

STUDI PENELITIAN PENGGUNAAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS* UNTUK PERBAIKAN RETAK RAMBUT PADA MORTAR DENGAN METODE INJECT

Melvien Zainul Asyqin¹, Mohammad Erfan², Siswi Astuti^{3*} dan Ester Priskasari⁴

¹Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura 2, Malang
Email: 2021103@scholar.itn.ac.id

²Staff Fakultas Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura 2, Malang
Email: mohammaderfan@lecturer.itn.ac.id

³Staff Fakultas Teknik Kimia, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura 2, Malang
Email: siswiastuti@lecturer.itn.ac.id

⁴Staff Fakultas Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura 2, Malang
Email: esterpriskasari@gmail.com

ABSTRACT

Mortar is widely used in construction as a binding material. However it can be damaged by weathering and other factors, resulting in cracks. This study proposed a solution to this issue by using a mixture of *bacillus subtilis* bacteria. The bacteria act as a biocatalyst, converting urea into calcium carbonate, which fills the cracks in the mortar. The experiment involved mortar samples with varying percentage of the bacterial mixture, and the injection method was used to repair the hairline cracks. Periodic observations were made every 3,7,14 and 28 days. The results showed that the *bacillus subtilis* bacteria mixture effectively closed the cracks, with the 10% variation yielding the best results. The average success rate for crack closure was 92%, and the repaired cracks has a width of $\leq 0,60$ mm. The SEM and EDX results confirmed that the cracks and pores in the specimens were filled with calcium carbonate. This study demonstrates the potential of using *bacillus subtilis* bacteria for repairing mortar cracks.

Keywords: *Bacillus subtilis*, Shrinkage, Mortar, Calcium carbonate, Hairline crack

ABSTRAK

Mortar merupakan material yang paling umum digunakan dalam konstruksi. Mortar berfungsi sebagai matrik pengikat atau bahan pengisi bagian penyusun suatu konstruksi yang bersifat struktural maupun non-struktural. Mortar akan mengalami pelapukan dan kerusakan di lingkungan yang agresif yang disebabkan dari faktor retak struktur atau juga retak non-struktur. Retak susut terjadi akibat kandungan semen tinggi, mutu pasir kurang baik serta pengaplikasian plesteran pada dinding terlalu tebal. Penanganan permasalahan keretakan melakukan perbaikan dengan metode injeksi menggunakan campuran bakteri *Bacillus Subtilis* dan komponen pendukung. *Bacillus Subtilis* berperan menjadi biokatalisator yang mengubah urea menjadi kalsium karbonat atau kapur. Kapur tersebut akan mengisi celah retak rambut pada mortar. Pada penelitian ini menggunakan sampel mortar dengan persentase perbaikan campuran bakteri serta komponen pendukung 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dari total 60 ml penggunaan campuran dengan metode injeksi. Metode injeksi campuran bakteri yang dilakukan setelah pengamatan secara visual, benda uji telah mengalami retak rambut. Pengamatan berkala pada benda uji setelah dilakukan perbaikan injeksi pada retak rambut mortar. Pengamatan berkala dilakukan setiap 3, 7, 14 dan 28 hari. Hasil dari penelitian ini campuran bakteri *Bacillus Subtilis* dapat menutup retak rambut yang terjadi pada mortar. Variasi 10% merupakan campuran perbaikan yang memiliki hasil optimum untuk menutup retak rambut pada mortar, berdasarkan hasil pengamatan yang dilakukan setiap 7, 14 dan 28 hari. Rata-rata hasil persentase keberhasilan penutupan retakan sebesar 92%. Lebar retakan yang dapat dilakukan dengan metode perbaikan adalah $\leq 0,60$ mm. Berdasarkan hasil SEM dan EDX bahwa pori-pori dan retakan yang ada pada benda uji terisi kalsium karbonat.

Kata kunci: *Bacillus subtilis*, Retak susut, Kalsium karbonat, Retak rambut

1. PENDAHULUAN

Mortar merupakan material yang paling umum digunakan dalam dunia konstruksi. Secara umum mortar terdiri dari tiga komponen utama yaitu semen, pasir dan air. Mortar berfungsi sebagai matrik pengikat atau bahan pengisi bagian penyusun suatu konstruksi yang bersifat struktural maupun non-struktural. Mortar memiliki beberapa fungsi atau kegunaan dalam bidang konstruksi yaitu sebagai bahan plesteran dinding, bahan acian, bahan perekat susunan pada pasangan bata dan batako dan masih banyak lagi kegunaannya dalam bidang konstruksi. Mortar akan mengalami pelapukan dan kerusakan di lingkungan yang agresif yang disebabkan dari faktor retak struktur atau juga retak non-struktur. Retak susut (*Shrinkage*) terjadi akibat kandungan semen yang tinggi, mutu pasir yang kurang baik serta pengaplikasian plesteran pada dinding terlalu tebal (Hidayat, 2009). Retak susut merupakan salah satu kerusakan yang dialami oleh plesteran dinding.

