoxy* dapat memperbaiki keretakan, kemampuannya untuk mengembalikan kekuatan beton ke kondisi awal terbatas. Sebagai solusi, inovasi "*bioconcrete*" yang menggunakan bakteri *Bacillus megaterium*, menawarkan kemampuan

perbaikan mandiri (*self-healing*) untuk retakan mikro pada beton, menjanjikan pemulihan yang lebih efektif dan efisien dari kerusakan struktural (Rahmawan et al., 2021).

Teknik *self-healing* merupakan pendekatan yang baik dalam perbaikan retakan mikro pada permukaan beton, penambahan bakteri menyebabkan pengendapan *kalsium karbonat* yang membentuk lapisan untuk menutupi retak pada beton (Pei et al., 2013). Bakteri yang ditambahkan harus dapat bertahan pada lingkungan basa tinggi atau alkali karena beton bersifat basa (Erşan et al., 2015). *Bacillus sphaericus* dapat mengendapkan  $\text{CaCO}_3$  di lingkungan basa tinggi dengan mengubah *urea* menjadi *amonium* dan *karbonat* (Van Tittelboom et al., 2010). *Kalsium karbonat* membantu mengisi retakan mikro dan mengikat bahan lain seperti pasir dan kerikil dalam beton (Kaur & Lall, 2012). Bentuk keretakan apapun pada beton akan menyebabkan bakteri menjadi aktif dari tahap hibernasinya. Metabolisme bakteri menghasilkan endapan *kalsium karbonat* yang mengisi celah retakan. Setelah retakan terisi penuh dengan *kalsium karbonat*, bakteri kembali ke tahap hibernasi dan ketika terjadi keretakan lagi maka bakteri kembali aktif dan mengisi celah retakan tersebut sehingga bakteri dapat dikatakan sebagai agen *self-healing* yang tahan lama. Mekanisme ini disebut sebagai *Microbiologically Induced Calcium Carbonate Precipitation* (MICP) (Vijay et al., 2017).

Konsep beton *self-healing* berbasis bakteri menunjukkan bahwa dengan adanya oksigen dan air di dalam retakan, *spora* bakteri yang tidak aktif diaktifkan. Kemudian, sel bakteri aktif mengubah *kalsium laktat* (CaC<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>6</sub>) ke CaCO<sub>3</sub> ditambah oksigen menjadi *kalsium karbonat*.



Kombinasi ini diharapkan dapat mengatasi kekurangan injeksi *epoxy* yang tidak mampu mengisi seluruh celah retakan dengan sempurna. Dengan adanya bakteri yang aktif dalam larutan injeksi, retakan mikro yang tidak terisi oleh *epoxy* dapat diperbaiki secara mandiri melalui proses MICP. Selain itu, pembentukan *kalsium karbonat* dalam retakan juga berkontribusi pada peningkatan ketahanan beton terhadap korosi dan degradasi lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas bakteri *Bacillus megaterium* sebagai material injeksi untuk memperbaiki retakan pada beton bertulang. Dengan menggunakan metode ini, diharapkan bakteri mampu berkembang dalam celah retakan, menghasilkan *kalsium karbonat* yang dapat menutup rongga dengan lebih baik dibandingkan material injeksi konvensional.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan berupa metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung untuk proses pembuatan dan pengujian sampel beton dan di

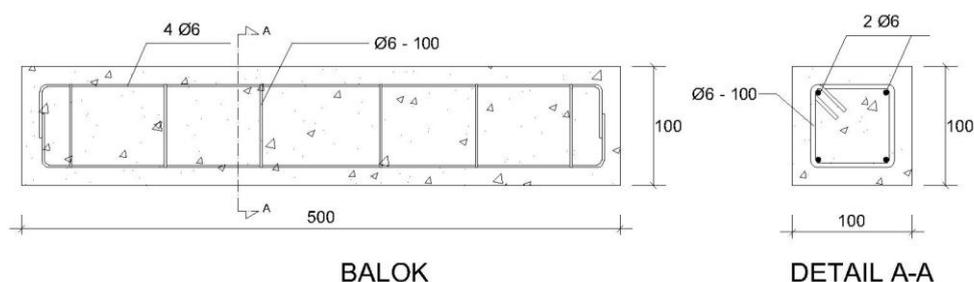
Laboratorium Bioproses Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung. Beberapa batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Beton yang digunakan merupakan beton instan BEP MIX dengan spesifikasi produk yang mampu mencapai mutu 30 MPa. Pembuatan beton menggunakan mixer.
- 2) Material injeksi yang digunakan adalah material bahan *resin epoxy* (*Estorex EP10*) dan bahan perekat permukaan (*Estobond EC*) dari produk PT. Hissan Trading Indonesia Denka-ESTOP dan tambahan campuran bakteri yang digunakan berasal dari spesies *Bacillus sp.* yaitu *Bacillus megaterium* yang dikulturasi di laboratorium.
- 3) Kerusakan yang ditinjau berupa retak ringan dengan lebar 0.05 mm – 10 mm mengacu pada ACI 224.1R-2007.
- 4) Pengujian kuat tekan mengacu pada pedoman SNI 1974 – 2011.
- 5) Pengujian lentur benda uji beton mengacu pada pedoman SNI 4431 – 2011.
- 6) Pengujian kedalaman retakan mengacu pada pedoman ASTM 1997 C 597 – 83 (1991), *Pulse Velocity Through Concrete* dan SNI - 4431-2011, Pengujian mutu beton dengan kecepatan pulsa melalui Beton

Tahapan awal pembuatan balok beton bertulang dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 500 mm dengan mutu rencana 30 MPa dan dilakukan

perawatan selama 28 hari. Adapun gambar detail sampel benda uji dapat dilihat pada Gambar 1. Balok beton diproduksi menggunakan campuran beton dengan rasio air-semen (FAS) sebesar 0,5. Bahan-bahan yang digunakan akan konsisten, dan proses pengecoran dilakukan secara

bersamaan. Melalui perlakuan yang konsisten ini, diharapkan spesimen uji yang homogen, mengurangi keraguan tentang keseragaman kualitasnya. Produksi sampel dibagi menjadi beberapa variasi injeksi, sebagaimana dirinci dalam Tabel 1.



Gambar 1. Benda uji balok bertulang

Tabel 1. Variasi benda uji

Jenis Pengujian	Jenis Sampel	Jumlah (buah)	Varian	Kode Sampel
Kuat Lentur Balok	Balok injeksi <i>epoxy</i>	3	28 hari	BLI
	Balok injeksi <i>epoxy</i> dan penambahan 5% bakteri <i>Bacillus megatrium</i>	3	28 hari	BLII
	Balok injeksi <i>epoxy</i> dan penambahan 10% bakteri <i>Bacillus megatrium</i>	3	28 hari	BLIII
	Balok injeksi <i>epoxy</i> dan penambahan 15% bakteri <i>Bacillus megatrium</i>	3	28 hari	BLIV
	Balok injeksi <i>epoxy</i> dan penambahan 20% bakteri <i>Bacillus megatrium</i>	3	28hari	BLV
	Balok injeksi <i>epoxy</i> dan penambahan 25% bakteri <i>Bacillus megatrium</i>	3	28 hari	BLVI

Kemudian, dilaksanakan pengembangbiakkan atau *inokulasi* pada bakteri *Bacillus megaterium* di laboratorium bio-proses. Proses tersebut dimulai dengan pembuatan media agar sebagai tempat *inokulasi* bakteri yang kemudian dipindahkan

pada media cair. Hasil akhir dapat dilihat pada Gambar 2. Kadar bakteri yang digunakan ialah dengan proporsi 15% dari jumlah keseluruhan bahan pengisi injeksi dan jumlah konsentrasi bakteri adalah 10<sup>6</sup> cfu/ml.

