



TUGAS AKHIR (RC-184803)

**PENGARUH ABU BATUBARA DAN *HEALING*
AGENT TERHADAP KEMAMPUAN *SELF HEALING*
BETON**

RAHMAN ADIMA ADRIANTA

NRP. 0311144000093

Dosen Pembimbing :

Dr.Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT.

JURUSAN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019



TUGAS AKHIR (RC-184803)

**PENGARUH ABU BATUBARA DAN *HEALING*
AGENT TERHADAP KEMAMPUAN *SELF HEALING*
BETON**

RAHMAN ADIMA ADRIANTA

NRP. 0311144000093

Dosen Pembimbing :

Dr.Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT.

JURUSAN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019



TUGAS AKHIR (RC-184803)

**INFLUENCE OF FLY ASH DAN HEALING AGENT
TOWARDS SELF HEALING ABILITY OF
CONCRETE**

RAHMAN ADIMA ADRIANTA

NRP. 0311144000093

Academic Supervisor :

Dr.Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT.

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2019

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH ABU BATUBARA DAN *HEALING* *AGENT* TERHADAP KEMAMPUAN *SELF HEALING* BETON

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Reguler Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMAN ADIMA ADBIANTA

NRP. 03111440000099

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputra (1.MT.....)



SURABAYA, JANUARI 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PENGARUH ABU BATUBARA DAN *HEALING* AGENT TERHADAP KEMAMPUAN *SELF HEALING* BETON

Nama Mahasiswa : Rahman Adima Adrianta
NRP : 0311144000093
Departemen : Teknik Sipil FTSLK-ITS
Dosen Konsultasi : Dr. Eng. Januari Jaya Ekaputri ST., MT.

ABSTRAK

Beton merupakan bahan yang rawan terjadi keretakan karena tegangan tariknya relatif kecil. Pengaruh pembebanan secara terus menerus akan memperbesar keretakan mikro yang memungkinkan air dan zat-zat lain akan masuk ke dalam beton dan menyebabkan korosi. Dalam penelitian ini penambahan healing agent berupa bakteri dan FABA diharapkan dapat meningkatkan kemampuan self healing beton. Healing agent yang mengandung bakteri dimasukkan ke dalam agregat buatan pasta geopolimer bertujuan untuk melokalisir konsentrasi bakteri serta melindungi bakteri dari proses mixing sehingga dapat melakukan autonomous healing pada crack secara optimal. Penambahan FABA pada matriks beton diharapkan membantu mekanisme healing secara autogenous dengan pembentukan C-S-H baru. Komposisi agregat buatan geopolimer menggunakan perbandingan massa antara sodium silikat dan sodum hidroksida sebesar 2, sedangkan rasio perbandingan massa antara alkali aktivator dibanding fly ash sebesar 0.25. Komposisi beton mengandung 20% fly ash terhadap berat binder dan 5% bottom ash terhadap berat agregat halus. Dari penelitian ini diketahui pengaruh penambahan healing agent dan FABA terhadap luas permukaan retak dan kedalaman retak, serta pengaruh penambahan healing agent terhadap kuat tekan pasta. Pengamatan secara kimia dilakukan untuk menentukan mineral apa yang terbentuk pada celah retak serta pengamatan biologi dilakukan untuk mengamati keberadaan bakteri pada umur

tertentu. Hasil menunjukkan penambahan healing agent dapat menghambat strength development hingga 28 hari namun berperan secara aktif pada umur 7 hari. Pengaruh healing agent dan FABA dapat meningkatkan kemampuan healing dalam tinjauan luas retak permukaan dan kedalaman retak, namun hasil yang didapatkan masih belum signifikan.

Kata Kunci : retak, self healing, autonomous healing, autogenous healing, fly ash

INFLUENCE OF FLY ASH AND HEALING AGENT TOWARDS SELF HEALING ABILITY OF CONCRETE

Nama Mahasiswa : Rahman Adima Adrianta
NRP : 031114 40000 093
Departemen : Teknik Sipil FTSLK-ITS
Dosen Konsultasi : Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri ST., MT.

ABSTRACT

Concrete is a material that tend to crack easily because a relatively low tension stress. The effect of continuous loading will amplify “micro-crack” that will lead water and other substances to reside in the concrete and cause corrosion. In this research, the addition of bacteria and FABA as healing agents are expected to improve the self-healing capability of the concrete. The healing agent which contains bacteria are injected to the artificial “geopolimer” paste aggregate, are expected to localize the bacteria concentration and protect the bacteria from mixing process so it will do autonomous healing at the crack optimally. The addition of FABA to the matrix is expected to help the healing mechanism autogenously with creating new C-S-H compound. The artificial geopolimer aggregate composition use mass comparison between sodium silicate and sodium hidroxide with 1 : 2 comparison, wjile the mass comparison between alkali activator and fly ash use 1 : 4 comparison. The concrete composition contain 20% fly ash compared to binder weight and 5% bottom ash compared to fine aggregate weight. From this research, it will found the effect of healing agents addition and FABA to the concrete crack surface area, crack depth and paste compressive strength. Chemical research are done to determine which minerals are formed inside the crack, while the biological research are done to observe the condition of bacteria at certain period of time. The

research result shows the addition of healing agent can obstruct the concrete strength development until the 28th day, but it performs actively at 7th days.. The effect of healing agents and FABA to crack's surface area healing process and it's depth are considered to be not fully significant.

Keywords : crack, self healing, autonomous healing, autogeneous healing, fly ash

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat rahmat, kasih dan bimbingan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Abu Batubara dan *Healing Agent* terhadap Kemampuan *Self Healing Beton*” ini dengan baik dan tepat waktu.

Adapun Tugas Akhir ini dibuat dengan tujuan untuk memenuhi syarat agar dapat melanjutkan ke Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sipil ITS Surabaya. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan kontribusi yang nyata dalam bidang ketekniksipilan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi atas terselesaikannya proposal Tugas Akhir ini, diantaranya :

1. Allah SWT yang telah memberikan kemampuan untuk menyelesaikan proposal ini.
2. Orang tua dan keluarga yang selalu memotivasi saya untuk lebih baik.
3. Ibu Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri ST., MT. sebagai dosen konsultasi yang telah memberikan banyak arahan dan ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Dosen – dosen dan pegawai kampus Jurusan Teknik Sipil FTSLK ITS
5. Teman – teman Teknik Sipil ITS angkatan 2014 yang selalu memberikan dukungan dan pelajaran berharga setiap harinya kepada saya.

Penulis menyadari bahwa proposal tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat diharapkan untuk pengembangan selanjutnya. Akhir kata, semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi generasi berikutnya.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Masalah Penelitian	5
1.3. Batasan Masalah	6
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Retak pada Beton	7
2.2. Faktor yang mempengaruhi Efisiensi Proses Self-Healing pada Beton.....	8
2.3. Mekanisme <i>Self Healing</i>	12
2.4. <i>Autogenous Self Healing</i>	12
2.5. Partikel Semen yang Tidak Terhidrasi.....	14
2.6. Efek <i>Pozzolan</i> terhadap Ca(OH)_2	15
2.7. <i>Fly ash</i> sebagai Material <i>Autogenous Healing</i>	16
2.8. <i>Self Healing</i> berbasis Bakteri.....	18
2.8.1. Hidrolisis Urea	18
2.8.2. Perubahan Nutrisi melalui Metabolisme Bakteri	20
2.9. Agregat Buatan Geopolimer	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1. Umum	25
3.2. Studi Literatur	27

3.3. Persiapan Material	27
3.4. Agregat Kasar Buatan	28
3.5. Analisa Material	30
3.5.1. <i>Binder</i>	30
3.5.2. Agregat Halus	34
3.5.3. Agregat Kasar	38
3.6. Pembuatan Benda Uji	46
3.6.1. Benda Uji Balok Beton (Bn)	46
3.6.2. Benda Uji Silinder Beton (Sn)	50
3.6.3. Benda Uji Silinder Pasta (Sp)	51
3.6.4. Komposisi Campuran Benda Uji dan Kebutuhan Benda Uji	54
3.7. Pembuatan Retak pada Balok	64
3.8. Perawatan Benda Uji	66
3.9. Pengujian Mekanis dan Biologis	67
3.9.1. Uji Tekan (ASTM C 39)	67
3.9.2. Uji <i>Determination of Bacterial Number using Standart Plate Count</i> dan Analisa Mikroorganisme ...	68
3.10. Evaluasi <i>Self Healing</i>	72
3.10.1. Tes <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	72
3.10.2. Tes Pengukuran Luasan Retak menggunakan Dinolite	76
3.10.3. Analisa XRD	76
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1. Umum	77
4.2. Analisa Material	77
4.2.1. Analisa OPC dan <i>Fly Ash</i>	77
4.2.2. Analisa Pasir dan <i>Bottom Ash</i> Suralaya	83
4.2.3. Analisa Agregat Kasar Alami dan Buatan	86
4.3. Analisa Benda Uji Silinder Pasta (Sp)	98
4.3.1. Pengujian Kuat Tekan	98
4.3.2. Pengujian XRD	103

4.3.3. Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>) .	115
4.3.4. Pengujian <i>Determination of Bacterial Number using Standart Plate Count</i> dan Analisa Mikroorganisme	121
4.4. Analisa Benda Uji Silinder Beton (Sn).....	124
4.4.1. Pengujian Kuat Tekan.....	124
4.5. Analisa Benda Uji Balok Beton (Bn)	126
4.5.1. Pemberian Retak Awal	126
4.5.2. Pengamatan Kedalaman Retak menggunakan UPV	131
4.5.3. Pengamatan Luasan Retak Permukaan menggunakan <i>Dinolite</i>	143
4.5.4. Uji XRD Material pada Celah Retak	152
4.5.5. Pengujian Jumlah Bakteri	158
4.5.6. Analisa ITZ (<i>Interfacial Transitional Zone</i>)....	160
BAB V KESIMPULAN	163
5.1. Kesimpulan	163
5.2. Saran	165
DAFTAR PUSTAKA.....	167
LAMPIRAN	175

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Efisiensi Self Healing dengan jumlah kapsul yang berbeda	9
Gambar 2. 2 Penutupan retak dari balok beton yang terbuat dari penuangan epoxy semen dan epoxy mortar.....	10
Gambar 2. 3 Penutupan retak dari balok beton yang terbuat dari penuangan tanah liat dan silikon	11
Gambar 2. 4 Penyebab dari autogenous self healing	13
Gambar 2. 5 4 Model mikrostruktur partikel untuk pasta semen yang terhidrasi, ditunjukkan hidrasi dalam kondisi jenuh dan tertutup. Abu-abu hitam menunjukkan pasta semen yang tidak terhidrasi, material yang mempunyai tekstur dan mempunyai warna abu-abu muda adalah produk dari hidrasi. Putih adalah air yang mengisi pori dan hitam adalah pori yang kosong.	15
Gambar 2. 6 Jumlah kalsium hidroksida berdasarkan penambahan material pozzolan. PZ = Semen Portland, HOZ= blast furnace slag cement, SFA = fly ash	16
Gambar 2. 7 Laju dari penyembuhan retak beton untuk campuran yang berbeda-beda. Titik merepresentasikan nilai rata-rata.	17
Gambar 2. 8 Pengurangan permeabilitas air dikarenakan proses autogenous healing untuk setiap campuran.	18
Gambar 2. 9 Pengendapan kalsium karbonat pada dinding sel..	20
Gambar 2. 10 Gambar mikroskopik (40x perbesaran) dari spesimen kontrol sebelum penyembuhan (A) dan spesimen yang mengandung bakteri (B) spesimen beton sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) penyembuhan (2 minggu perendaman di air. Pengendapan mineral terjadi dominan di dekat permukaan retak beton pada spesimen kontrol tetapi pengendapan mineral terjadi di dalam retak pada spesimen yang mengandung bakteri. Efisiensi penyembuhan terjadi pada semua 6 spesimen yang mengandung bakteri dan 2 dari 6 spesimen kontrol.....	21
Gambar 2. 11 Bentuk agregat buatan setelah digranulasi	24
Gambar 3. 1 Bagan alir dari metodologi penelitian.	26
Gambar 3. 2 Proses pembuatan agregat kasar buatan.	29

Gambar 3. 3 Kerosin dalam skala antara 0-1	31
Gambar 3. 4 a) Le Chatelier Flask berisi semen OPC b) Le Chatelier Flask berisi fly ash	32
Gambar 3. 5 Le Chatelier Flask (ASTM C188,2016).....	33
Gambar 3. 6 a) Kondisi SSD Bottom Ash b) Kondisi SSD Pasir	36
Gambar 3. 7 a) Piknometer berisi Bottom Ash b) Piknometer berisi Pasir	37
Gambar 3. 8 a) Bt Bottom Ash b) Bt Pasir	37
Gambar 3. 9 Kondisi Kering Permukaan Jenuh.....	40
Gambar 3. 10 Menimbang benda uji kering permukaan jenuh (Bj).	40
Gambar 3. 11 Menimbang berat benda uji dalam air (Ba).....	41
Gambar 3. 12 Ketentuan Mesin Los Angeles	43
Gambar 3. 13 a) Benda uji lolos saringan 19 mm tertahan saringan 12,5 mm b) benda uji lolos saringan 12,5 mm tertahan 9,5 mm.	44
Gambar 3. 14 Menimbang berat benda uji yang tertahan saringan 1,7 mm.....	45
Gambar 3. 15 Dimensi benda uji balok.....	47
Gambar 3. 16 Detail Penulangan Balok.....	47
Gambar 3. 17 Mesin mixer	48
Gambar 3. 18 Hasil pengadukan material oleh mesin mixer	48
Gambar 3. 19 Tulangan balok.....	49
Gambar 3. 20 Campuran dimasukkan ke dalam bekisting.....	49
Gambar 3. 21 Pemerataan permukaan cetakan	50
Gambar 3. 22 Benda uji silinder beton yang akan dites tekan...	51
Gambar 3. 23 Dimensi benda uji silinder	52
Gambar 3. 24 a) Spesimen silinder b) cetakan silinder.....	52
Gambar 3. 25 Mesin pengaduk	53
Gambar 3. 26 Skema alat uji lentur untuk membuat retak awal pada balok.....	64
Gambar 3. 27 Pemberian beban untuk menapatkan retak awal pada benda uji balok beton.	65
Gambar 3. 28 Perawatan moist curing benda uji balok beton (Bn)	66

Gambar 3. 29 Perawatan moist curing benda uji silinder beton (Sn)	66
Gambar 3. 30 Perawatan moist curing benda uji silinder pasta (Sp)	67
Gambar 3. 31 Pengujian kuat tekan benda uji silinder beton (Sn)	68
Gambar 3. 32 Pengujian kuat tekan benda uji silinder pasta (Sp)	68
Gambar 3. 33 Tabung reaksi	69
Gambar 3. 34 Proses penggoncangan tabung reaksi menggunakan mesin vortex	70
Gambar 3. 35 Proses penimbangan nutrient agar	70
Gambar 3. 36 Proses memasak larutan akuades steril dengan nutrient agar	71
Gambar 3. 37 Gambar mesin sterilisasi	71
Gambar 3. 38 2 buah cawan petri pengenceran 10^{-6}	72
Gambar 3. 39 Alat pengujian UPV	74
Gambar 3. 40 Skema pengujian UPV pada balok beton	74
Gambar 3. 41 Transducer dan receiver pada balok beton	75
Gambar 3. 42 Kamera mikro digital dinolite	76
Gambar 4. 1 Grafik XRD semen OPC	81
Gambar 4. 2 Grafik ketentuan gradasi agregat kasar ukuran maksimum 20 mm menurut SNI-03-2834-2000	92
Gambar 4. 3 Grafik gradasi aagregat kasar buatan untuk silinder F20B5M400	92
Gambar 4. 4 Grafik gradasi aagregat kasar buatan untuk silinder F20B5M1000	93
Gambar 4. 5 Grafik gradasi aagregat kasar buatan untuk silinder F20B5M5000	93
Gambar 4. 6 Kuat tekan silinder pasta (Sp) berdasarkan umur benda uji	101
Gambar 4. 7 Grafik XRD silinder pasta M0	106
Gambar 4. 8 Grafik XRD silinder pasta M400	108
Gambar 4. 9 Grafik XRD silinder pasta M1000	110
Gambar 4. 10 Grafik XRD silinder pasta M5000	112

Gambar 4. 11	Hubungan kuat tekan dengan jumlah albite	115
Gambar 4. 12	a) Gambar visualisasi hasil SEM cairan healing agent perbesaran 5000 kali b) Gambar visualisasi hasil SEM cairan healing agent perbesaran 10000 kali	116
Gambar 4. 13	Bakteri Sporosarcina (Sumber : Kim dkk. 2016)	117
Gambar 4. 14	a) Gambar visualisasi hasil SEM partikel fly ash yang tidak bereaksi pada M1000 b) dan c) Visualisasi hasil SEM terdapat bentuk bakteri meyerupai batang pada M1000.....	118
Gambar 4. 15	a) Gambar visualisasi hasil SEM partikel fly ash yang tidak bereaksi pada M5000 b) Visualisasi hasil SEM terdapat bentuk bakteri meyerupai batang pada M5000.....	120
Gambar 4. 16	Grafik kuat tekan silinder beton (Sn)	125
Gambar 4. 17	Hubungan Mn/MP dengan kedalaman retak awal	135
Gambar 4. 18	Hubungan umur moist curing terhadap kedalaman retak	136
Gambar 4. 19	Perbandingan rasio penyembuhan kedalaman retak terhadap umur moist curing.....	139
Gambar 4. 20	Grafik hubungan rate of healing dengan umur pengamatan.....	141
Gambar 4. 21	Grafik hubungan rate of healing dengan umur pengamatan.....	141
Gambar 4. 22	Grafik hubungan rate of healing dengan umur pengamatan.....	142
Gambar 4. 23	Mekanisme penutupan retak pada BnF20B5M1000	145
Gambar 4. 24	Hubungan umur moist curing terhadap luas permukaan retak	146
Gambar 4. 25	Pecahnya permukaan retak beton BnF0B0M1000	147
Gambar 4. 26	Perbandingan rasio penyembuhan luas permukaan retak terhadap umur moist curing.....	149

Gambar 4. 27 Kemungkinan bentuk retak yang terjadi dan dimana pengendapan mulai menutup retak a) uniform crack, b) pyramidal frustum crack, c) convex crack, dan d) concave crack 151

Gambar 4. 28 Grafik hubungan jumlah tobermorite+kalsium karbonat dengan healing ratio terhadap kedalaman retak beton 157

Gambar 4. 29 ITZ agregat buatan dengan perbesaran 50 kali . 161

Gambar 4. 30 ITZ agregat buatan dengan perbesaran 250 kali 161

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Komposisi Campuran Benda Uji Balok per satuan Balok	55
Tabel 3. 2 Desain campuran beton mutu 25 Mpa	56
Tabel 3. 3 Proporsi material tiap m ³	58
Tabel 3. 4 Komposisi Benda Uji Silinder Beton per 3 Silinder ..	59
Tabel 3. 5 Komposisi Benda Uji Silinder Pasta per 7 Silinder ..	60
Tabel 3. 6 Rekapitulasi jumlah benda uji balok.....	61
Tabel 3. 7 Rekapitulasi jumlah benda uji silinder beton.....	61
Tabel 3. 8 Jumlah benda uji silinder pasta.....	62
Tabel 3. 9 Komposisi Campuran Agregat Buatan M400.....	62
Tabel 3. 10 Komposisi Campuran Agregat Buatan M1000.....	62
Tabel 3. 11 Komposisi Campuran Agregat Buatan M5000.....	62
Tabel 3. 12 Komposisi Campuran Agregat Buatan M400.....	63
Tabel 3. 13 Komposisi Campuran Agregat Buatan M1000.....	63
Tabel 3. 14 Komposisi Campuran Agregat Buatan M5000.....	63
Tabel 3. 15 Petunjuk* untuk lebar retak, beton bertulang pada beban servis	65
Tabel 4. 1 Hasil pengujian berat jenis OPC	78
Tabel 4. 2 Hasil pengujian berat jenis Fly Ash.....	78
Tabel 4. 3 Kandungan senyawa pada semen OPC.....	79
Tabel 4. 4 Hasil pengujian XRF flash suralaya 1-4	82
Tabel 4. 5 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus.....	83
Tabel 4. 6 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air bottom ash.....	84
Tabel 4. 7 Hasil pengujian XRF bottom ash suralaya.....	85
Tabel 4. 8 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar alami	86
Tabel 4. 9 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M400.....	87
Tabel 4. 10 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M1000.....	88

Tabel 4. 11 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M5000.....	88
Tabel 4. 12 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M400	90
Tabel 4. 13 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M1000	90
Tabel 4. 14 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M5000	91
Tabel 4. 15 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji silinder beton	94
Tabel 4. 16 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji balok beton	95
Tabel 4. 17 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M0.....	98
Tabel 4. 18 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M400.....	99
Tabel 4. 19 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M1000.....	99
Tabel 4. 20 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M5000.....	100
Tabel 4. 21 Standar kontrol benda uji.....	100
Tabel 4. 22 Rekapitulasi kuat tekan benda uji	101
Tabel 4. 23 Senyawa pembacaan grafik XRD Silinder Pasta (Sp)	103
Tabel 4. 24 Kandungan senyawa pada M0	104
Tabel 4. 25 Kandungan senyawa pada M400	107
Tabel 4. 26 Kandungan senyawa pada M1000	109
Tabel 4. 27 Kandungan senyawa pada M5000	111
Tabel 4. 28 Hasil pengujian standart plate counting.....	121
Tabel 4. 29 Hasil pengujian analisa mikroorganisme	122
Tabel 4. 30 Hasil kuat tekan rata-rata benda uji silinder beton (Sn)	124
Tabel 4. 31 Hasil pengukuran kedalaman retak awal benda uji balok beton pada umur healing 0 hari.	127
Tabel 4. 32 Hasil pengukuran luasan retak permukaan awal benda uji balok beton pada umur healing 0 hari.	129
Tabel 4. 33 Kedalaman retak beton berdasarkan umur pengamatan	131

Tabel 4. 34 Momen Nominal dan Momen P pada benda uji balok beton (Bn).....	134
Tabel 4. 35 Healing ratio terhadap kedalaman retak balok beton berdasarkan umur pengamatan retak.....	138
Tabel 4. 36 Luasan retak permukaan berdasarkan umur pengamatan.....	144
Tabel 4. 37 Healing ratio berdasarkan luas retak permukaan terhadap umur pengamatan.....	148
Tabel 4. 38 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M400.....	152
Tabel 4. 39 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M1000.....	153
Tabel 4. 40 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M5000.....	153
Tabel 4. 41 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M400.....	153
Tabel 4. 42 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M1000.....	154
Tabel 4. 43 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M5000.....	154
Tabel 4. 44 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5.....	154
Tabel 4. 45 Kandungan mineral celah retak pada campuran Kontrol.....	155
Tabel 4. 46 Kandungan mineral beton di daerah selain celah retak pada campuran BnF20B5M5000 Kontrol.....	155
Tabel 4. 47 Jumlah koloni bakteri sporosarcina pasteurii.....	159

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton merupakan bahan dasar konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan konstruksi sipil termasuk rumah, jembatan, jalan, bandara, bangunan tinggi dan lain-lain. Beton adalah bahan komposit yang terdiri dari agregat kasar dan agregat halus yang diikat dengan campuran air dan semen. Jumlah produksi semen di dunia yang merupakan *binder* pada beton di tahun 2015 mencapai 4,1 *billion metric ton* (U.S. Geological Survey 2017). Namun produksi masifnya memberikan efek negatif pada lingkungan. Diperkirakan emisi karbon dari produksi semen di tahun 1994 mencapai 307 MtC (*million ton carbon*), emisi ini menyumbang 5% dari total emisi CO₂ global antropogenik pada tahun 1994 (Worrell dkk. 2001). Di lain sisi batubara masih akan tetap menjadi bahan bakar utama untuk pembangkit energi, sehingga produk pembakaran batubara berupa FABA akan tetap dihasilkan. Pada rencana pembangunan listrik 35 GW, diperkirakan abu batubara akan bertambah jumlahnya (Damayanti 2018). Kegiatan pengoperasian PLTU batubara akan menghasilkan limbah abu batubara (FABA) berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu endap (*bottom ash*) yang berkisar 5% dari 166,2 juta ton yaitu 8,31 juta ton di tahun 2019 (Kementerian ESDM 2015).

Kasus yang sering terjadi pada beton adalah keretakan pada beton sebagai fenomena yang tidak bisa dihindari, Fenomena ini bisa terjadi karena salah satu faktor yaitu ketika tegangan tarik beton melebihi kekuatan tariknya dan karena reaksi penyusutan pada beton. Kuat tarik pada beton bervariasi antara 8% - 15% dari kuat tekannya. Hal ini merupakan alasan utama mengapa kecilnya kuat tarik beton ini dapat menghasilkan retak pada beton (McCormac dan Brown 2014 : 16). Retak juga bisa terjadi karena penyusutan pada beton karena perbedaan proses penguapan pada air yang terkandung dalam beton. Permukaan terbuka seperti *slab-slab* lantai lebih mudah dipengaruhi oleh susut kering (*drying*

shrinkage) karena mempunyai permukaan kontak yang luas. Dalam kasus seperti itu kelembaban menguap lebih cepat di permukaan beton daripada permukaan di bawahnya dan akhirnya menimbulkan retak pada beton (Nawy 2010 : 57-58). Retak pada beton berdampak secara jangka panjang, dimana pembebanan jangka panjang dapat memperbesar keretakan mikro. Pengaruh pembebanan secara terus-menerus dan jangka panjang akan menimbulkan retak makro pada beton, yang memungkinkan air dan zat-zat lain akan masuk ke dalam beton dan menyebabkan korosi pada tulangan. Hal ini mengakibatkan turunnya kemampuan layan maupun keawetan pada beton (ACI 224R-01 : 25)

Studi tentang penyembuhan retak pada beton telah dilakukan sebelumnya. Beberapa mekanisme penyembuhan retak beton seperti metabolisme bakteri untuk menghasilkan CaCO_3 (Gollapudi, Knutson, dan Islam 1995), penambahan fly ash sebagai binder yang bersifat pozzolan dan dapat bereaksi dengan Ca(OH)_2 membentuk C-S-H baru (Tittelboom dkk. 2012), serta sedimentasi partikel pada daerah retak (de Rooij dkk. 2013), adalah mekanisme yang terbukti dapat menyembuhkan keretakan pada beton, namun pemanfaatan bakteri dan material pozzolan dianggap lebih memberikan efek pada proses penyembuhan beton. Pengendapan CaCO_3 oleh bakteri disebabkan karena bakteri menghasilkan enzim urease yang berfungsi sebagai katalisator dari proses hidrolisis urea ($\text{CO(NH}_2)_2$) membentuk ammonium (NH_4^+) dan karbonat (CO_3^{2-}) (Tittelboom dkk. 2010), serta dapat disebabkan karena metabolisme bakteri yang merubah senyawa organik kalsium laktat menjadi kalsium karbonat (Jonkers dkk. 2010). Bakteri sebagai agen penyembuh dapat secara langsung dicampur pada beton maupun dikapsulasi.

Studi dengan menggunakan spora bakteri genus *Bacillus* yang tahan alkali secara langsung diberikan pada campuran beton sebagai agen penyembuh. Prinsip pada penelitian ini yaitu bakteri berperan sebagai katalisator dan mengubah senyawa prekursor menjadi kalsium karbonat sebagai material pengisi retak. Senyawa prekursor yang ditemukan paling tepat untuk menyediakan

mekanisme *self-healing* adalah kalsium laktat, hal ini dapat ditunjukkan bahwa bakteri dan kalsium laktat sebagai dua komponen agen penyembuh menghasilkan sebesar 20-80 μm endapan mineral pada permukaan retak spesimen dengan *curing* selama 7 hari, namun pada 28 hari hanya terbentuk endapan sebesar 2-5 μm . Meskipun demikian, di dalam studi ini ditemukan bahwa kemampuan penyembuhan retak menggunakan bakteri terbatas hanya pada umur 7 hari. Kelangsungan hidup bakteri yang tidak terlindung dalam beton ditemukan hanya bertahan hingga sekitar 2 bulan saja (Jonkers dkk. 2010). Bakteri yang dimasukkan ke dalam tanah liat yang berpori sebagai pengganti agregat menunjukkan bahwa kehidupan bakteri lebih lama hingga mencapai 6 bulan (Jonkers 2011). Wiktor dan Jonkers (2011) juga menunjukkan beton yang mengandung spora bakteri yang tertanam dalam partikel tanah liat dapat tetap bertahan hidup dan berfungsi beberapa bulan setelah pengecoran beton. Ketika terjadi keretakan pada beton, kapsul yang ada di dalam beton akan rusak dan mekanisme *self-healing* akan dipicu oleh lepasnya agen penyembuh yang bereaksi di area kerusakan (Tittelboom dan Belie 2013). Wang dkk. (2014) menggunakan metode kapsulasi dengan cara mikrokapsulasi spora bakteri, mikrokapsul yang digunakan merupakan bahan yang berbasis melamin yang di dalamnya terdapat bakteri *Bacillus sphaericus*.

Salah satu proses natural dari penyembuhan retak beton diakibatkan oleh mekanisme hidrasi berkelanjutan semen. Semen yang tidak terhidrasi secara sempurna dapat ditunjukkan dengan penggunaan rasio *water-cement* rendah, penggunaan rasio (*w/c*) yang rendah menyebabkan jumlah semen yang tidak terhidrasi semakin meningkat, terjadinya retak akan menyebabkan partikel yang tidak terhidrasi bereaksi dengan air dan membentuk ikatan C-S-H baru yang dapat menutup retak beton (Granger dkk. 2007). *Fly ash*, produk sisa dari pembangkit listrik tenaga batubara mempunyai sifat pozzolan, yang berarti dapat bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terbentuk ketika proses hidrasi semen. Penambahan *fly ash* ke dalam beton sebagai *binder* dapat mempengaruhi

efisiensi penyembuhan retak, *fly ash* sebagai bahan alternatif *binder* mempunyai reaksi hidrasi yang lama dibandingkan dengan semen biasa. Setelah retak, partikel *fly ash* yang belum bereaksi dapat diaktifkan kembali dengan adanya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari proses hidrasi semen membentuk C-S-H baru yang akan menutup retak pada beton (Tittelboom dkk. 2012). Pemanfaatan *bottom ash* sebagai bahan substitusi agregat halus dapat memberikan efek kuat tekan pada beton dikarenakan sifat *pozzolan bottom ash* yang mengandung kadar silika dan dapat bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ membentuk C-S-H, namun kadar semen yang lebih rendah menggunakan 50%, 75%, dan 100% *bottom ash* menunjukkan hasil yang relatif rendah terhadap produk hidrasi semen berupa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang menyebabkan menurunnya total volume C-S-H yang terbentuk dan mengurangi kuat tekannya (Andrade, Rocha, dan Cheriaf 2007). Meskipun demikian *bottom ash* sebagai agregat halus adalah material berpori, efek ini menjadikan *bottom ash* sebagai tampungan air yang berguna untuk hidrasi berkelanjutan pada semen (Andrade 2007, Andrade 2007, Weber 2011, Barbare 2003, Bai 2005 dan Kasemchaisiri 2007 dalam Andrade, Rocha, dan Cheriaf 2009). Hal ini menunjukkan bahwa *bottom ash* dapat berfungsi untuk mendukung peran *fly ash* dalam pembentukan C-S-H pada beton.

Material penting lainnya dalam pembuatan beton adalah agregat kasar yang berupa batu kerikil. Gencarnya pembangunan infrastruktur khususnya di negara berkembang mengakibatkan ketersediaan bahan baku semakin berkurang, bahan baku material beton berupa agregat kasar yang berasal dari eksplorasi batuan alami yang berlebih dapat mengancam kondisi lingkungan (Priyadharshini, Ganesh, dan Santhi 2012). Geopolimer berbahan dasar *fly ash* dapat dimanfaatkan untuk dijadikan agregat kasar buatan pada beton. Beberapa studi agregat buatan menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* menunjukkan bahwa agregat geopolimer dapat digunakan sebagai bahan alternatif pengganti agregat alami karena berat jenis dan kekuatan beban kejut yang hampir sama dengan agregat alami (Abdullah dkk. 2015). Studi

lain tentang penggunaan geopolimer berbahan dasar *fly ash* sebagai agregat buatan pada campuran aspal beton telah diteliti dan hasilnya menyebutkan bahwa agregat buatan geopolimer ini sangat berpotensi sebagai pengganti agregat alam dengan memperhatikan kadar *alalkali activator*-nya (Karyawan, Ahyudanari, dan Ekaputri 2017). Dengan metode enkapsulasi bakteri ke dalam material tertentu selain memberikan efek memperpanjang umur bakteri, metode tersebut juga digunakan untuk melokalisir bakteri yang ada pada beton. Bakteri yang dicampurkan ke dalam beton secara langsung akan mengakibatkan penyebaran bakteri secara tidak merata dan dapat merusak spora dari bakteri yang ada dalam beton (Jonkers 2010). S.A.L. de Koster dkk. (2015) melakukan penelitian tentang enkapsulasi spora bakteri dengan pelapisan pasta geopolimer, hasil dari pelapisan tersebut diharapkan dapat dicampur langsung ke dalam matriks beton dimana material tersebut dapat selamat dari proses *mixing* beton namun cukup getas ketika retak muncul pada beton.