Penanganan permasalahan keretakan pada mortar dan pori-pori yang membesar akibat lingkungan dan kondisi eksternal semakin berkembang dan berinovasi. Melakukan penelitian teknologi bio concrete dari penambahan bakteri dari genus bacillus pada pembuatan beton dengan hasil dari pengembangan penelitian teknologi tersebut menghasilkan kemampuan khusus pada beton yang mampu pulih mandiri saat terjadi keretakan yang dikenal sebagai Self-Healing Concrete (Jonkers et al., 2010) (Kanwal et al., 2022). *Bacillus Subtilis* berperan sebagai biokatalisator yang mengubah urea menjadi kalsium karbonat dimana spesies bakteri ini lebih efisien dibandingkan spesies lainnya. Bakteri ini dapat dicampurkan ke dalam media padat ataupun cair (Pannem et al., 2023).

Bakteri bacillus subtilis memiliki kemampuan akan memproduksi senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) yang akan mengisi celah retakan dari mortar, serta bakteri ini dapat hidup di kondisi ekstrim. Lingkungan yang optimum untuk bacillus subtilis berkembang optimal adalah kondisi pH normal 7-8 (Rizal et al., 2021). *Bacillus subtilis* akan menghasilkan produksi senyawa kalsium karbonat atau kapur dibutuhkan bahan tambahan lain yang digunakan dalam campuran perbaikan retakan ini yaitu urea, CaCl_2 dan nutrisi bakteri. Senyawa kalsium karbonat atau kapur inilah yang akan menutup celah retakan pada mortar (Setiawan et al., 2023) (Basit & Khan, 2020) (Junaidi et al., 2022) (Nguyen et al., 2019) (Rizal et al., 2021).

Penelitian perbaikan retakan mortar dan beton baru ditemukan beberapa dengan berbagai metode dan berbagai jenis tambahan untuk campuran mix design. Dalam penelitian ini, kami melakukan eksperimen dengan menggunakan bakteri bacillus subtilis sebagai campuran injeksi untuk perbaikan retak rambut pada plesteran akibat retak susut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri bacillus subtilis menutup retakan serta mengisi celah retakan.

Hasil penelitian ini nantinya diharapkan kerusakan retak rambut yang terjadi pada mortar atau beton dapat diperbaiki dengan formula campuran injeksi memanfaatkan mikroba bakteri bacillus subtilis, sehingga menambah alternatif metode perbaikan retak rambut.

2. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi ekperimental dengan melakukan percobaan langsung di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Malang dan Laboratorium Mineral dan Material Maju Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui sejauh mana pengaruh penggunaan campuran bakteri bacillus subtilis yang digunakan sebagai agent self-healing pada micro crack mortar dengan variasi penampahan persentase campuran bakteri yang ditentukan yakni 0% (kontrol), 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dengan parameter optimasi micro crack tertutup kembali ditinjau secara pengamatan visual terbatas scaled mapping. Adapun pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi:

Komposisi Campuran Mortar

1. Semen
Semen merupakan bahan yang berfungsi sebagai perekat suatu campuran mortar atau beton. Jenis semen yang digunakan yakni semen jenis I, jenis semen yang penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain (SNI 2049-2015).
2. Agregat halus
Agregat halus dari pasir alam hasil disintegrasi alami batuan atau pasir dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm atau saringan No. 4 (SNI 1970-2008).
3. Air
Air merupakan salah satu bahan dasar untuk pembuatan mortar dan salah satu media untuk perawatan beton. Penggunaan air dalam pencampuran beton ini telah memenuhi persyaratan (SNI 03-2847-2002).

Material Campuran Perbaikan Injeksi

Material campuran perbaikan atau material tambahan yang digunakan meliputi bakteri *Bacillus Subtilis*, urea, CaCl_2 , dan air aquades (Syarif et al., 2020) (Setiawan et al., 2023) (Tziviloglou et al., 2016) (Rizal et al., 2021) serta air kelapa sebagai nutrisi bakteri *Bacillus subtilis* untuk memproduksi lebih banyak koloni (Abna, 2018). Total komposisi campuran material tambahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 60 gram, penelitian ini mencoba dengan jumlah konsentrasi bahan yang acak dan membuat sampel dengan itu sebagai bahan percobaan, pembagian komposisi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel.1 Material Campuran Perbaikan

Material	Quantity
Bacillus subtilis	10 gr
Urea ($\text{CO}(\text{NH})_2$)	10 gr
CaCl_2	10 gr
Aquades	20 ml
Air Kelapa	10 ml

Pengujian Agregat

Dilakukan beberapa pengujian agregat bahan material campuran mortar untuk memastikan material yang digunakan telah sesuai standar, diantaranya pengujian gradasi pasir, pengujian kadar air, pengujian kadar organik, pengujian kadar lumpur, pengujian berat jenis, dan pengujian berat isi.

