

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

TUGAS AKHIR

**Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana**

Oleh:

MELVIEN ZAINUL ASYQIN

20.21.103



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL S-1

**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
MALANG**

2024

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

Disusun Oleh:

MELVIEN ZAINUL ASYQIN

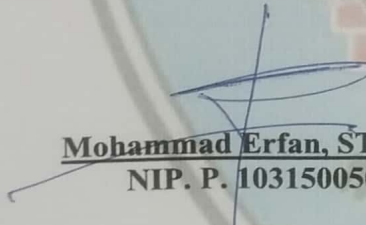
NIM 2021103

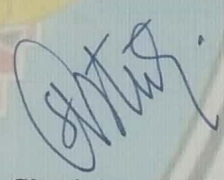
Telah disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk diujikan
Pada Tanggal 26 Juli 2024

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

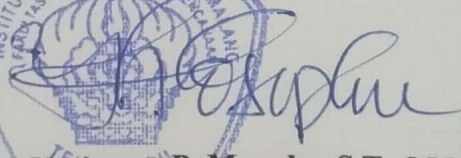
Dosen Pembimbing II


Mohammad Erfan, ST., MT.
NIP. P. 1031500508


Dra. Siswi Astuti, M.Pd.
NIP. P. 1018500091

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Sipil S-1


Dr. Yosimson P. Manaha, S.T., M.T.
NIP. P. 1030300383

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

Tugas Akhir ini telah dipertahankan di depan Dosen Pembahas Tugas Akhir Jenjang Strata (S-1) Pada Tanggal 26 Juli 2024 dan diterima untuk memenuhi salah satu syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Sipil S-1.

Disusun Oleh:

MELVIEN ZAINUL ASYQIN

NIM 2021103

Dosen Pembahas:

Dosen Pembahas I

Dosen Pembahas II

Ir. Ester Priskasari, MT.
NIP. Y. 1033900265

Ir. Hadi S. Wibawanto, ST, MT., IPP
NIP. P. 1032000579

Disahkan Oleh:

Ketua Program Studi

Sekretaris Program Studi

Teknik Sipil S-1

Teknik Sipil S-1

Dr. Yosimson P. Manaha, ST., MT.
NIP. P. 1030300383

Nenny Roostrianawaty, ST., MT.
NIP. P. 1031700533

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Sebagai mahasiswa Institut Teknologi Nasional Malang. Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Melvien Zainul Asyqin
NIM : 2021103
Program Studi : Teknik Sipil S-1
Fakultas : Teknik Sipil dan Perencanaan

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir saya dengan judul :

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

Merupakan karya asli hasil sendiri, bukan duplikat serta tidak mengutip seluruhnya karya milik orang lain kecuali disebut dari sumber aslinya dan tercantum dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan Tugas Akhir ini merupakan hasil duplikasi atau mengambil karya tulis dan pemikiran orang lain saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan tulus dan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Malang, 05 Agustus 2024

Penulis Surat Pernyataan



Melvien Zainul Asyqin

NIM. 20.21.103

HALAMAN PERSEMBAHAN

*Allahumma sholli 'ala sayyidina Muhammad Wa'ala ali sayyidina Muhammad
Alhamdulillah Rabbil Aalamiin*

*Terimakasih atas kelimpahan rezeki serta kesehatan yang telah Allah SWT
berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.*

*Tugas akhir ini saya persembahkan kepada kedua orang tua saya yakni Mama
Dariastum dan Bapak Hazin dan juga saya sendiri yang telah berjuang
menyelesaikan tahap akhir kuliah ini. Terkhusus kepada kakak saya abang Izwan
Irfan yang telah berjuang membantu orang tua untuk menyekolahkan adiknya ini
hingga menyelesaikan masa kuliah.*

*Dan tak lupa persembahan ini saya tunjukkan juga kepada keluarga, saudara dan
juga teman-teman seperjuangan yang telah membantu serta menemani dalam
menyelesaikan Tugas akhir ini. Terimakasih kepada seseorang kekasih tercinta*