Dengan permasalahan yang telah disebutkan diatas, mekanisme *self healing* pada beton dapat dipengaruhi oleh bakteri dan *fly ash*. Meskipun demikian pengaruh pasta geopolimer yang berfungsi ganda sebagai kapsul/wadah bakteri sekaligus sebagai agregat buatan yang digabungkan dengan penambahan *fly ash* sebagai *binder* dan *bottom ash* sebagai agregat halus terhadap kemampuan *self healing* pada beton belum dilakukan sebelumnya. Maka dari itu peneliti melakukan studi berjudul “Pengaruh abu batubara dan healing agent terhadap kemampuan self healing beton”.

1.2. Masalah Penelitian

Masalah penelitian yang akan ditinjau pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh volume *healing agent* yang dimasukkan ke dalam pasta geopolimer sebagai agregat buatan terhadap kuat tekan?

2. Bagaimana pengaruh penambahan *fly ash* dan *bottom ash* terhadap penyembuhan luas retak permukaan dan kedalaman retak pada beton?
3. Bagaimana pengaruh volume *healing agent* yang dimasukkan kedalam agregat buatan terhadap penyembuhan luas retak permukaan dan kedalaman retak pada beton?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, terdapat batasan masalah yaitu :

1. Kemampuan *self-healing* pada beton hanya diukur melalui 2 parameter yaitu, luas retak permukaan dan kedalaman retak.
2. Menggunakan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*).
3. Tidak ada aspek ekonomi yang didiskusikan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk menganalisa pengaruh volume *healing agent* yang dimasukkan ke dalam pasta geopolimer sebagai agregat buatan terhadap kuat tekan.
2. Untuk menganalisa pengaruh penambahan kandungan *fly ash* dan *bottom ash* terhadap penyembuhan luas retak permukaan dan kedalaman retak pada beton.
3. Untuk menganalisa pengaruh volume *healing agent* yang dimasukkan kedalam agregat buatan terhadap penyembuhan luas retak permukaan dan kedalaman retak pada beton.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai referensi terhadap peneliti selanjutnya terhadap kemampuan *self-healing* pada beton.
2. Sebagai alternatif solusi untuk permasalahan retak pada bet

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Retak pada Beton

Retak merupakan pemisahan pada permukaan beton menjadi dua atau beberapa bagian tanpa membuat beton tersebut terbelah. Semua beton rentan terhadap retak, baik dalam keadaan plastis maupun dalam keadaan mengeras. Semua beton memiliki kecenderungan alami untuk retak karena faktor internal atau eksternal, umumnya dipengaruhi oleh bahan desain, metode konstruksi, beban servis, dan kondisi paparan terhadap lingkungan. Retak pada beton dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori yaitu retak struktural dan retak non-struktural. Retakan struktural disebabkan oleh beban yang diterapkan maupun beban yang berlebihan, sedangkan retak non-struktural dipengaruhi oleh hasil bahan penyusun beton dan faktor lainnya seperti suhu lingkungan, kelembaban, kondisi paparan terhadap lingkungan, dan praktek konstruksi (Bose dan Bandyopadhyay 2016). Retak struktural dapat membahayakan bangunan secara langsung, sedangkan retak non-struktural tidak memberikan efek secara langsung terhadap bangunan. Namun, bila retak non-struktural dibiarkan dengan jangka waktu yang lama maka akan menimbulkan masalah dengan masuknya air ke dalam beton yang nantinya membuat korosi tulangan pada beton dan membuat bangunan tidak aman.

Menurut Ghafur (2009), retak dapat dikenali dengan tiga parameter yaitu lebarnya, panjangnya dan pola umumnya. Lebar retak ini sulit diukur karena bentuknya yang tidak teratur. Pada fase pengerasan beton terdapat retak mikro, retak ini sulit dideteksi karena terlalu kecil. Untuk melihat lebar retak mikro biasanya digunakan mikroskop, lebar retak yang diukur bervariasi antara 0,125-1,0 μm (8 jam pertama setelah pencetakan). Lebar retak minimum yang dapat dilihat oleh mata sebesar 0,13 mm (0,005 in),

dikenal dengan retak mikro. Retak mikro apabila dibebani akan menjadi retak mayor atau retak yang lebih besar.

2.2. Faktor yang mempengaruhi Efisiensi Proses Self-Healing pada Beton

Menurut Meharie dkk. (2017) ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi proses *self healing* pada beton. Beberapa faktor sangat penting dalam mempengaruhi efisiensi proses *self healing* beton. Faktor-faktor tersebut antara lain :

a. Ukuran Retak

Tittelboom dkk. (2013) menyampaikan bahwa proses penyembuhan secara alami dapat menyembuhkan retak selebar 5-300 μm . Sahmaran dkk. (2015) menyadari bahwa semakin besar lebar retak yang dialami maka semakin sulit proses penyembuhan dapat dilakukan yang dimana kemampuan perbaikan agen penyembuh mikroba yang digunakan terbatas pada spesimen dengan lebar retakan hingga sebesar 0,8 mm. Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil lebar retak pada beton maka semakin mudah untuk diperbaiki secara sempurna.

b. Umur Beton dan Umur Retak

Semakin lama umur spesimen, efisiensi penyembuhan semakin berkurang. Luo dkk. (2015) dan Wang dkk. (2015) menyebutkan bahwa efisiensi penyembuhan menurun dengan bertambahnya umur spesimen.

c. Suhu, Tekanan, dan Waktu Penyembuhan

Performa perbaikan akan meningkat seiring dengan suhu dan tekanan yang lebih tinggi dan waktu penyembuhan yang lebih lama (Wang dkk. 2015).

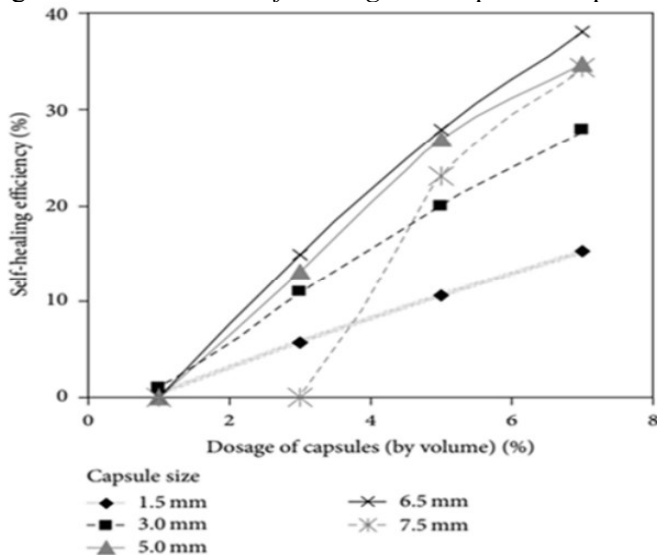
d. Ketersediaan Air dan Udara

Ketersediaan air sangat penting bagi proses perbaikan retak. Semua studi yang telah dilakukan mengatakan bahwa ketersediaan air sangat penting untuk memudahkan penyembuhan retakan (Bhaskar 2016). Sahmaran dkk. (2015) juga mengatakan bahwa retak menyembuhkan sendiri dengan proses reaksi hidrasi

pada partikel semen yang tidak terhidrasi menghasilkan ikatan C-S-H dan mekanisme pengendapan kalsium karbonat yang membutuhkan air dan udara.

e. Dosis, Ukuran, dan Penyebaran Kapsul

Huang dan Ye (2016) mempelajari hubungan antara efisiensi penyembuhan dan dosis kapsul dengan ukuran yang berbeda. Mereka menyadari bahwa efisiensi penyembuhan meningkat seiring dengan bertambahnya kapsul. Studi menunjukkan bahwa efisiensi penyembuhan tertinggi apabila ukuran kapsul 6,5 mm dan meningkat 15% bila dosis kapsul 3%. Wang dkk. (2015) juga menyatakan bahwa kapasitas agen penyembuh tergantung pada jumlah kapsul yang tersebar di dalam beton. Mereka menyadari bahwa kapsul yang tersebar secara lokal, semakin banyak agen penyembuh akan tersedia dan penyembuhan lokal akan lebih efektif. **Gambar 2.1** di bawah ini menunjukkan hubungan antara efisiensi *self healing* terhadap dosis kapsul.



Gambar 2.1 Efisiensi *Self Healing* dengan jumlah kapsul yang berbeda

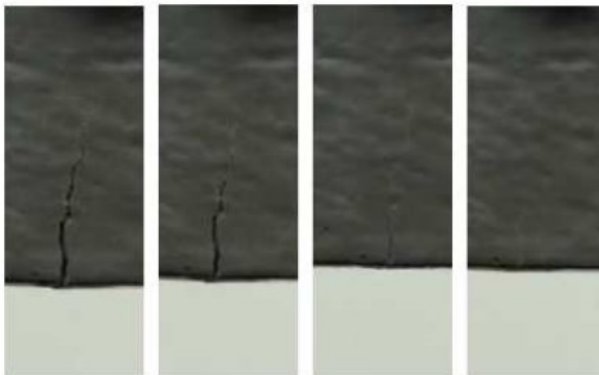
Sumber : Huang dan Ye (2016)

f. Agen Penyembuh dan Kadar Viskositasnya

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan agen penyembuh yang berbeda untuk meningkatkan efisiensi penyembuhan saat retakan terjadi pada beton atau mortar sejak beberapa tahun yang lalu. Viskositas agen penyembuh adalah parameter yang sangat penting. Viskositas sebaiknya tidak terlalu tinggi agar mengalir secara baik keluar dari kapsul untuk mengisi celah. Di sisi lain, jika viskositasnya terlalu rendah, agen bisa bocor keluar dari retakan atau bisa hilang karena penyerapan oleh campuran beton di sekitarnya (Tittelboom dkk. 2013).

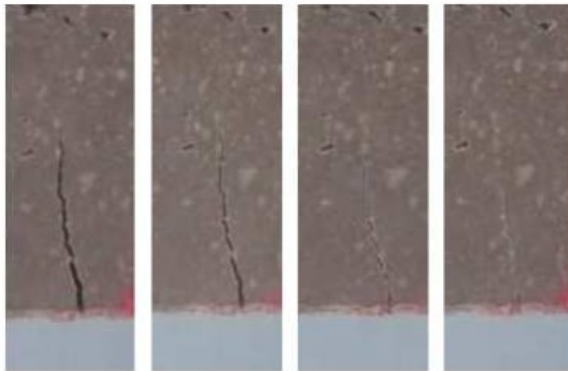
g. Komposisi Material Beton

Sun dkk. (2013) mengidentifikasi beberapa factor yang mempengaruhi kapasitas penyembuhan sendiri. Mereka umumnya menyadari bahwa karakteristik material pada beton mempengaruhi kemampuan penyembuhan retak. Mereka juga meneliti kekakuan balok dengan material yang berbeda seperti kekakuan balok yang terbuat dari penguangan tanah liat dan *silicone* serta penguangan *epoxy* semen dan *epoxy* mortar. Mereka menunjukkan perbaikan retak dengan material tersebut melalui **Gambar 2.2 dan Gambar 2.3** di bawah.



Gambar 2. 2 Penutupan retak dari balok beton yang terbuat dari penguangan epoxy semen dan epoxy mortar.

Sumber : Sun dkk. (2013)



Gambar 2. 3 Penutupan retak dari balok beton yang terbuat dari penguangan tanah liat dan silikon
Sumber : Sun dkk. (2013)

h. Agen Ekspansif dan Campuran Mineral

Efek penambahan mineral seperti bahan berbasis silika, bahan ekspansif kimiawi, mineral pembengkakan dan komponen kristal telah dilakukan pada eksperimen yang menggunakan spesimen mortar dengan pembebanan yang menyebabkan retak mikro dengan lebar rata-rata 0,05 mm. Hasil tes menunjukkan bahwa sebagian besar retakan berhasil sembuh dalam 7 hari pertama. Dalam penelitian lain, dengan menggunakan campuran mineral lebar retak 0,15 mm dan 0,22 mm sembuh sepenuhnya dalam jangka waktu 3 dan 33 hari berturut turut (Fawzy 2016).

i. Konsentrasi Ion Ca^{2+}

Huang dan Ye (2013) menyelidiki efek ion Ca^{2+} pada proses penyembuhan retak pada beton. Mereka menambahkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ke dalam air sebagai agen penyembuh untuk mengeksplorasi dan membandingkan perilaku penyembuhan retakan menggunakan larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan air suling. Ditemukan bahwa penyembuhan lebih cepat terjadi pada larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ daripada air suling. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi

ion Ca^{2+} yang lebih tinggi dapat meningkatkan efisiensi penyembuhan retak pada beton.

j. Mekanisme Perbaikan yang Dipakai

Mekanisme yang paling dipercaya untuk menghasilkan penyembuhan retak pada beton yaitu, mekanisme terbentuknya kalsium karbonat dan kalsium hidroksida yang merupakan metode paling efektif untuk menyembuhkan beton secara alami (Talaiekhozani dkk. 2014).

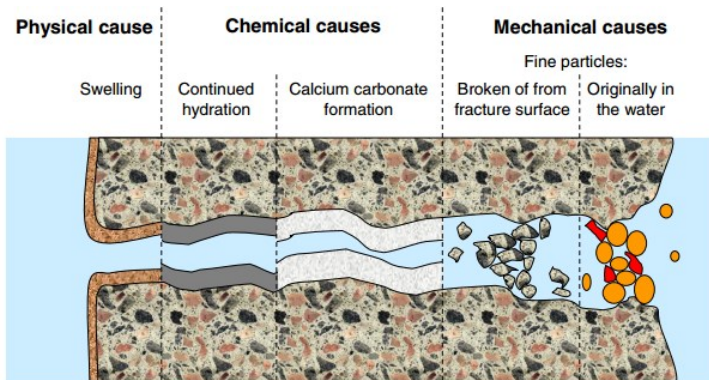
2.3. Mekanisme *Self Healing*

Menurut Huang dkk. (2016) dalam ulasannya menyimpulkan bahwa mekanisme *self healing* dapat dikelompokkan menjadi 4 kategori yaitu :

- 1). Autogenous *self healing*,
- 2). *Self healing* berbasis campuran mineral,
- 3). *Self healing* berbasis bakteri,
- 4). *Self healing* berbasis agen adhesive.

2.4. *Autogenous Self Healing*

Autogenous self healing merupakan proses *self healing* yang dimana proses tersebut memakai komponen material di dalam beton meskipun material tersebut tidak didesain khusus untuk melakukan mekanisme *self healing*. Menurut de Rooij dkk (2013) penyebab terjadinya *autogenous self healing* dibagi menjadi 3 penyebab, termasuk penyebab fisik, penyebab kimia, dan penyebab mekanis. Ketiga mekanisme tersebut ditunjukkan pada **Gambar 2.4** di bawah.



Gambar 2. 4 Penyebab dari *autogenous self healing*
 Sumber : de Rooij dkk. (2013)

Penyebab fisik terjadi karena pembengkakan dari pasta semen yang terhidrasi di permukaan retak. Fenomena ini terjadi ketika air diserap oleh pasta semen yang terhidrasi dan mengisi celah dari unsur-unsur penyusun pasta semen yang terhidrasi. Efek dari pembengkakan ini ternyata menyebabkan reduksi aliran fluida pada beton yang mengalami retak hingga kurang dari 10%.

Terdapat dua penyebab kimia. Pertama adalah hidrasi berkelanjutan dari semen yang tidak bereaksi karena kurangnya air. Ketika air masuk melalui retakan, maka partikel semen yang belum terhidrasi akan bereaksi dengan air dan membentuk produk baru yang akan mengisi celah dari retak tersebut. Produk dari reaksi hidrasi ini menempati ruang dengan besar sekitar dua kali ukuran diameter *klinker* semen. Hidrasi berkelanjutan ini tidak bisa disebut sebagai penyebab utama dalam penyembuhan retak beton secara sempurna, tapi jika retak kurang dari atau mencapai 0,1 mm dan dengan asumsi bahwa terjadi pembengkakan dan reaksi hidrasi secara terus menerus maka retak akan bisa menutup dengan sempurna. Namun apabila lebar retak lebih dari 0,1 mm, efek dari mekanisme ini menjadi kecil.

Penyebab kimia yang kedua adalah pembentukan kalsium karbonat pada permukaan retakan. Pembentukan kalsium karbonat

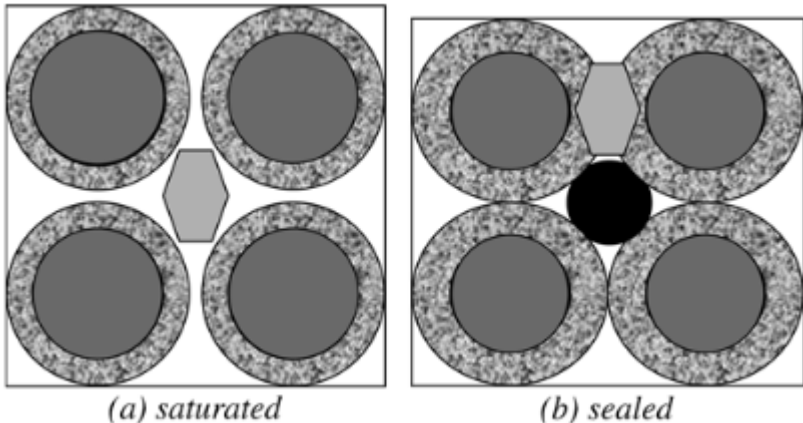
ini terjadi karena ion Ca^{2+} yang bereaksi dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) dan membentuk CaCO_3 yang mengisi celah pada retak. Ion Ca^{2+} berasal dari $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang merupakan hasil dari proses hidrasi semen, sementara ion CO_3^{2-} berasal dari air yang memasuki celah retak. Reaksi pembentukan CaCO_3 ini tergantung pada suhu, pH, dan konsentrasi dari $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Mekanisme ini memberikan efek kontribusi yang paling penting dalam penyembuhan retak beton.

Terdapat dua penyebab mekanis yang dapat berkontribusi dalam proses penyembuhan retak yaitu, adanya partikel halus di dalam air yang melewati retak dan pecahan partikel beton kecil. Dua mekanisme tersebut dapat mengisi celah pada retakan beton namun mekanisme ini hanya menimbulkan efek yang tidak terlalu signifikan.

2.5. Partikel Semen yang Tidak Terhidrasi

Di dalam material beton, tidak semua partikel semen terhidrasi pada awal waktu pengecoran. Dalam kebanyakan beton khususnya pada beton yang mempunyai kadar w/c yang rendah, jumlah semen yang tidak terhidrasi diperkirakan bisa mencapai 25% atau lebih. Partikel semen yang tidak terhidrasi ini berada dalam beton dan dapat bertahan dengan waktu yang lama. Maka dengan masuknya air ke dalam beton proses *self healing* pada beton dapat terjadi (Li 2007, Breugel 2007 dalam Lv dan Chen 2012).

Bentz dan Stutzman (2006) melakukan studi tentang perbandingan karakteristik hidrasi dan mikrostruktur dari pasta semen dengan kadar rasio *water-cement* (w/c) 0,35 dan 0,435 yang di-*curing* dalam kondisi *saturated* dan *sealed*. **Gambar 2.5 a dan b** menunjukkan mengenai model dari partikel semen yang di-*curing* pada kondisi yang berbeda. Pada kondisi *saturated* semua kapiler partikel terisi dengan air, sedangkan untuk kondisi *sealed* pori yang kosong akan terbentuk yang menyebabkan ketersediaan ruang bagi air. Namun pada kedua kondisi tersebut terlihat masih ada bagian partikel semen yang tidak terhidrasi.

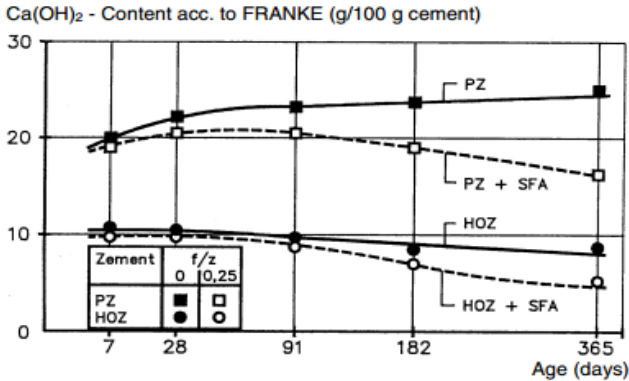


Gambar 2. 5 4 Model mikrostruktur partikel untuk pasta semen yang terhidrasi, ditunjukkan hidrasi dalam kondisi jenuh dan tertutup. Abu-abu hitam menunjukkan pasta semen yang tidak terhidrasi, material yang mempunyai tekstur dan mempunyai warna abu-abu muda adalah produk dari hidrasi. Putih adalah air yang mengisi pori dan hitam adalah pori yang kosong.
Sumber : Bentz dan Stutzman (2006)

2.6. Efek *Pozzolan* terhadap $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Ketika semen terhidrasi, kalsium silikat hidrat, aluminat dan kalsium hidroksida terbentuk. Kalsium hidroksida terlarut dalam air yang menyediakan ion kalsium dimana ion tersebut diperlukan untuk pembentukan kalsium karbonat di retakan. Di dalam semen, sebagian kalsium hidroksida digunakan untuk pembentukan produk hidrasi menggunakan *fly ash* atau pozzolan lainnya. Reaksi karbonasi sangat dipengaruhi oleh jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di dalam campuran beton. Penambahan material pozzolan dapat mengurangi jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di dalam campuran beton. Penambahan *fly ash* dan *blast furnace slag* di dalam campuran semen dapat mengurangi jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sampai pada hari ke 365. Dapat dilihat pada **Gambar 2.6** bahwa jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada semen Portland lebih banyak dibandingkan dengan semen yang

mengandung *fly ash* dan *blast furnace slag* yang mengurangi jumlah kalsium hidroksida dengan proses hidrasi yang berlanjut. Maka pozzolan dengan reaktifitas rendah lebih direkomendasikan untuk menghasilkan kemampuan *self healing* pada beton (de Rooij dkk. 2013).



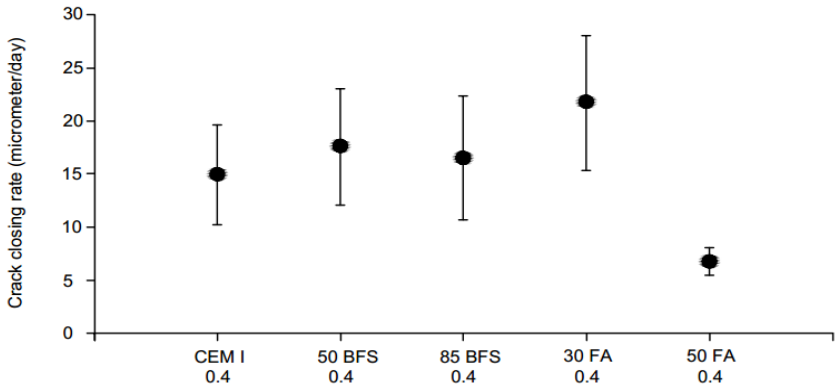
Gambar 2. 6 Jumlah kalsium hidroksida berdasarkan penambahan material pozzolan. PZ = Semen Portland, HOZ= *blast furnace slag cement*, SFA = *fly ash*
Sumber : de Rooij dkk. (2013)

2.7. *Fly ash* sebagai Material *Autogenous Healing*

Fly ash dapat digunakan sebagai material *autogenous healing* dalam beton karena memiliki sifat pozzolan yang dimana dapat mengikat Ca(OH)₂, oleh karena *fly ash* bereaksi lebih lama dibandingkan dengan klinker semen Portland, mereka meningkatkan rentang waktu terhadap ketersediaan klinker semen yang tidak terhidrasi dalam beton. Kemampuan *fly ash* sebagai material *autogenous healing* telah diteliti oleh Tittelboom dkk (2012).

Menurut Tittelboom dkk. (2012), penggantian semen menggunakan 30% *fly ash* menghasilkan laju penyembuhan retak rata-rata per hari sebesar 20 μm/hari. Hasil ini terlihat lebih besar

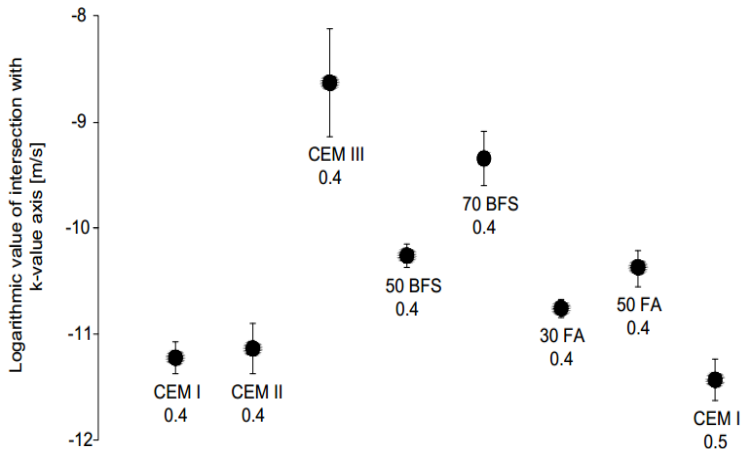
apabila dibandingkan dengan spesimen yang hanya menggunakan semen Portland (**Gambar 2.7**).



Gambar 2. 7 Laju dari penyembuhan retak beton untuk campuran yang berbeda-beda. Titik merepresentasikan nilai rata-rata.

Sumber : Tittelboom dkk. (2012)

Dalam analisa statistik dapat terlihat bahwa perbedaan signifikan efisiensi *autogenous healing* terjadi diantara CEM I dan campuran semen yang telah disubstitusi menggunakan *fly ash* atau *blast furnace slag*. Hal ini menunjukkan kesimpulan bahwa substitusi sebagian dari semen oleh *fly ash* menghasilkan peningkatan efisiensi penyembuhan retak. Berkurangnya permeabilitas air dengan adanya proses *autogenous healing* menjadi bukti lain terhadap efisiensi penyembuhan retak beton yang ditampilkan pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 Pengurangan permeabilitas air dikarenakan proses *autogenous healing* untuk setiap campuran.

Sumber : Tittelboom dkk. (2012)

2.8. *Self Healing* berbasis Bakteri

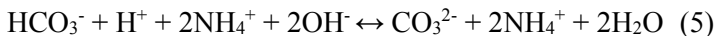
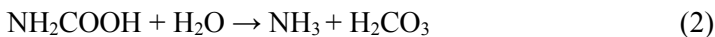
Beberapa peneliti mengembangkan ide tentang meningkatkan daya tahan beton dengan menggunakan bakteri untuk menyembuhkan retak pada beton. Bakteri ini menghasilkan pengendapan kalsium karbonat melalui beberapa mekanisme seperti hidrolisis urea dan pengubahan senyawa mineral kalsium laktat / pengubahan nutrisi melalui metabolisme bakteri.

2.8.1. Hidrolisis Urea

Bang, Galinat, dan Ramakrishnan (2001) dalam Sangadji (2017) melakukan penelitian terhadap bakteri *Bacillus Pasteuri* yang diimmobilisasi pada Poliuretan untuk mengendapkan kalsium karbonat. Ramachandran (2001) dalam Sangadji (2017) juga menggunakan bakteri *Bacillus Pasteurii* yang dimasukkan pada mortar yang retak.

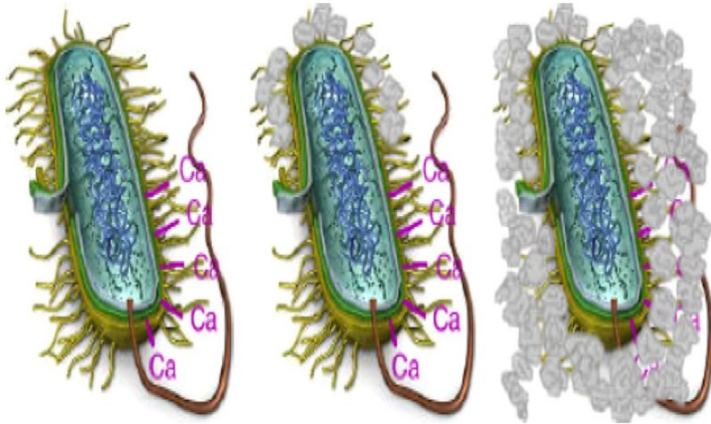
Tittelboom dkk. (2010) menggunakan bakteri yang memproduksi urease yang berfungsi sebagai katalisator proses

hidrolisis urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) menjadi ammonium (NH_4^+) dan karbonat (CO_3^{2-}). Pertama, 1 mol dari urea terhidrolisis menjadi 1 mol karbamat dan 1 mol ammonia (reaksi 1). Karbamat kemudian terhidrolisis menjadi 1 mol ammonia dan *carbonic acid* (reaksi 2). Produk ini kemudian membentuk 1 mol bikarbonat dan 2 mol ammonium dan ion hidroksida (reaksi 3 dan 4). 2 reaksi terakhir memberikan efek terhadap peningkatan ph, yang menghasilkan ion karbonat (reaksi 5). Proses pembuatan urease untuk hidrolisis urea menjadi karbonat dan ammonium adalah sebagai berikut (Tittelboom dkk. 2010).



Dinding sel bakteri yang bermuatan negatif menarik kation dari lingkungan, termasuk ion Ca^{2+} untuk mendepositkan di dinding sel. Ion Ca^{2+} secara terus menerus bereaksi dengan ion CO_3^{2-} yang menyebabkan pengendapan CaCO_3 di permukaan dinding sel yang menyediakan tempat nukleasi (reaksi 6 dan 7) (Tittelboom dkk. 2010). **Gambar 2.9** menunjukkan gambaran pengendapan CaCO_3 pada dinding sel bakteri.





Gambar 2. 9 Pengendapan kalsium karbonat pada dinding sel.

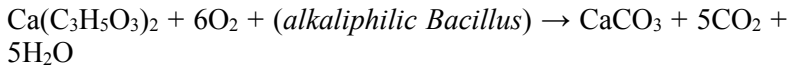
Sumber : Vijay (2017)

2.8.2. Perubahan Nutrisi melalui Metabolisme Bakteri

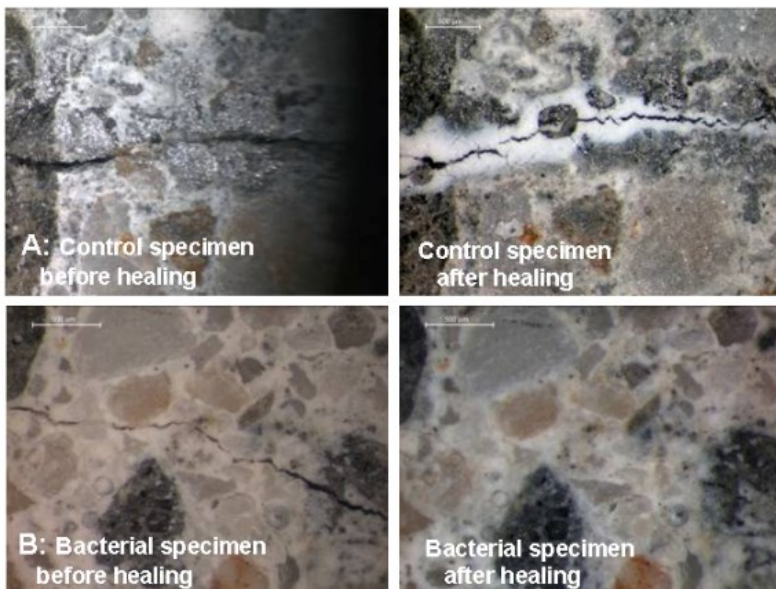
Pendekatan yang berbeda dilakukan oleh Jonkers dkk. (2010) dan Jonkers (2011) yang dimana mereka menggunakan mekanisme lain dalam pembentukan CaCO_3 oleh bakteri. Bakteri tersebut merubah nutrisi melalui metabolisme bakteri untuk menghasilkan CaCO_3 dan nutrisi yang digunakan adalah kalsium laktat. Bakteri tersebut harus tahan terhadap basa dan toleran terhadap oksigen (*aerobic*). Bakteri yang tahan terhadap kondisi tersebut ada pada bakteri dengan jenis genus *Bacillus*. Alasan mengapa bakteri ini harus tahan terhadap basa dikarenakan campuran beton berkarakter mempunyai nilai ph diantara 11 dan 13.