Variasi dibagi menjadi dua jenis sampel, satu diisi dengan *epoxy* sebagai pengisi injeksi, dan yang lain dengan campuran *epoxy* bersama dengan penambahan bakteri *Bacillus megaterium* dengan variasi penambahan seperti Tabel 1. Nilai paling optimal dipilih dari konsentrasi penambahan bakteri *Bacillus megaterium* tertinggi yang mengembalikan kekuatan awal, dan

dibandingkan dengan *epoxy* tanpa penambahan bakteri. Setelah membuat spesimen untuk melakukan Uji Kekuatan Lentur dilakukan menggunakan metode lentur tiga titik. Pengujian dilakukan setelah 28 hari ( $F_0$ ). Selanjutnya, pengujian dilakukan menggunakan mesin lentur tiga titik *bending machine* seperti yang digambarkan dalam Gambar 3.



Gambar 2. Larutan bakteri *bacillus megaterium*



Gambar 3. Alat *bending machine*

Setelah spesimen dilakukan pembebanan, mengakibatkan lendutan yang menyebabkan retak pada balok. Balok dirancang untuk menahan lebar retak yang diperbolehkan sebesar 0,1 - 10 mm. Selanjutnya, ketika balok mengalami retakan, perbaikan dilakukan pada retakan ini menggunakan campuran bahan pengisi injeksi. Karena cairan pengisi retakan *epoxy* membutuhkan waktu untuk mengeras, pengujian dilakukan setelah

28 hari dari proses injeksi. Setelah 28 hari sejak injeksi dilakukan, balok dikenakan beban tambahan untuk menentukan beban setelah injeksi *epoxy* ( $F_1$ ). Persamaan yang digunakan untuk menghitung kekuatan lentur balok sebagai berikut.

$$F = \frac{PL}{bh^2} \quad (1)$$

dimana,

F = Kuat lentur (MPa)

P = Beban maksimum pada waktu lentur (kN)

L = Panjang Bentang Antar Tumpuan (mm)

b = Lebar Balok (mm)

h = Tinggi Balok (mm)

Selanjutnya, pengujian beban setelah injeksi diikuti oleh analisis yang membandingkan kekuatan lentur sebelum dan setelah injeksi. Analisis ini mencakup grafik yang menggambarkan hubungan antara lenturan dan kapasitas *epoxy* dan *Bacillus megaterium* sebagai faktor peningkatan kekuatan lentur beton.

Selain itu juga dilakukan pengujian cepat rambat gelombang, dengan penambahan pengujian cepat rambat gelombang untuk mengetahui kedalaman retakan dan efektivitas bahan pengisi injeksi. Pengujian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Melakukan pengujian UPV sebelum uji beban pada balok untuk kondisi inisial ( $UPV_0$ ).
- 2) Setelah pembebanan awal, melakukan pengujian UPV untuk mengukur kedalaman retakan ( $UPV_1$ ).
- 3) Setelah balok diinjeksi, sebelum pembebanan melakukan pengujian UPV untuk mendapatkan

kedalaman retakan setelah injeksi ( $UPV_2$ ).

Analisa kualitas bahan dilakukan dengan mengukur waktu transit pulsa ultrasonik secara akurat melalui material yang sedang diuji. Jarak yang ditempuh oleh pulsa gelombang ultrasonik dalam material dan kecepatannya ditentukan menurut persamaan berikut :

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

dimana,

V = Kecepatan rambat gelombang (m/s)

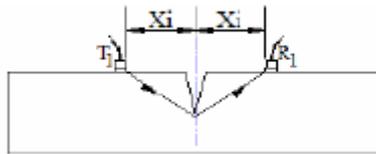
L = jarak antar pusat permukaan transduser (m)

T = waktu tempuh (s)

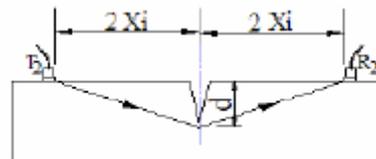
Hubungan kecepatan gelombang ultrasonik dan mutu kepadatan beton berdasarkan SNI - 4431-2011 dapat dilihat pada Tabel 2. Pengujian pundit ini juga untuk menentukan kedalaman retak pada beton hanya dilakukan 2 kali pengukuran pada 2 tempat yang berbeda dengan jarak transduser kedua ke titik retak memiliki panjang 2 kali jarak *transducer* pertama ke titik retak, seperti terlihat pada Gambar 4. dan Gambar 5.

Tabel 2. Hubungan Kecepatan Gelombang Ultrasonik dan Mutu Kepadatan Beton

Kecepatan Rambat Gelombang Ultrasonik (km/sec)	Mutu Kepadatan Beton
< 2,13	Kurang
2,13 – 3,05	Cukup
3,05 – 3,66	Cukup Baik
3,66 – 4,57	Baik
> 4,57	Baik Sekali



Gambar 4. Pengukuran ke 1 pada jarak xi ke titik retak



Gambar 5. Pengukuran ke 2 pada jarak 2 xi ke titik retak

Besarnya kedalaman retak beton berdasarkan Metoda BS, dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$d = x \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (3)$$

dimana,

d = kedalaman retak, mm

x = panjang lintasan, mm

t1 = kecepatan waktu rambat,  $\mu$ S

t2 = kecepatan waktu rambat,  $\mu$ S

Sementara itu juga dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk menganalisis struktur mikro beton setelah mengalami retakan serta setelah diperbaiki dengan metode injeksi. SEM memberikan gambaran rinci mengenai tekstur permukaan, ukuran pori-pori, dan distribusi retakan dalam skala *mikroskopis*. Dengan teknik ini, dapat diamati bagaimana material injeksi, seperti kombinasi *epoxy* dan bakteri *Bacillus megaterium*, mengisi retakan serta interaksinya dengan matriks beton pada tingkat mikro. Pengujian ini dilakukan dengan

membandingkan tiga kondisi sampel beton, yaitu:

- 1) Beton normal (tanpa perbaikan).
- 2) Beton setelah perbaikan dengan injeksi *epoxy* dan bakteri *Bacillus megaterium* (28 hari setelah perbaikan).
- 3) Beton setelah pengujian (28 hari setelah pengujian pasca perbaikan).

Evaluasi ini bertujuan untuk mengamati perkembangan struktur mikro beton pada setiap tahap serta efektivitas proses *self-healing* dalam jangka waktu tertentu.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh data mengenai efektivitas *Bacillus megaterium* dalam *epoxy* sebagai material injeksi untuk perbaikan retak pada beton. Hasilnya adalah sebagai berikut.