*Rif'atul Ilmiyah atas support, waktu, sorak semangat dan doa yang telah
diberikan serta Terimakasih juga kepada sahabat-sahabat saya terutama Zaim,
Iim, Riska, Siska, Fanus, Hesti, Pram, Agni, Adam, Mira, Wadda serta teman-
teman yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.*

*Success is the final achievement of every failure process that we have gone
through. If Allah elevates your career, boosts your sustenance, don't forget to
bow down and increase your gratitude to Allah Subhanahu Wa Ta'ala.*

*Ever tried, ever failed, No matter.
Try again, fail again, Fail better.
The world is yours.
Treat everyone kindly and light up the night.
-Peter Dinklage*

ABSTRAK

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

Oleh : Melvien Zainul Asyqin (2021103). Pembimbing I : Mohammad Erfan, ST., MT. Pembimbing II : Dra. Siswi Astuti, M.Pd. Program Studi Teknik Sipil S-1, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang.

Mortar merupakan material yang paling umum digunakan dalam dunia 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 yang tinggi, mutu pasir yang kurang baik serta pengaplikasian plesteran pada dinding terlalu tebal. Penanganan permasalahan keretakan pada mortar melakukan perbaikan dengan metode inject menggunakan campuran bakteri *Bacillus Subtilis*. *Bacillus Subtilis* merupakan anggota genus *Bacillus*, yang mengubah urea menjadi kalsium karbonat atau kapur. Kalsium karbonat tersebut akan mengisi celah retak rambut (micro crack) 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 tersebut dengan metode inject. Metode injeksi campuran bakteri yang dilakukan ketika pada pengamatan secara visual, benda uji telah mengalami retak rambut (micro crack). 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 bakteri beserta komponen pendukungnya 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 ini adalah $\leq 0,60$ mm. Dan berdasarkan hasil pengujian SEM dan EDX bahwa pori-pori dan retakan yang ada pada benda uji terisi oleh kalsium karbonat atau kapur.

Kata Kunci : *Bacillus subtilis*, Retak susut, Kalsium Karbonat, Perbaikan retak rambut

SUMMARY

“RESEARCH STUDY ON THE USE OF BACILLUS SUBTILIS BACTERIA FOR HAIRLANE CRACK REPAIR IN MORTAR BY INJECTION METHOD”

By : Melvien Zainul Asyqin (2021103). Supervisor I : Mohammad Erfan, ST., MT.
Supervisor II : Dra. Siswi Astuti, M.Pd. S1 Civil Engineering Study Program,
Faculty of Civil Engineering and Planning, National Institute of Technology
Malang.

Mortar is the most used material in the world of construction. Mortar functions as a binding matrix or filling material for structural and non-structural construction. Mortar will experience weathering and damage in aggressive environments caused by structural cracking or non-structural cracking factors. Shrinkage cracks occur due to high cement content, poor sand quality and the application of plaster on the wall is too thick. Handling the problem of cracks in mortar repair with the inject method using a mixture of *Bacillus Subtilis* bacteria. *Bacillus Subtilis* is a member of the *Bacillus* genus, which converts urea into calcium carbonate or lime. The calcium carbonate will fill the micro cracks in the mortar.

This study used mortar samples with the percentage of bacterial mixture improvement and supporting components of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of a total of 60 ml of the mixture using the inject method. The injection method of the bacterial mixture was carried out when on visual observation, the specimens had experienced micro cracks. Periodic observations were made on the specimens after injection repair of the hairline cracks in the mortar. Periodic observations were made every 3, 7, 14 and 28 days.

The results of this study showed that a mixture of *Bacillus Subtilis* bacteria can close hair cracks that occur in mortar. The 10% variation is a mixture of bacteria and their supporting components that have optimum results for closing hair cracks in mortar, based on observations made every 7, 14 and 28 days. The average percentage of successful crack closure is 92%. The crack width that can be done with this repair method is ≤ 0.60 mm. And based on the results of SEM and EDX testing that the pores and cracks in the test object are filled with calcium carbonate or lime.