Dalam penelitian Jonkers dkk. (2010) menunjukkan bakteri bersama dengan nutrien kalsium laktat merepresentasikan dua komponen dari agen penyembuh yang menghasilkan sejumlah 20-80 μm pengendapan mineral pada permukaan retak pada umur 7 hari yang di-*curing*. Pengendapan mineral seperti kalsium karbonat ini terbentuk karena metabolisme bakteri yang mengubah

kalsium laktat. Bakteri bermetabolisme mengubah 1 mol kalsium laktat, $(\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2)$, menjadi 1 mol kalsium karbonat seperti ditunjukkan pada reaksi di bawah.



Gambar 2.10 menunjukkan bukti dari penyembuhan retak pada beton menggunakan bakteri yang mengubah kalsium laktat menjadi kalsium karbonat yang dilakukan oleh Jonkers (2011).



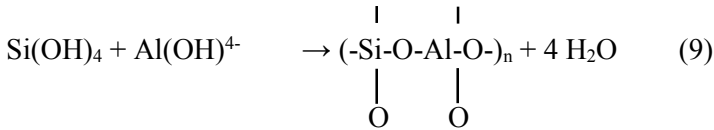
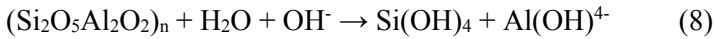
Gambar 2. 10 Gambar mikroskopik (40x perbesaran) dari spesimen kontrol sebelum penyembuhan (A) dan spesimen yang mengandung bakteri (B) spesimen beton sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) penyembuhan (2 minggu perendaman di air. Pengendapan mineral terjadi dominan di dekat permukaan retak beton pada spesimen kontrol tetapi pengendapan mineral terjadi

di dalam retak pada spesimen yang mengandung bakteri. Efisiensi penyembuhan terjadi pada semua 6 spesimen yang mengandung bakteri dan 2 dari 6 spesimen kontrol.

Sumber : Jonkers (2011)

2.9. Agregat Buatan Geopolimer

Istilah 'geopolimer' pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978 untuk mendeskripsikan mineral *binder* dengan komposisi kimia yang menyerupai zeolite tapi dengan mikrostruktur yang *amorphous*. Geopolimer berbeda dengan portland/pozzolan semen, geopolimer tidak menghasilkan CSH untuk pembentukan kekuatan matriks, namun menggunakan polikondensasi silika dan prekursor alumina untuk mencapai kekuatannya (Parshwanath, Lakshmanan, dan Nataraja 2011). Geopolimer pada dasarnya terdiri dari pengulangan monomer sialat (-Si-O-Al-O-). Berbagai bahan aluminosilikat seperti kaolinit, feldspar, dan residu industri seperti fly ash telah digunakan sebagai bahan baku dalam teknologi geopolimerisasi. Reaktivitas dari aluminosilikat ini tergantung dari sifat kimia dan komposisi mineral yang ada, kriteria utama untuk mencapai geopolimer yang stabil adalah dengan menggunakan sumber material yang bersifat cenderung *amorphous* dan mudah untuk melepas aluminium. Alkali aktivator seperti NaOH, KOH, Na₂SiO₃, dan K₂SiO₃ digunakan untuk mengaktifkan material aluminosilikat (Singh dkk. 2015). Representasi yang skematis pada pembentukan geopolimer berbahan dasar fly ash ditunjukkan pada (reaksi 8 dan 9). Di dalam kondisi lingkungan yang cenderung basa, polimerisasi terjadi ketika aluminosilikat reaktif dilarutkan dengan cepat dan [SiO₄]⁻ dan [AlO₄]⁻ dilepaskan dalam larutan yang kemudian dihubungkan dengan prekursor polimer dengan berbagi atom oksigen membentuk ikatan Si-O-Al-O (Komnitsas 2011). Reaksi dari pembentukan geopolimer dapat dilihat pada reaksi di bawah (Singh dkk. 2015).



Selain fungsi geopolimer sebagai material alternatif pengganti beton konvensional, para peneliti juga telah melakukan studi terhadap agregat buatan geopolimer sebagai pengganti agregat natural. Karyawan, Ahyudanari, dan Ekaputri (2017) melakukan studi tentang agregat buatan geopolimer berbahan dasar *fly ash*, agregat buatan ini terbuat dari pasta geopolimer yang dibuat dalam 3 campuran yang berbeda menggunakan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yaitu 1.5, 2, dan 2.5 dengan molaritas NaOH sebesar 8 molar dan komposisi *fly ash* : alkali aktivator yaitu 75% : 25%. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa besarnya kuat tekan dipengaruhi oleh rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, semakin kecil rasio yang ada semakin besar kekuatan tekan geopolimer diperoleh. Kuat tekan yang dihasilkan dari studi tersebut ditemukan adanya korelasi antara kuat tekan dari agregat alami sehingga dapat berpotensi untuk menggantikan agregat alami. Jo, Park, dan Park (2007) membuat agregat ringan buatan geopolimer, pasta geopolimer yang mengeras kemudian digranulasi untuk menghasilkan ukuran agregat maksimum nominal yang ditentukan (**Gambar 2.11**). Abdullah dkk. (2010) juga melakukan studi dengan membandingkan sifat mekanikal dari agregat kasar buatan geopolimer *fly ash* dengan agregat alami. Disebutkan bahwa dari hasil tes berat jenis, agregat alami mempunyai berat jenis 2.7092 g/cm^3 sementara agregat buatan mempunyai berat jenis sebesar 2.1336 g/cm^3 . Pada *aggregate impact test* agregat buatan mempunyai nilai 19.6% sedangkan agregat alami mempunyai nilai 8.62%. Sedangkan untuk tes penyerapan air, agregat buatan memiliki angka penyerapan air sebesar 6.86% dan agregat alami memiliki angka penyerapan air sebesar 3.86%. Hal tersebut menunjukkan bahwa agregat buatan ini dapat menggantikan

angregat alami karena memiliki sifat mekanis yang sebanding dalam nilai berat jenis dan nilai tumbukan (*impact value*).

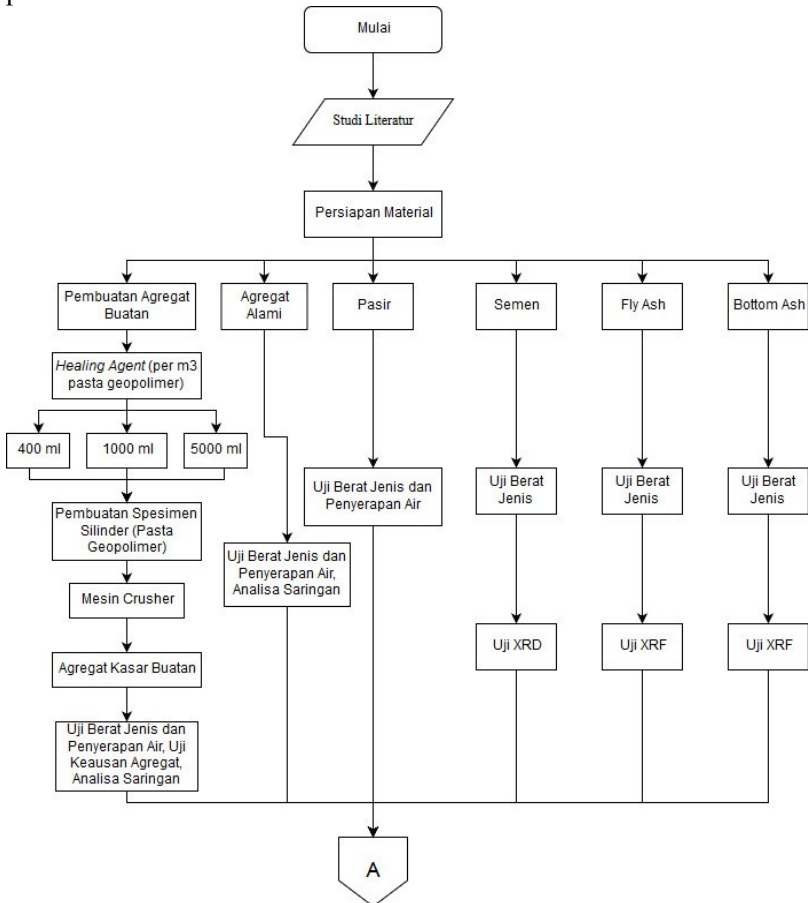


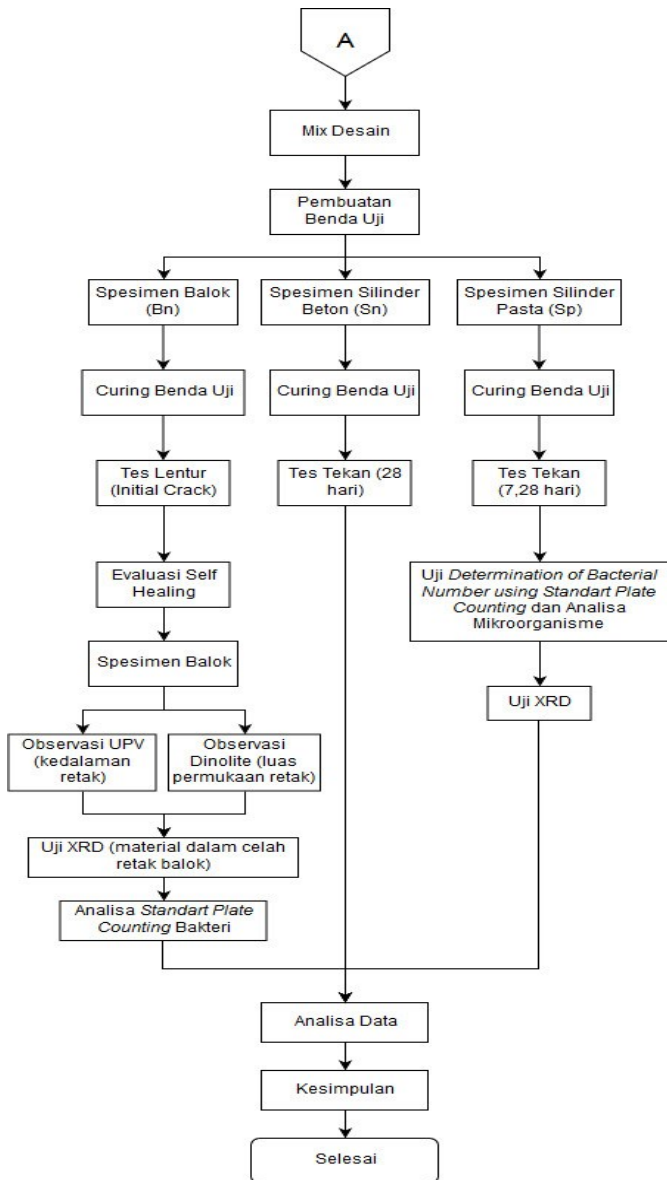
Gambar 2. 11 Bentuk agregat buatan setelah digranulasi

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

Pada bab ini dijelaskan langkah-langkah yang harus dikerjakan dalam penelitian. Untuk menjawab rumusan masalah dari penelitian ini, bagan alir penelitian diusulkan sebagai berikut pada **Gambar 3.1**





Gambar 3. 1 Bagan alir dari metodologi penelitian.

3.2. Studi Literatur

Studi literatur mencakup review dari beberapa jurnal, prosiding, dan perraturan yang berkaitan dengan mekanisme *self healing*. Beberapa standar tes digunakan untuk menganalisa kemampuan penyembuhan pada beton.

3.3. Persiapan Material

Persiapan material meliputi :

- a. *Ordinary Portland Cement* (OPC)
Semen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan semen tipe 1 / *Ordinary Portland Cement* (OPC) yang didapat dari PT. Semen Indonesia, Tbk. OPC digunakan pada penelitian ini karena OPC tidak mengandung material pozzolan yang dapat mempengaruhi mekanisme penyembuhan pada beton.
- b. Agregat Kasar Alami (Batu Pecah)
Batu Pecah digunakan untuk membuat spesimen balok beton. Digunakan agregat dengan ukuran maksimum 20 mm.
- c. Agregat Halus (Pasir)
Pasir digunakan untuk membuat spesimen balok beton maupun mortar dogbone. Penyaringan dan pencucian dilakukan terlebih dahulu sebelum pasir siap digunakan.
- d. Agregat Halus (*Bottom Ash*)
Bottom Ash yang digunakan dalam penelitian ini didapat dari PLTU Suralaya, *Bottom Ash* yang didapat harus dalam kondisi halus, yang nantinya dilakukan proses ayakan dan berhasil lolos ayakan no.4 sehingga termasuk kategori agregat halus.
- e. *Fly Ash*
Fly Ash yang digunakan diperoleh dari PLTU Suralaya dengan tipe F. *Fly Ash* ini digunakan

untuk substitusi semen OPC yang dimana kondisinya harus halus dan lolos ayakan no. 200.

f. *Healing Agent*

Healing agent yang digunakan dalam penelitian ini mengandung *Sporascina Pasteurii* yang didalamnya terdapat nutrisi. Dasar pemilihan bakteri ini adalah karena peneliti sebelumnya menggunakan bakteri jenis genus *bacillus* bakteri ini tahan terhadap lingkungan alkali (*alkaliphilic*) dan toleran terhadap oksigen (*aerob*) (Jonkers 2010).

g. Larutan NaOH atau Sodium Hidroksida

Larutan ini adalah larutan yang berfungsi sebagai campuran alkali yang nantinya akan bereaksi ketika bercampur denan *Fly Ash*.

h. Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

Sodium silikat merupakan polimer silicon-oksigen yang mengandung ion natrium (Na^+), dimana nantinya berguna menjadi katalisator atau zat yang mempercepat suatu reaksi kimia dalam pembuatan beton geopolimer.

3.4. Agregat Kasar Buatan

Agregat buatan ini didapatkan dari hasil *crusher* spesimen pasta yang didalamnya terkandung mikroba dengan komposisi yang berbeda-beda. Dibuat benda uji yang mengandung volume *healing agent* yang berbeda-beda. Agregat buatan ini harus mengalami penyesuaian dengan peraturan ASTM mengenai agregat pada umumnya. Berdasarkan literatur, beberapa komposisi perbandingan didapatkan. Hardjito dan Rangan (2005) melakukan penelitian mengenai campuran beton geopolimer, perbandingan massa antara sodium silikat dan sodium hidroksida berada di antara 0.4 sampai 2.5, maka pada penelitian ini digunakan perbandingan massa sebesar 2. Sedangkan rasio perbandingan massa antara alkali aktivator dibanding *fly ash* sekitar 0.3 sampai 0.4, namun pada

penelitian ini memakai rasio 0.25. Bagio dkk. (2017) melakukan penelitian pada kuat tekan beton menggunakan bakteri dengan volume 200 ml/m³ sampai 1000 ml/m³. Pada penelitian tersebut menunjukkan beton dengan bakteri cenderung lebih besar kuat tekannya daripada beton normal, hal ini dapat disimpulkan bahwa pebentukan CaCO₃ oleh bakteri terjadi. Maka pada penelitian ini bakteri yang digunakan adalah *Bacillus Pasteurii*, dengan volume *healing agent* (mikroba + nutrient) 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³. Berikut disajikan gambar langkah-langkah membuat agregat buatan pada **Gambar 3.2**. Sebagian untuk memenuhi kebutuhan agregat kasar buatan, penulis langsung mengecor dalam jumlah banyak kemudian menuangkan hasil pengecoran pasta pada kresek besar, kemudian membagi hasil pengecoran tersebut setelah mengeras menjadi 4 bagian, lalu per bagian dimasukkan ke dalam mesin crusher.



Gambar 3. 2 Proses pembuatan agregat kasar buatan.

3.5. Analisa Material

Analisa material bertujuan untuk mengetahui apakah material yang digunakan sudah sesuai standar atau tidak. Analisa material yang dilakukan adalah sebagai berikut.

3.5.1. *Binder*

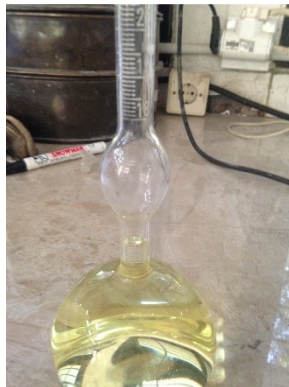
Binder yang dianalisa merupakan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) yang diperoleh dari Semen Gresik dan *fly ash* kelas F, pengujian yang dilakukan terhadap OPC yaitu pengujian berat jenis semen portland (ASTM 188-16) dan pengujian XRD. Sementara pengujian yang dilakukan terhadap *fly ash* yaitu pengujian berat jenis semen portland (ASTM 188-16) dan pengujian XRF.

a. Metode Pengujian Berat Jenis Semen Portland (ASTM 188-16)

Metode tes ini digunakan untuk mendapatkan nilai berat isi semen portland, yang digunakan untuk pengendalian mutu semen.

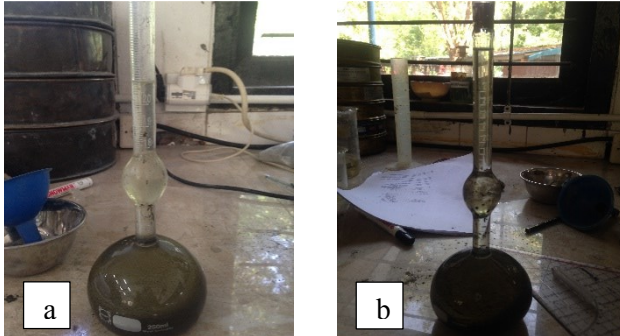
- Alat dan bahan :
 1. *Le Chatelier Flask*, dengan ketentuan seperti tercantum pada **Gambar 3.5**.
 2. Timbangan kapasitas 200 gram dengan ketelitian ± 2 gram.
 3. Kerosin bebas air atau naphtha yang mempunyai berat jenis 62 API (American Petroleum Institute).
 4. Baki diameter 40 cm, tinggi 30 cm yang penuh diisi air bersih.
 5. Thermometer.
 6. Semen OPC

- Prosedur Pelaksanaan :
 1. Mengisi *Le Chatelier Flask* dengan kerosin atau minyak tanah sampai permukaan kerosin dalam botol terletak pada skala antara 0-1, mengeringkan bagian dalam botol di atas permukaan cairan, ditunjukkan pada Gambar dibawah.



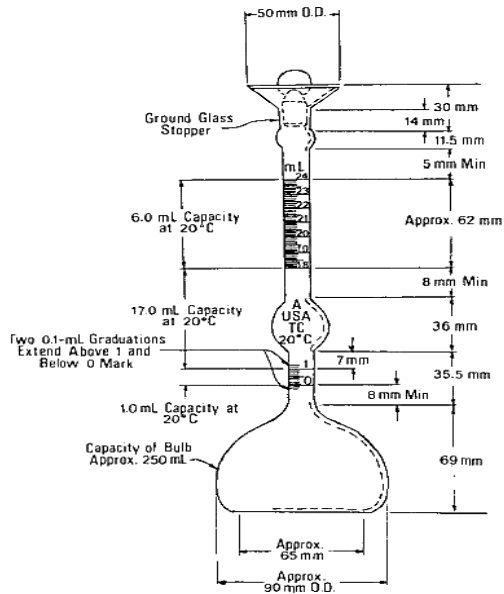
Gambar 3.3 Kerosin dalam skala antara 0-1

2. Merendam botol-botol *Le Chatelier Flask* yang dimaksud pada butir 1 ke dalam baki berisi air, biarkan botol-botol itu terendam selama ± 60 menit agar suhu botol itu tetap dan suhu cairan dalam botol sama dengan suhu air.
3. Setelah suhu cairan dalam botol dan air sama, membaca tinggi permukaan terhadap skala botol, misalnya V1.
4. Memasukkan semen sedikit demi sedikit ke dalam botol, harus diusahakan seluruh sampel masuk ke dalam cairan dan hindarkan adanya semen yang menempel di dinding dalam botol di atas permukaan cairan.



Gambar 3. 4 a) *Le Chatelier Flask* berisi semen OPC b) *Le Chatelier Flask* berisi *fly ash*

5. Setelah seluruh benda uji dimasukkan, goyangkan perlahan-lahan botol itu selama ± 30 menit, sehingga seluruh gelembung udara dalam benda uji keluar.
6. Merendam botol yang berisi benda uji dan cairan itu selama ± 60 menit, sehingga suhu larutan dalam botol sama dengan suhu air, lalu membaca tinggi permukaan larutan pada skala botol, misalnya V_2 .
7. Menghitung berat W dan berat jenis semen portland.



Gambar 3.5 *Le Chatelier Flask* (ASTM C188,2016)

- Perhitungan :

$$\rho = \frac{\text{berat semen}}{V_2 - V_1} \dots (3.1)$$

Dimana :

ρ = berat isi semen portland
 $V_2 - V_1$ = isi kerosin atau naphta yang dipindahkan oleh benda uji

$$G_{sp} = \rho / G_a \dots (3.2)$$

Dimana :

G_{sp} = berat jenis semen portland
 G_a = berat isi air suling pada suhu 4°C
 (=1 gr/cm³).

b. Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk OPC

X-Ray Diffraction digunakan untuk menentukan kandungan senyawa mineral dan persentase dari material yang ada dalam benda uji. Data senyawa mineral ini sangat penting agar dapat dianalisa material apa yang menimbulkan kemampuan penyembuhan dari benda uji. Pengujian dilakukan di Institut Teknologi Bandung. Hasil yang didapat kemudian diplot dalam bentuk grafik dan dicocokkan dengan data mineral yang ada pada software Match.

c. Pengujian XRF (*X-Ray Fluoroscene*) untuk Fly Ash

X-Ray Fluoroscene digunakan untuk menentukan elemen kimia dan persentase dari material yang ada dalam benda uji. Data elemen kimia ini sangat penting agar dapat dianalisa sifat materialnya, menentukan mineralogi dalam analisis XRD dan menganalisa kemampuan penyembuhan pada benda uji. Pengujian ini dilakukan di PT. Sucofindo.

3.5.2. Agregat Halus

Analisis yang dilakukan terhadap agregat halus pasir yaitu pengujian berat jenis dan penyerapan air (ASTM C128-01) , sementara pengujian yang dilakukan pada *bottom ash* yaitu pengujian berat jenis dan penyerapan air (ASTM C128-01), dan pengujian XRF.

a. Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air (ASTM C128-01)

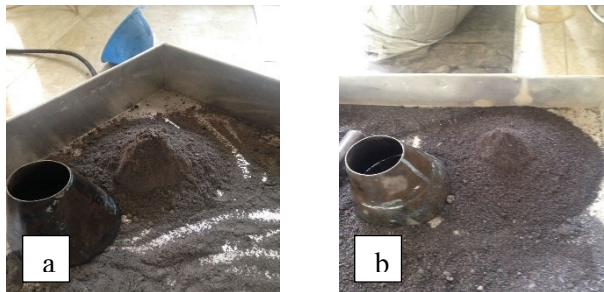
Metode ini digunakan untuk memperoleh angka berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh, berat jenis semu, dan angka penyerapan dari agregat halus.

- Alat dan bahan :

1. Timbangan, kapasitas 1 kg atau lebih dengan ketelitian 0.1 gram.
 2. Piknometer dengan kapasitas 500 ml.
 3. Kerucut terpancung, diameter bagian bawah. (90 ± 3) mm dan tinggi (75 ± 3) mm dibuat dari logam tebal minimum 0.8mm.
 4. Batang penumbuk yang mempunyai bidang penumbuk rata, berat (340 ± 15) gram, diameter permukaan penumbuk (25 ± 3) .
 5. Saringan No.4 (4,75mm)
 6. Oven, dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$.
 7. Pengukuran suhu dengan ketelitian pembacaan 1°C .
 8. Talam.
 9. Bejana tempat air.
 10. Pompa hampa udara atau tungku.
 11. Desikator.
 12. Agregat lewat saringan No.4 diperoleh dari cara perempat sebanyak 1000 gram.
- Prosedur Pelaksanaan :
 1. Mengeringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, sampai berat tetap, yang dimaksud berat tetap adalah keadaan berat benda uji selama 3 kali proses penimbangan dan pemanasan dalam oven selang waktu 2 jam berturut-turut, tidak akan mengalami perubahan kadar air lebih besar daripada 0,1%, mendinginkan pada suhu ruang, kemudian merendam dalam air selama (24 ± 4) jam.
 2. Membuang air perendam dengan hati-hati, menebarkan agregat diatas talam mengeringkan di udara panas dengan cara

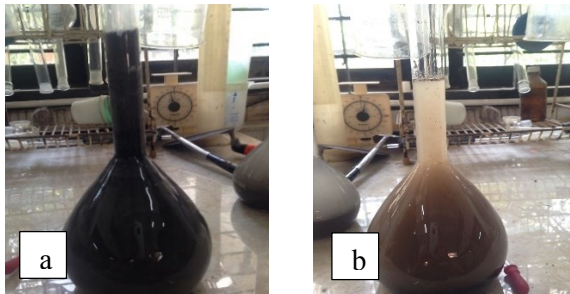
membalik-balikkan benda uji, melakukan pengeringan sampai tercapai keadaan kering permukaan jenuh.

3. Memeriksa keadaan kering permukaan jenuh dengan mengisikan benda uji ke dalam kerucut terpancung, memadatkan dengan batang penumbuk sebanyak 25 kali, angkat kerucut terpancung, keadaan kering permukaan jenuh tercapai bila benda uji runtuh akan tetapi masih dalam keadaan tercetak, kondisi kering permukaan jenuh ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



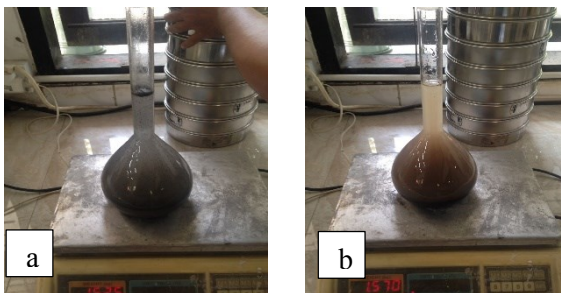
Gambar 3.6 a) Kondisi SSD *Bottom Ash* b) Kondisi SSD Pasir

4. Segera setelah mencapai keadaan kering permukaan jenuh, memasukkan 500 gram benda uji ke dalam piknometer, memasukkan air suling sampai mencapai 90% isi piknometer, memutar sambil mengguncang sampai tidak terlihat gelembung udara di dalamnya.
5. Merendam piknometer dalam air dan ukur suhu air untuk penyesuaian perhitungan kepada suhu standar 25°C.
6. Menambahkan air sampai mencapai tanda batas ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3. 7 a) Piknometer berisi *Bottom Ash* b) Piknometer berisi Pasir

7. Menimbang piknometer berisi air dan benda uji sampai ketelitian 0,1 gram (Bt) ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3. 8 a) Bt *Bottom Ash* b) Bt Pasir

8. Mengeluarkan benda uji, mengeringkan dalam oven dengan suhu $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ sampai berat tetap.
9. Setelah benda uji dingin kemudian menimbang (Bk).
10. Menentukan berat piknometer berisi air penuh dan mengukur suhu air (B).

- Perhitungan :

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{Bk}{(B+500-Bt)} \dots\dots(3.3)$$

$$\begin{aligned} &\text{Berat jenis jenuh kering} \\ &\text{permukaan} = \frac{500}{(B+500-Bt)} \dots\dots (3.4) \end{aligned}$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{Bk}{(B+Bk-Bt)} \dots\dots (3.5)$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{500-Bk}{(Bk)} \times 100\% \dots\dots (3.6)$$

Dimana :

Bk = berat benda uji kering oven (gram)

B = berat piknometer berisi air (gram)

Bt = berat piknometer berisi benda uji dan air (gram)

500 = berat benda uji dalam keadaan kering permukaan jenuh (gram)

b. Pengujian XRF (*X-Ray Fluoroscene*) untuk *Bottom Ash*

X-Ray Fluoroscene digunakan untuk menentukan elemen kimia dan persentase dari material yang ada dalam benda uji. Data elemen kimia ini sangat penting agar dapat dianalisa sifat materialnya, menentukan mineralogi dalam analisis XRD dan menganalisa kemampuan penyembuhan pada benda uji. Pengujian ini dilakukan di PT. Sucofindo.

3.5.3. Agregat Kasar

Analisis yang dilakukan terhadap agregat kasar alami yaitu pengujian berat jenis dan penyerapan air (ASTM C 127-01) dan pengujian analisa saringan agregat kasar (ASTM C 136), untuk agregat kasar buatan dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air (ASTM C 127-01), pengujian keausan agregat

kasar (ASTM C 131-03), dan pengujian analisa saringan agregat kasar (ASTM C 136).

a. Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air (ASTM C 127-01)

Metode ini digunakan untuk memperoleh angka berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh, dan berat jenis semu serta besarnya angka penyerapan.

- Alat dan bahan :
 1. Keranjang kawat ukuran 3,35 mm (No.6) atau 2,36 mm (No. 8) dengan kapasitas kira-kira 5 kg.
 2. Tempat air dengan kapasitas dan bentuk yang sesuai untuk pemeriksaan. Tempat ini harus dilengkapi dengan pipa sehingga permukaan air selalu tetap.
 3. Timbangan dengan kapasitas 5 kg dan ketelitian 0,1 % dari berat contoh yang ditimbang dan dilengkapi dengan alat penggantung keranjang.
 4. Oven, yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$.
 5. Alat pemisah contoh.
 6. Saringan No. 4 (4,75mm)

- Prosedur pelaksanaan :
 1. Mencuci benda uji untuk menghilangkan debu atau bahan-bahan lain yang melekat pada permukaan.
 2. Mengeringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap.
 3. Mendinginkan benda uji pada suhu kamar selama 1-3 jam, kemudian timbang dengan ketelitian 0,5 gram(Bk).

4. Merendam benda uji dalam air pada suhu kamar selama 24 ± 4 jam.
5. Mengeluarkan benda uji dari air, mengelap dengan kain penyerap sampai selaput air pada permukaan hilang ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3. 9 Kondisi Kering Permukaan Jenuh

6. Menimbang benda uji kering permukaan jenuh (B_j) ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3. 10 Menimbang benda uji kering permukaan jenuh (B_j).

7. Meletakkan benda uji didalam keranjang, menggoncangkan batu supaya mengeluarkan udara yang tersekap dan menentukan beratnya dalam air (B_a) ditunjukkan dalam **Gambar 3.11**.



Gambar 3. 11 Menimbang berat benda uji dalam air (B_a)

- Perhitungan :

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{B_k}{(B_j - B_a)} \dots\dots (3.7)$$

$$\begin{aligned} &\text{Berat jenis kering} \\ &\text{permukaan jenuh} = \frac{B_j}{(B_j - B_a)} \dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{B_k}{(B_k - B_a)} \dots\dots (3.9)$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{(B_j - B_k)}{(B_k)} \times 100\% \dots\dots (3.10)$$

Dimana :

B_k = berat benda uji kering oven (gram)

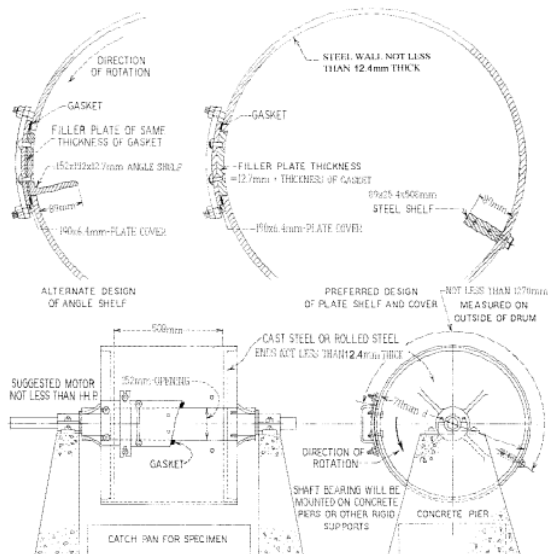
B_j = berat benda uji kering permukaan (gram)

B_a = berat benda uji kering permukaan jenuh di dalam air (gram)

b. Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles (ASTM C 131-03) untuk Agregat Buatan

Metode ini digunakan untuk mengetahui angka keausan tersebut, yang dinyatakan dengan perbandingan antara berat beban aus lolos saringan No. 12 terhadap berat semula, dinyatakan dalam persen.