Tabel.2 Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat

Pengujian	Standar Acuan	Nilai
Agregat Halus		
Berat isi gembur/padat (gr/cm^3)	SNI 03-4804-1998	1,76/1,94
Analisa saringan (Gradasi)	SNI 03-1968-1990	2
Kadar zat organik	ASTM C40-2009	5
Kadar air (%) asli/ssd	SNI 1971-2011	4.15/0.58
Absorpsi (%)	SNI 1970-2008	2,10
Kadar lumpur (%)	SNI 03-4428-1997	0,83
Berat jenis (gr/cm^3)	SNI 1970-2008	2,63
Semen		
Berat isi gembur/padat (gr/cm^3)	SNI 03-4804-1998	1,12/1,20
Berat jenis (gr/cm^3)	SNI 03-2531-1991	2,94

Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji sesuai dengan (SNI 03-6825-2002). Serta kebutuhan semen sebesar 502, 74 gr dan kebutuhan pasir sebesar 3687,6 gr, dan air sebanyak 351,9 gr. Kemudian dicampur menggunakan mesin mixer, waktu pencampuran dilaksanakan hingga 45 menit. Setelah campuran merata, dicetak dengan cetakan benda uji berukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm, dengan kebutuhan jumlah benda uji sebanyak 36 buah.

Injeksi

Pada proses penelitian eksperimen, dipilih metode perawatan sampel mortar yang mengalami retak rambut (micro crack) akibat retak susut adalah injeksi dengan suntikan berkapasitas 10 ml. Pada perlakuan injeksi, campuran bakteri yang telah dibuat digunakan seluruhnya pada retak serabut mortar dengan perlakuan injeksi bertahap hingga campuran tersebut habis.

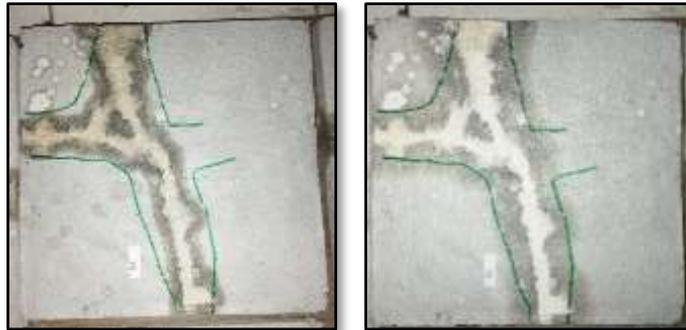
Tabel.3 Komposisi Campuran Injeksi Perbaikan Bakteri

Kode Sampel	Persentase Penambahan	Komponen Pendukung				
		Aquades	CaCl_2	Urea	Air Kelapa	Bakteri
A	0%	20	10	10	10	10
B	10%	22	11	11	11	11
C	20%	24	12	12	12	12
D	30%	26	13	13	13	13
E	40%	28	14	14	14	14
F	50%	30	15	15	15	15

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

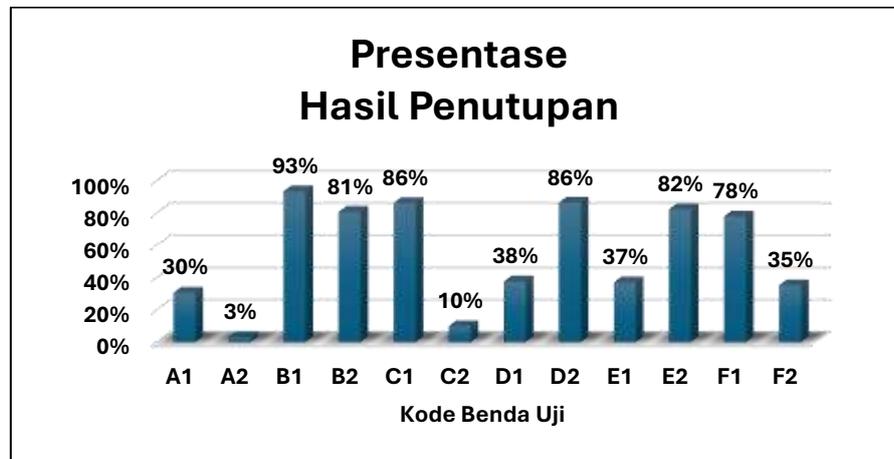
Scalled Mapping

A. Hasil pengamatan benda uji umur 7 hari



Gambar 1. Kondisi Sampel B1 Awal Injeksi dan Setelah 7 Hari Injeksi Bakteri Perbaikan Retakan