Keywords : *Bacillus subtilis*, Shrinkage crack, Calcium Carbonate, Hairline crack repair

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Penelitian Penggunaan Bakteri *Bacillus Subtilis* Untuk Perbaikan Retak Rambut Pada Mortar Dengan Metode Inject**” dengan baik dan lancar.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak yang telah memberi dukungan secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyusunan Tugas Akhir ini kepada:

1. Bapak **Dr. Yosimso P. Manaha, ST., MT** Selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil.
2. Ibu **Nenny Roostrianawaty, ST., MT.** Selaku Sekretaris Program Studi Teknik Sipil.
3. Bapak **Mohammad Erfan ST., MT.** Selaku Dosen Pembimbing I.
4. Ibu **Dra. Siswi Astuti, MPd** Selaku Dosen Pembimbing II.
5. Ibu **Ir. Ester Priskasari, MT.** Selaku Dosen Penguji I.
6. Bapak **Ir. Hadi Surya Wibawanto, ST., MT., IPP.** Selaku Dosen Penguji II.
7. Bapak **Ir. Vega Aditama, ST., MT., IPM.** Selaku Kepala Studio Skripsi Teknik Sipil S-1.
8. Laboran dan asisten laboratorium Bahan Konstruksi Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang.
9. Seluruh staff dan jajaran pengurus Program Studi Teknik Sipil yang telah membantu dalam administrasi penulis.
10. Kedua orang tua, keluarga serta saudara penulis yang telah mendukung, memberi semangat serta mendoakan penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Teman-teman seperjuangan yang telah membantu menyelesaikan penelitian dan tugas akhir ini.

12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca sangat penulis harapkan. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Malang, 29 Juli 2024

Melvien Zainul Asyqin

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iv
ABSTRAK	v
SUMMARY	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Pengertian Mortar.....	7
2.3 Material Penyusun.....	10
2.3.1 Semen.....	10
2.3.2 Agregat Halus.....	11
2.3.3 Air.....	11
2.4 Material Tambahan.....	11
2.4.1 Bakteri Bacillus Subtilis.....	13
2.4.2 Komponen Pendukung	14
2.5 Pengujian Mortar.....	15
2.6 Perawatan Benda Uji.....	15
2.7 Retak Susut Mortar.....	16
2.8 Inject Benda Uji	17
2.9 Perlakuan Benda Uji Setelah Perbaikan Inject.....	17
2.10 <i>Scalled Mapping</i>	17
2.11 Pengujian Durabilitas Mortar	18

BAB III.....	19
METODELOGI PENELITIAN	19
3.1 Tujuan Penelitian.....	19
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	19
3.2.1 Tempat Penelitian.....	19
3.2.2 Waktu Penelitian	20
3.3 Metode Penelitian.....	20
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	21
3.5 Populasi dan Sampel	22
3.6 Metode Pengumpulan Data	23
3.6.1 Uji Bahan.....	23
3.6.2 Uji Leleh Mortar (<i>flow</i>).....	23
3.6.3 Pembuatan Benda Uji.....	24
3.6.4 Inject.....	24
3.6.5 Scalled Mapping.....	24
3.6.6 Pengujian <i>Durability</i>	24
3.7 Bagan Alir Penelitian	26
BAB IV	29
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Penelitian Pendahuluan	29
4.1.1 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	29
4.1.2 Perkembangbiakan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	29
4.1.3 Pengaplikasian Campuran Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> Pada Mortar	32
4.2 Hasil Pengujian Bahan	39
4.2.1 Pemeriksaan Gradasi Pasir	39
4.2.2 Pemeriksaan Kadar Air	41
4.2.3 Pemeriksaan Bahan Lolos Saringan No. 200.....	41
4.2.4 Pemeriksaan Kadar Organik.....	42
4.2.5 Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Halus.....	43
4.2.6 Pemeriksaan Berat Jenis.....	43
4.2.7 Pemeriksaan Berat Isi.....	45
4.2.8 Konsistensi dan Waktu Ikat Semen.....	48
4.3 Pembuatan Benda Uji Mortar.....	51
4.3.1 Penentuan Kebutuhan Material Benda Uji.....	52
4.3.2 Pembuatan Benda Uji dan Pembuatan Campuran Bakteri Perbaikan Retak Rambut Benda Uji	54
4.4 Hasil Pengujian Benda Uji Mortar	57
4.5 Inject Benda Uji Mortar	58
4.6 Hasil Pengamatan <i>Scalled Mapping</i>	60
4.6.1 <i>Scalled Mapping</i> sampel 7 hari	60
4.6.2 <i>Scalled Mapping</i> sampel 14 hari	70