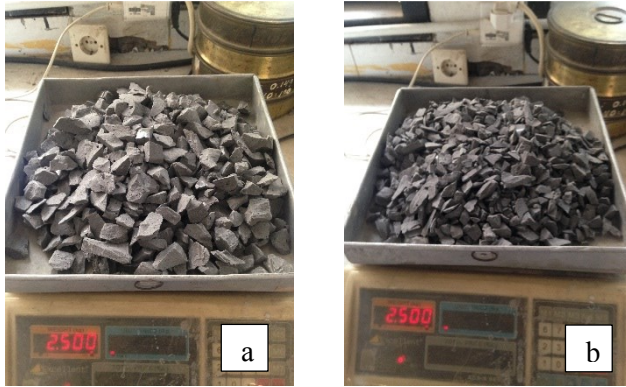
- Alat dan Bahan :
 1. Mesin abrasi Los Angeles dengan ketentuan seperti pada **Gambar 3.12**. Mesin terdiri dari silinder baja tertutup pada kedua sisinya dengan diameter 711 mm panjang dalam 508 mm, silinder bertumpu pada dua poros pendek yang tak menerus dan berputar pada poros mendatar, silinder berlubang untuk memasukkan banda uji penutup lubang terpasang rapat sehingga permukaan dalam silinder tidak terganggu, di dalam silinder terdapat bilah baja melintang penuh setinggi 89 mm.
 2. Saringan No.12 (1,7mm), saringan 19 mm, dan saringan 9,5 mm.
 3. Timbangan, dengan ketelitian 5 gram.
 4. Bola-bola baja 11 buah dengan diameter rata-rata 4,68 cm dan berat masing-masing antara 400 gram sampai 440 gram,
 5. Oven yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$.



Gambar 3. 12 Ketentuan Mesin Los Angeles

Sumber : ASTM C131-03

- Prosedur pelaksanaan :
 1. Mengoven benda uji hingga berat tetap.
 2. Mempersiapkan gradasi B, benda uji lolos saringan 19 mm tertahan saringan 12,5 mm sebanyak 2,5 kg dan benda uji lolos saringan 12,5 mm tertahan 9,5 mm sebanyak 2,5 kg, yang ditunjukkan pada **Gambar 3.11**.



Gambar 3. 13 a) Benda uji lolos saringan 19 mm tertahan saringan 12,5 mm b) benda uji lolos saringan 12,5 mm tertahan 9,5 mm.

3. Memasukkan benda uji dan 11 buah bola baja ke dalam mesin Los Angeles.
4. Menyalakan mesin dengan kecepatan 30 sampai dengan 33 rpm, dengan jumlah putaran 500 putaran.
5. Setelah pemutaran selesai, mengeluarkan benda uji dari mesin kemudian menyaring dengan saringan 1,7 mm.
6. Menimbang berat benda uji yang tertahan saringan 1,7 mm, ditunjukkan pada **Gambar 3.14**.



Gambar 3. 14 Menimbang berat benda uji yang tertahan saringan 1,7 mm.

- Perhitungan :

$$\text{Keausan} = \frac{(a-b)}{a} \times 100\% \quad \dots\dots (3.11)$$

Keterangan :

a = berat benda uji semula (gram)

b = berat benda uji tertahan saringan no.12 (gram)

c. Metode Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar (ASTM C 136)

Metode ini digunakan untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran agregat kasar.

- Alat dan bahan :
 1. Timbangan dengan ketelitian 0.1% dari benda uji.
 2. Satu set saringan 19,1 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm.
 3. Oven.
 4. Talam.

5. Kuas, sikat kuningan.

- Prosedur pelaksanaan :

Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran saringan terbesar ditempatkan paling atas hingga saringan terkecil ditempatkan paling bawah, mengguncang saringan hingga 15 menit.

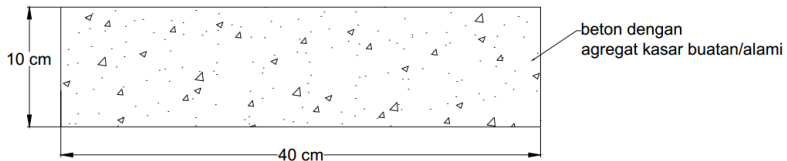
3.6. Pembuatan Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini dibedakan menjadi dua yaitu benda uji balok beton (Bn), uji silinder beton (Sb), dan benda uji silinder pasta (Sp). Benda uji balok beton diamati untuk proses penyembuhan lebar dan kedalaman retak secara visual, agregat kasar buatan yang mengandung *healing agent* menggantikan agregat alami 100%, lalu benda uji silinder beton dibuat untuk analisa kuat tekan silinder yang mengandung substitusi 100% agregat buatan, sedangkan benda uji silinder pasta dibuat untuk analisa kuat tekan pada volume *healing agent* yang berbeda.

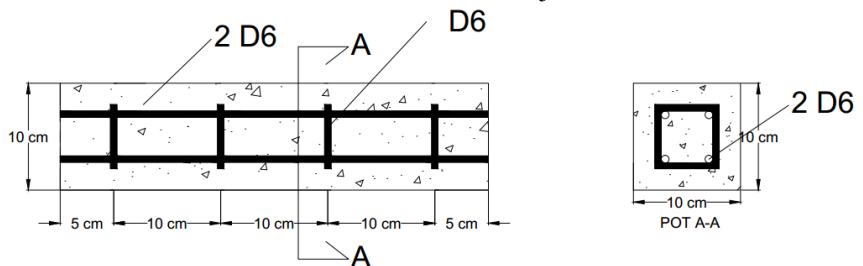
3.6.1. Benda Uji Balok Beton (Bn)

Benda uji balok sederhana dibuat menggunakan campuran beton normal berkekuatan tekan rencana 25 Mpa campuran tersebut mengandung agregat buatan yang didalamnya telah terkandung *healing agent*. Dimensi benda uji balok beton adalah (l) 40 cm, tinggi (h) 10 cm dan lebar (b) 10 cm. Benda uji ini nantinya akan dilakukan tes lentur sehingga diharuskan untuk memiliki tulangan untuk mengontrol retak, agar nanti pada pembuatan *initial crack* retak yang terjadi yaitu retak mikro pada daerah tarik. Spesimen balok beton ini dibuat untuk mengetahui laju penutupan retak yang diukur pada kedalaman retak dan lebar retak menggunakan *UPV* dan *Dinolite*. Tulangan lentur dan tulangan geser diberikan pada benda uji balok ini. Dimensi benda uji balok dapat dilihat pada **Gambar 3.15**. Balok ini memiliki tulangan tarik sebanyak 2 buah berdiameter 6 mm dan 2 buah tulangan tekan berdiameter 6 mm. Untuk menahan geser pada saat

uji lentur maka diberi tulangan geser pada tumpuan dan pada pusat beban dengan diameter tulangan 6 mm. Detail penulangan dapat dilihat pada **Gambar 3.16**.



Gambar 3. 15 Dimensi benda uji balok



Gambar 3. 16 Detail Penulangan Balok

- Proses pencetakan benda uji :
 1. Menyiapkan material campuran beton termasuk agregat buatan sesuai komposisi yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.
 2. Kondisi material agregat halus dan agregat kasar dipersiapkan pada kondisi kering permukaan jenuh (SSD).
 3. Memasukkan material agregat halus dan aregat kasar ke dalam wadah. Kemudian memasukkan dan diaduk dengan mesin mixer yang ditunjukkan pada **Gambar 3.15** sekitar 2 menit.



Gambar 3. 17 Mesin mixer

4. Setelah tercampur merata masukkan *binder* secara perlahan lalu aduk lagi hingga rata.
5. Memasukkan air yang telah disiapkan dalam wadah secara perlahan, dengan kecepatan mixer yang konstan selama kurang lebih 10 menit hingga *flowability* campuran bagus.
6. Tuang campuran adukan beton kedalam nampan yang ditunjukkan pada **Gambar 3.18**.



Gambar 3. 18 Hasil pengadukan material oleh mesin mixer

7. Merangkai beton decking pada tulangan sebagai spasi balok, lalu memasukkan tulangan balok pada bekisting yang ditunjukkan pada **Gambar 3.19**.



Gambar 3. 19 Tulangan balok

8. Memasukkan campuran beton kedalam bekisting sambil merojok campuran secara merata yang ditunjukkan pada **Gambar 3.20**.



Gambar 3. 20 Campuran dimasukkan ke dalam bekisting

9. Setelah memasukkan campuran hingga penuh, meratakan bagian atas cetakan yang ditunjukkan pada **Gambar 3.21**.



Gambar 3. 21 Pemerataan permukaan cetakan

3.6.2. Benda Uji Silinder Beton (Sn)

Benda uji silinder berukuran tinggi 20 cm dan berdiameter 10 cm, benda uji ini mempunyai variasi yang sama dengan variasi benda uji balok, dibuat untuk menganalisa perbedaan kuat tekan antara beton silinder menggunakan agregat kasar alami dan beton silinder menggunakan agregat kasar buatan. Kemudian untuk menganalisa pengaruh *fly ash* dan *bottom ash* terhadap kuat tekan beton. Agregat kasar di dalamnya merupakan pasta geopolimer yang mengandung konsentrasi *healing agent* sebesar 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³.

- Proses pencetakan benda uji :
 1. Menyiapkan campuran beton sesuai komposisi yang ditunjukkan pada **Tabel 3.4**.
 2. Kondisi agregat kasar dan agregat halus dalam keadaan kering permukaan jenuh (SSD).
 3. Kondisi material agregat halus dan agregat kasar dipersiapkan pada kondisi kering permukaan jenuh (SSD).
 4. Memasukkan material agregat halus dan agregat kasar ke dalam wadah. Kemudian memasukkan dan diaduk dengan mesin mixer

- kurang lebih selama 2 menit sampai mencampur dengan rata.
5. Kemudian memasukkan binder secara perlahan ke dalam mesin mixer, tunggu hingga campuran tercampur merata.
 6. Memasukkan air secara perlahan ke dalam mesin mixer lalu tunggu hingga flow kurang lebih selama 10 menit.
 7. Setelah campuran mempunyai flow yang baik dan tercampur secara rata, lalu menuangkan campuran beton segar ke dalam wadah.
 8. Campuran beton segar dimasukkan ke dalam bekisting silinder secara bertahap sambil dirojok.
 9. Ratakan permukaan atas silinder. Benda uji terlihat seperti pada **Gambar 3.22**.

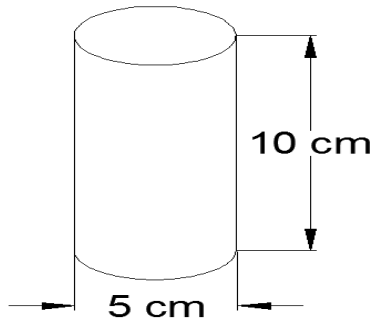


Gambar 3. 22 Benda uji silinder beton yang akan dites tekan

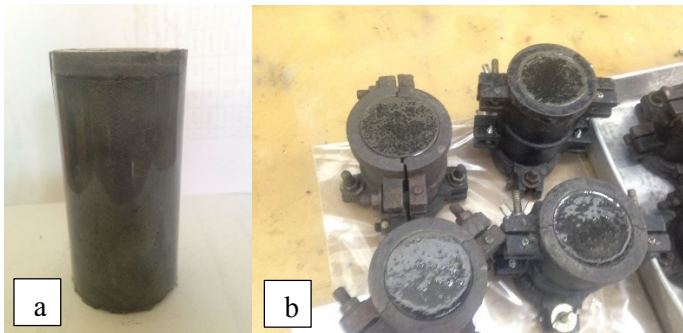
3.6.3. Benda Uji Silinder Pasta (Sp)

Benda uji silinder berukuran tinggi 10 cm dan berdiameter 5 cm, benda uji ini dibuat untuk menganalisa kuat tekan pasta geopolimer yang mengandung konsentrasi *healing agent* sebesar 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³. Dimensi benda uji

silinder dapat dilihat pada **Gambar 3.23 dan 3.24**. Uji tekan dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari. Setelah diuji tekan silinder dimasukkan ke dalam *crusher* untuk dijadikan agregat kasar buatan.



Gambar 3. 23 Dimensi benda uji silinder

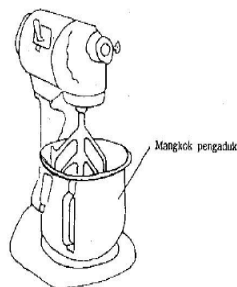


Gambar 3. 24 a) Spesimen silinder b) cetakan silinder

- Proses pencetakan benda uji :
 1. Menyiapkan larutan NaOH 8 Molar, untuk membuat 1 liter larutan NaOH 8 Molar dibutuhkan 320 gram NaOH *flakes*.
 2. Untuk membuat 1 liter larutan NaOH 8 Molar, taruh NaOH *flakes* ke dalam wadah ukur

dengan kapasitas 1000 ml dan timbang seberat 320 gram.

3. Kemudian tambahkan larutan akuades ke dalam wadah ukur yang berisi NaOH *flakes* hingga volume mencapai 1000 ml.
4. Aduk larutan dan tunggu hingga dingin, dalam penelitian ini peneliti menunggu hingga semalam untuk membiarkan larutan NaOH mendingin.
5. Setelah larutan NaOH dingin, menyiapkan material campuran pasta sesuai komposisi yang ditentukan oleh **Tabel 3.5**.
6. Mencampur natrium silikat dengan natrium dioksida sesuai dengan komposisi. Aduk hingga larutan tercampur merata selama kurang lebih 5 menit.
7. Setelah diaduk dengan rata, menyiapkan *fly ash* dan memasukkan ke dalam mesin pengaduk yang ditunjukkan pada **Gambar 3.21** dengan kecepatan sedang selama kurang lebih 10 menit.



Gambar 3. 25 Mesin pengaduk

8. Setelah campuran terlihat homogen bagi spesimen yang mengandung *healing agent* di dalamnya, masukkan *healing agent* sesuai

komposisi yang telah ditentukan menggunakan jarum suntik yang diteteskan secara perlahan ke dalam campuran pasta geopolimer.

9. Kemudian aduk lagi kurang lebih selama 5 menit hingga *healing agent* tercampur secara merata.
10. Tuangkan pasta ke dalam bekisting silinder yang telah disiapkan, silinder sebelumnya diberi lapisan plastik mika pada alas bekisting dan selimut bekisting silinder.

3.6.4. Komposisi Campuran Benda Uji dan Kebutuhan Benda Uji

Pada penelitian ini didasarkan atas pengembangan penelitian – peneitian sebelumnya sehingga komposisi campuran didapatkan. Berikut disajikan komposisi campuran benda uji yang akan dilakukan percobaan. Benda uji balok ini direncanakan dengan kuat tekan $f_c' = 25$ MPa (Normal) dengan agregat diharapkan masuk ke dalam persyaratan SNI. Komposisi campuran benda uji balok dapat dilihat pada **Tabel 3.1**. Pengujian lentur dilakukan sekaligus memberikan retak awal pada beton, pengujian dilakukan setelah balok beton berumur 28 hari dengan pengujian benda uji 1 buah balok, sehingga setiap variasi membutuhkan benda uji 1 buah balok. Sedangkan pengujian kuat tekan pada silinder beton dilakukan pada umur 28 hari, dengan pengujian sebanyak 3 benda uji , sehingga setiap variasi memerlukan benda uji silinder beton sebanyak 3 buah. Untuk silinder pasta diuji kuat tekan pada umur 7 hari dan 28 hari dengan pengujian benda uji 7 buah silinder pada setiap umurnya, sehingga setiap variasi membutuhkan 14 buah benda uji.

a. **Benda Uji Balok (Bn)**

Tabel 3. 1 Komposisi Campuran Benda Uji Balok per satuan Balok

No	Kode	Jenis Material						
		Air (kg)	Semen (kg)	Fly Ash (kg)	Pasir (kg)	Bottom Ash (kg)	Kerikil (kg)	Agregat Buatan (kg)
1	F20 B5 M400	0.902	1.503	0.376	2.973	0.156	-	3.477
2	F20 B5 M1000	0.902	1.503	0.376	2.973	0.156	-	3.477
3	F20 B5 M5000	0.902	1.503	0.376	2.973	0.156	-	3.477
4	F0 B0 M400	0.902	1.879	-	3.129	-	-	3.477
5	F0 B0 M1000	0.902	1.879	-	3.129	-	-	3.477
6	F0 B0 M5000	0.902	1.879	-	3.129	-	-	3.477
7	F 20 B5 M0	0.902	1.503	0.376	2.973	0.156	4.694	-
8	Control	0.902	1.879	-	3.129	-	4.694	-

Keterangan :

Fxx : Komposisi persen Fly Ash 0 % dan 20% dari semen

Byy : Komposisi persen Bottom Ash 0% dan 5% dari pasir

Mxx : Komposisi *healing agent* yang ada dalam agregat buatan sejumlah 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³

Untuk pembuatan benda uji balok, menggunakan *mix design* metode DOE mengacu pada SNI 03 – 2834 – 2000 dengan mutu beton rencana f_c 25 Mpa dengan mengganti 100% agregat kasar dengan agregat kasar buatan yang sudah dipersiapkan dan dianalisa berat jenisnya.

Tabel 3. 2 Desain campuran beton mutu 25 Mpa

No	Uraian	Tabel/Grafik/P erhitungan	Nilai
1	Kuat tekan yang disyaratkan	Ditetapkan	25 Mpa pada 28 hari ; $k =$ 1,64
2	Deviasi standar	Margin : 1,64	5,06
3	Nilai tambah (margin)	SNI 2847-2013 tabel 5.3.2.2	8,3
4	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	1+3	$25 + 8.3 =$ 33,3 Mpa
5	Jenis semen	Ditetapkan	OPC
6	Jenis agregat kasar	Ditetapkan	Batu pecah
	Jenis agregat halus	Ditetapkan	Pasir
7	Faktor air semen bebas	SNI 03-2834- 1993 Grafik 1	0,48
8	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0,6
9	Slump	Ditetapkan	60-180 mm
10	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	20 mm
11	Kadar air bebas	SNI 03-2834- 1993 Tabel 3	205 kg/m^3
12	Jumlah semen	11 : 7	$427,0833$ kg/m^3
13	Susunan besar butir agregat halus	Ditetapkan	Zona 2
14	Persen agregat halus		40%
15	Persen agregat kasar		60%

16	Berat jenis relatif agregat (kering permukaan)		2,6912 kg/m ³
17	Berat isi beton	SNI 03-2834-1993 Grafik 16	2410 kg/m ³
18	Kadar agregat gabungan	17- (12+11)	1777,917 kg/m ³
19	Kadar agregat halus	14 x 18	711,1667 kg/m ³
20	Kadar agregat kasar	15 x 18	1066,75 kg/m ³

- Perhitungan konversi volume agregat kasar :

Dikarenakan agregat kasar alami pada benda uji balok disubstitusi 100% dengan agregat kasar buatan yang berbahan dasar geopolimer berisi *healing agent* dengan berat jenis yang lebih kecil dari agregat kasar alami, maka diperlukan konversi volume kebutuhan agregat kasar buatan.

Diketahui :

$$\text{Kadar agregat kasar alami} = 1066,75 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Berat agregat kasar alami/m}^3 (W_a) = 1066,75 \text{ kg}$$

$$\text{Berat jenis agregat kasar alami } (\rho_a) = 2,7 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Berat jenis agregat buatan } (\rho_b) = 2 \text{ kg/m}^3$$

Ditanya :

Kebutuhan berat agregat kasar buatan (W_b)

Perhitungan :

$$\begin{aligned} \text{Volume agregat kasar alami } (V_a) &= \frac{W_a}{\rho_a} \dots (3.12) \\ &= 395,0926 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Konversi volume agregat buatan

$$V_a = V_n \text{ (volume agregat kasar buatan)}$$

$$= 395,0926 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} W_b = V_a \times \rho_b &= 395,0926 \times 2 \dots (3.13) \\ &= 790,1852 \text{ kg} \end{aligned}$$

Sehingga dari perhitungan campuran dan konversi volume agregat kasar di atas dibutuhkan proporsi material yang ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 Proporsi material tiap m³

Proporsi Campuran	<i>Binder</i> (kg)	Air (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar Alami (kg)	Agregat Kasar Buatan (kg)
Tiap m ³	427,03	205	711,16	1066,75	790,185

b. Benda Uji Silinder Beton (Sn)

Tabel 3. 4 Komposisi Benda Uji Silinder Beton per 3 Silinder

No	Kode	Jenis Material						
		Air (kg)	Semen (kg)	Fly Ash (kg)	Pasir (kg)	Bottom Ash (kg)	Kerikil (kg)	Agregat Buatan (kg)
1	F20 B5 M400	1.159714	1.933	0.483	3.822	0.201	-	4.470
2	F20 B5 M1000	1.159714	1.933	0.483	3.822	0.201	-	4.470
3	F20 B5 M5000	1.159714	1.933	0.483	3.822	0.201	-	4.470
4	F0 B0 M400	1.159714	2.416	-	4.023	-	-	4.470
5	F0 B0 M1000	1.159714	2.416	-	4.023	-	-	4.470
6	F0 B0 M5000	1.159714	2.416	-	4.023	-	-	4.470
7	F 20 B5 M0	1.159714	1.933	0.483	3.822	0.201	6.035	-
8	Control	1.159714	2.416	-	4.023	-	6.035	-

Keterangan :

Fxx : Komposisi persen Fly Ash 0 % dan 20% dari semen

Byy : Komposisi persen Bottom Ash 0% dan 5% dari pasir

Mxx : Komposisi *healing agent* yang ada dalam agregat buatan sejumlah 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³

Untuk pembuatan benda uji silinder, menggunakan *mix design* metode DOE mengacu pada SNI 03 – 2834 – 2000 dengan mutu beton rencana f_c 25 Mpa dengan mengganti 100% agregat kasar dengan agregat kasar buatan yang sudah dipersiapkan dan dianalisa berat jenisnya. Untuk *mix design* silinder beton sama seperti *mix design* balok beton yang ditunjukkan pada **Tabel 3.2**. Untuk konversi volume agregat kasar buatan untuk silinder beton menggunakan cara yang sama yang ditunjukkan pada rumus **3.12**. Dengan proposi campuran per m^3 ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

c. Benda Uji Silinder Pasta (Sp)

Tabel 3. 5 Komposisi Benda Uji Silinder Pasta per 7 Silinder

No	Kode	Fly Ash : 75 % dari berat campuran (kg)	Alkali : 25% berat campuran Na_2SiO_3 : NaOH ; 2:1		Healing Agent (ml)
			Na_2SiO_3 (kg)	NaOH (kg)	
1	M 0	2,97	0,66	0,33	-
2	M 400	2,97	0,66	0,33	0,66
3	M 1000	2,97	0,66	0,33	1,65
4	M 5000	2,97	0,66	0,33	8,25

Keterangan :

Fxx : Pasta geopolimer yang mengandung *healing agent* 400 ml/ m^3 , 1000 ml/ m^3 , dan 5000 ml/ m^3 .

Jumlah kebutuhan benda uji disesuaikan dengan analisa yang akan dilakukan pada benda uji tersebut. Jumlah kebutuhan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. 6 Rekapitulasi jumlah benda uji balok

Benda Uji	Campuran	Tes Lentur		Total
		Sampel tiap pengujian	Jumlah pengujian	
Balok Beton (Bn)	F20 B5 B400	1	1	1
	F20 B5 B800	1	1	1
	F20 B5 B1000	1	1	1
	F0 B0 M400	1	1	1
	F0 B0 M800	1	1	1
	F0 B0 M1000	1	1	1
	F 20 B5 M0	1	1	1
	Kontrol	1	1	1
Total Benda Uji				8

Tabel 3. 7 Rekapitulasi jumlah benda uji silinder beton

Benda Uji	Campuran	Tes Lentur		Total
		Sampel tiap pengujian	Jumlah pengujian	
Silinder Beton (Sn)	F20 B5 B400	3	1	3
	F20 B5 B800	3	1	3
	F20 B5 B1000	3	1	3
	F0 B0 M400	3	1	3
	F0 B0 M800	3	1	3
	F0 B0 M1000	3	1	3
	F 20 B5 M0	3	1	3
	Kontrol	3	1	3
Total Benda Uji				24

Tabel 3. 8 Jumlah benda uji silinder pasta

Benda Uji	Campuran	Tes Tekan		Total
		Sampel tiap pengujian	Jumlah pengujian	
Silinder Pasta (Sp)	M0	7	2	14
	M400	7	2	14
	M1000	7	2	14
	M5000	7	2	14
Total Benda Uji				56

Sehingga jumlah kebutuhan agregat buatan untuk benda uji balok beton (Bn) diperoleh kemudian ditampilkan komposisi campuran agregat buatan pada **Tabel 3.9**, **Tabel 3.10**, dan **Tabel 3.11**. Dibutuhkan agregat buatan M400, M1000, dan M5000 pada benda uji balok beton masing-masing sebanyak 3,477 kg.

Tabel 3. 9 Komposisi Campuran Agregat Buatan M400

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 400ml/m ³ (ml)
3,4	0,754	0,377	0,75

Tabel 3. 10 Komposisi Campuran Agregat Buatan M1000

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 1000ml/m ³ (ml)
3,4	0,754	0,377	1,88

Tabel 3. 11 Komposisi Campuran Agregat Buatan M5000

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 5000ml/m ³ (ml)
3,4	0,754	0,377	9,4

Ketiga campuran tersebut akan menghasilkan 8 buah silinder 5x10 cm dengan berat 4,526 kg sehingga berat yang dihasilkan melebihi berat agregat buatan yang dibutuhkan pada benda uji balok beton yaitu sebesar 3,47 kg untuk mencegah jumlah material pasta geopolimer yang hilang karena proses *crushing*.

Sementara untuk komposisi campuran agregat buatan untuk benda uji silinder beton (Sn) ditampilkan pada **Tabel 3.12**, **Tabel 3.13**, dan **Tabel 3.14**.

Tabel 3. 12 Komposisi Campuran Agregat Buatan M400

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 400ml/m ³ (ml)
4,242	0,943	0,471	0,95

Tabel 3. 13 Komposisi Campuran Agregat Buatan M1000

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 1000ml/m ³ (ml)
4,242	0,943	0,471	2,35

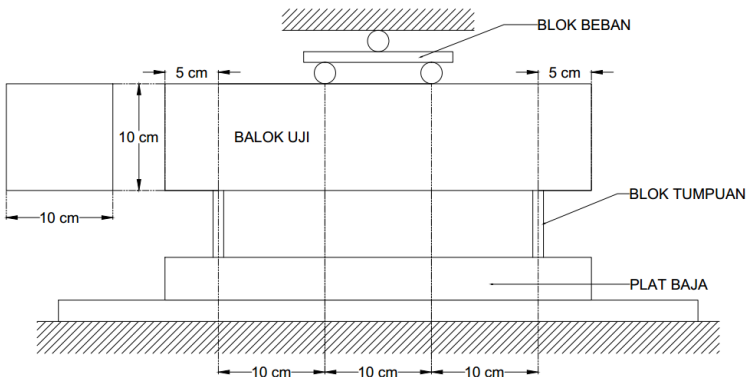
Tabel 3. 14 Komposisi Campuran Agregat Buatan M5000

Fly Ash (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH 8M (kg)	Healing Agent 5000ml/m ³ (ml)
4,242	0,943	0,471	11,8

Ketiga campuran tersebut akan menghasilkan 10 buah silinder 5x10 cm dengan berat 5,662 kg sehingga berat yang dihasilkan melebihi berat agregat buatan yang dibutuhkan pada benda uji balok beton yaitu sebesar 4,47 kg untuk mencegah jumlah material pasta geopolimer yang hilang karena proses *crushing*.

3.7. Pembuatan Retak pada Balok

Retak pada benda uji balok beton diberikan dengan cara menekan balok menggunakan *four point bending test* hingga terjadi retak awal natural. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan ITS, dengan kecepatan pemberian beban yaitu 2 mm/detik. Pemberian beban akan diberhentikan setelah penglihatan secara visual retak awal terjadi pada benda uji. Untuk skema pemberian beban hingga muncul retak awal pada benda uji balok beton dapat dilihat pada **Gambar 3.26**. Kemudian untuk pelaksanaan pengujian benda uji balok beton dapat dilihat pada **Gambar 3.27**.



Gambar 3. 26 Skema alat uji lentur untuk membuat retak awal pada balok.



Gambar 3. 27 Pemberian beban untuk menapatkan retak awal pada benda uji balok beton.

Menurut ACI 224R – 01, lebar retak yang diperbolehkan ditentukan berdasarkan tipe beton dan keadaan beton terhadap paparan lingkungan. Untuk struktur yang berada pada kondisi udara yang kering atau terlindungi maksimum lebar retak adalah 0,41 mm. Untuk struktur penahan air lebar maksimum yang diijinkan adalah 0,1 mm. Lebar retak maksimum dapat dilihat pada **Tabel 3.15**. Namun dalam pelaksanaan di lapangan lebar retak yang terjadi tidak bisa dikontrol secara maksimal.

Tabel 3. 15 Petunjuk* untuk lebar retak, beton bertulang pada beban servis

Kondisi Paparan	Lebar Retak	
	in.	mm
Udara kering atau membran terlindung	0,016	0,41
Kelembaban, udara lembab, tanah	0,0012	0,30
Pengaruh kimia	0,007	0,18
Air laut, basah dan kering	0,006	0,15
Struktur penahan air†	0,004	0,10

*Harusnya diharapkan bahwa sebagian retakan pada struktur akan melebihi nilai-nilai ini. Dengan waktu, porsi yang signifikan dapat melebihi nilai-nilai ini. Ini adalah panduan umum untuk desain yang akan digunakan bersamaan dengan pertimbangan suara keputusan insinyur.

† Eksklusif pada pipa tanpa tekanan

3.8. Perawatan Benda Uji

Pada semua benda uji, baik balok beton (Bn) pada saat pasca cetak dan pasca pemberian retak awal, silinder beton (Sn) pasca cetak, dan silinder pasta (Sp) pasca cetak dilakukan perawatan *moist curing* dimana kondisi lingkungan dibuat lembab dengan menutupi seluruh permukaan benda uji dengan kain basah. Perawatan *moist curing* pada balok beton (Bn) ditunjukkan pada **Gambar 3.28**, untuk benda uji silinder beton (Sn) ditunjukkan pada **Gambar 3.29**, dan untuk benda uji silinder pasta (Sp) ditunjukkan pada **Gambar 3.30**.



Gambar 3. 28 Perawatan *moist curing* benda uji balok beton (Bn)



Gambar 3. 29 Perawatan *moist curing* benda uji silinder beton (Sn)



Gambar 3. 30 Perawatan moist curing benda uji silinder pasta (Sp)

3.9. Pengujian Mekanis dan Biologis

Pada penelitian ini pengujian pada benda uji dibagi menjadi dua macam yaitu pengujian mekanis dan biologis. Pengujian mekanis adalah pengujian untuk mengetahui sifat mekanis benda uji yaitu kuat tekan, dilakukan pada benda uji silinder beton (Sn) dan silinder pasta (Sp), sementara untuk pengujian biologis adalah metode pengujian secara biologis yang dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Biologi ITS untuk mengetahui jumlah koloni dan identifikasi bakteri yang hidup dalam pasta geopolimer.

3.9.1. Uji Tekan (ASTM C 39)

Pengujian kuat tekan dilakukan pada penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui seberapa besar daya tekan yang dimiliki oleh benda uji silinder beton (Sn) dan silinder pasta (Sp). Pengujian kuat tekan dilakukan secara berkala pada umur 28 hari pada benda uji silinder beton (Sn) dan pada umur 7 dan 28 hari pada benda uji silinder pasta (Sp). Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* model UH-500kN dari Shimadzu Corporation di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan ITS. Benda uji harus rata bagian atas maupun bawahnya dan harus siku-siku.