### Hasil Kuat lentur

Adapun hasil pengujian kuat lentur ( $F_0$ ) dan ( $F_1$ ) dengan cara analitis dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian kuat lentur awal ( $F_0$ ) Kuat lentur setelah perbaikan ( $F_1$ )

No. Sampel	Jenis Perbaikan	Kuat Lentur (Mpa)		Perbandingan kekuatan %	Rata-Rata Peningkatan %
		Kekuatan Awal ( $F_0$ )	Setelah Perbaikan ( $F_1$ )		
BLI.1	<i>Epoxy</i>	13,40	15,17	113,19	104,67
BLI.2		15,85	14,63	92,32	
BLI.3		14,81	16,07	108,49	
BLII.1	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i> 5%	14,33	13,07	91,16	106,15
BLII.2		13,15	15,92	121,14	
BLIII.1	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i> 10%	13,41	14,65	109,23	111,22
BLIII.2		13,76	15,58	113,23	
BLIII.3		14,22	15,81	111,21	
BLIV.1	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i> 15%	12,18	13,29	109,11	112,19
BLIV.2		14,27	15,66	109,69	
BLIV.3		13,02	12,97	99,65	
BLV.1	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i> 20%	11,95	13,47	112,70	109,35
BLV.2		11,33	14,14	124,81	
BLV.3		12,78	11,57	90,53	
BLVI.1	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i> 25%	12,66	13,80	109,06	107,06
BLVI.2		14,59	15,19	104,12	
BLVI.3		14,91	16,10	108,01	

Berdasarkan Tabel 3. memperlihatkan hasil kuat lentur yang dilakukan, diperoleh kuat lentur pada umur 28 hari, hasil tersebut akan menjadi pembanding balok yang diinjeksi ( $F_0$ ) menunjukkan bahwa perbaikan menggunakan injeksi *epoxy* meningkatkan kekuatan rata-rata sebesar 4,67%. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas *epoxy* yang digunakan dalam injeksi adalah baik, bahkan melebihi kekuatan awal, berbanding terbalik dengan penelitian sebelumnya yang hanya mampu mencapai 84% dari kekuatan awal (Griffin et al., 2017).

Sementara itu, perbaikan dengan injeksi menggunakan bakteri *Bacillus*

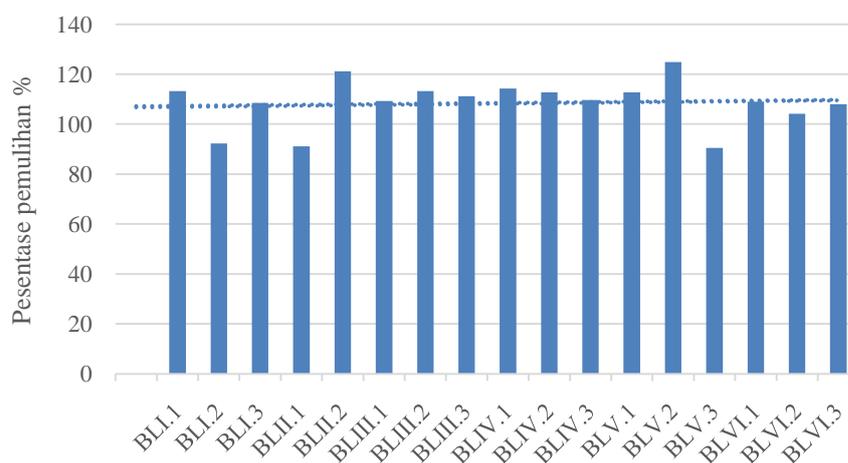
*megaterium* pada berbagai variasi konsentrasi menunjukkan hasil sebagai berikut:

- **5%:** peningkatan rata-rata sebesar 6,15%
- **10%:** peningkatan rata-rata sebesar 11,22%
- **15%:** peningkatan rata-rata sebesar 12,19%
- **20%:** peningkatan rata-rata sebesar 9,35%
- **25%:** peningkatan rata-rata sebesar 7,06%

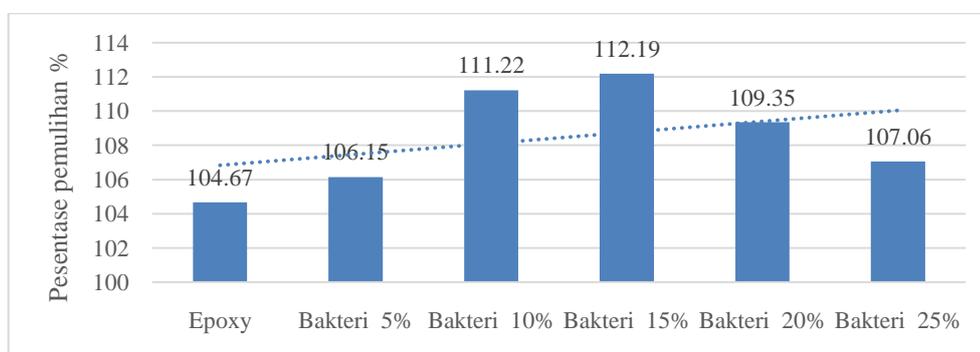
Selanjutnya, injeksi dengan bakteri *Bacillus megaterium* pada konsentrasi 15% menunjukkan

peningkatan kekuatan sebesar 12,19%. Ini menunjukkan bahwa metode perbaikan dengan injeksi *Bacillus megaterium* adalah yang paling efektif di antara semua metode yang diuji. Bahkan, hasil ini lebih baik daripada penelitian sebelumnya yang hanya mampu mendekati 99,7% dari kekuatan awal (Alimin et al., 2024). Percobaan ini tidak hanya mengembalikan kekuatan awal tetapi juga meningkatkan kekuatan sebesar 12,19% dari kekuatan awal.

Secara umum, penggunaan bakteri sebagai bahan tambah dalam injeksi menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kekuatan lentur pasca-retak, serta menunjukkan kemampuan *self-healing* melalui mekanisme pengendapan *kalsium karbonat* di dalam retakan beton. Hal ini mendukung penerapan bakteri sebagai alternatif inovatif dalam perbaikan struktural beton. Adapun grafik perbandingan persentase pemulihan kekuatan sampel dapat dilihat pada Gambar 6. dan Gambar 7.



Gambar 6. Perbandingan Pemulihan Kekuatan Tiap Sampel



Gambar 7. Rata-rata Peningkatan Pemulihan Kekuatan

Grafik yang dihasilkan dari data menunjukkan tren pemulihan kekuatan beton setelah perbaikan dengan kedua metode. *Trendline* yang ditambahkan pada grafik menggambarkan hubungan linier antara persentase *Bacillus megaterium* dan peningkatan kekuatan lentur beton. Dengan meningkatnya konsentrasi *Bacillus megaterium*, terlihat adanya peningkatan pemulihan kekuatan beton secara signifikan, yang mendukung hipotesis bahwa konsentrasi yang lebih tinggi dari bakteri ini berpotensi meningkatkan proses perbaikan beton.