4.6.3 <i>Scalled Mapping</i> sampel 28 hari	81
4.7 Rekapitulasi Pengamatan <i>Scalled Mapping</i>	91
4.8 Hasil Luas dan <i>Mapping Self Healing</i> Sampel Optimum	103
4.9 Hasil Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX).....	105
4.10 Pembahasan.....	109
BAB V.....	112
KESIMPULAN DAN SARAN.....	112
5.1 Kesimpulan.....	112
5.2 Saran.....	113
DAFTAR PUSTAKA	115
LAMPIRAN.....	118

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	5
Tabel 2.2 Material Yang Digunakan Dalam Reagent	12
Tabel 2.3 Material Komponen Pendukung Yang Direncanakan Dalam Penelitian	13
Tabel 3.1 Variasi Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-7.....	22
Tabel 3.2 Variasi Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-14.....	22
Tabel 3.3 Variasi Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-28.....	23
Tabel 4.1 Komposisi Nutrisi Tahu pada Pertumbuhan Bakteri	31
Tabel 4.2 Komposisi Nutrisi Tempe pada Pertumbuhan Bakteri	31
Tabel 4.3 Jenis Nutrisi Terhadap Jumlah MPN Sampel Bacillus Subtilis	32
Tabel 4.4 Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Peningkatan Jumlah Koloni Bakteri Bacillus Subtilis.....	32
Tabel 4.5 Komposisi Pencampuran Reagen Bacillus Subtilis Galur Murni dan Komponen Pendukung (Satuan gram)	33
Tabel 4.6 Komposisi Pencampuran Reagen Bacillus Subtilis BAC-Plus dan Komponen Pendukung (Satuan gram)	33
Tabel 4.7 Hasil Pengujian pH Pada Mortar Dengan Campuran Bakteri Bacillus Subtilis Galur Murni	34
Tabel 4.8 Hasil Pengujian pH Pada Mortar Dengan Campuran Bakteri Bacillus Subtilis BAC-Plus	34
Tabel 4.9 Pengujian Berat Mortar Dengan Campuran Bakteri Bacillus Subtilis Produk Galur Murni	35
Tabel 4.10 Pengujian Berat Mortar Dengan Campuran Bakteri Bacillus Subtilis Produk BAC-Plus.....	35
Tabel 4.11 Hasil Kandungan Komponen Senyawa Yang Terdapat Pada Mortar Bakteri Bacillus Subtilis BAC-Plus	38
Tabel 4.12 Hasil Pemeriksaan Gradasi Agregat Halus	39

Tabel 4.13 Pemeriksaan Bahan Lolos Saringan No. 200.....	41
Tabel 4.14 Persentase Kadar Organik.....	42
Tabel 4.15 Hasil Pengujian Kadar Lumpur.....	43
Tabel 4.16 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus.....	44
Tabel 4.17 Pengujian Berat Jenis Semen Portland.....	45
Tabel 4.18 Hasil Pengujian Berat Isi Agregat Halus Kondisi Gembur.....	46
Tabel 4.19 Hasil Pengujian Berat Isi Agregat Halus Kondisi Padat.....	46
Tabel 4.20 Hasil Pengujian Berat Isi Semen Kondisi Gembur	47
Tabel 4.21 Hasil Pengujian Berat Isi Semen Kondisi Gembur	47
Tabel 4.22 Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen	48
Tabel 4.23 Hasil Pengujian Konsistensi Waktu Ikat Awal Semen	50
Tabel 4.24 Pembagian Material Komponen Pendukung Yang Direncanakan Dalam Penelitian	53
Tabel 4.25 Data Komposisi Campuran Perbaikan oleh Bakteri Bacillus Subtilis dan Komponen Tambahan	54
Tabel 4.26 Hasil Uji Flow Table Pada Benda Uji Mortar.....	57
Tabel 4.27 Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-7.....	58
Tabel 4.28 Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-14.....	59
Tabel 4.29 Pengamatan Visual Terbatas Scalled Mapping dengan metode Inject untuk benda uji ukuran 30 cm x 30 cm x 2 cm hari ke-28.....	59
Tabel 4.30 Hasil Pengamatan Penutupan Panjang Retak Benda Uji Umur 7 Hari	92
Tabel 4.31 Hasil Pengamatan Lebar Retak Benda Uji Umur 7 Hari	93
Tabel 4.32 Persentase Hasil Penutupan Retakan Untuk Pengamatan Umur 7 Hari	94
Tabel 4.33 Hasil Pengamatan Penutupan Panjang Retak Benda Uji Umur 14 Hari	96
Tabel 4.34 Hasil Pengamatan Lebar Retak Benda Uji Umur 14 Hari	97
Tabel 4.35 Persentase Hasil Penutupan Retakan Untuk Pengamatan Umur 14 Hari	98