Gambar 3. 31 Pengujian kuat tekan benda uji silinder beton (Sn)



Gambar 3. 32 Pengujian kuat tekan benda uji silinder pasta (Sp)

3.9.2. Uji *Determination of Bacterial Number using Standart Plate Count* dan Analisa Mikroorganisme

Pengujian *standard plate count* merupakan salah satu metode pengukuran tidak langsung terhadap kepadatan sel untuk mengetahui informasi berkaitan dengan bakteri yang hidup dalam bentuk *colony forming unit* (CFU). Benda uji untuk pengujian ini adalah *healing agent* yang berwujud cair kemudian *healing agent* dalam pasta geopolimer yang berwujud serbuk. Kemudian untuk pengujian analisa mikroorganisme dilakukan untuk

mengidentifikasi apakah bakteri yang hidup dalam benda uji merupakan bakteri yang diinginkan yaitu *sporosarcina pasteurii*.

- Langkah pengujian *standard counting plate* :
 1. Beri tanda 7 cawan dengan pengenceran berikut : 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , dan 10^{-7} . Beri tanda 6 tabung reaksi yang akan diisi akuades steril dengan tanda 10^{-0} , 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , dan 10^{-6} .



Gambar 3. 33 Tabung reaksi

2. Sebanyak 1 gram sampel serbuk atau 1 ml *healing agent* cair ditimbang secara aseptis.
3. Dilakukan pengenceran bertingkat hingga 10^{-6} .
4. Memasukkan 1 gram sampel serbuk atau 1 ml *healing agent* cair ke tabung reaksi berisi 9 ml akuades steril menjadi pengenceran 10^{-1} . Tutup tabung reaksi 10^{-1}
5. Menggoncangkan larutan pengenceran 10^{-1} dengan mesin *vortex mixer*.



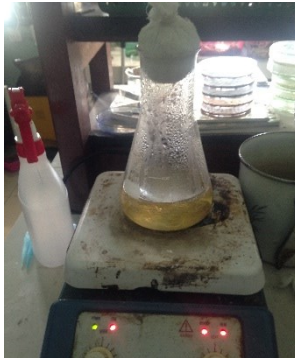
Gambar 3. 34 Proses penggoncangan tabung reaksi menggunakan mesin vortex

6. Setelah digoyang buku tutup tabung dan masukkan 1 ml ke tabung reaksi kedua berisi 9 ml akuades steril menjadi pengenceran 10^{-2} . Tutup tabung reaksi 10^{-2} .
7. Menggoncangkan larutan pengenceran 10^{-2} dengan mesin *vortex mixer*.
8. Ulangi proses tersebut sampai pengenceran 10^{-6} .
9. Siapkan larutan agar untuk dituangkan ke tiap-tiap cawan petri.
10. Menimbang *nutrient agar* dengan dosis pemakaian 28 gr / 1000 ml, maka untuk 200 ml akuades dibutuhkan 5,6 gr *nutrient agar*.



Gambar 3. 35 Proses penimbangan *nutrient agar*

11. Masukkan akuades dan 5,6 gr *nutrient agar* ke dalam wadah.
12. Memasak campuran akuades dan *nutrient agar* menggunakan *hot plate stirrer*.



Gambar 3. 36 Proses memasak larutan akuades steril dengan *nutrient agar*

13. Kemudian melakukan sterilisasi 121°C selama 15 menit dalam tekanan 1,5 atm.



Gambar 3. 37 Gambar mesin sterilisasi

14. Setelah sterilisasi selesai, tuangkan 0,1 ml dari tabung reaksi pengenceran 10^{-6} ke dalam 2 cawan petri menjadi 10^{-7} .
15. Tuangkan 1 ml dari 10^{-6} dari tabung reaksi pengenceran 10^{-6} ke dalam 2 cawan petri menjadi 10^{-6} .



Gambar 3. 38 2 buah cawan petri pengenceran 10^{-6}

16. Ulangi langkah tersebut hingga mencapai cawan petri 10^{-1} .
17. Tuangkan larutan agar ke setiap cawan petri dengan sama rata.
18. Inkubasi selama 24 jam pada suhu 35°C .

3.10. Evaluasi *Self Healing*

Pada penelitian ini analisa *self healing* pada benda uji dilihat melalui penutupan kedalaman retak menggunakan *Ultrasonic pulse velocity* (UPV) dan penutupan lebar retak menggunakan *Dinolite*. Pengetesan dan pengukuran dijelaskan di bawah:

3.10.1. Tes *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

UPV dilakukan untuk mengevaluasi proses penyembuhan benda uji, dalam hal perubahan kedalaman retak pada umur 0, 3, 7, 10, 14, 17, 21, 24, 28, 31, 35, 48, 60, dan 70 hari setelah pemberian retakan pada balok. Metode ini dilakukan menurut ASTM C 597-02. Prinsip kerja dari pengujian ini adalah dengan mengukur cepat

rambat gelombang ultrasonik yang melewati benda uji. Pada penelitian ini digunakan alat UPV dengan merk “PROCEQ”.

Untuk mengukur kedalaman retak, UPV digunakan dengan metode *indirect transmission*. Pengukuran keretakan dapat didekati dengan cara mengetahui waktu dan jarak tempuh gelombang. Transmitter dan receiver diletakkan pada permukaan beton yang mengapit retak dengan jarak tertentu. Kedalaman retak dapat diketahui dari hubungan jarak X terhadap waktu tempuh T1 dan T2. Pendekatan hubungan jarak transducer (X1 dan X2) dengan waktu tempuh (T1 dan T2) dapat dilihat pada persamaan empiris yaitu:

$$h = x \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \dots\dots\dots (19)$$

Keterangan:

h : Kedalaman retak

x : Jarak transmitter atau receiver terhadap garis

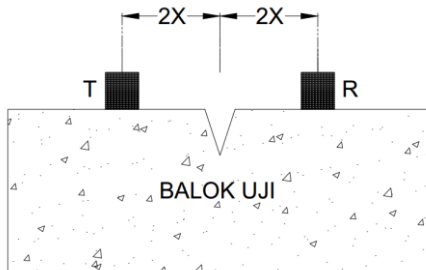
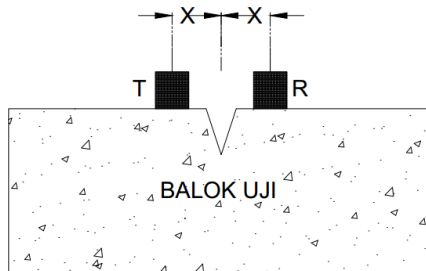
t1 : Waktu tempuh gelombang ultrasonik pada jarak x terhadap garis retak

t2 : Waktu tempuh gelombang ultrasonik pada jarak 2x terhadap garis retak

Alat pengujian ditunjukkan pada **Gambar 3.39**, terdiri dari *pulse generator*, sepasang *transducers* (*transmitting transducer* dan *receiving transducer*), *receiver amplifier*, *time measuring unit*, *time display unit* dan kabel. Selain itu beton yang retak disiapkan pada pengujian ini. Skema pengujian UPV terhadap benda uji ditunjukkan pada **Gambar 3.40** dan **Gambar 3.41**.



Gambar 3. 39 Alat pengujian UPV



Gambar 3. 40 Skema pengujian UPV pada balok beton



Gambar 3. 41 *Transducer* dan *receiver* pada balok beton

- Metode pengujian UPV :
 1. Tempatkan *transducer* dan *receiver* seperti pada **Gambar 3.40**.
 2. Atur jarak antara *transducer* dan *receiver* sebesar X_1 yaitu 3 cm.
 3. Sebuah pengirim gelombang mengirimkan sebuah gelombang ultrasonik berdurasi pendek kepada sebuah *transducer*.
 4. Pengukur waktu elektrik akan menunjukkan bekerja.
 5. Gelombang ultrasonik dihantarkan melalui *viscous fluid*, yang kemudian masuk menjalar ke dalam beton dan diterima oleh *receiver*.
 6. Ketika gelombang tersebut diterima oleh *receiver*, alat pengukur waktu elektrik akan mati dan sekaligus menunjukkan waktu yang dibutuhkan gelombang tersebut dari mulai dikirim hingga diterima.
 7. Catat waktu yang dibutuhkan tersebut.
 8. Lakukan langkah 1-7 dengan nilai $X=2X_1$.
 9. Catat kedalaman retak yang ditunjukkan oleh UPV.

3.10.2. Tes Pengukuran Luasan Retak menggunakan Dinolite

Pada benda uji balok beton dilakukan analisa mikrokamera. Analisa ini bertujuan untuk mengamati perkembangan luas retak permukaan akibat dari adanya mekanisme penutupan retak. Pengamatan ini dilakukan berkala mulai dari retak pertama yakni 0, 3, 7, 10, 14, 17, 21, 24, 28, 31, 35, 48, 60, dan 70 hari, pengamatan dilakukan setelah benda uji dilakukan pemberian awal retak menggunakan tes lentur. Pengamatan ini dilakukan menggunakan kamera mikro bermerk Dinolite dengan menyesuaikan skala tertentu, sehingga retak pada benda uji lebih jelas untuk diamati.



Gambar 3. 42 Kamera mikro digital dinolite

3.10.3. Analisa XRD

Analisa XRD ini digunakan untuk mengevaluasi mekanisme penyembuhan yang terjadi pada spesimen dengan mengidentifikasi mineral yang menutupi celah retak. Disamping itu, dari metode ini, efek dominan mekanisme penyembuhan retak pada benda uji dapat dianalisis. Tes ini dilakukan pada usia benda uji mencapai umur 70 hari. Pengujian dilakukan di Laboratorium Material dan Metalurgi ITS.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai hasil seluruh pengujian yang telah dilakukan dan kemudian dianalisa untuk menarik kesimpulan. Hasil pengujian yang telah dilakukan meliputi hasil analisa material, analisa mekanis dan biologis, dan pengamatan *self-healing* pada benda uji. Data yang didapat dari pengujian ditunjukkan dalam bentuk tabel dan grafik, untuk memudahkan analisa. Secara garis besar data pengujian akan ditampilkan pada bab ini meliputi :

- Pengujian material
- Pengujian mekanis benda uji silinder pasta geopolimer, silinder beton, dan balok beton
- Pengujian biologis benda uji pasta geopolimer
- Pengamatan mekanisme *self-healing*

4.2. Analisa Material

Material utama yang telah dianalisa pada percobaan ini antara lain:

- *Ordinary Portland Cement* (OPC)
- *Fly Ash* PLTU Suralaya 1-4 Kelas F
- Pasir
- *Bottom Ash* PLTU Suralaya
- Agregat Kasar Alami
- Agregat Kasar Buatan Geopolimer

4.2.1. Analisa OPC dan *Fly Ash*

Analisa yang dilakukan kepada OPC yaitu analisa berat jenis dan XRD, sementara analisa yang dilakukan kepada *Fly Ash* adalah berat jenis, dan XRF.

4.2.1.1. Berat Jenis OPC (ASTM 188-16)

Berat jenis OPC didapat dengan membandingkan berat OPC dengan isi kerosin atau naphta yang dipindahkan oleh benda uji. Data hasil analisa berat jenis terhadap OPC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Hasil pengujian berat jenis OPC

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat benda uji	65	65	gram
2	Volume benda uji (V2-V1)	20.5	20.6	cc
3	Berat isi (ρ)	3.1707	3.155	gr/cc
4	Berat jenis (G_{sp})	3.1707	3.155	-
	Rata-rata ((I+II)/2)	3.163		

Dari pengujian berat jenis menurut ASTM 188 didapatkan angka berat jenis sebesar 3,163. Pada ASTM C150 maupun SNI-15-2049-2004 tidak ada persyaratan spesifik yang mengatakan nilai berat jenis semen portland. Tetapi pada SNI-15-2049-2004 menyebutkan pada catatan 82 bahwa berat jenis dari semen portland tidak boleh bervariasi terlalu besar dan diperkirakan memiliki nilai sebesar 3.15 sehingga angka berat jenis yang didapatkan melalui analisa ASTM 188 memenuhi persyaratan.

4.2.1.2. Berat Jenis *Fly Ash* (ASTM 188-16)

Berat jenis *Fly Ash* didapatkan menurut analisa ASTM 188-16. Data hasil analisa berat jenis terhadap *Fly Ash* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Hasil pengujian berat jenis *Fly Ash*

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat benda uji	65	65	gram
2	Volume benda uji (V2-V1)	26.2	26.4	cc
3	Berat isi (ρ)	2.48	2.462	gr/cc
4	Berat jenis (G_{sp})	2.48	2.462	-
	Rata-rata ((I+II)/2)	2.471		

Dari pengujian berat jenis *fly ash* menurut ASTM 188 didapatkan angka berat jenis sebesar 2,471. Beberapa institusi memberikan nilai *specific gravity* (Gs) *fly ash* yang bervariasi, (*United States, Federal Highway Administration Research and Technology* 2016) memberikan nilai *specific gravity* berkisar antara 2.1 – 3. (Ekaputri dkk. 2013) menganalisa berat jenis *fly ash* kelas F dari 5 pembangkit listrik di Indonesia yaitu Suralaya, Tjiwi Kimia, PJB, IPMOMI, dan Jepara. Dalam hasil analisa semua berat jenis *fly ash*, dihasilkan nilai berat jenis dengan rentang 2.08 – 2.78. Dapat dibandingkan bahwa berat jenis yang didapatkan pada penelitian ini masih dalam rentang dari penelitian sebelumnya dan dapat dipakai dalam penelitian ini.

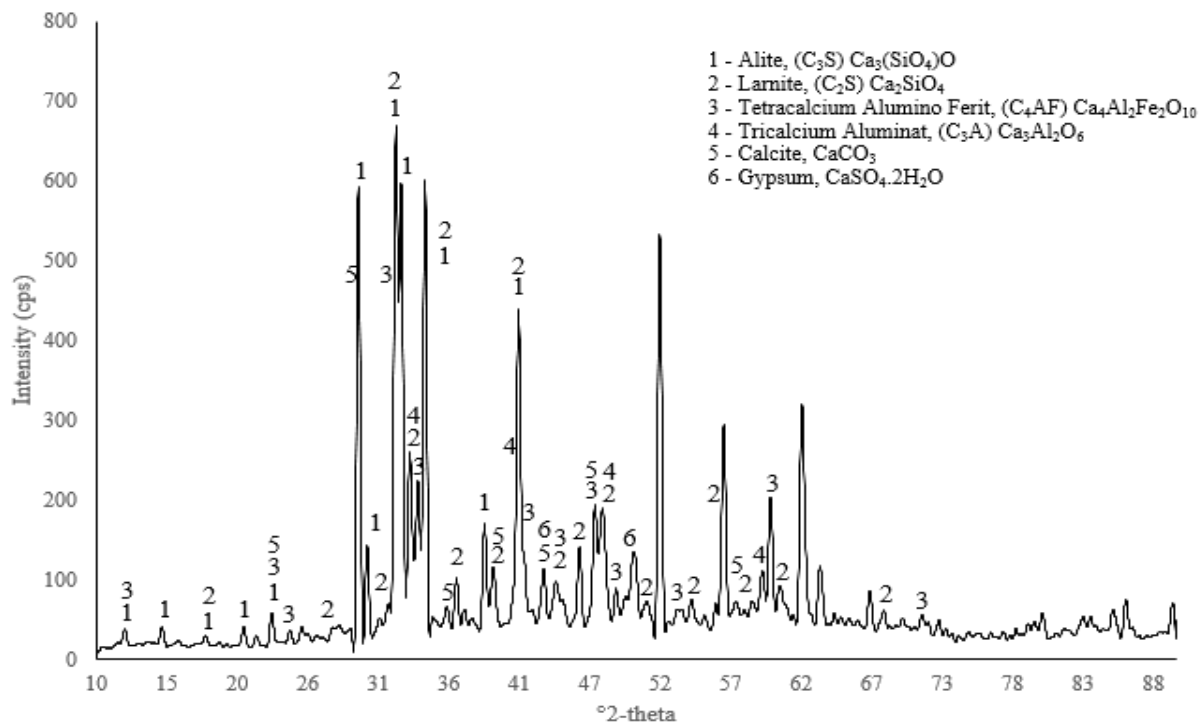
4.2.1.3. Pengujian XRD OPC

Pengujian *X-ray powder diffraction* (XRD) OPC dilakukan untuk mengidentifikasi prosentase komposisi suatu senyawa di dalamnya. Pengujian XRD dilakukan di Institut Teknologi Bandung. **Gambar 4.1** menunjukkan grafik XRD semen OPC. Dari grafik tersebut lalu dianalisa kandungan senyawa pada semen OPC seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Kandungan senyawa pada semen OPC

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Alite (C ₃ S)	Ca ₃ (SiO ₄)O	55.8
2	Larnite (C ₂ S)	Ca ₂ SiO ₄	16
3	Tetracalcium Alumino Ferit (C ₄ AF)	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	12.2
4	Tricalcium Aluminat (C ₃ A)	Ca ₃ Al ₂ O ₆	5.3
5	Calcite	CaCO ₃	7.1
6	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	3.5

Dari **Tabel 4.3** menunjukkan bahwa semen OPC yang diunakan memiliki kandungan C_3S 47.3%, C_2S 22.2%, C_4AF 11.5%, C_3A 6.8%, $CaCO_3$ 7.9%, dan $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 4.3%. Pada standard yang dikeluarkan oleh SNI 15-2049-2000 tidak mensyaratkan berapa persen senyawa yang harus dimiliki oleh semen tipe I, namun persyaratan itu untuk jenis-jenis selain tipe I. Misalnya mensyaratkan C_3S maksimum sebesar 35% untuk semen tipe IV. Menurut penelitian Stutzman, Feng, dan Bullard (2016) semen OPC memiliki kandungan senyawa C_3S 58.8%, C_2S 10.8%, C_3A 5.5%, dan C_4AF 9.2%. Maka dapat disimpulkan OPC yang digunakan pada penelitian ini dapat digunakan dan masih memasuki persyaratan.



Gambar 4. 1 Grafik XRD semen OPC

4.2.1.4. Pengujian XRF *Fly Ash Suralaya*

Pengujian *X-Ray Fluoroscence* (XRF) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari material *fly ash*, dengan konsentrasi unsur-unsur oksida di dalamnya. Dalam penelitian ini hasil XRF mengikuti penelitian dari (Wulandari 2018). Pengujian ini dilakukan di Laboratorium PT. Sucofindo. Hasil analisa XRF material *fly ash* dapat dilihat pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 4 Hasil pengujian XRF flash suralaya 1-4

No	Oksida	Jumlah (%wt)
1	SiO ₂	44.83
2	Al ₂ O ₃	29.23
3	Fe ₂ O ₃	4.66
4	TiO ₂	0.84
5	CaO	4.47
6	MgO	1.62
7	Cr ₂ O ₃	0.01
8	K ₂ O	0.68
9	Na ₂ O	1.32
10	SO ₃	0.62
11	MnO ₂	0.09
12	P ₂ O ₅	0.25
13	LoI	11.13

Menurut ASTM C 618-05 jumlah presentase minimum silikon dioksida (SiO₂) ditambah oksida aluminum (Al₂O₃) ditambah oksida besi (Fe₂O₃) *fly ash* kelas F adalah 70%, sementara hasil analisa XRF *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan total jumlah SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ adalah sebesar 78.72%. Dapat disimpulkan dari hasil analisa tersebut menurut ASTM C 618-05 *fly ash* yang digunakan pada penelitian ini masuk dalam persyaratan *fly ash* kelas F.

4.2.2. Analisa Pasir dan *Bottom Ash* Suralaya

Analisa yang dilakukan kepada agregat halus pasir yaitu analisa berat jenis dan penyerapan air. Untuk *bottom ash* dilakukan analisa berat jenis dan penyerapan air, dan pengujian XRF.

4.2.2.1. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus Pasir (ASTM C128-01)

Berat jenis dan penyerapan air agregat halus pasir didapatkan dengan analisa ASTM C128-01. Material agregat halus ini nantinya akan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan silinder beton dan balok beton. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	496	494	gr
2	Berat Piknometer Berisi Air (B)	1250	1250	gr
3	Berat Piknometer Berisi Benda Uji dan Air (Bt)	1570	1560	gr
4	Berat Jenis Curah ($Bk/(B+500-Bt)$)	2.755	2.6	
5	Berat Jenis Kering Permukaan ($500/(B+500-Bt)$)	2.778	2.632	
6	Berat Jenis Semu ($Bk/(B+Bk-Bt)$)	2.818	2.685	
7	Penyerapan ($((500-Bk)/ Bk) \times 100\%$)	0.8%	1.2%	
	Rata-rata $((I+II)/2)$	2.705		

Berdasarkan pengujian berat jenis yang dilakukan, terlihat pada **Tabel 4.5** berat jenis yang dihasilkan oleh agregat halus pasir adalah 2.705, sementara penyerapan air rata-ratanya sebesar 1%.

4.2.2.2. Berat Jenis dan Penyerapan Air *Bottom Ash* Suralaya (ASTM C128-01)

Berat jenis dan penyerapan air *bottom ash* suralaya dilakukan dengan metode ASTM C128-01, yaitu pengujian berat jenis yang dilakukan untuk agregat halus. *Bottom ash* pada penelitian ini digunakan sebagai substitusi agregat halus pada campuran silinder beton dan balok beton. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air *bottom ash* dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 6 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air *bottom ash*

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	459.5	462.2	gr
2	Berat Piknometer Berisi Air (B)	1250	1250	gr
3	Berat Piknometer Berisi Benda Uji dan Air (Bt)	1525	1515	gr
4	Berat Jenis Curah ($Bk/(B+500-Bt)$)	2.042	1.967	
5	Berat Jenis Kering Permukaan ($500/(B+500-Bt)$)	2.222	2.127	
6	Berat Jenis Semu ($Bk/(B+Bk-Bt)$)	2.490	2.344	
7	Penyerapan ($((500-Bk)/ Bk) \times 100\%$)	9%	8%	
	Rata-rata $((I+II)/2)$	2.175		

Berdasarkan pengujian berat jenis yang dilakukan terlihat hasil berat jenis dari *bottom ash* lebih kecil dari berat jenis pasir alami yaitu sebesar 2.175. Hasil ini mendekati dari hasil berat jenis *bottom ash* yang diukur oleh Wulandari (2018) yaitu sebesar 2.353. Rata-rata nilai penyerapan air *bottom ash* menunjukkan sebesar 8% yang jauh lebih besar daripada pasir alami, sehingga metode pengecoran benda uji nantinya harus dipastikan *bottom ash* dalam keadaan SSD.

4.2.2.3. Pengujian XRF *Bottom Ash* Suralaya

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari material *bottom ash*, dengan konsentrasi unsur-unsur oksida di dalamnya. Dalam penelitian ini hasil XRF mengikuti penelitian dari (Wulandari 2018) karena penggunaan material yang bersumber sama. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium PT. Sucofindo. Hasil analisa XRF material *bottom ash* dapat dilihat pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4. 7 Hasil pengujian XRF *bottom ash* suralaya

No	Oksida	Jumlah (%wt)
1	SiO ₂	47.25
2	Al ₂ O ₃	17.64
3	Fe ₂ O ₃	11.30
4	TiO ₂	0.68
5	CaO	9.46
6	MgO	5.10
7	Cr ₂ O ₃	0.02
8	K ₂ O	0.92
9	Na ₂ O	0.92
10	SO ₃	0.37
11	MnO ₂	2.49
12	P ₂ O ₅	0.19
13	LoI	3.49

Dari **Tabel 4.7** diketahui bahwa komposisi unsur/oksida pada *bottom ash* seperti yang telah dianalisa oleh Wulandari (2018), menunjukkan yang paling dominan adalah SiO₂, dan Al₂O₃. Dengan jumlah oksida SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ adalah 76.19%. Hasil tersebut lebih kecil daripada jumlah total presentase yang dimiliki oleh *fly ash*. Sehingga, sesuai syarat ASTM C 618-05, material *bottom ash* termasuk material pozolan kelas F.

4.2.3. Analisa Agregat Kasar Alami dan Buatan

Analisa yang dilakukan kepada agregat kasar alami (batu pecah) yaitu analisa berat jenis dan penyerapan air dan analisa saringan agregat kasar untuk campuran silinder beton dan balok beton. Untuk agregat buatan geopolimer dilakukan analisa berat jenis dan penyerapan air, pengujian keausan agregat kasar, dan analisa saringan agregat kasar.

4.2.3.1. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Alami (ASTM C127-01)

Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar alami didapatkan dengan analisa ASTM C127-01. Material agregat kasar alami ini nantinya akan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan silinder beton dan balok beton. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 4.8**.

Tabel 4. 8 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar alami

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	2173	2147	gr
2	Berat Benda Uji Kering Permukaan (Bj)	2210	2180	gr
3	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh didalam Air (Ba)	1382	1358	gr
4	Berat Jenis Curah (Bk/(Bj-Ba))	2.624	2.612	
5	Berat Jenis Kering Permukaan (Bj/(Bj-Ba))	2.669	2.652	
6	Berat Jenis Semu (Bk/(Bk-Ba))	2.747	2.721	
7	Penyerapan ((Bj-Bk)/ Bk)x100%	1.7%	1.5%	
	Rata-rata ((I+II)/2)	2.660		

Dari analisa berdasarkan ASTM C127-01 diperoleh rata-rata berat jenis agregat kasar alami sebesar 2.66 lalu angka rata-rata penyerapan air sebesar 1.62%. Nilai dari berat jenis ini kemudian akan digunakan dalam *mix design* campuran silinder beton dan balok beton, untuk menentukan berat isi beton melalui berat jenis agregat relatif.

4.2.3.2. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Buatan Geopolimer (ASTM C127-01)

Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar buatan didapatkan dengan analisa ASTM C127-01. Material agregat kasar buatan ini nantinya akan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan silinder beton dan balok beton. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 4.9, 4.10, dan 4.11**. Material yang diuji adalah material pasta geopolimer M400, M1000, dan M5000.

Tabel 4. 9 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M400

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	1310	1315	gr
2	Berat Benda Uji Kering Permukaan (Bj)	1510	1500	gr
3	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh didalam Air (Ba)	756	748	gr
4	Berat Jenis Curah (Bk/(Bj-Ba))	1.737	1.748	
5	Berat Jenis Kering Permukaan (Bj/(Bj-Ba))	2.003	1.994	
6	Berat Jenis Semu (Bk/(Bk-Ba))	2.365	2.319	
7	Penyerapan ((Bj-Bk)/ Bk)x100%	15%	14%	
	Rata-rata ((I+II)/2)	1.998		

Tabel 4. 10 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M1000

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	1340	1310	gr
2	Berat Benda Uji Kering Permukaan (Bj)	1560	1525	gr
3	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh didalam Air (Ba)	788	767	gr
4	Berat Jenis Curah (Bk/(Bj-Ba))	1.735	1.728	
5	Berat Jenis Kering Permukaan (Bj/(Bj-Ba))	2.02	2.012	
6	Berat Jenis Semu (Bk/(Bk-Ba))	2.427	2.413	
7	Penyerapan ((Bj-Bk)/ Bk)x100%	16%	16%	
	Rata-rata ((I+II)/2)	2.016		

Tabel 4. 11 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar buatan geopolimer M5000

No	Nomor Pengujian	I	II	
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	1350	1230	gr
2	Berat Benda Uji Kering Permukaan (Bj)	1590	1460	gr
3	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh didalam Air (Ba)	793	724	gr
4	Berat Jenis Curah (Bk/(Bj-Ba))	1.694	1.671	
5	Berat Jenis Kering Permukaan (Bj/(Bj-Ba))	1.995	1.984	
6	Berat Jenis Semu (Bk/(Bk-Ba))	2.424	2.431	
7	Penyerapan ((Bj-Bk)/ Bk)x100%	18%	19%	
	Rata-rata ((I+II)/2)	1.989		

Dari ketiga hasil berat jenis agregat kasar buatan geopolimer pada tabel di atas ditunjukkan bahwa pengaruh penambahan volume *healing agent* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai berat jenis dari agregat kasar buatan yaitu sebesar 1.989-2.016, namun berat jenis agregat kasar buatan geopolimer lebih kecil daripada berat jenis agregat kasar alami. Dalam rentang nilai berat jenis yang telah dianalisa diketahui bahwa agregat kasar buatan geopolimer yang dibuat dalam penelitian ini memiliki hasil berat jenis yang sedikit lebih besar, namun relatif senada terhadap penelitian yang dilakukan oleh Wulandari (2018) pada spesimen pasta geopolimer berbakteri (PGB) bervolume *healing agent* 400ml/m³ dengan perbandingan *fly ash* : alkali aktivator yaitu 65%:35% dan konsentrasi NaOH 4M, berat jenis yang dihasilkan pada spesimen tersebut yaitu sebesar 1.837. Angka penyerapan agregat kasar buatan geopolimer menunjukkan nilai yang lebih besar daripada angka penyerapan agregat kasar alami, menunjukkan bahwa terdapat banyak pori pada agregat kasar buatan geopolimer. Nilai berat jenis agregat kasar buatan akan digunakan sebagai perhitungan konversi volume agregat kasar buatan geopolimer, dikarenakan berat jenis agregat buatan ini jauh lebih kecil daripada agregat kasar alami, dibutuhkan volume yang lebih besar pula. Maka kebutuhan volume agregat kasar buatan dikonversi atau disamakan dengan kebutuhan volume agregat kasar alami yang kemudian nanti akan mempengaruhi berat kebutuhan agregat kasar buatan geopolimer.

4.2.3.3. Keausan Agregat Kasar Buatan dengan Mesin Abrasi Los Angeles (ASTM C 131-03)

Keausan agregat didapatkan dengan menggunakan metode ASTM C 131-03. Agregat kasar buatan geopolimer ini diuji keausan untuk melihat apakah nilai aus agregat buatan masih masuk dalam spesifikasi ASTM C 33-03. Material agregat kasar buatan ini nantinya akan dipakai dalam campuran silinder beton dan balok beton yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil pengujian keausan agregat kasar dengan mesin abrasi *los angeles*

dapat dilihat pada **Tabel 4.12, 4.13, dan 4.14**. Pengujian ini dilakukan kepada agregat kasar buatan pasta geopolimer M400, M1000, dan M5000.

Tabel 4. 12 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M400

Gradasi Pemeriksaan		B (fraksi 10-20 mm)	
Saringan		Berat sebelum (gr)	Berat sesudah (gr)
Lolos	Tertahan	(a)	(b)
19 mm	12.5 mm	2500	
12.5 mm	9.5 mm	2500	
Jumlah Berat		5000	
Berat tertahan saringan no. 12			3413.3
Keausan $((a-b)/a) \times 100\%$		31.73%	

Tabel 4. 13 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M1000

Gradasi Pemeriksaan		B (fraksi 10-20 mm)	
Saringan		Berat sebelum (gr)	Berat sesudah (gr)
Lolos	Tertahan	(a)	(b)
19 mm	12.5 mm	2500	
12.5 mm	9.5 mm	2500	
Jumlah Berat		5000	
Berat tertahan saringan no. 12			3432.7
Keausan $((a-b)/a) \times 100\%$		31.34%	

Tabel 4. 14 Hasil pengujian keausan agregat kasar buatan geopolimer M5000

Gradasi Pemeriksaan		B (fraksi 10-20 mm)	
Saringan		Berat sebelum (gr)	Berat sesudah (gr)
Lolos	Tertahan	(a)	(b)
19 mm	12.5 mm	2500	
12.5 mm	9.5 mm	2500	
Jumlah Berat		5000	
Berat tertahan saringan no. 12			3515
Keausan $((a-b)/a) \times 100\%$		29.7%	

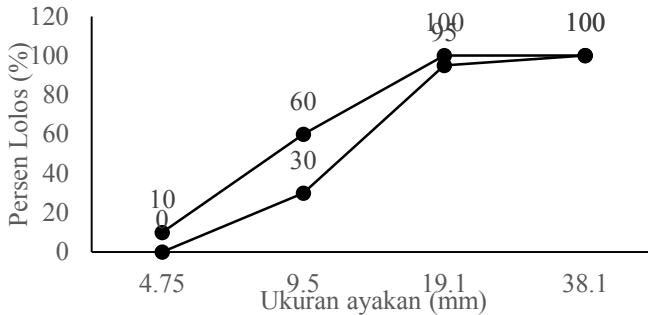
Dari hasil pengujian di atas, nilai keausan yang didapat dari ketiga variasi volume *healing agent* relatif sama dengan rentang nilai sebesar 29.7%-31.73%. Penambahan volume *healing agent* hanya mempengaruhi sedikit dari nilai keausan agregat dimana hanya selisih 2% pada konsentrasi *healing agent* terendah hingga terbesar. Persyaratan minimum nilai keausan suatu agregat kasar menurut ASTM C 33-03 yaitu sebesar 50%, sedangkan hasil dari pengujian keausan pada penelitian ini paling besar menunjukkan nilai sebesar 31.73%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa angka keausan agregat kasar buatan pasta geopolimer pada penelitian ini masuk dalam persyaratan ASTM C 33-03 dan dapat digunakan sebagai pengganti agregat kasar alami.