Namun, meskipun perbaikan dengan *Bacillus megaterium* pada persentase tinggi menunjukkan hasil

yang lebih baik, penggunaan bakteri pada konsentrasi yang sangat tinggi (seperti 25%) tidak selalu menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan dan bahkan menunjukkan penurunan pada beberapa sampel. Hal ini mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti ketidaksempurnaan dalam distribusi bakteri atau kualitas mikroba yang lebih rendah pada konsentrasi tinggi.

### Pengujian kecepatan rambat gelombang

Berdasarkan pengujian kecepatan rambat gelombang yang telah dilakukan pada penelitian ini diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian kecepatan rambat gelombang

No	Jenis Perbaikan	Kecepatan rambat m/s	Kerapatan	Kecepatan rambat m/s	Kerapatan	Kecepatan rambat m/s	Kerapatan	Perbandingan volume awal
		Sebelum retak		Saat retak		Setelah Perbaikan		
BLI.1	Epoxy	3139,7	Cukup Baik	1042,7	Kurang	2913,8	Cukup	90,9
BLI.2		3310,2	Cukup Baik	1038,9	Kurang	2947,7	Cukup	
BLII.1	Bakteri 5%	3145,4	Cukup Baik	1042,5	Kurang	2953,4	Cukup	107,4
BLII.2		2822,7	Cukup	1230,9	Kurang	3414,3	Cukup Baik	
BLIII.1	Bakteri 10%	2775,3	Cukup	1324,2	Kurang	3414,9	Cukup Baik	115,8
BLIII.2		2947,7	Cukup	1298,4	Kurang	3200	Cukup Baik	
BLIV.1	Bakteri 15%	2643,9	Cukup	1293,7	Kurang	3196,9	Cukup Baik	116
BLIV.2		2947,7	Cukup	1289,4	Kurang	3272,7	Cukup Baik	
BLV.1	Bakteri 20%	3195,4	Cukup Baik	1353,5	Kurang	2856,3	Cukup	91,6
BLV.2		3150,3	Cukup Baik	1224,9	Kurang	2954,2	Cukup	
BLVI.1	Bakteri 25%	3087,8	Cukup Baik	1099,0	Kurang	3172,4	Cukup Baik	109,3
BLVI.2		2749,7	Cukup	995,9	Kurang	3183,5	Cukup Baik	
Rata-rata		2993,0	Cukup	50,5	Kurang	40,5	Cukup Baik	

Berdasarkan Tabel 4. di atas, pengujian kecepatan rambat gelombang ultrasonik pada beton yang mengalami keretakan dan diperbaiki dengan metode *epoxy* serta injeksi bakteri *Bacillus megaterium* memberikan gambaran yang signifikan tentang efektivitas masing-masing metode. Berdasarkan SNI 4431-2011, yang mengaitkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik dengan mutu kepadatan beton, dapat ditarik kesimpulan bahwa metode injeksi bakteri memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas beton pasca perbaikan.

Sebelum terjadi keretakan, sebagian besar sampel menunjukkan kecepatan rambat gelombang yang masuk dalam kategori Cukup Baik, dengan kecepatan antara 3,05 hingga 3,66 km/s. Namun, setelah beton mengalami keretakan, kecepatan gelombang turun drastis, menunjukkan penurunan mutu beton ke kategori Kurang, dengan nilai di bawah 2,13 km/s. Hal ini mengindikasikan bahwa retakan signifikan memengaruhi kerapatan dan integritas struktur beton.

Setelah dilakukan perbaikan menggunakan *epoxy*, kecepatan gelombang berhasil meningkat, tetapi hanya mencapai kisaran Cukup, yaitu sekitar 2,9 km/s. Ini menunjukkan bahwa meskipun *epoxy* mampu mengisi retakan dan meningkatkan kekuatan beton, kemampuan perbaikan ini masih terbatas. Beton tidak kembali ke kondisi optimal sebelum keretakan terjadi, dan *epoxy* hanya memberikan peningkatan yang moderat.

Sebaliknya, metode injeksi bakteri *Bacillus megaterium* menunjukkan hasil yang lebih baik, terutama pada konsentrasi 10% dan 15%. Setelah perbaikan dengan konsentrasi 10%, kecepatan gelombang mencapai 3,41 km/s, yang masuk dalam kategori Cukup Baik. Ini menandakan bahwa injeksi bakteri secara efektif memperbaiki retakan dan meningkatkan kerapatan beton hampir setara dengan kondisi awal. Pada konsentrasi 15%, hasilnya bahkan lebih baik dengan kecepatan 3,19 km/s, masih dalam kategori Cukup Baik, menunjukkan perbaikan yang mendekati sempurna.

Namun, pada konsentrasi bakteri yang lebih tinggi seperti 20% dan 25%, efektivitas perbaikan justru menurun. Kecepatan gelombang setelah perbaikan menunjukkan angka yang lebih rendah, pada konsentrasi 20% hanya mencapai 2,85 km/s, yang berada pada kategori Cukup.

Secara keseluruhan, penggunaan bakteri *Bacillus megaterium* dengan konsentrasi yang tepat, terutama pada 10% dan 15%, memberikan hasil terbaik dalam memperbaiki retakan beton melalui mekanisme *self-healing*. Metode ini tidak hanya meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga memulihkan kepadatan dan kerapatan struktur dengan lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional seperti *epoxy*.

Kemudian dilanjutkan dengan analisis kedalaman retakan, untuk menentukan kedalaman retak pada beton hanya dilakukan dua kali

pengukuran pada dua tempat yang berbeda dengan jarak *transducer* kedua ke titik retak memiliki panjang dua kali jarak *transducer* pertama ke titik

retak. Adapun hasil pengujian kedalaman retakan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian kedalaman retakan

No	Jenis Pengujian	Titik	Waktu Retak $\mu$ s	Kedalaman retakan mm	Rata-rata kedalaman retak	Waktu Retak $\mu$ s	Kedalaman retakan mm	Rata-rata kedalaman retak
			Sebelum Perbaikan			Setelah Perbaikan		
BLI.1	Epoxy	T1	43,93	51,02	49,56	26,6	13,96	33,56
		T2	64,30			55,9		
BLI.2		T1	38,94	48,11		46,2	53,17	
		T2	58,1			66,7		
BLII.1	Bakteri 5%	T1	45,97	43,37	49,86	29,6	20,72	25,92
		T2	70,90			54,3		
BLII.2		T1	41,27	56,36		32	31,12	
		T2	58,43			54,2		
BLIII.1	Bakteri 10%	T1	38,7	45,24	46,96	29,65	11,42	18,73
		T2	58,9			57,60		
BLIII.2		T1	32,9	48,68		32,45	26,04	
		T2	48,9			57,2		
BLIV.1	Bakteri 15%	T1	36,33	58,54	63,12	35,9	15,73	18,03
		T2	50,80			68,1		
BLIV.2		T1	42,92	67,71		29,9	20,34	
		T2	57,2			55		
BLV.1	Bakteri 20%	T1	36,33	58,54	57,65	28,2	15,83	32,67
		T2	50,80			60,2		
BLV.2		T1	39,10	56,76		38,7	49,52	
		T2	55,23			57,2		
BLVI.1	Bakteri 25%	T1	46,23	61,57	57,96	35,9	31,97	26,15
		T2	63,57			60,4		
BLVI.2		T1	47,70	54,34		29,9	20,34	
		T2	68,37			55		

Berdasarkan Tabel 5, Berdasarkan hasil pengujian terhadap kedalaman retakan sebelum dan sesudah perbaikan, baik dengan metode *epoxy* maupun injeksi bakteri *Bacillus megaterium*, terlihat bahwa injeksi bakteri memberikan hasil yang lebih baik dalam memperbaiki retakan beton.