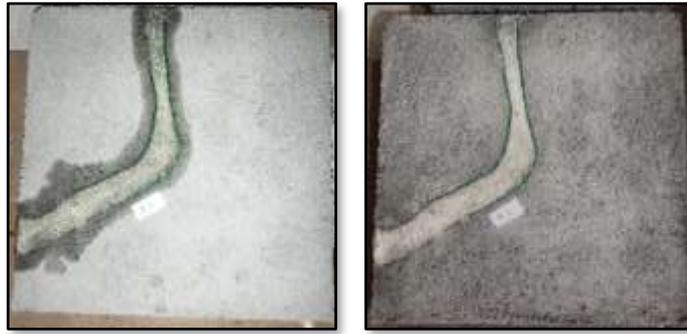
Gambar 1 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut B1 sebelum perbaikan injeksi dengan campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi komposisi 10%, untuk lebar retak rambut sampel (B1) 0,4mm. Kemudian dilakukan perbaikan dengan metode injeksi campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi 10% pada retak rambut benda uji mortar (B1). Setelah dilakukan injeksi campuran bakteri benda uji didiamkan di ruangan penyimpanan benda uji untuk kemudian diamati selama 7 hari. Pengamatan pada gambar 1 ini dilakukan pada hari ke 7 (B1), pada sampel B1 ini terjadi penutupan retakan dikarenakan lebar retakan sampel tersebut dibawah 1 mm. Dengan komposisi 10% retakan dapat tertutup oleh hasil senyawa kalsium karbonat. Berikut grafik data hasil pengamatan untuk benda uji lainnya pada umur pengamatan 7 hari:



Gambar 2. Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 7 Hari

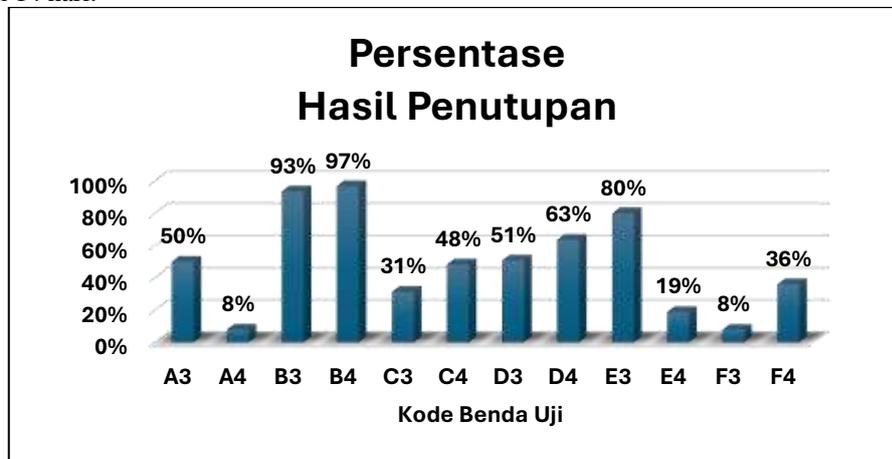
Dari grafik diatas diperoleh hasil bahwa pada sampel B1 merupakan sampel optimum dari hasil perbaikan retak rambut pada mortar dengan presentase hasil penutupan sebesar 93%. Sampel B1 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut (memiliki lebar 0,4 mm) dan diberi perlakuan injeksi campuran perbaikan bakteri Bacillus Subtilis dengan komposisi sebesar 10% yang dapat dilihat pada tabel 4, berhasil menutup retakan dengan panjang penutupan sebesar 459,177 mm. Dan berdasarkan dari hasil pada grafik diatas didapatkan bahwa pengaruh lebar retakan yang terjadi pada benda uji menjadi acuan berhasil atau tidaknya bakteri menutupi retak rambut tersebut.