4.2.3.4. Analisa Saringan Agregat Kasar (ASTM C 136)

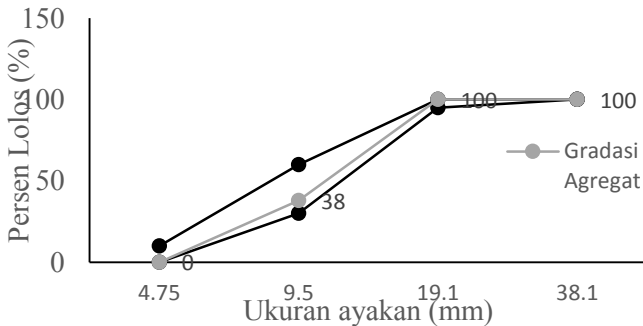
Analisa saringan agregat kasar dilakukan dengan metode ASTM C 136. Material yang dianalisa merupakan semua agregat kasar alami maupun buatan yang dibutuhkan untuk campuran benda uji silinder beton dan balok beton. Pada penelitian ini agregat yang digunakan berukuran maksimum sebesar 20mm, untuk ketentuan gradasi ukuran agregat kasar maksimum 20mm menurut SNI-03-2834-2000 dapat dilihat pada **Gambar 4.2** Hasil dari

analisa saringan agregat kasar berupa grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.3-4.5**. Untuk rekapitulasi hasil gradasi semua agregat untuk benda uji dapat dilihat pada **Tabel 4.15** dan **4.16**.

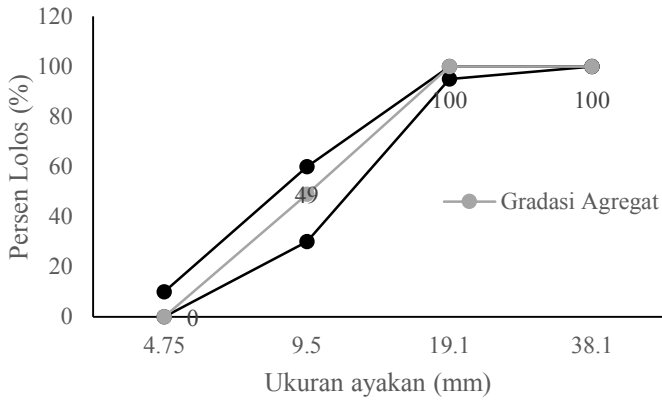
Gambar 4. 2 Grafik ketentuan gradasi agregat kasar ukuran maksimum 20 mm menurut SNI-03-2834-2000



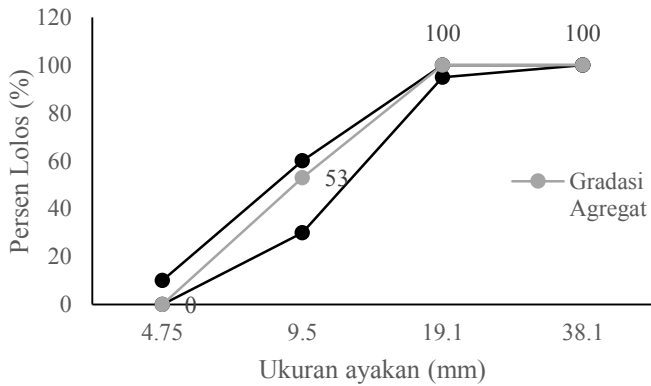
Gambar 4. 3 Grafik gradasi agregat kasar buatan untuk silinder F20B5M400



Gambar 4. 4 Grafik gradasi aagregat kasar buatan untuk silinder F20B5M1000



Gambar 4. 5 Grafik gradasi aagregat kasar buatan untuk silinder F20B5M5000



Tabel 4. 15 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji silinder beton

Kode Spesimen	Ukuran Saringan (mm)	Berat tertahan (gr)	Kumulatif	
			Tertahan	Lewat
SnF20B5M400	19.1	0	0%	100%
	12.5	1164.7	26%	74%
	9.5	1566	62%	38%
	4.75	1692.7	100%	0%
Total		4423.4		
SnF20B5M1000	19.1	0	0%	100%
	12.5	841.6	19%	81%
	9.5	1400.9	51%	49%
	4.75	2160	100%	0%
Total		4402.5		
SnF20B5M5000	19.1	0	0%	100%
	12.5	915	20%	80%
	9.5	1260	47%	53%
	4.75	2425	100%	0%
Total		4600		
SnF0B0M400	19.1	0	0%	100%
	12.5	1976.5	45%	55%
	9.5	1178.4	71%	29%
	4.75	1271	100%	0%
Total		4425.9		
SnF0B0M1000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1537.4	35%	65%
	9.5	1218.8	62%	38%
	4.75	1659.5	100%	0%
Total		4415.7		

Tabel 4.15 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji silinder beton (lanjutan)

Kode Spesimen	Ukuran Saringan (mm)	Berat tertahan (gr)	Kumulatif	
			Tertahan	Lewat
SnF0B0M5000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1745.1	39%	61%
	9.5	1100	64%	36%
	4.75	1577.4	100%	0%
Total		4422.5		
SnF20B5	19.1	0	0%	100%
	12.5	1727	30%	70%
	9.5	1605.5	58%	42%
	4.75	2382.8	100%	0%
Total		5715.3		
Kontrol	19.1	0	0%	100%
	12.5	1995	33%	67%
	9.5	1725	62%	38%
	4.75	2310	100%	0%
Total		6030		

Tabel 4.16 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji balok beton

Kode Spesimen	Ukuran Saringan (mm)	Berat tertahan (gr)	Kumulatif	
			Tertahan	Lewat
BnF20B5M400	19.1	0	0%	100%
	12.5	1519	44%	56%
	9.5	918.8	71%	29%
	4.75	1015.1	100%	0%
Total		3452.9		

Tabel 4.16 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji balok beton (lanjutan)

Kode Spesimen	Ukuran Saringan (mm)	Berat tertahan (gr)	Kumulatif	
			Tertahan	Lewat
BnF20B5M1000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1453.7	42%	58%
	9.5	827.4	65%	35%
	4.75	1206.5	100%	0%
Total		3487.6		
BnF20B5M5000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1607.5	47%	53%
	9.5	754.8	69%	31%
	4.75	1084.4	100%	0%
Total		3446.7		
BnF0B0M400	19.1	0	0%	100%
	12.5	1617.9	48%	52%
	9.5	743.8	70%	30%
	4.75	1030.8	100%	0%
Total		3392.5		
BnF0B0M1000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1483.8	43%	57%
	9.5	879.5	69%	31%
	4.75	1084.9	100%	0%
Total		3448.2		
BnF0B0M5000	19.1	0	0%	100%
	12.5	1747.5	48%	52%
	9.5	772.6	69%	31%
	4.75	1109.6	100%	0%
Total		3629.7		

Tabel 4.16 Rekapitulasi hasil gradasi agregat kasar untuk benda uji balok beton (lanjutan)

Kode Spesimen	Ukuran Saringan (mm)	Berat tertahan (gr)	Kumulatif	
			Tertahan	Lewat
BnF20B5	19.1	0	0%	100%
	12.5	1543.1	45%	55%
	9.5	804.3	69%	31%
	4.75	1060.8	100%	0%
Total		3408.2		
Kontrol	19.1	0	0%	100%
	12.5	1573.4	33%	67%
	9.5	1420.7	64%	36%
	4.75	1715.3	100%	0%
Total		4709.4		

Dari hasil gradasi semua agregat kasar yang sudah dianalisa terlihat bahwa semua gradasi masuk dalam ketentuan SNI-03-2834-2000, data dari gradasi agregat ini digunakan dalam campuran silinder beton dan balok beton untuk mendapatkan pengerjaan beton yang mudah dikerjakan sehingga campuran menjadi ideal dan padat. Dalam menganalisa gradasi agregat buatan ditemukan kesulitan dalam menentukan gradasi agar mencapai persyaratan SNI-03-2834-2000 dikarenakan dalam proses pembuatan agregat buatan mesin crusher tidak sepenuhnya akurat dalam membuat suatu ukuran agregat sehingga material agregat buatan harus dipecah secara manual hingga masuk ke dalam persyaratan SNI-03-2834-2000.

4.3. Analisa Benda Uji Silinder Pasta (Sp)

Analisa yang dilakukan terhadap benda uji ini adalah antara lain, analisa pengujian tes tekan, analisa pengujian XRD, analisa pengujian SEM, dan analisa pengujian biologis.

4.3.1. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan ini dilakukan berdasarkan ASTM C 39. Pengujian ini dilakukan untuk melihat pengaruh volume *healing agent* terhadap kuat tekan pada umur 7 hari dan 28 hari. Sampel benda uji yang digunakan dalam pengujian ini berupa silinder dengan diameter 5 cm dan tinggi 10 cm. Perawatan terhadap benda uji ini menggunakan *moist-curing*, yang juga telah dijelaskan pada bab 3. Hasil pengujian kuat tekan yang diambil adalah 3 nilai kuat tekan yang memiliki standart deviasi yang paling kecil lalu diambil rata-ratanya. Hasil pengujian kuat tekan tersebut dijelaskan pada **Tabel 4.17, 4.18, 4.19, dan 4.20.**

Tabel 4. 17 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M0

Keterangan	Kuat Tekan (Mpa)	
	7 hari	28 hari
M0	30.5	40.6
	29.9	44.0
	29.6	40.3
Rata-rata	30	41.7
Standart Deviasi	0.4229	2.0312
Kovarian	1.4086%	4.875
Kontrol Kualitas	Terbaik	Baik

Tabel 4. 18 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M400

Keterangan	Kuat Tekan (Mpa)	
	7 hari	28 hari
M400	26.0	36.6
	25.0	37.9
	22.7	38.7
Rata-rata	24.5	37.8
Standart Deviasi	1.7	1.1
Kovarian	6.8952%	2.8031%
Kontrol Kualitas	Sangat Baik	Terbaik

Tabel 4. 19 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M1000

Keterangan	Kuat Tekan (Mpa)	
	7 hari	28 hari
M1000	30.2	40.0
	27.6	41.0
	30.7	37.3
Rata-rata	29.5	39.4
Standart Deviasi	1.6603	1.9116
Kovarian	5.6331%	4.8514%
Kontrol Kualitas	Sangat Baik	Baik

Tabel 4. 20 Hasil kuat tekan silinder pasta (Sp) M5000

Keterangan	Kuat Tekan (Mpa)	
	7 hari	28 hari
M5000	31.7	32.3
	29.3	34.7
	32.7	32.8
Rata-rata	31.2	33.2
Standart Deviasi	1.7	1.2648
Kovarian	5.59%	3.804%
Kontrol Kualitas	Sangat Baik	Terbaik

Dari data hasil pengujian kuat tekan di atas, dapat diketahui bahwa kontrol kualitas dari semua uji coba laborototium dalam penelitian ini masih dalam batas standart yang diatur oleh SNI 03-6815-2002, yaitu masuk dalam kategori baik, sangat baik, dan terbaik. Tabel persyaratan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.21**.

Tabel 4. 21 Standar kontrol benda uji

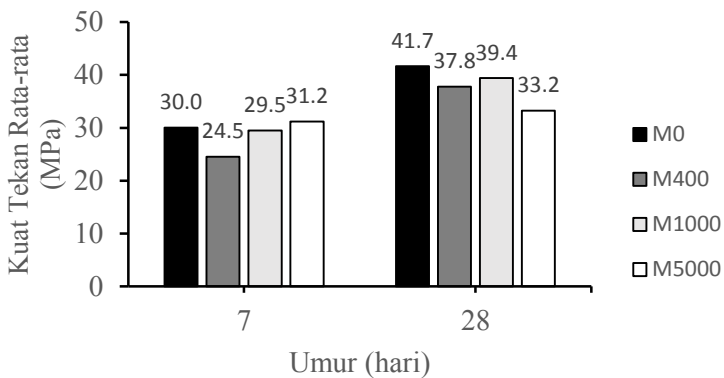
Standar Deviasi (MPa)		Kovarian (%)		Kontrol Kualitas
Kelas		Kelas		
Lapangan	Lab	Lapangan	Lab	
<2.81	<1.41	<3	<2	Terbaik
2.8-3.52	1.41-1.76	3-4	2-3	Sangat Baik
3.52-4.22	1.76-2.11	4-5	3-4	Baik
4.22-4.92	2.11-2.46	5-6	4-5	Cukup
>4.92	>2.46	>6	>5	Kurang

Data hasil pengujian pada tabel **Tabel 4.17, 4.18, 4.19, dan 4.20** kemudian direkap pada **Tabel 4.21** dan diplot kedalam bentuk grafik untuk mempermudah pola pengaruh volume *healing agent*

terhadap kuat tekan yang dimiliki oleh silinder pasta (Sp) selama umur pengetesan. Grafik tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.

Tabel 4. 22 Rekapitulasi kuat tekan benda uji

Nama Sample	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)	
	7 (hari)	28 (hari)
M0	30	41.7
M400	24.5	37.8
M1000	29.5	39.4
M5000	31.2	33.2



Gambar 4. 6 Kuat tekan silinder pasta (Sp) berdasarkan umur benda uji

Hasil pengujian kuat tekan silinder pasta (Sp) yang ditunjukkan sesuai **Tabel 4.22** dan **Gambar 4.6** menunjukkan bahwa campuran pasta geopolimer M5000 pada umur 7 hari memiliki kuat tekan yang paling tinggi daripada campuran silinder lainnya dan pada umur 28 hari kuat tekan tertinggi terjadi pada spesimen M0. Terlihat keberadaan *healing agent* memberikan *strength development* pada umur 7 hari, namun secara umum

menurunkan kuat tekan pada umur 28 hari dimana kuat tekan spesimen M5000 turun sebesar 20% dari kuat tekan spesimen M0. Dari semua variasi volume *healing agent* yang diberikan terlihat M1000 mempunyai besar kuat tekan yang optimum pada umur 28 hari.

Terjadinya penurunan kuat tekan dicurigai karena pasta geopolimer dengan kandungan *fly ash* : alkali aktivator, 75:25 dengan NaOH 8 Molar tidak mempunyai cukup banyak pori sebagai tempat *healing agent* untuk melakukan presipitasi kalsium karbonat. Adanya pori dalam pasta geopolimer dapat memberikan cukup ruang bagi bakteri untuk mengendapkan kalsium karbonat, hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wulandari (2018) dengan menggunakan kandungan *fly ash* : alkali aktivator sebesar 65:35 dengan NaOH 4 Molar terjadi peningkatan kuat tekan geopolimer berbasis bakteri/*healing agent* karena mempunyai pori yang lebih banyak. Konsentrasi NaOH dapat mempengaruhi jumlah pori yang terbentuk dalam pasta geopolimer. Bakri dkk. (2011) mengamati kondisi mikrostruktur dari pasta geopolimer dengan konsentrasi NaOH yang berbeda-beda. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi molaritas NaOH terlihat semakin sedikit proporsi mikrosfer *fly ash* yang tidak bereaksi sehingga tidak banyak menimbulkan pori.

Peneliti lain juga menunjukkan bahwa aplikasi bakteri *sporosarcina pasteurii* dapat menurunkan kuat tekan. Penambahan bakteri *sporosarcina pasteurii* menyebabkan kuat tekan kubus mortar semen menurun sebesar 11%-18% ketika dibandingkan dengan spesimen kontrol. Namun bakteri tetap melakukan presipitasi kalsium karbonat dengan meningkatkan kuat tekan ketika dibandingkan dengan spesimen yang hanya dicampur oleh nutrisi bakteri (Aregawi dkk. 2016).

Di lain sisi penyebab terjadinya *strength development* dicurigai karena aktifitas bakteri yang hanya cenderung aktif hingga umur 7 hari. Hal ini didukung dengan penelitian oleh Chidara, Nagulagama, dan Yadav (2014) dimana penambahan bakteri *sporosarcina pasteurii* + urea dapat menunjukkan

penguatan kuat tekan awal pada umur 7 hari, namun relatif lebih kecil terhadap spesimen kontrol pada umur 28 hari. Pendekatan literatur ini dipakai karena penelitian efek bakteri *sporosarcina pasteurii* terhadap pasta geopolimer sejauh ini belum ada. Untuk memastikan faktor yang mempengaruhi kuat tekan selanjutnya akan dilakukan pengujian XRD pada sub bab selanjutnya. Hal itu dikarenakan kuat tekan benda uji dapat dipengaruhi oleh berbagai macam factor dalam proses pencampuran, perawatan dan pencetakan yang baik.

4.3.2. Pengujian XRD

Untuk lebih memahami tentang mikrostruktur dan senyawa yang terbentuk pada silinder pasta geopolimer dengan konsentrasi volume yang berbeda dalam penelitian ini, maka perlu dilakukan pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*). Senyawa yang dibaca pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 4.23**.

Tabel 4. 23 Senyawa pembacaan grafik XRD Silinder Pasta (Sp)

Simbol	Senyawa Oksida	Unsur Kimia
1	Albite	NaAlSi ₃ O ₈
2	Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
3	Natrosilite	Na ₂ Si ₂ O ₅
4	Quartz Low	SiO ₂
5	Magnetite	Fe ₃ O ₄
6	Sodium Carbonate	Na ₂ CO ₃
7	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO ₃
8	Ammonia	NH ₃

Pada campuran silinder pasta geopolimer, albite dan anorthite merupakan hasil dari polikondensasi monomer orthosialate (OH)₃-Si-O-Al-(OH)₃. Terputusnya ion Si dan Al yang berasal dari *fly ash* melalui aksi dari ion hidrosida (OH) menyebabkan terbentuknya monomer orthosialate, ion positif Na⁺ dan Ca²⁺ akan menyeimbangkan muatan negatif dari Al dan akan

membentuk struktur polimer. Albite dan anorthite merupakan *feldspar* yang berpengaruh banyak terhadap kuat tekan silinder geopolimer. Hal ini ditunjukkan bahwa penambahan bahan geopolimer yang memiliki kandungan albite dominan sebesar 40-50% pada tanah liat berbusa yang mengandung lumpur menunjukkan peningkatan kuat tekan dari 20 MPa hingga 90 Mpa (Davidovits 2008). Pada campuran ini calcite dapat terbentuk dengan adanya penambahan bakteri, pembentukan calcite juga merupakan indikasi bahwa bakteri yang ada dalam silinder pasta bermetabolisme (Jonkers 2011). Kandungan ammonia pada silinder pasta juga dicari terkait dengan proses metabolisme bakteri yang menghasilkan ammonium dan karbonat (Tittelboom dkk. 2010). Quartz merupakan senyawa yang ada dalam *fly ash* sebagai bukti adanya kandungan yang terdapat pada pengujian XRF. Sodium karbonat diinput pada analisa XRD untuk mengetahui bukti bahwa ion Na dapat bereaksi dengan karbonat yang dihasilkan oleh metabolisme bakteri. **Gambar 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10** menunjukkan grafik XRD dari silinder pasta geopolimer. Dari grafik tersebut lalu dianalisa kandungan senyawa pada semen OPC seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.24, 4.25, 4.26, dan 4.27**. Dari hasil pengujian XRD tersebut, akan ditarik beberapa kesimpulan sehingga didapatkan pola kandungan senyawa oksida di dalam sampel tersebut.

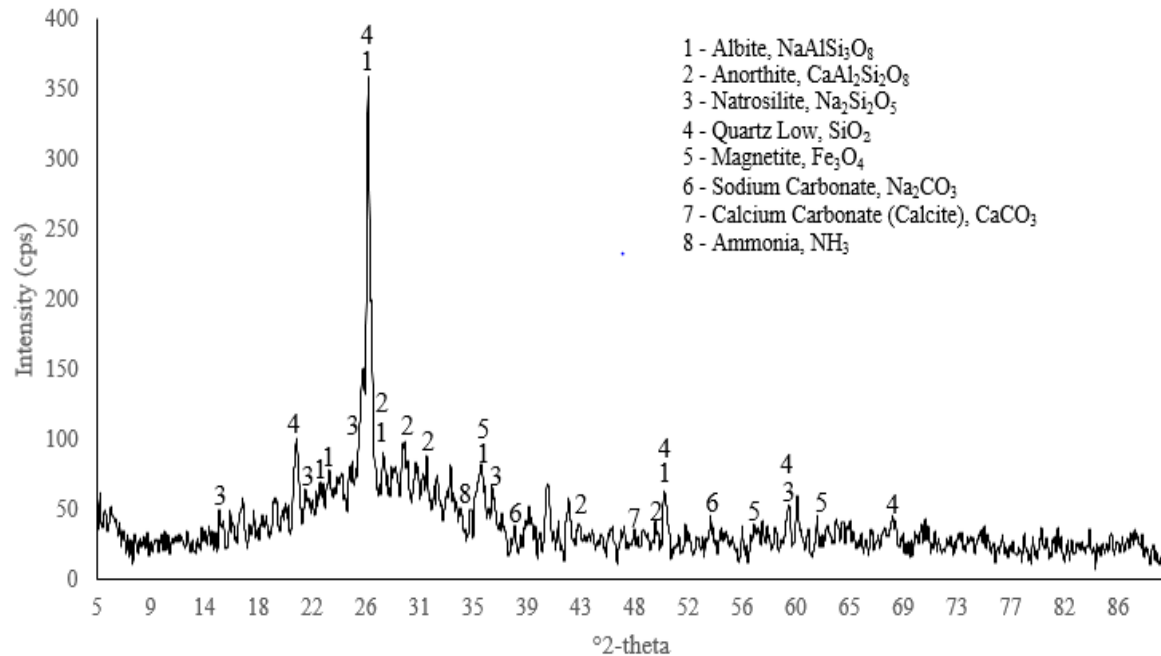
Tabel 4. 24 Kandungan senyawa pada M0

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	33.4
2	Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	13.4
3	Natrosilite	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	26
4	Quartz Low	SiO_2	18.1
5	Magnetite	Fe_3O_4	5.2
6	Sodium Carbonate	Na_2CO_3	3.2

Tabel 4.23 Kandungan senyawa pada M0 (lanjutan)

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
7	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO ₃	0.4
8	Ammonia	NH ₃	0.3

Dari **Tabel 4.24** didapatkan bahwa senyawa albite memiliki kandungan paling banyak diantara senyawa lainnya yaitu sebesar 33.4%. Sedangkan, senyawa lainnya seperti natrosilite memiliki kandungan sebesar 26%, quartz sebesar 18.1%, dan anorthite sebesar 13.4%. Ammonia merupakan senyawa yang memiliki kandungan paling sedikit dikarenakan *healing agent* tidak dicampur pada pasta.

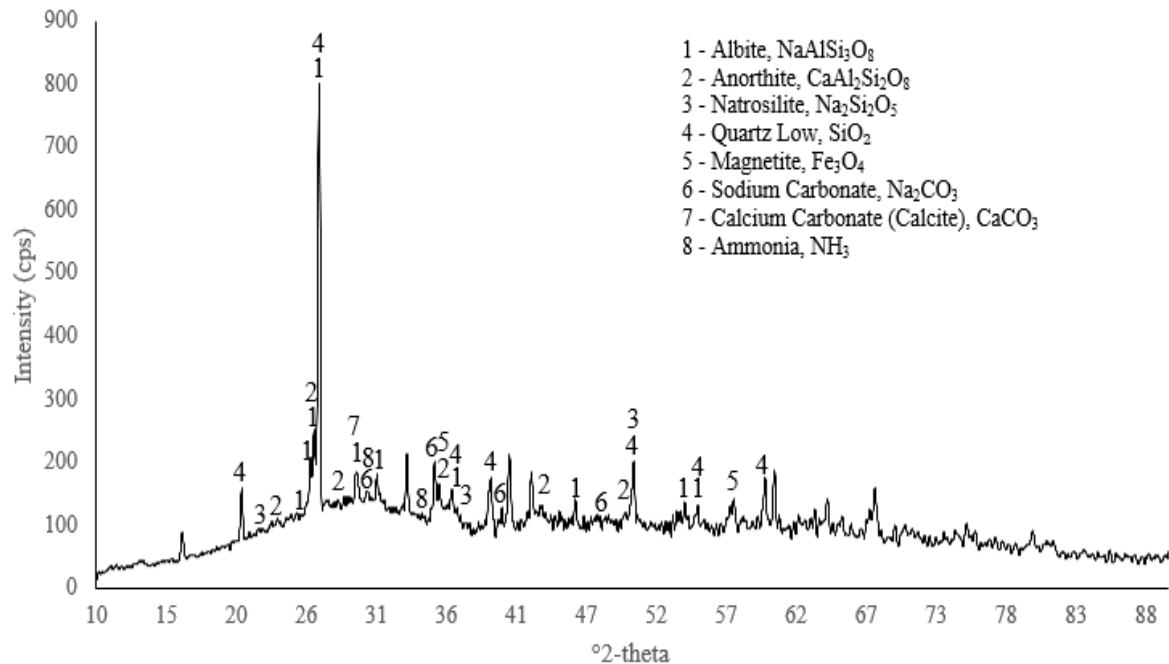


Gambar 4. 7 Grafik XRD silinder pasta M0

Tabel 4. 25 Kandungan senyawa pada M400

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	28.1
2	Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	11.6
3	Natrosilite	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	24.6
4	Quartz Low	SiO_2	20.6
5	Magnetite	Fe_3O_4	6.5
6	Sodium Carbonate	Na_2CO_3	5.1
7	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	1.9
8	Ammonia	NH_3	1.8

Dari **Tabel 4.24** senyawa albite memiliki kandungan paling banyak sebesar 28.1%, natrosilite sebesar 24.6%, quartz sebesar 20.6%, dan anorthite sebesar 11.6%. Ammonia pada M400 sedikit bertambah karena kandungan *healing agent* yang dimasukkan dalam silinder pasta, kandungan tersebut sebesar 1.8% begitu juga dengan calcite bertambah menjadi 1.9%. **Gambar 4.8** menunjukkan grafik XRD dari M400.

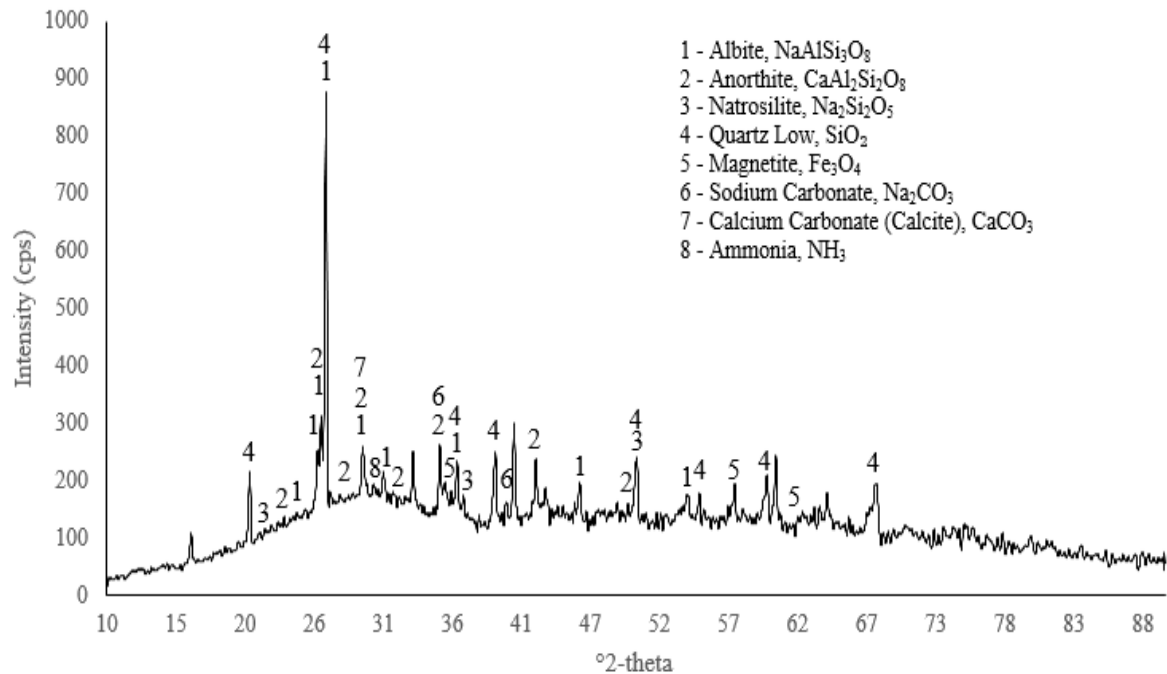


Gambar 4. 8 Grafik XRD silinder pasta M400

Tabel 4. 26 Kandungan senyawa pada M1000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	30.7
2	Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	11.3
3	Natrosilite	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	18.8
4	Quartz Low	SiO_2	21.1
5	Magnetite	Fe_3O_4	5
6	Sodium Carbonate	Na_2CO_3	6.2
7	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	3.9
8	Ammonia	NH_3	3.1

Dari **Tabel 4.26** diatas dapat dilihat bahwa senyawa albite masih memiliki kandungan yang lebih banyak diantara senyawa lainnya yaitu sebesar 30.7%. Lalu quartz semakin banyak sebesar 21.1%, natrosilite sebesar 18.8%, dan anorthite sebesar 11.3%. Ammonia ditemukan sebesar 3.1% dengan adanya penambahan healing agent, sementara calcite ditemukan sebesar 3.9%. **Gambar 4.9** menunjukkan grafik XRD silinder pasta M1000.

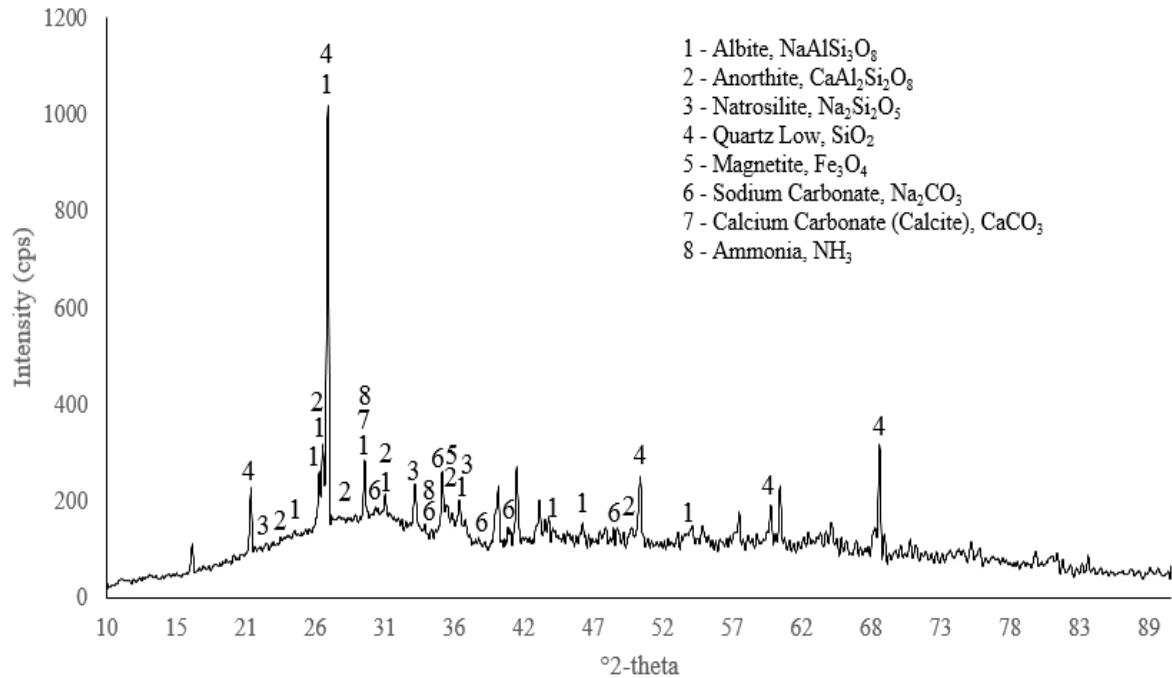


Gambar 4. 9 Grafik XRD silinder pasta M1000

Tabel 4. 27 Kandungan senyawa pada M5000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	24.4
2	Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	10.6
3	Natrosilite	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	17.8
4	Quartz Low	SiO_2	22
5	Magnetite	Fe_3O_4	4.5
6	Sodium Carbonate	Na_2CO_3	9.8
7	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	4.4
8	Ammonia	NH_3	6.5

Dari data **Tabel 4.27** diatas dapat dilihat kandungan albite menurun cukup banyak menjadi sebesar 24.4%, dikarenakan adanya larutan *healing agent* yang cukup banyak dimasukkan ke dalam campuran silinder pasta. Anorthite sebesar 10.6%, natrosiite 17.8%, dan quartz sebesar 22%. Ditemukan peningkatan jumlah ammonia dan calcite pada M5000 sebesar 4.4% dan 6.5%. **Gambar 4.10** menunjukkan grafik XRD dari silinder pasta M5000.