Pada perbaikan menggunakan *epoxy*, kedalaman retakan awal rata-rata sekitar 51,02 mm, dan setelah perbaikan, kedalaman berkurang

menjadi 26,6 mm. Ini menunjukkan bahwa *epoxy* cukup efektif dalam mengurangi kedalaman retakan, dengan penurunan kedalaman sebesar 47,85%. Namun, masih terdapat retakan yang tersisa, menunjukkan bahwa *epoxy* tidak mampu menutup retakan secara sempurna.

Sebaliknya, injeksi bakteri *Bacillus megaterium* menunjukkan hasil yang lebih bervariasi tergantung pada konsentrasi yang digunakan. Pada konsentrasi 5%, kedalaman retakan

berkurang dari 43,37 mm menjadi 25,92 mm, menunjukkan penurunan sebesar 40,2%. Ini menunjukkan bahwa meskipun efektif, konsentrasi bakteri yang rendah belum optimal dalam menutup retakan sepenuhnya.

Pada konsentrasi 10%, hasil perbaikan lebih signifikan dengan kedalaman retakan berkurang dari 45,24 mm menjadi 18,73 mm, menandakan penurunan sebesar 58,6%. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi 10% adalah salah satu yang paling efektif, di mana bakteri mampu menghasilkan *kalsium karbonat* dalam jumlah yang cukup untuk memperbaiki retakan secara lebih efisien.

Konsentrasi 15% memberikan hasil terbaik dengan penurunan kedalaman retakan dari 58,54 mm menjadi 18,03 mm, atau sekitar 69,2%. Pada konsentrasi ini, jumlah bakteri yang aktif dalam menghasilkan *kalsium karbonat* mencapai titik optimal, sehingga mampu memperbaiki retakan dengan sangat baik.

Namun, pada konsentrasi 20% dan 25%, efektivitas perbaikan menurun. Pada konsentrasi 20%, kedalaman retakan berkurang dari 58,54 mm menjadi 32,67 mm, sedangkan pada konsentrasi 25%, kedalaman berkurang dari 61,57 mm menjadi 26,15 mm. Secara keseluruhan, injeksi bakteri *Bacillus megaterium* terbukti lebih unggul dalam memperbaiki retakan beton dibandingkan dengan *epoxy*, terutama

pada konsentrasi 10% dan 15%, yang memberikan hasil perbaikan terbaik.

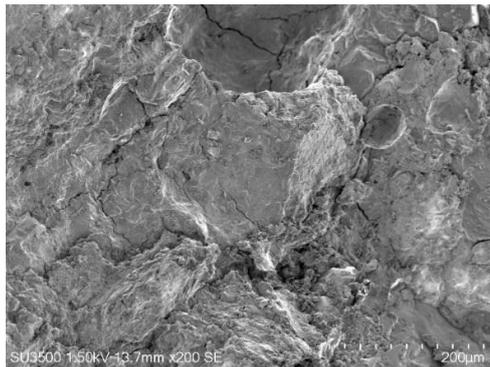
### **Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM)**

Untuk memperoleh gambaran mikrostruktur beton sebelum dan sesudah proses perbaikan serta setelah pengujian, dilakukan pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap tiga kondisi sampel, yaitu: beton normal (tanpa perbaikan), beton setelah perbaikan (menggunakan injeksi *epoxy* dan bakteri *Bacillus megaterium*), serta beton setelah pengujian (28 hari pasca perbaikan dan pengujian).

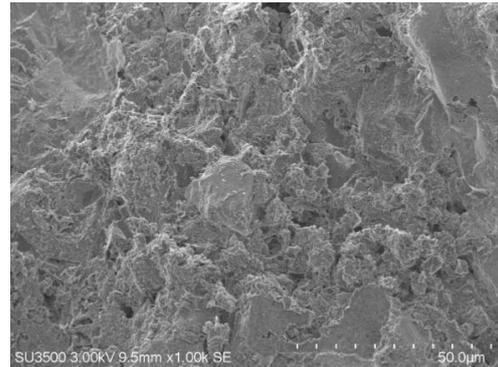
#### **1. Beton normal (tanpa perbaikan)**

Pengujian struktur mikro beton normal dapat dilihat pada Gambar 8. Gambar tersebut menunjukkan hasil pengamatan morfologi permukaan beton normal pada skala mikroskopis dengan pembesaran 200 kali dan 1000 kali, yang bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mikrostruktur seperti porositas, retakan mikro, dan distribusi material penyusun.

Pada gambar SEM, terlihat struktur permukaan beton yang masih alami, belum mengalami proses perbaikan maupun intervensi biologis. Permukaan menunjukkan banyak rongga mikro dan pori-pori terbuka yang menyebar tidak merata. Struktur ini mencerminkan bahwa beton berada dalam kondisi standar hasil pencampuran dan pengerasan tanpa perlakuan lanjutan.



Perbesaran 200 kali skala 200 μm



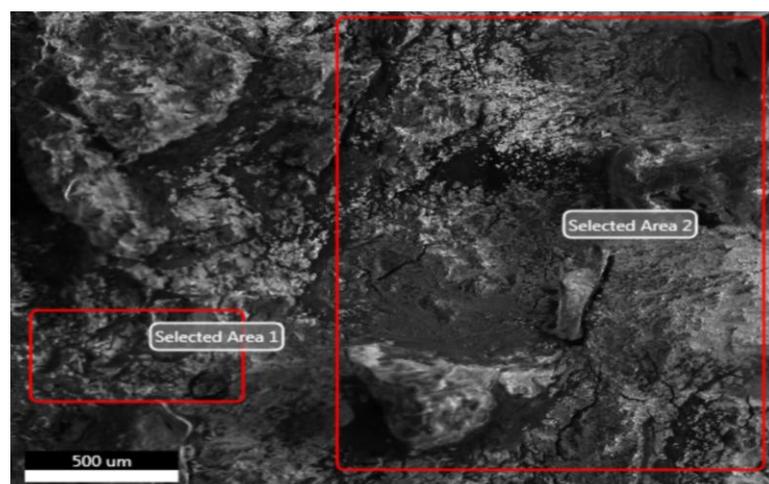
Perbesaran 1000 kali skala 50 μm

Gambar 8. Pengujian SEM beton normal

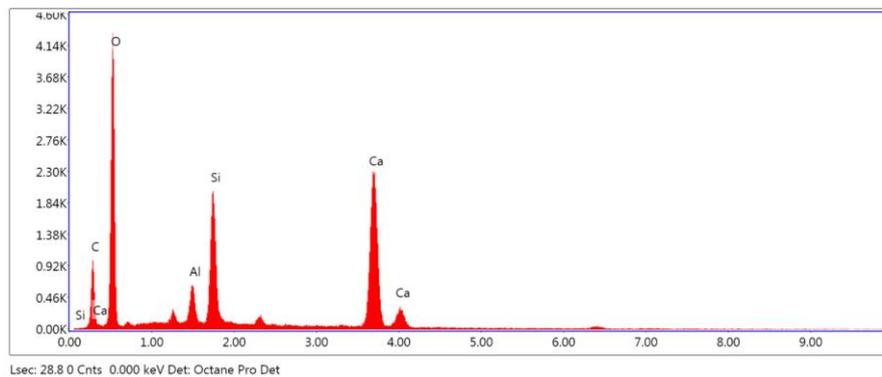
Pori-pori yang tampak berukuran cukup besar menunjukkan tingkat kerapatan beton yang rendah, yang dapat berimplikasi terhadap penurunan performa mekanik maupun ketahanan terhadap penetrasi cairan dan gas. Ketiadaan *endapan kalsium karbonat* ( $\text{CaCO}_3$ ) juga memperjelas bahwa belum terjadi proses biomineralisasi.