B. Hasil pengamatan benda uji umur 14 hari



Gambar 3. Kondisi Sampel B3 Awal Injeksi dan Setelah 14 Hari Injeksi Bakteri Perbaikan Retakan

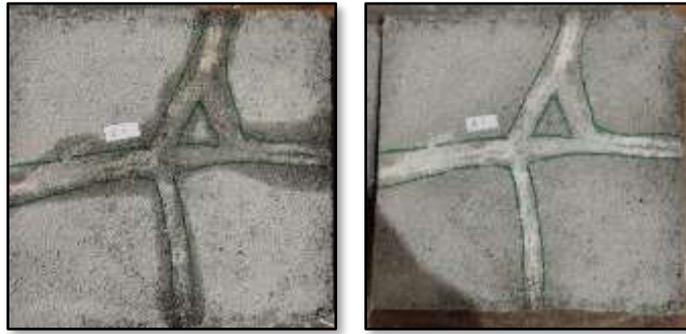
Gambar 3 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut (B3) sebelum perbaikan injeksi dengan campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi komposisi 10%, untuk rata-rata lebar retak rambut sampel (B3) 0,4 mm. Kemudian dilakukan perbaikan dengan metode injeksi campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi 10% pada retak rambut benda uji mortar (B3). Setelah dilakukan injeksi campuran bakteri benda uji didiamkan di ruangan penyimpanan benda uji untuk kemudian diamati selama 14 hari. Pengamatan pada gambar 3 ini dilakukan pada hari ke 14 (B3), pada sampel B3 ini terjadi penutupan retakan dikarenakan lebar retakan sampel tersebut dibawah 1 mm. Dengan komposisi 10% retakan dapat tertutup oleh hasil senyawa kalsium karbonat. Berikut grafik data hasil pengamatan untuk benda uji lainnya pada umur pengamatan 14 hari:



Gambar 4. Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 14 Hari

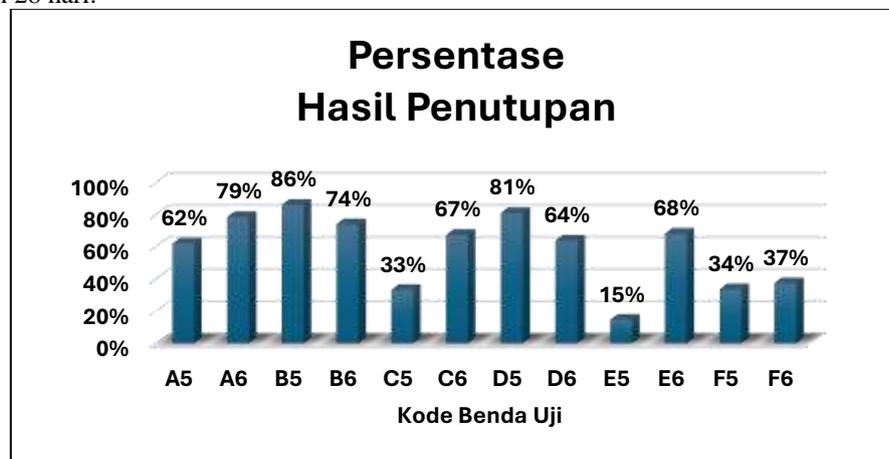
Dari grafik diatas diperoleh hasil bahwa pada sampel B3 dan B4 merupakan sampel optimum dari hasil perbaikan retak rambut pada mortar dengan presentase hasil penutupan sebesar 93% dan 97%. Sampel B3 dan B4 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut (memiliki lebar 0,4 mm) dan diberi perlakuan injeksi campuran perbaikan bakteri Bacillus Subtilis dengan komposisi sebesar 10% yang dapat dilihat pada tabel 5, berhasil menutup retakan dengan panjang penutupan sebesar 272.804 mm dan 369.162 mm . Dan berdasarkan dari hasil pada grafik diatas didapatkan bahwa pengaruh lebar retakan yang terjadi pada benda uji menjadi acuan berhasil atau tidaknya bakteri menutupi retak rambut tersebut.

C. Hasil pengamatan benda uji umur 28 hari.



Gambar 5. Kondisi Sampel B6 Awal Injeksi dan Setelah 28 Hari Injeksi Bakteri Perbaikan Retakan

Gambar 5 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut (B6) sebelum perbaikan injeksi dengan campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi komposisi 10%, untuk rata-rata lebar retak rambut sampel (B6) 0,6 mm. Kemudian dilakukan perbaikan dengan metode injeksi campuran bakteri bacillus subtilis dengan variasi 10% pada retak rambut benda uji mortar (B6). Setelah dilakukan injeksi campuran bakteri benda uji dibiarkan di ruangan penyimpanan benda uji untuk kemudian diamati selama 28 hari. Pengamatan pada gambar 5 ini dilakukan pada hari ke 28 (B6), pada sampel B6 terjadi sedikit penutupan retakan tetapi tidak tertutup pada sedikit bagian tepi sisi retakan dikarenakan perbedaan lebar retakan. Dengan komposisi yang sama yaitu variasi 10% pengaruh lebar retakan menjadi alasan terbentuk atau tidaknya penutupan retakan tersebut oleh bakteri. Berikut grafik data hasil pengamatan untuk benda uji lainnya pada umur pengamatan 28 hari:

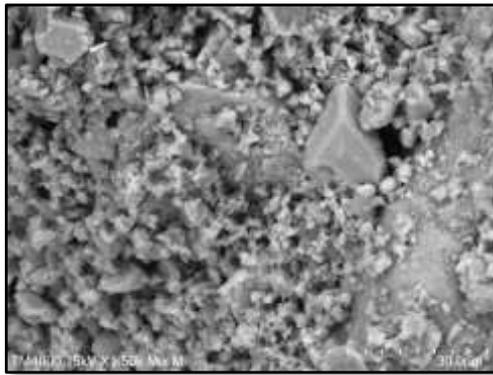


Gambar 6. Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 28 Hari

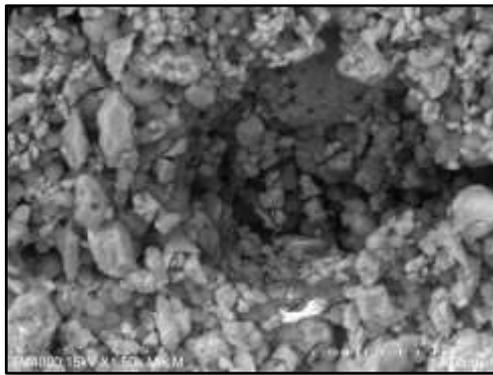
Dari grafik diatas diperoleh hasil bahwa pada sampel B5 merupakan sampel optimum dari hasil perbaikan retak rambut pada mortar dengan presentase hasil penutupan sebesar 86%. Sampel B5 merupakan benda uji yang mengalami retak rambut (memiliki lebar 0,6 mm) dan diberi perlakuan injeksi campuran perbaikan bakteri Bacillus Subtilis dengan komposisi sebesar 10% yang dapat dilihat pada tabel 6, berhasil menutup retakan dengan panjang penutupan sebesar 467.395 mm. Berdasarkan dari hasil pada grafik diatas didapatkan bahwa pengaruh lebar retakan yang terjadi pada benda uji menjadi acuan berhasil atau tidaknya bakteri menutupi retak rambut tersebut.

Hasil Pengamatan SEM

Pada pengujian SEM dan EDX ini dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang dengan cara mengamati bagian atas retakan yang tertutup oleh kapur atas hasil akhir reaksi kimia bakteri bacillus subtilis dan komponen tambahannya dari benda uji yang mempunyai hasil paling optimum (terbaik). Berikut hasil dari pengujian SEM, dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 7. Hasil Pengujian SEM Sampel B1 Komposisi 10% Pengamatan 7 Hari



Gambar 8. Hasil Pengujian SEM Sampel B1 Komposisi 10% Pengamatan 14 Hari

Gambar diatas merupakan hasil pengamatan SEM didapatkan hasil bahwa senyawa kalsium karbonat mengisi pori-pori retakan yang ada pada celah retakan pada benda uji mortar. Dengan ketelitian pengamatan sebesar 30 µm.

Hasil Pengujian EDX

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
O	8	6421	65.44	51.18	60.14	9.84	15.03
Ca	20	19368	38.93	30.45	14.28	1.23	3.16
C	6	2241	18.51	14.48	22.66	3.44	18.59
Si	14	1355	1.65	1.29	0.87	0.12	7.03
F	9	121	1.42	1.11	1.10	0.68	48.07
Cl	17	666	0.87	0.68	0.36	0.07	8.55
Al	13	445	0.61	0.48	0.34	0.07	11.83
Mg	12	250	0.43	0.34	0.26	0.07	15.71
Sum			127.87	100.00	100.00		

Gambar 9. Hasil Spektrum Pengujian EDX Sampel B1

Dari hasil spektrum pengujian EDX didapatkan bahwa kandungan Ca-K atau kalsium karbonat yang terdapat pada sampel B1 memiliki massa normal 30,45% dari total massa normal 100% yang ada pada sampel tersebut. Serta berikut juga dilakukan pengujian pembacaan SEM dan EDX pada sampel B3 komposisi 10% pada pengamatan sampel 14 Hari:

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
O	8	5542	49.56	48.17	56.01	7.64	15.42
Ca	20	19858	32.41	31.51	14.62	1.03	3.17
C	6	2893	18.42	17.90	27.72	3.24	17.57
Si	14	917	0.97	0.94	0.62	0.08	8.60
Cl	17	645	0.73	0.71	0.37	0.07	9.16
F	9	44	0.42	0.41	0.40	0.32	76.34
Al	13	262	0.31	0.30	0.21	0.05	17.10
Mg	12	44	0.07	0.06	0.05	0.04	56.88
Sum			102.88	100.00	100.00		

Gambar 10. Hasil Spektrum Pengujian EDX Sampel B3

Dari hasil spektrum pengujian EDX pada celah retakan *micro crack* sampel B3 didapatkan bahwa material yang mengisi celah retakan adalah senyawa kalsium karbonat (Ca-K) atau kapur. Sampel B3 memiliki massa normal 32,41% dari total massa normal 100% yang ada pada sampel tersebut. Terbentuknya senyawa kalsium karbonat tersebut merupakan hasil dari proses aktivitas bakteri *bacillus subtilis*.