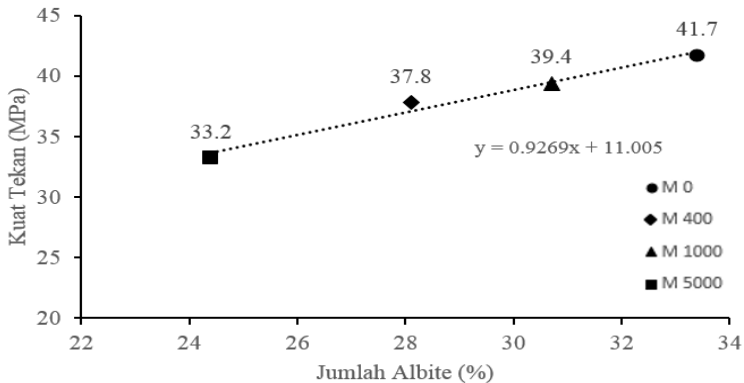
Gambar 4. 10 Grafik XRD silinder pasta M5000

Dengan membandingkan hasil pengujian XRD diantara M0, M400, M1000, dan M5000. Maka dapat ditarik kesimpulan ataupun analisa dari peneliti dengan hasil sebagai berikut :

1. Kandungan albite pada M0 sebesar 33.4% terlihat menurun sebesar 28.1% pada M400 dan 30.7% pada M1000. Sementara pada M5000 terlihat kandungan albite terkecil sebesar 24.4%. Kandungan albite yang ada pada silinder pasta mempunyai peran yang besar terhadap kuat tekan beton, jika dilihat dari persentase albite masing-masing sampel menunjukkan korelasi yang sama terhadap besar kuat tekan yang diperoleh oleh masing-masing sampel. Hubungan jumlah albite terhadap kuat tekan ditunjukkan pada **Gambar 4.11**. Kandungan albite pada M400 dan M1000 relatif sama karena jumlah *healing agent* yang dimasukkan ke dalam sistem jumlahnya tidak terlalu signifikan begitu pula dengan kuat tekan antara M400 dan M1000 yang relatif sama. Komposisi albite pada benda uji menunjukkan besaran yang relatif.
2. Kandungan anorthite tiap sampel relatif sama, karena anorthite merupakan ikatan Ca yang bersumber dari *fly ash* sendiri. Kandungan anorthite pada M0 sebesar 13.4%, M400 sebesar 11.6%, M1000 sebesar 11.3%, dan M5000 sebesar 10.6%. Penurunan jumlah anorthite dari M0 hingga M5000 disebabkan karena semakin banyaknya volume *healing agent* yang dimasukkan dalam campuran pasta, Ca yang bersumber dari *fly ash* akan bereaksi dengan hasil metabolisme bakteri berupa CO_3 yang mengakibat sumber Ca tiap-tiap sampel semakin berkurang untuk berikatan dengan Si-O-Al.
3. Natrosilite dicari untuk mengetahui seberapa banyak Na pada sistem yang bereaksi. Pada sampel M0 ditemukan natrosilite sebesar 26%, pada M400 sebesar 24.6%, pada M1000 sebesar 18.8%, dan pada M5000 sebesar 17.8%. Jika dilihat dari jumlah tiap sampel, kandungan natrosilite mengalami penurunan seiring dengan penambahan jumlah

healing agent pada campuran, dikarenakan jumlah Na pada sistem diganggu oleh keberadaan *healing agent* yang dapat mengikat Na, dibuktikan dengan adanya sodium karbonat pada tiap-tiap sampel.

4. Jumlah quartz low meningkat seiring dengan penambahan *healing agent*. Pada M0 jumlah quartz low sebesar 18.1%, pada M400 sebesar 20.6%, pada M1000 sebesar 21.1%, dan pada M5000 sebesar 22%. Meningkatnya kandungan quartz low ini disebabkan karena Na pada sistem bereaksi dengan *healing agent* dan menghambat kuat tekan, karena Na pada sistem bereaksi dengan *healing agent* maka natrosilite semakin berkurang begitu juga dengan albite pada M5000.
5. Penambahan *healing agent* pada sistem banyak mempengaruhi dari kandungan calcite, sodium karbonat, maupun ammonia. Calcite ditemukan meningkat seiring dengan penambahan volume *healing agent*. Hal ini sejalan dengan apa yang dilakukan pada pebelitian sebelumnya yang menemukan bahwa calcite bertambah seiring dengan bakteri yang dimasukkan pada sistem Jonkers (2011). Namun pada M5000 calcite yang ditemukan tidak memberikan peningkatan jumlah yang signifikan, hal ini mengacu pada jumlah deposit Ca yang ada pada *fly ash* tidak mencukupi untuk bereaksi dengan semua hasil metabolisme *healing agent* yaitu CO₃. Sodium karbonat ditemukan meningkat seiring dengan penambahan volume *healing agent* karena Na yang diganggu oleh *healing agent* dapat membentuk sodium karbonat. Ammonia ditemukan jejak pada tiap sampel yang mengandung *healing agent* ammonia adalah salah satu hasil dari proses bakteri yang nantinya akan menjadi ammonium (NH₄⁺).



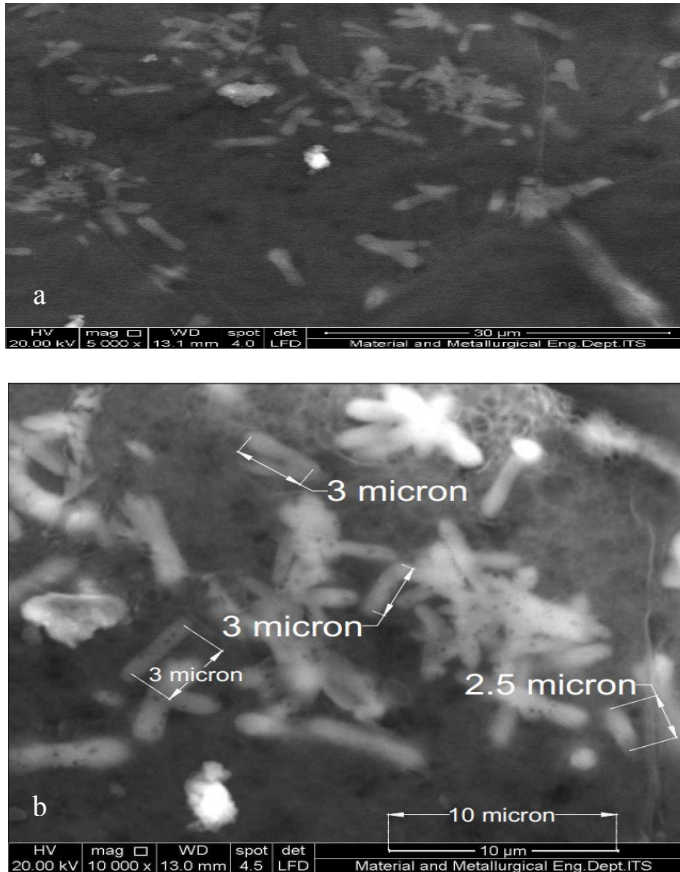
Gambar 4. 11 Hubungan kuat tekan dengan jumlah albite

Pada **Gambar 4.11** diatas dapat dilihat hubungan jumlah albite terhadap kuat tekan masing-masing sampel. Terlihat bahwa kandungan jumlah albite berbanding dengan kuat tekan yang dihasilkan dan dapat dikorelasikan. Pengaruh perubahan kandungan albite maupun kuat tekan ini disebabkan karena adanya *healing agent* yang terlalu banyak dan akhirnya dapat mengganggu reaksi Na dengan Si-O-Al untuk melakukan polikondensasi monomer geopolimer. Korelasi kuat tekan terhadap jumlah albite telah dibuktikan dengan penelitian sebelumnya yang direview oleh Davidovits (2008), ditunjukkan dengan penambahan bahan geopolimer yang memiliki kandungan albite dominan sebesar 40-50% pada tanah liat berbuisa yang mengandung lumpur menghasilkan peningkatan kuat tekan dari 20 MPa hingga 90 Mpa. Pada pembuatan pasta M5000 fakta di lapangan menunjukkan bahwa konsistensi campuran terlihat lebih encer dan lebih *workable* dibandingkan dengan campuran lain yang mengandung lebih sedikit *healing agent*.

4.3.3. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

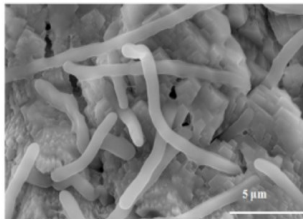
Pengujian ini dilakukan di Institut Teknologi Bandung dan Lab Material dan Metalurgi ITS, yang bertujuan untuk mendapatkan gambaran bentuk permukaan dan tekstur dari benda

uji silinder pasta, analisa SEM juga dilakukan pada sampel cair *healing agent* yang nantinya akan dimasukkan dalam campuran. Hasil pengujian SEM yang ditampilkan menggunakan perbesaran yang bervariasi. Hasil pengujian SEM diperlihatkan pada **Gambar 4.12, 4.14, 4.15, 4.16, dan 4.17.**

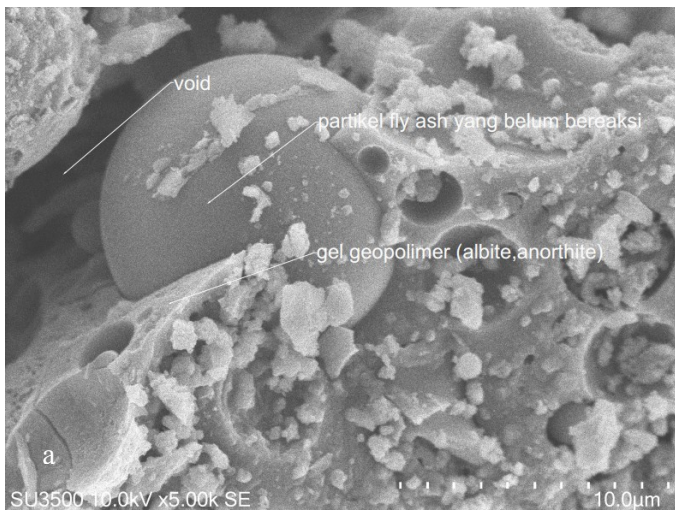


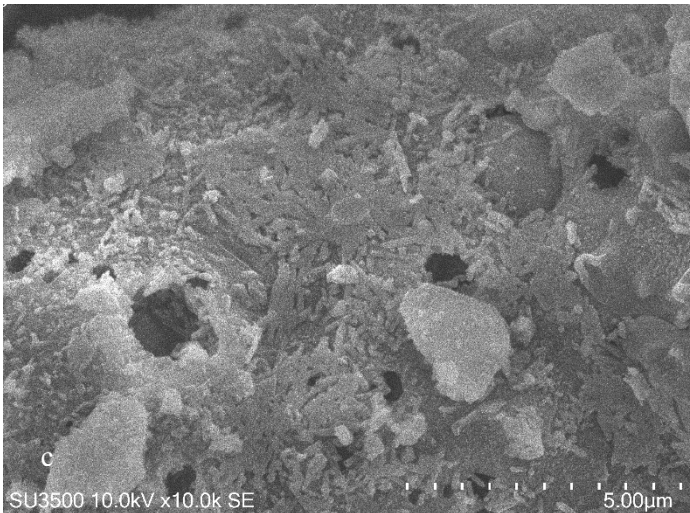
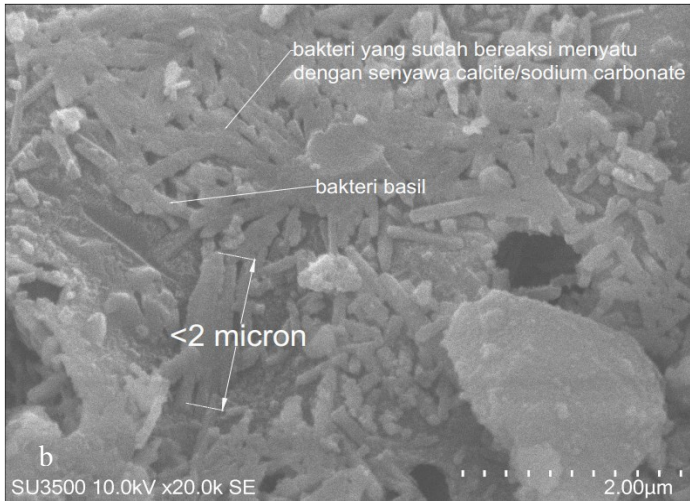
Gambar 4. 12 a) Gambar visualisasi hasil SEM cairan *healing agent* perbesaran 5000 kali b) Gambar visualisasi hasil SEM cairan *healing agent* perbesaran 10000 kali

Pada hasil gambar SEM diatas menunjukkan bahwa *healing agent* mempunyai bakteri *sporosarcina pasteurii* yang berbentuk batang/basil. Bakteri ini mempunyai bentuk yang sama dengan bakteri yang digunakan oleh Kim dkk. (2016) yang ditunjukkan pada **Gambar 4.13**. Pada gambar tersebut juga terlihat dimensi bakteri yang ada pada cairan *healing agent* sekitar $\pm 3 \mu\text{m}$. Ukuran dimensi ini nantinya akan disamakan dengan bentuk bakteri yang ada pada benda uji silinder pasata geopolimer.

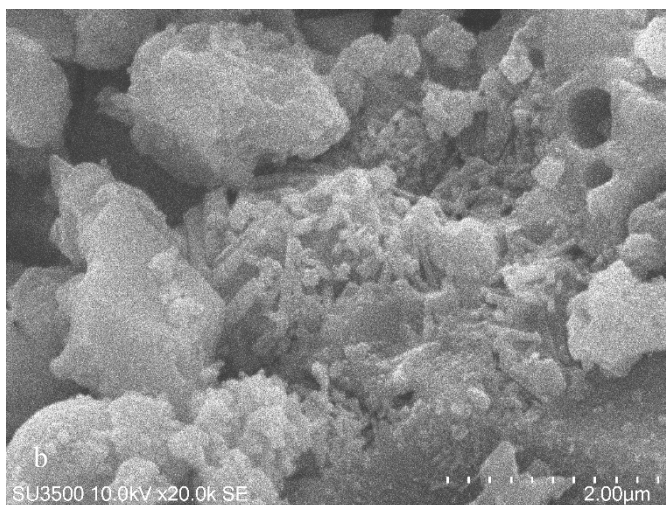
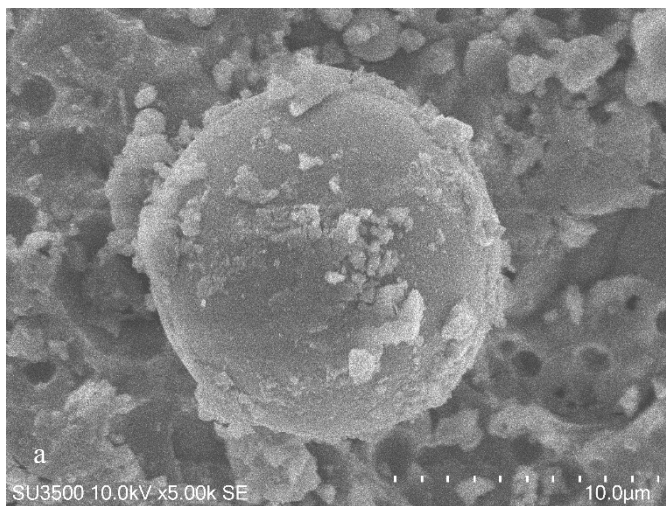


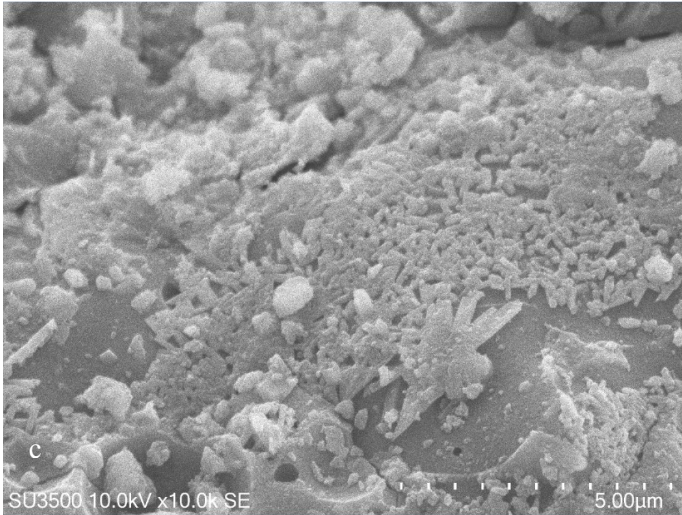
Gambar 4. 13 Bakteri Sporosarcina (Sumber : Kim dkk. 2016)





Gambar 4. 14 a) Gambar visualisasi hasil SEM partikel *fly ash* yang tidak bereaksi pada M1000 b) dan c) Visualisasi hasil SEM terdapat bentuk bakteri meyerupai batang pada M1000





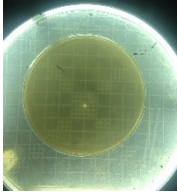
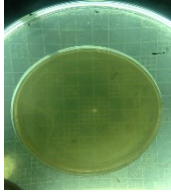
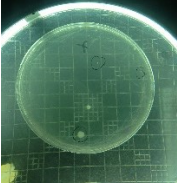
Gambar 4. 15 a) Gambar visualisasi hasil SEM partikel *fly ash* yang tidak bereaksi pada M5000 b) Visualisasi hasil SEM terdapat bentuk bakteri meyerupai batang pada M5000

Dari hasil visualisasi SEM di atas terlihat adanya partikel *fly ash* yang belum bereaksi dikarenakan perbandingan *fly ash* terhadap alkali aktivator yang digunakan pada penelitian ini sebesar 75:25, sehingga menyebabkan banyak partikel *fly ash* yang mengandung atom Si dan Al belum dapat terurai dengan NaOH (Alehyen dkk. 2017). Pada visualisasi SEM juga terdapat terduga indikasi bakteri *sporosarcina pasteurii* berbentuk basil/batang yang sudah bereaksi dengan Ca maupun Na membentuk calcite dan sodium carbonate yang ditemukan dalam analisa XRD pada sub bab sebelumnya. Hal ini dapat disimpulkan bahwa bakteri tersebut masih ada pada umur silinder 28 hari dan sudah mengalami metabolisme, keberadaan bakteri pada benda uji akan dibuktikan dengan metode *determination of bacterial number* pada sub bab berikutnya.

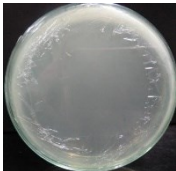
4.3.4. Pengujian *Determination of Bacterial Number using Standart Plate Count* dan Analisa Mikroorganisme

Pengujian *standard plate count* merupakan salah satu metode pengukuran tidak langsung terhadap kepadatan sel untuk mengetahui informasi berkaitan dengan bakteri yang hidup dalam bentuk *colony forming unit* (CFU). Benda uji untuk pengujian ini adalah *healing agent* yang berwujud cair dan *healing agent* dalam pasta geopolimer yang berwujud serbuk. Kemudian untuk pengujian analisa mikroorganisme dilakukan untuk mengidentifikasi apakah bakteri yang hidup dalam benda uji merupakan bakteri yang diinginkan yaitu *sporosarcina pasteurii*. Pengujian ini dilakukan pada benda uji yang berumur 1 hari pasca cetak. Hasil dari pengujian *standart plate counting* ditunjukkan pada **Tabel 4.28**. Untuk pengujian analisa mikroorganisme ditunjukkan pada **Tabel 4.29**.

Tabel 4. 28 Hasil pengujian *standart plate counting*


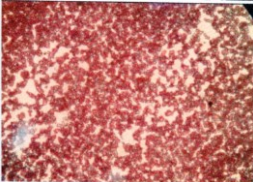
NO	Sampel	Jumlah Koloni	Foto	
			Ulangan 1	Ulangan 2
1	<i>Liquid Healing Agent</i>	U1: 6 U2: 10 Jumlah: 8×10^1 cfu/ml		
2	M400	U1 : 3 U2 : - Jumlah : 3×10^1 cfu/gram		

Tabel 4.28 Hasil pengujian *standart plate counting* (lanjutan)


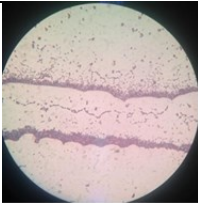
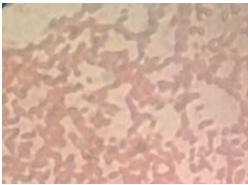
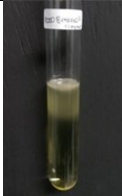
NO	Sampel	Jumlah Koloni	Foto	
			Ulangan 1	Ulangan 2
3	M1000	U1 : 7 U2 : - Jumlah : 7×10^1 cfu/gram		

Dari **Tabel 4.28** di atas, dapat disimpulkan bahwa bakteri tersebut eksis pada kedua media benda uji baik itu pada media sumber *healing agent* maupun media pasta geopolimer. Media pasta geopolimer ini mengandung volume *healing agent* cair sebanyak 400 ml/m^3 dan 1000 ml/m^3 . Pada media *liquid healing agent* terdapat koloni sejumlah 80 unit/ml nya, sedangkan pada M400 dan M1000 terdapat 30 dan 70 cfu/gram.

Tabel 4. 29 Hasil pengujian analisa mikroorganisme

Sampel	Keterangan	Foto
M400	Gram Positif (berwarna ungu)	
	Terdapat Endospora (sedikit ada bulat hijau)	

Tabel 4.29 Hasil pengujian analisa mikroorganisme (lanjutan)

Sampel	Keterangan	Foto
M400	Aerob obligat (membutuhkan oksigen)	
M1000	Gram positif (berwarna ungu)	
	Terdapat Endospora (sedikit ada bulat hijau)	
	Aerob obligat (membutuhkan oksigen)	

Dari **Tabel 4.29** di atas peneliti menganggap bahwa metode identifikasi di atas dapat menunjukkan bahwa bakteri yang ada dalam *healing agent* memang merupakan bakteri *sporosarcina pasteurii*.

4.4. Analisa Benda Uji Silinder Beton (Sn)

Analisa yang dilakukan pada benda uji ini adalah tes tekan yang bertujuan untuk mengetahui perbedaan kuat tekan antara beton silinder menggunakan agregat kasar alami dan beton silinder menggunakan agregat kasar buatan. Kemudian untuk menganalisa pengaruh *fly ash* dan *bottom ash* terhadap kuat tekan beton.

4.4.1. Pengujian Kuat Tekan

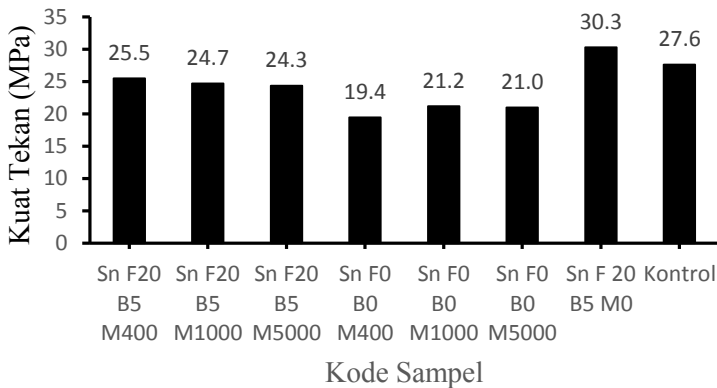
Pengujian kuat tekan ini dilakukan berdasarkan ASTM C 39 di Lab Beton dan Material Teknik Sipil ITS. Benda uji silinder beton diuji tekan pada umur 28 hari, dengan dimensi tinggi 20 cm dan diameter 10 cm. Perawatan terhadap benda uji ini menggunakan *moist-curing*, yang juga telah dijelaskan pada bab 3. Hasil pengujian kuat tekan yang diambil adalah rata-rata dari 3 hasil kuat tekan yang ada. **Tabel 4.30** menunjukkan kuat tekan masing-masing sampel yang telah diuji.

Tabel 4. 30 Hasil kuat tekan rata-rata benda uji silinder beton (Sn)

Nama Sample	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)
	28 hari
Sn F20 B5 M400	25.5
Sn F20 B5 M1000	24.7
Sn F20 B5 M5000	24.3
Sn F0 B0 M400	19.4
Sn F0 B0 M1000	21.2
Sn F0 B0 M5000	20.3
Sn F 20 B5 M0	30.3
Kontrol	27.6

Dari hasil **Tabel 4.30** terlihat bahwa benda uji Sn F20 B5 M0 mempunyai nilai kuat tekan yang paling besar dari kuat tekan

yaitu sebesar 30.3 MPa, dengan rencana kuat tekan yang didesain sebesar 25 MPa. Sementara benda uji kontrol memiliki kuat tekan sebesar 27.6 MPa, kuat tekan benda uji yang menggunakan agregat buatan relatif menurun dari benda uji kontrol dikarenakan konversi volume yang telah diubah untuk memudahkan pekerjaan. Konversi dilakukan karena berat jenis benda uji agregat buatan terlalu kecil dari berat jenis agregat alami. Untuk lebih mengetahui pengaruh dari penggantian agregat alami dengan agregat buatan dalam benda uji silinder beton maka dibuatlah grafik pada **Gambar 4.16**.



Gambar 4. 16 Grafik kuat tekan silinder beton (Sn)

Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa semua sampel yang mengandung agregat buatan mengalami penurunan, namun saat dibandingkan dengan konsentrasi volume *healing agent* yang dimasukkan ke dalam agregat buatan kuat tekan menunjukkan besar yang relatif sama seperti pada kuat tekan Sn F20B5M400, Sn F20B5M1000, dan Sn F20B5M5000 mempunyai kuat tekan sebesar 24.3 – 25.5 Mpa. Untuk Sn F0B0M400, Sn F0B0M1000, dan Sn F0B0M5000 mempunyai kuat tekan pada rentang 19.4 – 21.1. Dapat disimpulkan bahwa sampel yang mengandung *fly ash* 20% dan *bottom ash* 5% mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi dari pada sampel yang tidak memiliki *fly ash* dan *bottom ash*. Hal

ini dikarenakan *fly ash* dan *bottom ash* merupakan pozzolan yang mempengaruhi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang merupakan produk sampingan dari hidrasi semen. *Fly ash* dan *bottom ash* yang terdapat pada matriks beton akan bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk menghasilkan C-S-H baru, hal ini ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan oleh de Rooij dkk. (2013), dimana mereka menunjukkan bahwa konsentrasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ berkurang seiring dengan penambahan *fly ash* pada matriks beton. Hal ini juga dibuktikan pada hasil kuat tekan di atas bahwa silinder Sn F20B5 mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi daripada Sn Kontrol.

4.5. Analisa Benda Uji Balok Beton (Bn)

Analisa yang dilakukan pada benda uji ini pada umumnya adalah pengamatan mekanisme *self-healing* menggunakan UPV maupun Dinolite, XRD material penutup retak, dan pengujian jumlah koloni bakteri yang berada pada campuran beton.

4.5.1. Pemberian Retak Awal

Pemberian retak awal dilakukan pada saat benda uji balok beton (Bn) berumur 28 hari. Pada penelitian ini benda uji berukuran 40x10x10 cm dan mempunyai tulangan di dalamnya. Pada benda uji ini mekanisme *self-healing* ditinjau dari kedalaman dan luasan retak permukaan mulai dari umur 28 hari pasca pemberian retak awal. Mekanisme *healing* kedalaman retak dan luasan retak permukaan ditinjau dari umur healing 0 hari, keduanya dihitung pasca pemberian retak awal pada umur balok beton 28 hari. Hasil pengukuran kedalaman retak awal dan lebar retak awal ditunjukkan pada **Tabel 4.31** dan **4.32**.

Tabel 4. 31 Hasil pengukuran kedalaman retak awal benda uji balok beton pada umur *healing* 0 hari.

Spesimen	Waktu Rambat (μs)		Kedalaman Retak (mm)
	t1	t2	
BnF20B5M400	18.5	31.6	23
	17.1	28.7	24
	17.4	30	22
	16.7	29.1	21
	17.3	29.3	24
Rata-rata	17.4	29.74	22.8
BnF20B5M1000	19.8	35	19
	20.7	34.8	24
	19.3	34.2	19
	18.8	34.1	17
	20.2	35.6	20
Rata-rata	19.76	34.74	19.8
BnF20B5M5000	51.4	90.7	19
	67	107.1	29
	53.5	92.5	21
	51.2	86.9	23
	52.3	91.4	20
Rata-rata	55.08	93.72	22.4
BnF0B0M400	46.8	82.6	19
	47	86.1	16
	45.8	81.4	19
	48.3	85.8	19
	58.4	98.2	24
Rata-rata	49.26	86.82	19.4

Tabel 4.31 Hasil pengukuran kedalaman retak awal benda uji balok beton pada umur *healing* 0 hari (lanjutan)

Spesimen	Waktu Rambat (μ s)		Kedalaman Retak (mm)
	t1	t2	
BnF0B0M1000	53.6	84.4	30
	53.9	84.7	31
	52.6	79.4	35
	51.8	81.9	30
	53.2	86.1	28
Rata-rata	53.02	83.3	30.8
BnF0B0M5000	47.8	77.2	28
	48.3	81.4	24
	46.6	79	23
	46.8	76.5	27
	42	70.6	24
Rata-rata	46.3	76.94	25.2
Bn F20B5	48.3	73.8	34
	49.6	73.6	37
	50.5	76.4	35
	48.2	74.7	32
	47.8	75.3	30
Rata-rata	48.88	74.76	33.6
Kontrol	53.3	76.8	40
	52.7	76	40
	48.8	76.9	30
	54.2	79.7	38
	54.2	79.3	38
Rata-rata	52.64	77.74	37.2

Data pada **Tabel 4.31** didapatkan dengan cara meninjau satu titik yang sudah ditandai sebelumnya dan mengulangi pembacaan UPV sebanyak 5 kali kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil mendekati valid. Dari data tersebut menunjukkan bahwa kedalaman yang terjadi sangat bervariasi meskipun pembebanan dihentikan pada saat terjadi retak awal. Terjadinya variasi kedalaman retak diduga karena kandungan FABA yang terdapat dalam benda uji, dimana benda uji yang mengandung FABA lebih kuat untuk menahan tarik. Perbedaan kerapatan benda uji bisa terjadi salah satunya karena perbedaan komposisi dan faktor pengecoran beton. Dapat dilihat bahwa kedalaman retak yang paling besar terjadi pada spesimen kontrol, sedangkan yang paling kecil terjadi pada spesimen BnF0B0M400. Kedalaman retakan pada umur 0 hari ini nantinya akan digunakan sebagai acuan rasio *healing* beton.

Tabel 4. 32 Hasil pengukuran luasan retak permukaan awal benda uji balok beton pada umur *healing* 0 hari.

Nama Sampel	Titik Pembacaan	Luasan Retak
		(mm ²)
		A _{awal}
Bn F20 B5 M400	A	0.117
	B	0.119
Bn F20 B5 M1000	B	0.034
	C	0.034
Bn F20 B5 M5000	A	0.594
	B	0.81
	C	0.535
Bn F0 B0 M400	A	0.112
	B	0.106
	C	0.107

Tabel 4.32 Hasil pengukuran luasan retak permukaan awal benda uji balok beton pada umur *healing* 0 hari (lanjutan).