Kemudian pengujian terhadap komposisi kimia beton normal dilakukan menggunakan metode *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), yang merupakan bagian dari

analisis mikroskopis dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) diperlihatkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 menyajikan grafik spektrum hasil analisis EDS yang menunjukkan elemen-elemen dominan yang terdeteksi pada permukaan sampel beton. Adapun Tabel 6 merangkum komposisi unsur kimia yang teridentifikasi berdasarkan hasil pengujian tersebut, yang mencerminkan kandungan material penyusun utama pada beton normal.



Gambar 9. Pengujian EDS pada beton normal



Gambar 10. Grafik Pengujian EDS pada beton normal

Tabel 6. Komposisi campuran ditinjau dengan EDS pada beton normal

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.15	18.05	142.42	9.42	0.0444	1.0991	0.9500	0.3622	1.0000
O K	50.07	60.85	772.47	9.43	0.1295	1.0476	0.9716	0.2468	1.0000
AlK	2.46	1.77	147.54	6.20	0.0177	0.9252	1.0113	0.7665	1.0115
SiK	8.21	5.68	521.11	3.97	0.0661	0.9445	1.0177	0.8418	1.0122
CaK	28.12	13.64	847.30	2.44	0.2515	0.8858	1.0474	0.9967	1.0128

Beton normal memiliki komposisi yang didominasi oleh oksigen (50,07% berat) dan kalsium (28,12% berat), yang merupakan elemen utama dalam senyawa pembentuk beton, seperti kalsium silikat dan kalsium karbonat. Silikon (8,21% berat) juga hadir dalam bentuk senyawa silikat, yang memberikan beton kekuatannya. Kandungan karbon dalam beton normal (11,15% berat) relatif rendah, menunjukkan bahwa struktur beton umumnya tersusun oleh mineral anorganik.

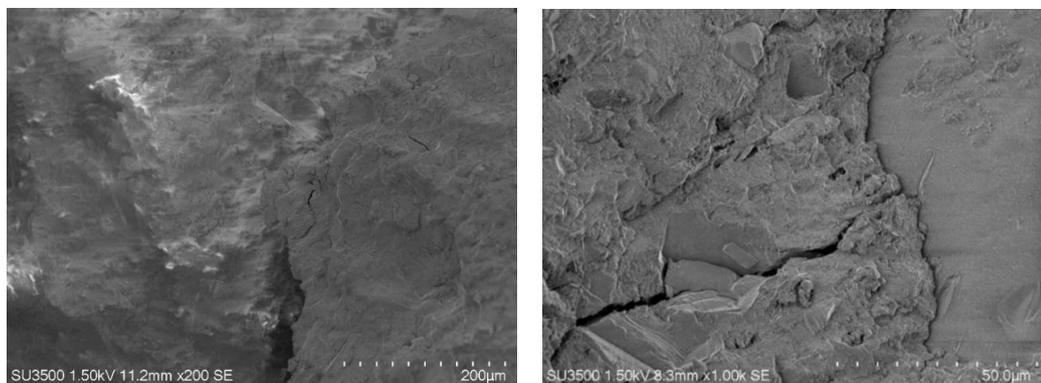
2. Beton setelah perbaikan dengan injeksi epoxy dan bakteri *Bacillus megaterium* (28 hari setelah perbaikan)

Hasil pengujian SEM pada beton 28 hari setelah perbaikan ditunjukkan pada Gambar 11. Pada gambar SEM, tampak struktur beton mengalami perubahan signifikan setelah dilakukan

perbaikan. Permukaan beton terlihat lebih padat, dengan keberadaan lapisan atau endapan mineral di sepanjang retakan mikro yang sebelumnya terbuka. Permukaan terlihat lebih padat dan halus dibandingkan kondisi sebelumnya. Pori-pori besar tampak berkurang secara signifikan, dan beberapa retakan besar mulai tertutup, mengindikasikan adanya aktivitas penyembuhan oleh bakteri dan penetrasi epoxy ke dalam rongga-retakan. Daerah transisi antara beton lama dan material perbaikan juga dapat terlihat dengan jelas. Secara keseluruhan, mikrostruktur menjadi lebih kompak dan lebih tahan terhadap penetrasi zat dari luar. Endapan ini merupakan hasil dari proses biomineralisasi yang dilakukan oleh bakteri *Bacillus megaterium*, di mana bakteri tersebut menghasilkan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) sebagai hasil

metabolisme yang kemudian mengisi retakan-retakan halus. Komposisi kimia beton setelah 28 hari perbaikan

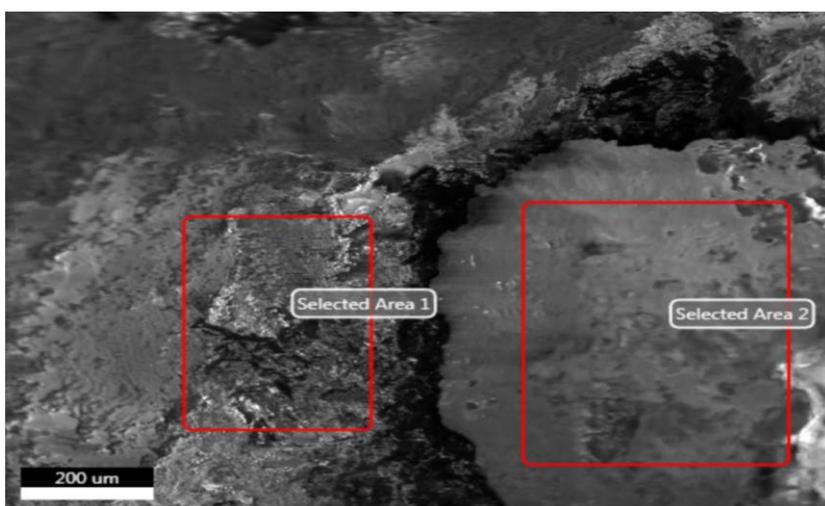
dianalisis melalui pengujian EDS, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12, Gambar 13, dan Tabel 7.