Setelah dilakukan pengamatan pada setiap benda uji, berdasarkan umur pengamatan. Didapatkan hasil persentase penutupan retakan yang ditampilkan pada gambar 4, 8 dan 12, dengan hasil benda uji B1 dan B3 baik pada pengamatan umur 7 hari, 14 hari dan 28 hari memiliki persentase terbesar. Rata-rata persentase dari setiap umur pengamatan tersebut adalah 92%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran perbaikan bakteri *bacillus subtilis* variasi 10% dapat menutup retak rambut yang terjadi pada benda uji. Serta peneliti menemukan banyak dari jumlah sampel mengalami penutupan dengan lebar retakan dibawah 0,6 mm disebabkan dengan lebar tersebut lebih efektif dan optimum untuk *bacillus subtilis* menutup retakan. Kemudian sampel yang optimum tersebut diuji SEM dan EDX, dan ketika dilakukan pemindahan sampel untuk dipotong yang akan digunakan untuk pengujian SEM dan EDX, sampel tidak patah secara langsung akibat pemindahan sampel, melainkan sampel tersebut patah dikarenakan proses pemotongan sampel oleh alat bantu gerinda. Dan pada pengamatan scalled mapping sampel dengan komposisi 10% tidak terjadi kegagalan reaksi kimia untuk menghasilkan senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) atau kapur serta tidak terjadi gumpalan kapur karena banyaknya kadar bakteri *bacillus subtilis* yang digunakan. Hasil dari penelitian ini dapat menyebutkan bahwa retak rambut *micro crack* yang terjadi pada plesteran dinding dapat diperbaiki dengan memanfaatkan mikroba bakteri *bacillus subtilis* dengan komponen tambahannya untuk menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) dengan komposisi variasi 10% dalam jangka waktu perbaikan 7 hari, 14 hari ataupun 28 hari. Namun pengamatan penutupan retakan hingga pada bagian dalam retakan tidak dapat dibuktikan 100% kepercayaannya disebabkan kurangnya alat mikroskop, pencitraan digital dan tomografi sinar-X yang mendukung untuk memastikan berapa besar kedalaman penutupan yang terjadi tidak hanya pengamatan visual dari tampak atas retak rambut benda uji mortar (Meraz et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari studi penelitian ini, analisa dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai penggunaan bakteri *bacillus subtilis* untuk perbaikan retak rambut pada mortar dengan metode injeksi, maka dari penelitian ini dapat memberikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengamatan hasil pulih mandiri dari pengamatan visual terhadap penutupan retak rambut (*micro crack*) mortar setelah dilakukan injeksi campuran perbaikan yang meliputi bakteri *bacillus subtilis* dan komponen tambahan lainnya, didapatkan bahwa bakteri berhasil membentuk senyawa kalsium karbonat atau kapur yang dapat menutup celah retak rambut pada benda uji mortar. Berdasarkan grafik 4, 8 dan 12 hasil persentase dari penutupan retakan didapatkan lebar retakan akan optimum dapat tertutup oleh kapur dari hasil injeksi bakteri adalah $\leq 0,60$ mm. Dari pengamatan visual secara langsung dan juga dengan bantuan alat kamera smartphone diketahui bahwa campuran perbaikan bakteri *bacillus subtilis* dan komponen tambahannya berhasil membentuk senyawa kalsium karbonat (CaCO_3). Dimana senyawa kalsium karbonat atau kapur ini merupakan hasil akhir dari proses kimia campuran perbaikan tersebut. Kapur inilah yang akan menutup baik permukaan dan sela-sela dalam retak rambut mortar tersebut. Dari pengamatan pengujian scanning electron microscope (SEM) dapat terlihat bahwa kalsium karbonat dapat menutup pori-pori dan sela-sela retak rambut benda uji mortar, dan juga dari hasil pengujian dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) yang berfungsi untuk melihat komponen atom yang ada pada penutupan retak rambut benda uji mortar bahwa didapatkan kandungan senyawa (Ca-K) pada penutupan celah retak rambut mortar tersebut.