Tabel 4.36 Hasil Pengamatan Penutupan Panjang Retak Benda Uji Umur 28 Hari	100
Tabel 4.37 Hasil Pengamatan Lebar Retak Benda Uji Umur 28 Hari	101
Tabel 4.38 Persentase Hasil Penutupan Retakan Untuk Pengamatan Umur 28 Hari	102
Tabel 4.39 Hasil Spektrum Pengujian EDX Sampel B ₁	107
Tabel 4.40 Hasil Spektrum Pengujian EDX Sampel B ₃	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Keretakan sebelum pulih mandiri dan sesudah pulih mandiri	10
Gambar 2.2 Bakteri Bacillus Subtilis.....	13
Gambar 2.3 Contoh retak rambut pada plesteran dinding.....	16
Gambar 4.1 Penanaman Bakteri Bacillus Subtilis Pada Media Agar-Agar (NA). 30	
Gambar 4.2 Penanaman Bakteri dengan Media Cair.....	31
Gambar 4.3 Pengamatan Visual pada Sampel 4A Penutupan Pori-Pori dengan Bakteri Bacillus Subtilis BAC-Plus	36
Gambar 4.4 Pengamatan Visual pada Sampel 4B Penutupan Pori-Pori dengan Bakteri Bacillus Subtilis Galur Murni.....	36
Gambar 4.5 Pengamatan SEM pada Sampel 4A Bakteri Bacillus Subtilis BAC- Plus dan Komponen Tambahan	37
Gambar 4.6 Hasil Uji EDX pada Sampel 4A Bakteri Bacillus Subtilis BAC-Plus dan Komponen Tambahan	38
Gambar 4.7 Pengujian Gradasi Agregat Halus	39
Gambar 4.8 Grafik Agregat Halus Zona 2	40
Gambar 4.9 Hasil Pengujian Kadar Organik Agregat Halus	42
Gambar 4.10 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus	43
Gambar 4.11 Pengujian Berat Jenis Agregat Halus	44
Gambar 4.12 Pengujian Berat Jenis Semen Portland.....	45
Gambar 4.13 Pengujian Berat Isi Agregat Halus	46
Gambar 4.14 Pengujian Berat Isi Semen Portland.....	47
Gambar 4.15 Pengujian Konsistensi Normal Semen	48
Gambar 4.16 Grafik Konsistensi Normal Semen.....	49
Gambar 4.17 Pengujian Waktu Ikat Semen	50
Gambar 4.18 Grafik Waktu Ikat Semen.....	51
Gambar 4.19 Cetakan Benda Uji	52
Gambar 4.20 Gambar Pembuatan Mortar dan Uji Leleh Mortar	55
Gambar 4.21 Percetakan Benda Uji	55
Gambar 4.22 Benda Uji Yang Sudah Kering Setelah 3 Hari dari Proses Percetakan	56