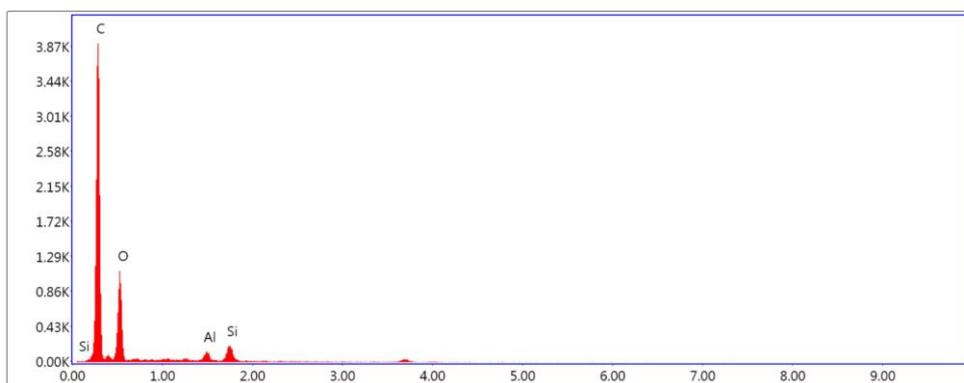
Perbesaran 200 kali skala 200  $\mu\text{m}$

Perbesaran 1000 kali skala 50  $\mu\text{m}$

Gambar 11. Pengujian SEM 28 hari setelah perbaikan



Gambar 12. Pengujian EDS pada beton 28 hari setelah perbaikan



Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

Gambar 13. Grafik pengujian EDS pada beton 28 hari setelah perbaikan

Tabel 7. Komposisi campuran ditinjau dengan EDS 28 hari setelah perbaikan

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	65.64	72.50	624.26	5.40	0.4354	1.0196	0.9921	0.6505	1.0000
O K	31.53	26.15	193.85	10.31	0.0722	0.9689	1.0101	0.2361	1.0000
AlK	1.06	0.52	29.40	8.42	0.0078	0.8524	1.0428	0.8521	1.0059
SiK	1.76	0.83	50.60	5.70	0.0142	0.8696	1.0478	0.9169	1.0062

Beton yang diperbaiki dengan injeksi bakteri *Bacillus megaterium* menunjukkan peningkatan kandungan karbon yang lebih tinggi (65,64% berat), yang berasal dari proses mineralisasi biologis di mana bakteri menghasilkan kalsium karbonat untuk mengisi retakan. Kandungan oksigen (31,53% berat) yang masih signifikan menandakan bahwa proses biologis ini menghasilkan senyawa oksida yang membantu memperbaiki struktur beton.

3. Beton setelah pengujian (28 hari setelah pengujian pasca perbaikan) Pengujian SEM dilakukan untuk mengamati kondisi mikrostruktur beton 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 14. Gambar SEM 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan menunjukkan kondisi Mikrostruktur beton tetap memperlihatkan tingkat kepadatan yang baik. Retakan masih tampak, namun dengan ukuran dan jumlah yang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi awal sebelum perbaikan. Permukaan beton terlihat lebih homogen dan padat dibandingkan dua kondisi sebelumnya. Pada beberapa area, terlihat adanya pengisian pada retakan dan pori-pori, yang merupakan hasil kombinasi antara *resin epoxy* dan

endapan *kalsium karbonat* yang dihasilkan oleh aktivitas bakteri.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses *biomineralisasi* masih berlangsung meskipun beton telah melewati tahap pengujian. Hasilnya, struktur mikro beton mengalami penguatan lebih lanjut. Proses ini bersifat berkelanjutan, di mana sisa-sisa retakan mikro terus mengalami perbaikan oleh aktivitas bakteri yang masih aktif, sehingga menghasilkan beton dengan kepadatan dan integritas struktural yang lebih baik dibandingkan sebelum perbaikan dilakukan.

Pengujian EDS untuk beton 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16, dengan hasil komposisi unsur dirangkum dalam Tabel 8.

Data EDS pada beton setelah 28 hari proses curing menunjukkan peningkatan signifikan pada unsur kalsium (23,47%), oksigen (49,12%), dan silikon (15,71%), yang mengindikasikan terbentuknya senyawa hidrasi seperti C-S-H dan  $\text{CaCO}_3$  akibat aktivitas bakteri *Bacillus megaterium*. Penurunan drastis kandungan karbon (8,61%) menandakan berkurangnya dominasi bahan organik *epoxy*, sementara peningkatan unsur semen seperti Si dan Al menunjukkan penguatan

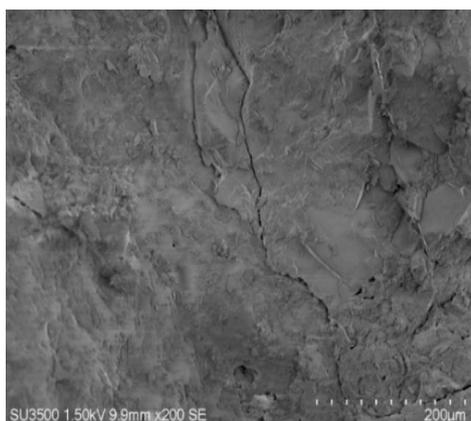
mikrostruktur beton. Komposisi ini mencerminkan keberhasilan proses perbaikan biologis dan kimiawi yang meningkatkan kualitas permukaan beton setelah perbaikan dan curing.

Dari ketiga kondisi pengamatan, dapat disimpulkan bahwa:

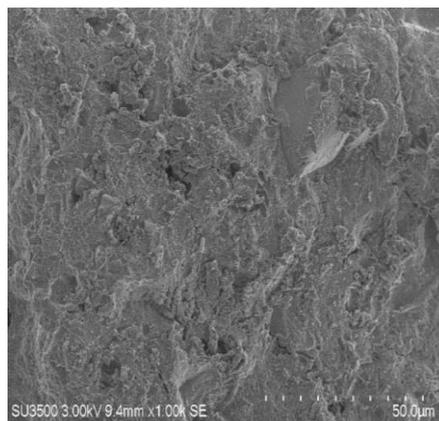
- Beton normal memiliki struktur yang lebih berpori dan kurang padat.
- Setelah perbaikan dengan metode epoxy dan bakteri, mulai terbentuk endapan biomineral yang secara efektif menutup retakan.

- Setelah pengujian, struktur mikro menunjukkan peningkatan kepadatan lebih lanjut, dengan retakan mikro yang hampir seluruhnya tertutup.