2. Dari hasil studi penelitian, analisa dan pembahasan yang telah dilakukan didapatkan presentase optimum penggunaan bakteri *bacillus subtilis* dan komponen tambahannya tersebut adalah variasi 10%. Karena dalam pengamatan yang dilakukan pada kondisi 7 hari pengamatan, 14 hari pengamatan dan 28 hari pengamatan proses penutupan retakan, variasi 10% memberikan hasil persentase penutupan retak sebesar 92% dan tidak adanya gumpalan berlebih akibat kandungan bakteri *bacillus subtilis* yang terlalu banyak. Tetapi tingkat keberhasilan penutupan retakan ini oleh bantuan mikroba *bacillus subtilis* dan komponen tambahannya sangat bergantung dengan lebar retak rambut yang ada pada mortar. Dari penelitian ini diklasifikasikan bahwa lebar retakan yang dapat dilakukan perbaikan dengan bakteri *bacillus subtilis* dengan metode injeksi adalah 0,10 – 0,60 mm. Jika lebih dari 0,60 mm memungkinkan tidak berhasilnya penutupan retak rambut mortar dengan metode dan campuran perbaikan dengan variasi presentase 10% tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abna, I. M. (2018). "Pemanfaatan Limbah Air Kelapa Sebagai Substrat Oleh Bacillus Subtilis ATCC 6051 Untuk Produksi Antibiotika". *Forum Ilmiah*, 15(2), 339–348.
- Anonim. (1991). SNI-15-2531-1991 Pengujian berat jenis semen. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (1997). SNI-03-4428-1997 Pemeriksaan kadar lumpur pasir. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (1998). SNI 03-4804:1998 Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga udara dalam agregat ICS 91.100.20 Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (2002a). SNI 03-2847:2002 Standart Nasional Indonesia Beton. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (2002b). SNI 03-6825:2002 Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen Portland untuk pekerjaan sipil. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (2008). SNI 1970:2008 Standar Nasional Indonesia Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (2011). SNI 1971:2011 Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan ICS 93.020 Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Anonim. (2015). SNI 2049:2015 Standart Nasional Indonesia Semen Portland. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- ASTM. (2009). Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. www.astm.org
- Basit, M., & Khan, E. (2020). "Self-Healing Performance of Bacteria-Based Mortar in Marine Environment Originality statement". PhD Thesis. Australia: The University of Sydney.
- Hidayat, S. (2009). *Semen: Jenis & Aplikasinya*. Jakarta: Kawan Pustaka.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Mulyer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete". *Ecological Engineering*, 36 (2), 230–235.
- Junaidi, I., Ekaputri, J. J., Purnomo, S., Sumartono, I. H., Agustin, W., & Astuti, W. (2022). "Aplikasi Mikroba Dalam Agregat Buatan Untuk Meningkatkan Kuat Tarik Belah Beton Mengandung Fly Ash". *Jurnal Teknik Sipil*, 16 (4), 289-301.
- Kanwal, M., Khushnood, R. A., Khaliq, W., Wattoo, A. G., & Shahid, T. (2022). "Synthesis of pyrolytic carbonized bagasse to immobilize Bacillus subtilis; application in healing micro-cracks and fracture properties of concrete". *Cement and Concrete Composites*, 126
- Meraz, M. M., Mim, N. J., Mehedi, M. T., Bhattacharya, B., Aftab, M. R., Billah, M. M., & Meraz, M. M. (2023). Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. *Alexandria Engineering Journal*. 73, 665–694.
- Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H., & Cousture, A. (2019). "Bacterial self-healing of concrete and durability assessment". *Cement and Concrete Composites*, 104, 1-15.
- Pannem, R. M. R., Bashaveni, B., & Kalaiselvan, S. (2023). "The effect of fly ash aggregates on the self-healing capacity of bacterial concrete". *Ain Shams Engineering Journal*, 1-11.
- Rizal, F., Aiyub, Hanif, & Anwar, C. (2021). "Penggunaan Bakteri Bacillus Subtilis terhadap Kinerja Mortar yang Terpapar Sulfat". *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*. 5 (1), 113-121.
- Setiawan, E., Wahyuni, S. Y., & Kartika, N. (2023). "Analisis Efektifitas Kemampuan Pulih Mandiri Micro Crack Pada Self-Healing Concrete". *Rekayasa Sipil*, 17 (2), 169-178.
- Syarif, F., Davino, M. G., & Ardianto, M. F. (2020). "Penerapan Teknik Biocementation Oleh Bacillus Subtilis dan Pengaruhnya Terhadap Permeabilitas Pada Tanah Organik. *Jurnal Saintis*". 20 (01), 47-52.
- 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.