Gambar 4.23 Campuran Bakteri Bacillus Subtilis dan Komponen Tambahan.....	57
Gambar 4.24 Flow Test Pada Benda Uji Mortar.....	58
Gambar 4.25 Contoh Proses Perbaikan Retak Rambut Mortar dengan Injeksi Campuran Bakteri Bacillus Subtilis Pada Sampel	59
Gambar 4.26 Komposisi 0% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	60
Gambar 4.27 Pengamatan Hari ke 7 Sampel A ₁ dan A ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 0% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	61
Gambar 4.28 Komposisi 10% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	62
Gambar 4.29 Pengamatan Hari ke 7 Sampel B ₁ dan B ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 10% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	62
Gambar 4.30 Komposisi 20% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	63
Gambar 4.31 Pengamatan Hari ke 7 Sampel C ₁ dan C ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 20% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	64
Gambar 4.32 Komposisi 30% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	65
Gambar 4.33 Pengamatan Hari ke 7 Sampel D ₁ dan D ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 30% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	65
Gambar 4.34 Komposisi 40% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	66
Gambar 4.35 Pengamatan Hari ke 7 Sampel E ₁ dan E ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 40% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	67
Gambar 4.36 Komposisi 50% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 7 Hari.....	68
Gambar 4.37 Pengamatan Hari ke 7 Sampel F ₁ dan F ₂ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 50% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	69
Gambar 4.38 Komposisi 0% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	70
Gambar 4.39 Pengamatan Hari ke 14 Sampel A ₃ dan A ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 0% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	71
Gambar 4.40 Komposisi 10% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	72
Gambar 4.41 Pengamatan Hari ke 14 Sampel B ₃ dan B ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 10% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	72
Gambar 4.42 Komposisi 20% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	73
Gambar 4.43 Pengamatan Hari ke 14 Sampel C ₃ dan C ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 20% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	74

Gambar 4.44 Komposisi 30% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	75
Gambar 4.45 Pengamatan Hari ke 14 Sampel D ₃ dan D ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 30% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	76
Gambar 4.46 Komposisi 40% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	77
Gambar 4.47 Pengamatan Hari ke 14 Sampel E ₃ dan E ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 40% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	78
Gambar 4.48 Komposisi 50% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 14 Hari.....	79
Gambar 4.49 Pengamatan Hari ke 14 Sampel F ₃ dan F ₄ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 50% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	80
Gambar 4.50 Komposisi 0% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	81
Gambar 4.51 Pengamatan Hari ke 28 Sampel A ₅ dan A ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 0% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	82
Gambar 4.52 Komposisi 10% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	83
Gambar 4.53 Pengamatan Hari ke 28 Sampel B ₅ dan B ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 10% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	84
Gambar 4.54 Komposisi 20% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	85
Gambar 4.55 Pengamatan Hari ke 28 Sampel C ₅ dan C ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 20% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	85
Gambar 4.56 Komposisi 30% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	86
Gambar 4.57 Pengamatan Hari ke 28 Sampel D ₅ dan D ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 30% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	87
Gambar 4.58 Komposisi 40% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	88
Gambar 4.59 Pengamatan Hari ke 28 Sampel E ₅ dan E ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 40% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	89
Gambar 4.60 Komposisi 50% Campuran Bakteri Perbaikan Untuk 28 Hari.....	90
Gambar 4.61 Pengamatan Hari ke 28 Sampel F ₅ dan F ₆ Perbaikan Retak Rambut Komposisi 50% Campuran Bakteri Setelah Inject.....	90
Gambar 4.62 Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 7 Hari	95
Gambar 4.63 Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 14 Hari.....	99

Gambar 4.64 Grafik Persentase Hasil Penutupan Retakan Benda Uji Umur 28 Hari.....	103
Gambar 4.65 Mapping Self Healing Sampel Optimum B ₁ Pengamatan 7 Hari...	104
Gambar 4.66 Mapping Self Healing Sampel Optimum B ₃ Pengamatan 14 Hari	104
Gambar 4.67 Tampak Samping Sampel Optimum B ₄	105
Gambar 4.68 Hasil Pengujian SEM Sampel B ₁ Komposisi 10% Pengamatan 7 Hari.....	106
Gambar 4.69 Hasil Spektrum Pada Pengujian EDX sampel B ₁	107
Gambar 4.70 Hasil Pengujian SEM Sampel B ₃ Komposisi 10% Pengamatan 14 Hari.....	108
Gambar 4.71 Hasil Spektrum Pada Pengujian EDX sampel B ₃	108