Hasil ini mendukung efektivitas metode perbaikan menggunakan *Bacillus megaterium* yang bekerja secara biologis dalam membentuk kembali struktur beton melalui proses self-healing berbasis mineralisasi. Hal ini menjadi solusi potensial untuk perbaikan beton yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

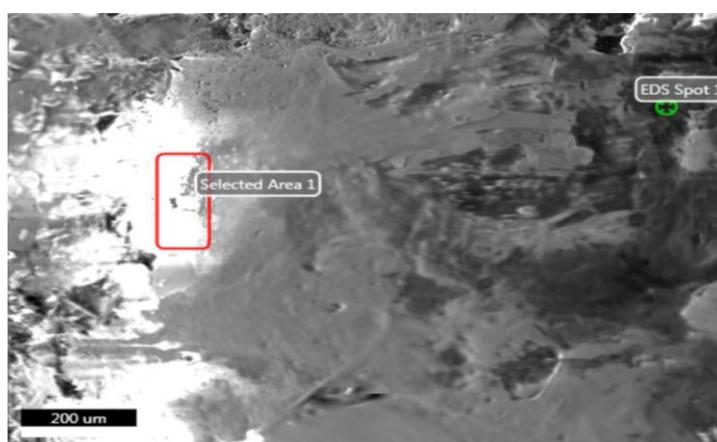


Perbesaran 200 kali skala 200 µm

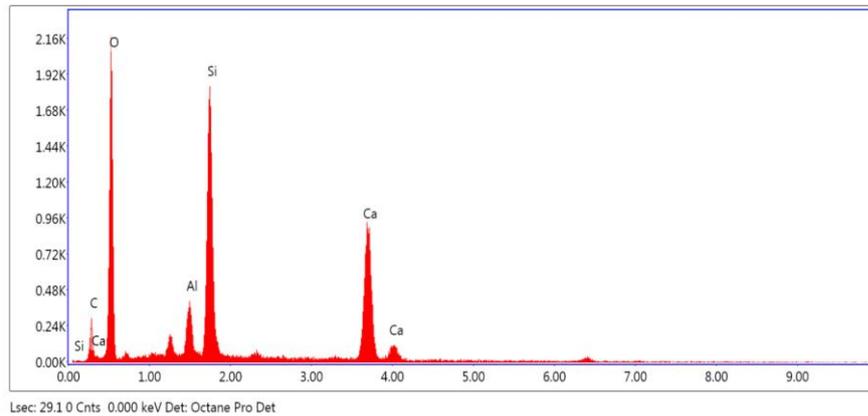


Perbesaran 1000 kali skala 50 µm

Gambar 14. Pengujian SEM 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan



Gambar 15. Pengujian EDS pada beton 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan



Gambar 16. Grafik engujian EDS pada beton 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan

Tabel 8. Komposisi campuran ditinjau dengan EDS 28 hari setelah pengujian pasca perbaikan

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	8.61	14.20	37.09	12.44	0.0256	1.1022	0.9498	0.2695	1.0000
O K	49.12	60.83	366.19	9.76	0.1335	1.0505	0.9714	0.2586	1.0000
AlK	3.10	2.28	87.41	7.05	0.0224	0.9277	1.0112	0.7691	1.0136
SiK	15.71	11.08	464.01	3.98	0.1260	0.9470	1.0176	0.8395	1.0092
CaK	23.47	11.60	329.37	3.10	0.2086	0.8881	1.0473	0.9873	1.0136

### SIMPULAN

Berdasarkan rangkaian pengujian yang dilakukan terhadap sampel beton sebelum dan sesudah perbaikan dengan metode kombinasi injeksi *epoxy* dan bakteri *Bacillus megaterium*, diperoleh sejumlah temuan penting yang menunjukkan keberhasilan metode ini dalam mengembalikan serta meningkatkan performa beton dari berbagai aspek. Injeksi menggunakan *Bacillus megaterium* pada konsentrasi 15% terbukti paling efektif dalam meningkatkan kekuatan lentur balok. Peningkatan kekuatan lentur pada balok mencapai 12,19%. Hasil ini menunjukkan bahwa perbaikan menggunakan bakteri lebih efisien dibandingkan metode konvensional seperti *epoxy* dalam mengembalikan kekuatan struktur.

Pada pengujian kecepatan rambat gelombang ultrasonik (UPV), penggunaan bakteri dengan konsentrasi 10% dan 15% menunjukkan hasil yang optimal, masing-masing menghasilkan kecepatan 3,41 km/s dan 3,19 km/s. Nilai ini tergolong dalam kategori “cukup baik” berdasarkan SNI 4431:2011 dan mendekati nilai beton normal sebesar 3,66 km/s, yang mengindikasikan peningkatan kepadatan internal beton secara signifikan. Sementara itu, hasil pengamatan mikroskopis menggunakan SEM menunjukkan endapan *kalsium karbonat* yang terbentuk secara merata pada permukaan retakan. Hal ini menandakan keberhasilan proses *self-healing* oleh aktivitas biologis bakteri dalam memperbaiki mikrostruktur

beton secara menyeluruh, termasuk pada bagian mikroretakan yang tidak terjangkau oleh metode konvensional.

Secara keseluruhan, sintesis dari ketiga metode pengujian tersebut menegaskan bahwa konsentrasi 15% *Bacillus megaterium* merupakan salah satu konsentrasi optimal dalam perbaikan beton. Pada konsentrasi ini, bakteri mampu bekerja secara efisien tanpa mengalami saturasi, menghasilkan perbaikan yang efektif secara mekanis, struktural, dan mikroskopis. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya dalam pemanfaatan teknologi biologis untuk perbaikan infrastruktur beton yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan Penelitian Pasca Sarjana (PPS) tahun 2023 pada Program Studi Rekayasa Infrastruktur, Politeknik Negeri Bandung, dengan dukungan dari P3M Politeknik Negeri Bandung. Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan fasilitas yang telah diberikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

Alimin, B.M.I., Mauludin, L.M., & Widiarnoko, G., 2024, The comparative study of epoxy and bacterial injections for cracked concrete beam flexural strength. E3S Web of Conferences, 479.

Amalia, Z., Saidi, T., Aulia, T.B., & Mahlil, M., 2021, Pengaruh

Densitas Arus Terhadap Perilaku Retak Beton Bertulang Yang Mengalami Korosi Tulangan. Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil, 11(2), 351.

- Erşan, Y.Ç., Da Silva, F.B., Boon, N., Verstraete, W., & De Belie, N., 2015, Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. Construction and Building Materials, 88, 196–203.
- Griffin, S., Askarinejad, H., & Farrant, B., 2017, Evaluation of Epoxy Injection Method for Concrete Crack Repair. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 177–181.
- Herlambang, F.S., & Setyono, E.Y., 2018, Analisis Injeksi Epoxy Pada Perbaikan Retak Beton Terhadap Beban Lentur.
- Kaur, M., & Lall, G.C., 2012, Renewed Approach of Integration WLAN & UMTS and Handover. In International Journal of Computer Applications (Vol. 44).
- Kurniati, D., 2024, Ketahanan Kuat Tekan Beton Serat Fiber Glass Sebagai Bahan Tambah. 10(2).
- Layang, S., 2022, Cracks In Reinforced Concrete Beam. BALANGA: Jurnal Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan, 10(1), 6–12.
- Pei, R., Liu, J., Wang, S., & Yang, M., 2013, Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete. Cement and Concrete Composites, 39, 122–130.

- Rahmawan, R.Z., Fauzan, M., & Putra, H., 2021, Aplikasi Bakteri sebagai Agen Self-Healing pada Beton.
- Sukarto Wismogroho, A., Firdharini, C., & Sembiring, K., 2022, Development of Mortar for Repair of Cracked Concrete with Injection Method. *Journal of Technomaterial Physics*, 4(1), 46–53.
- Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H.M., & Schlangen, E., 2016, Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*, 122, 118–125.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W., 2010, Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 157–166.
- Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S.V., 2017, Bacteria based self healing concrete – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 152, pp. 1008–1014). Elsevier Ltd.