Nama Sampel	Titik Pembacaan	Luasan Retak
		(mm ²)
		A _{awal}
Bn F0 B0 M1000	A	0.455
	B	0.488
	C	0.438
Bn F0 B0 M5000	A	0.057
	B	0.072
	C	0.095
Bn F20 B5	A	0.13
	B	0.189
	C	0.118
Kontrol	B	0.105
	C	0.425

Dari data pengamatan luas retak permukaan yang terjadi pada balok beton seperti pada **Tabel 4.32** di atas, dapat dilihat bahwa luasan retakan yang terjadi sangat bervariasi meskipun pembebanan dihentikan pada saat retak awal terjadi. Luasan yang paling besar terjadi pada spesimen BnF0B0M400 sebesar 0.723 mm², sedangkan spesimen BnF20B5M1000 memiliki luasan retak yang paling kecil yaitu sebesar 0.034 mm². Karena variasi luas retak yang ada maka pada sub bab berikutnya akan diseleksi dan ditampilkan mana saja benda uji yang bisa diamati lebih lanjut dan dibandingkan dengan benda uji lainnya.

4.5.2. Pengamatan Kedalaman Retak menggunakan UPV

Data kedalaman retak benda uji balok beton (Bn) berdasarkan umur pengamatan digunakan sebagai perhitungan untuk mendapatkan angka *healing* rasio. Pada **Tabel 4.33** ditunjukkan data kedalaman retak berdasarkan umur *moist curing* balok beton, kemudian pola hubungan kedalaman retak dengan umur *moist curing* disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.17**. Pengamatan dilakukan dengan interval 3 hari dan 4 hari dari permulaan umur pengamatan.

Tabel 4. 33 Kedalaman retak beton berdasarkan umur pengamatan

Kode	P (kgf)	Umur Pengamatan													
		0 hari	3 hari	7 hari	10 hari	14 hari	17 hari	21 hari	24 hari	28 hari	31 hari	35 hari	48 hari	60 hari	70 hari
		h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h
BnF20 B5M400	1744.03	22.8	22.8	22.6	21.8	20.4	20.6	17.9	17.6	17	16.6	16.4	14.4	15.2	15.6
BnF20B5 M1000	1424.81	19.8	18.6	18.2	17	16.6	15.4	13	13	13.2	13.4	13.2	18.8	16.2	18.6
BnF20B5 M5000	1797.89	22.4	21.7	19.6	18.8	18.2	17.6	17.4	16.8	16.7	15.8	14.8	16	15.2	15
BnF0B0 M400	1351.12	19.4	18.5	19	18.6	17.8	17.6	17	16.4	16.8	16.6	15.2	18	19	19

Keterangan : h dalam satuan millimeter (mm)

Tabel 4. 33 Kedalaman retak beton berdasarkan umur pengamatan (lanjutan).

Kode	P (kgf)	Umur Pengamatan													
		0 hari	3 hari	7 hari	10 hari	14 hari	17 hari	21 hari	24 hari	28 hari	31 hari	35 hari	48 hari	60 hari	70 hari
		h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h
BnF0B0 M1000	1601.35	30.8	30.5	30.4	30.3	30.7	30	27.6	26.6	26.4	26.6	26.4	27.2	27.2	31
BnF0B0 M5000	1617.29	25.2	25	24.6	24.8	24.2	21.4	20.6	20.6	20.6	20.4	20	22.4	22.8	23.8
BnF20B5	1650.43	33.6	33.4	32.6	31.4	30.8	30	30	31	28	27.8	27.4	28.8	30.4	33.4
Kontrol	1592.67	37.2	37.2	37	37	37	36.8	36.2	35.6	34.8	34.6	34	33.8	33.2	33.4

Keterangan : h dalam satuan millimeter (mm)

Dari data pada **Tabel 4.33**, bisa dilihat data kedalaman cenderung menurun pada tiap sampel namun tidak signifikan. Dengan beban P yang relatif sama diperoleh kedalaman retak yang berbeda-beda, benda uji yang mengandung agregat buatan geopolimer cenderung mengalami kedalaman retak yang lebih kecil dibandingkan dengan benda uji BnF20B5 dan Kontrol dikarenakan kemampuan tarik dari agregat buatan pasta geopolimer lebih besar daripada agregat alami. Pembacaan UPV diulang 5 kali tiap sampel dan didapatkan rata-rata seperti ditampilkan pada **Tabel 4.33** di tiap umurnya. Pembacaan UPV juga dilakukan dengan membandingkan nilai kedalaman retak pada umur-umur sebelumnya dan dicari dengan kedalaman yang hampir sama maupun lebih besar.

Prinsip kerja dari pengujian ini adalah dengan mengukur cepat rambat gelombang ultrasonik yang melewati benda uji beton saat pengujian. Untuk mengukur kedalaman retak, UPV digunakan dengan metode *indirect transmission*. Pengukuran kedalaman retak dapat didekati dengan cara mengetahui waktu dan jarak tempuh gelombang dari hubungan jarak X terhadap waktu tempuh T_1 dan T_2 . Pendekatan hubungan jarak transducer (X_1 dan X_2) dengan waktu tempuh (T_1 dan T_2) dapat dilihat pada persamaan empiris (19). Pada area yang diblok merah menunjukkan adanya beberapa kenaikan nilai kedalaman retak pada umur 48 hari, kenaikan tersebut terjadi diduga karena adanya pergeseran, pengangkatan, serta pembebanan pada benda uji balok beton. Karena yang diamati adalah retak yang kecil, maka sangat rentan terhadap situasi yang diaplikasikan kepada benda uji seperti pembebanan dinamis dan pergeseran sehingga menyebabkan perubahan nilai kedalaman retak. Dari data tersebut, kemudian dilakukan perhitungan *healing ratio* untuk mengetahui besarnya rasio penyembuhan retak yang dimiliki oleh masing-masing sampel. *Healing ratio* adalah presentase dari hasil perhitungan selisih kedalaman retak waktu tertentu dengan kedalaman retak mula-mula, yang dibagi dengan kedalaman retak mula-mula itu sendiri, dapat dihitung pada rumus (20) sebagai berikut :

$$R_D = \frac{(D_o - D_t)}{D_o} \dots\dots\dots (20)$$

Dimana :

R_D = Rasio penyembuhan (*healing ratio*) kedalaman retak

D_t = Kedalaman retak pada hari $-t$

D_o = Kedalaman retak awal

Untuk memudahkan pembacaan data diatas **Gambar 4.18** menunjukkan grafik hubungan antara data kedalaman retak dengan umur *moist curing* balok beton.

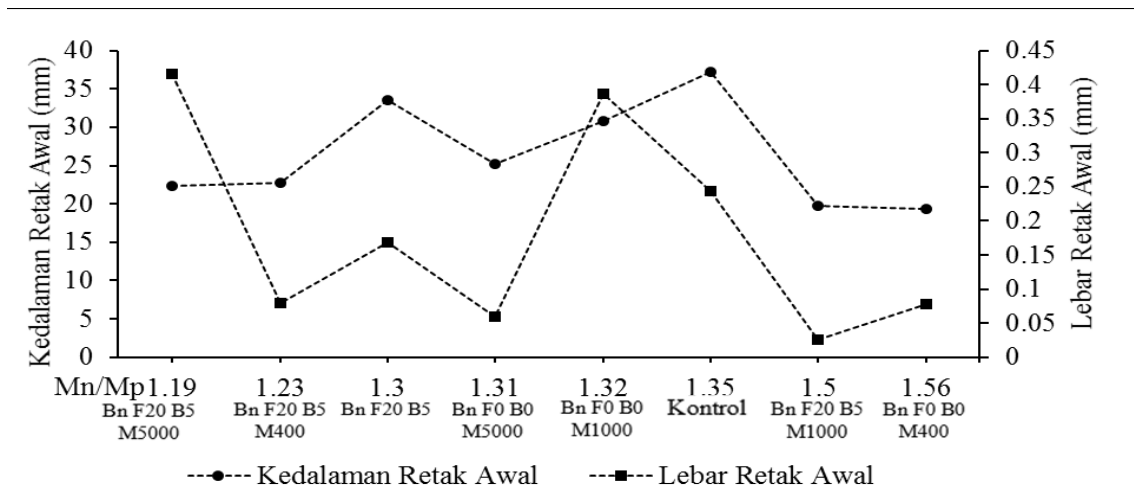
Selain itu untuk mengetahui pengaruh penambahan FABA terhadap kemampuan tarik beton digunakan pendekatan perbandingan Momen Nominal dengan Momen P yang terjadi pada

saat pengetesan lentur beton. Hasil perbandingan tersebut akan dihubungkan dengan kedalaman retak awal yang terjadi pasca pengetesan. Kuat tekan yang digunakan untuk menghitung Momen Nominal diambil dari hasil pengetesan kuat tekan silinder beton (S_n) pada sub bab sebelumnya. Hasil perhitungan momen nominal dan momen P dapat dilihat pada **Tabel 4.34**.

Tabel 4. 34 Momen Nominal dan Momen P pada benda uji balok beton (Bn)

Kode	Mn (Kgm)	MP (Kgm)	ϕ (Mn/ MP)	Kedalaman awal (mm)	Lebar awal (mm)
Bn F20 B5 M400	106.42	87.21	1.23	22.8	0.079
Bn F20 B5 M1000	106.28	71.25	1.5	19.8	0.026
Bn F20 B5 M5000	106.2	89.9	1.19	22.4	0.416
Bn F0 B0 M400	105.05	67.56	1.56	19.4	0.078
Bn F0 B0 M1000	105.54	80.07	1.32	30.8	0.386
Bn F0 B0 M5000	105.49	80.87	1.31	25.2	0.06
Bn F20 B5	107.1	82.53	1.3	33.6	0.168
Kontrol	106.75	79.64	1.35	37.2	0.244

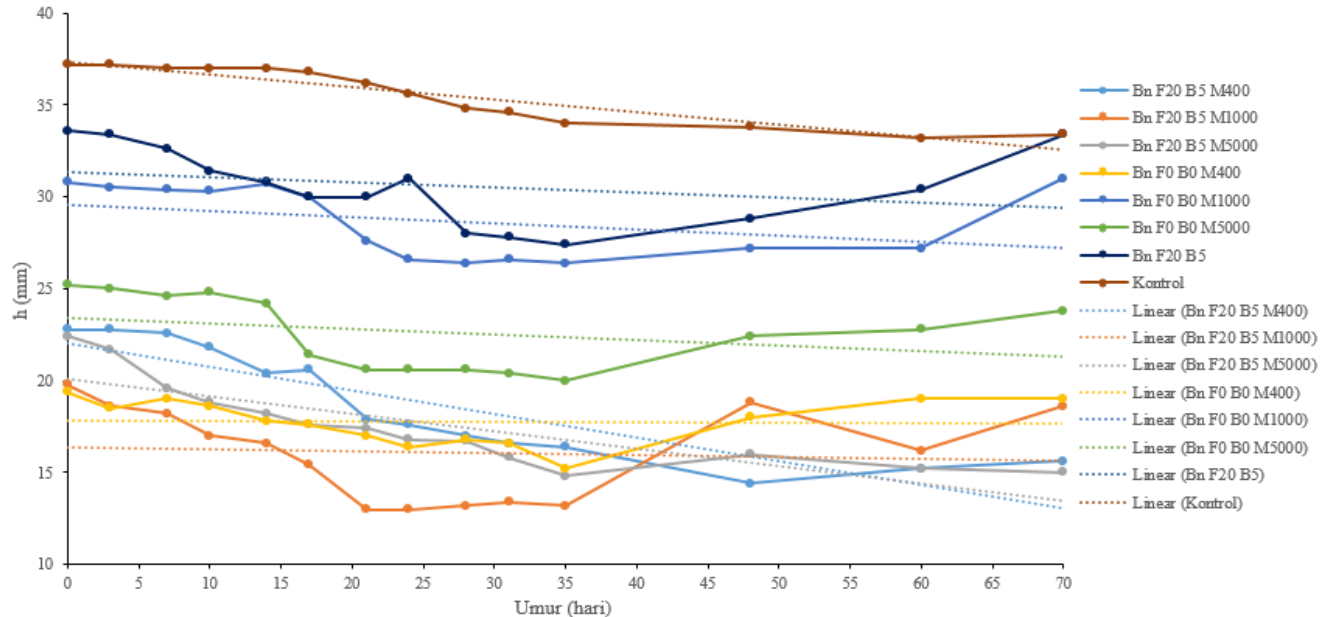
Kemudian hubungan Mn/MP dengan kedalaman retak awal ditunjukkan dengan grafik pada **Gambar 4.17**



Gambar 4.17 Hubungan Mn/MP dengan kedalaman retak awal

Dari **Gambar 4.17** dapat dilihat bahwa dengan perbandingan Mn/MP yang relatif sama menunjukkan kedalaman retak yang berbeda-beda. Hal ini juga menunjukkan bahwa kapasitas momen yang kecil tidak berhubungan dengan kuat tarik yang kecil juga karena adanya konsentrasi FABA pada benda uji serta agregat buatan geopolimer yang lebih kuat menahan tarik sehingga kedalaman retak yang dihasilkan rata-rata lebih kecil. Sampel yang mempunyai kandungan FABA rata-rata memiliki kedalaman yang lebih kecil daripada sampel yang tidak memiliki kandungan FABA. Pada umumnya

kedalaman yang terjadi berbanding dengan lebar retak yang terjadi, serta dari P yang hampir sama perilakunya berbeda secara mikroskopik pada lebar retak. Data acak pada lebar retak ini menguatkan bahwa kemampuan tarik yang cukup tinggi dialami oleh benda uji yang memiliki kandungan FABA.



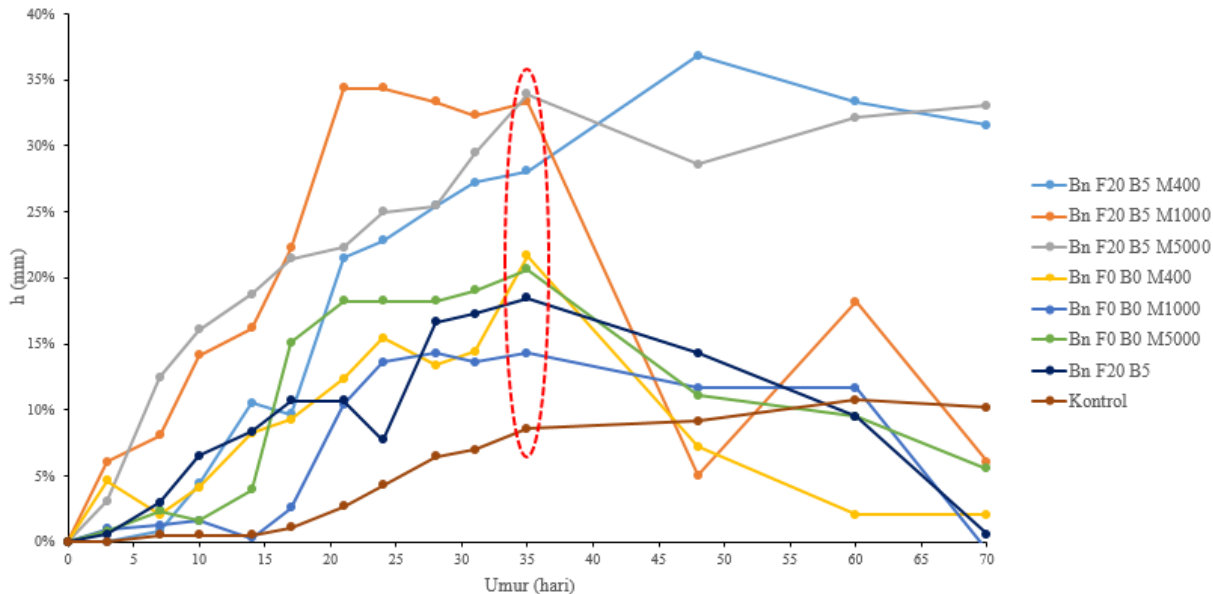
Gambar 4. 18 Hubungan umur *moist curing* terhadap kedalaman retak

Dari grafik pada **Gambar 4.18** dapat diketahui bagaimana hubungan perbaikan kedalaman retak berdasarkan umur balok beton. Dari grafik tersebut secara umum dapat disimpulkan bahwa semua variasi mampu mengurangi/ memperbaiki kedalaman retak namun tidak secara signifikan. Rata-rata semua benda uji kecuali kontrol mengalami perbaikan kedalaman antara 4 mm hingga 7 mm. kesimpulan lain yang didapat dari grafik pada **Gambar 4.18** adalah variasi balok beton yang menggunakan *healing agent* dan FABA memiliki nilai perbaikan retak paling besar daripada variasi lainnya. Grafik linear menunjukkan garis lurus yang dapat diartikan sebagai kecenderungan perbaikan kedalaman retak terhadap umur *moist curing* beton, namun pada kasus ini grafik linear dihubungkan hingga umur 70 hari sehingga gradient grafik cenderung kecil. Di lain sisi sampel yang mengandung bakteri pada *healing agent* menunjukkan aktivitas *healing* hanya terpacu pada umur-umur awal *moist curing* dan cenderung tak beraktifitas setelah umur *moist curing* lebih dari 21 hari, dengan kata lain bakteri pada umur kurang dari 21 hari mengalami aktifitas yang signifikan daripada bakteri yang sudah lebih dari umur 21 hari. Terlihat juga bahwa pada umumnya kedalaman retak bertambah seiring dengan adanya gangguan beban dinamis yang dialami oleh benda uji pada umur 48 hari hingga 70 hari. Untuk rasio healing berdasarkan kedalaman retak akan ditunjukkan pada **Tabel 4.35** berikut.

Tabel 4. 35 *Healing ratio* terhadap kedalaman retak balok beton berdasarkan umur pengamatan retak

Kode	Umur Pengamatan (hari)													
	0	3	7	10	14	17	21	24	28	31	35	48	60	70
Bn F20 B5 M400	0.0 %	0.0 %	0.9 %	4.4 %	10.5 %	9.6 %	21.5 %	22.8 %	25.4 %	27.2 %	28.1 %	36.8 %	33.3 %	31.6 %
Bn F20 B5 M1000	0.0 %	6.1 %	8.1 %	14.1 %	16.2 %	22.2 %	34.3 %	34.3 %	33.3 %	32.3 %	33.3 %	5.1%	18.2 %	6.1 %
Bn F20 B5 M5000	0.0 %	3.1 %	12.5 %	16.1 %	18.8 %	21.4 %	22.3 %	25.0 %	25.4 %	29.5 %	33.9 %	28.6 %	32.1 %	33.0 %
Bn F0 B0 M400	0.0 %	4.6 %	2.1 %	4.1 %	8.2 %	9.3 %	12.4 %	15.5 %	13.4 %	14.4 %	21.6 %	7.2%	2.1%	2.1 %
Bn F0 B0 M1000	0.0 %	1.0 %	1.3 %	1.6 %	0.3 %	2.6 %	10.4 %	13.6 %	14.3 %	13.6 %	14.3 %	11.7 %	11.7 %	- 0.6 %
Bn F0 B0 M5000	0.0 %	0.8 %	2.4 %	1.6 %	4.0 %	15.1 %	18.3 %	18.3 %	18.3 %	19.0 %	20.6 %	11.1 %	9.5%	5.6 %
Bn F20 B5	0.0 %	0.6 %	3.0 %	6.5 %	8.3 %	10.7 %	10.7 %	7.7 %	16.7 %	17.3 %	18.5 %	14.3 %	9.5%	0.6 %
Kontrol	0.0 %	0.0 %	0.5 %	0.5 %	0.5 %	1.1 %	2.7 %	4.3 %	6.5 %	7.0 %	8.6%	9.1%	10.8 %	10.2 %

Dari data pada **Tabel 4.35**, kemudian diplot ke dalam grafik untuk mempermudah pembacaan dan analisa, sebagaimana tersaji pada **Gambar 4.19** berikut.

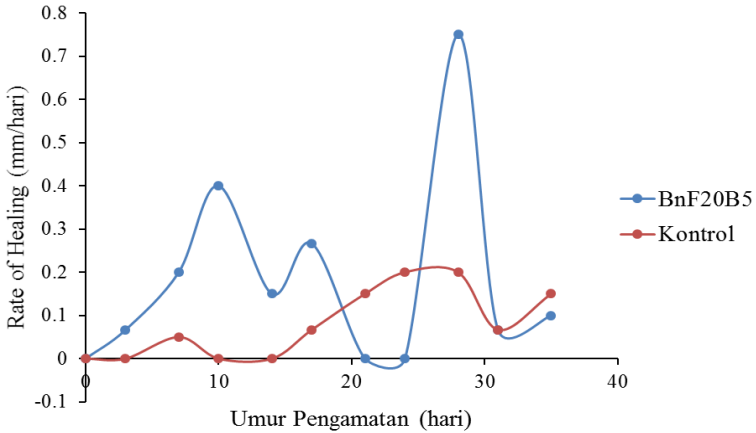


Gambar 4.19 Perbandingan rasio penyembuhan kedalaman retak terhadap umur *moist curing*

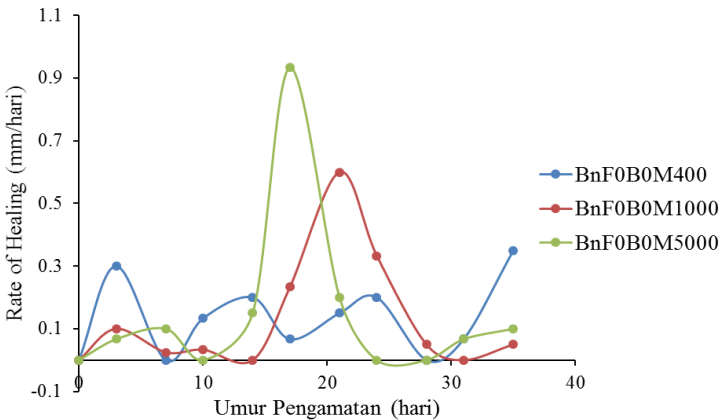
Dari grafik pada **Gambar 4.19** dapat ditarik kesimpulan bahwa BnF20B5M5000 dan BnF20B5M1000 memiliki kecepatan penyembuhan kedalaman retak yang lebih baik daripada komposisi lainnya. Kemudian dibawahnya yaitu komposisi BnF20B5M400. Tercatat pada pengujian kedalaman retak oleh UPV, kecepatan *healing* yang paling tinggi sebesar 34%. Pada penelitian ini data yang dianalisa hanya sebatas pada lingkaran merah saja dikarenakan data yang diukur setelah balok beton mengalami perilaku pembebanan dinamis dan pergeseran menjadi tidak beraturan, namun pada umumnya perbaikan kedalaman retak pada semua komposisi dirasa kurang signifikan, dilihat dari data yang diambil ada beberapa data yang tidak sesuai trend dari pengukuran UPV sebelumnya dikarenakan banyak faktor. Semua benda uji mengalami penurunan *healing ratio* setelah umur pengamatan lebih dari 35 hari terkecuali bagi BnF20B5M400 yang terus naik hingga turun lagi pada umur 70 hari dan bagi Kontrol yang terus naik secara perlahan namun tidak signifikan, hal ini disebabkan karena banyak faktor yang penulis tidak bisa perkirakan akan mengganggu mekanisme *healing* beton serta faktor pembacaan alat yang kurang teliti menyebabkan sebagian data tidak terakomodir secara sempurna. Untuk mendukung data penyembuhan kedalaman retak diperlukan analisa yang lebih mendalam tentang unsur kimia apa saja yang terjadi pada celah retak menggunakan XRD yang akan dibahas pada sub bab selanjutnya. Pengamatan oleh *Dinolite* tidak dapat menunjukkan adanya tanda-tanda visual terhadap penyembuhan kedalaman retak beton dikarenakan kemampuan kamera *Dinolite* tidak bisa menjangkau permukaan terdalam keretakan pada beton.

Selain itu analisa *rate of healing* dilakukan untuk menunjukkan kecepatan *healing* dari benda uji per harinya. Dari analisa *rate of healing* nantinya akan dikorelasikan terhadap peran bakteri dan FABA untuk melakukan mekanisme *healing*. **Gambar 4.20, 4.21, dan 4.22** menunjukkan grafik *rate of healing* dari masing-masing benda uji. *Rate of healing* didapatkan dari selisih

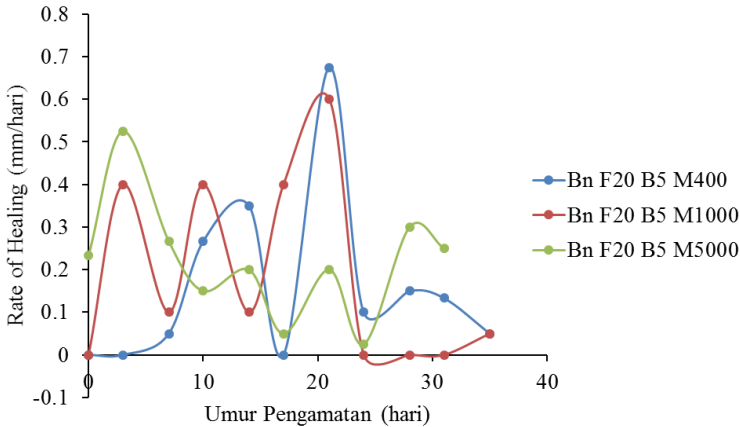
penutupan kedalaman retak dibagi dengan selisih hari yang ditinjau, dan akhirnya didapatkan satuan mm/hari.



Gambar 4. 20 Grafik hubungan *rate of healing* dengan umur pengamatan



Gambar 4. 21 Grafik hubungan *rate of healing* dengan umur pengamatan



Gambar 4. 22 Grafik hubungan *rate of healing* dengan umur pengamatan.

Dari **Gambar 4.20**, **4.21**, dan **4.22** dapat dilihat *rate of healing* pada masing-masing benda uji balok beton. Apabila *rate of healing* benda uji kontrol dibandingkan dengan BnF20B5 maka dapat dilihat kecepatan *healing* tinggi pada umur 28 hari, kontribusi FABA sebagai *pozzolanic latent* dicurigai sebagai mekanisme yang menambah kecepatan *healing*. Hal ini juga dapat dilihat pada **Gambar 4.22** bahwa terjadi kecepatan *healing* yang tinggi pada umur pengamatan 21 hari pada benda uji yang memiliki komposisi FABA, selain itu bakteri berperan pada umur awal pengamatan yang ditunjukkan dengan adanya *peak* kecepatan *healing* hingga umur 17 hari. Pada **Gambar 4.21** tidak terlihat adanya peningkatan kecepatan *healing* pada umur-umur awal dikarenakan benda uji BnF0B0M1000 dan BnF0B0M5000 memiliki kedalaman retak yang cukup besar. Semakin kecil kedalaman retak maka akan semakin cepat pula penyembuhan kedalaman retak. Benda uji BnF20B5M400, BnF20B5M1000, BnF20B5M5000, dan BnF0B0M400 memiliki kedalaman retak yang relatif lebih kecil daripada benda uji lainnya sehingga menyebabkan kecepatan *healing* yang lebih cepat.

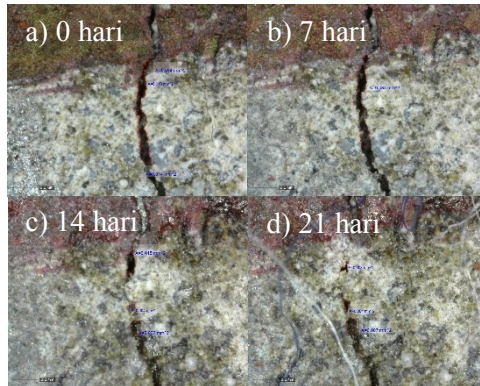
4.5.3. Pengamatan Luasan Retak Permukaan menggunakan *Dinolite*

Dari data luasan retak awal benda uji balok beton yang telah didapatkan pada **Tabel 4.32**, kemudian dilakukan penyeleksian terhadap data-data mana saja yang dapat dianalisa. Sehingga dapat diketahui ataupun didapatkan data luasan retak permukaan yang mempunyai nilai relevan terhadap luasan retak permukaan awal. Hasil pemilahan data luasan retak permukaan selama 70 hari ditunjukkan pada **Tabel 4.36**. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan perbesaran yang tetap sebesar 225 kali untuk tiap benda uji. Pengamatan dilakukan pasca retak awal pada umur benda uji 0,3,7,10,14,17,21,24,28,31,35,48,60, dan 70 hari namun untuk memudahkan pembacaan luasan retak, pada sub bab ini hanya akan menganalisa benda uji balok beton pasca retak awal yang berumur 0,7,14,21,28,35, 60, dan 70 hari. Setiap benda uji dipilih tiga titik pengamatan namun penyeleksian data akan dipilih hanya satu titik pengamatan untuk analisa.

Tabel 4. 36 Luasan retak permukaan berdasarkan umur pengamatan

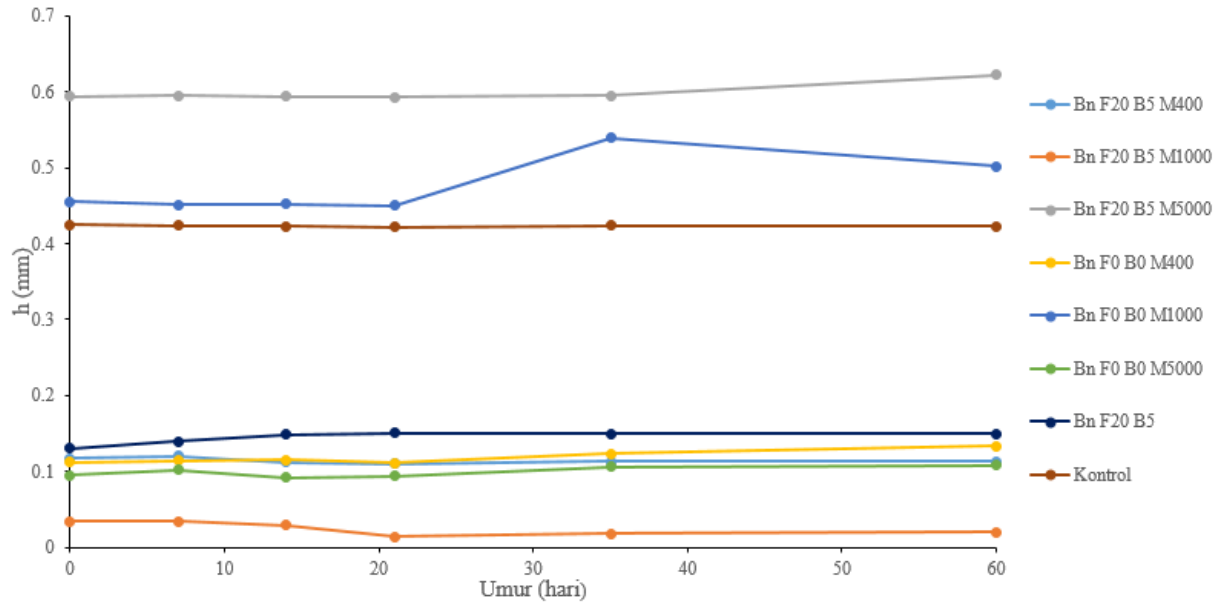
Spesimen	Lebar Retak 0 hari (mm)	Umur Pengamatan							
		0 hari	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari	35 hari	60 hari	70 hari
		A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)
Bn F20 B5 M400	0.079	0.117	0.12	0.112	0.11	0.113	0.113	0.126	0.127
Bn F20 B5 M1000	0.026	0.034	0.034	0.029	0.014	0.018	0.02	0.018	0.017
Bn F20 B5 M5000	0.416	0.594	0.595	0.594	0.593	0.595	0.622	0.636	0.634
Bn F0 B0 M400	0.078	0.112	0.114	0.115	0.111	0.123	0.134	0.156	0.154
Bn F0 B0 M1000	0.386	0.455	0.451	0.452	0.45	0.539	0.502	0.502	0.515
Bn F0 B0 M5000	0.06	0.095	0.102	0.092	0.094	0.106	0.108	0.105	0.106
Bn F20 B5	0.168	0.13	0.14	0.149	0.151	0.15	0.15	0.157	0.16
Kontrol	0.244	0.425	0.424	0.423	0.422	0.424	0.423	0.42	0.424

Dari data **Tabel 4.36**, pada umumnya semua variasi tidak mengalami penurunan luasan retak permukaan secara signifikan, namun pada spesimen BnF20B5M1000 mengalami penurunan luasan retak permukaan diduga dikarenakan oleh mekanisme pecahnya permukaan beton yang menyebabkan partikel-partikel halus mengisi celah retak seperti yang dijelaskan oleh de Rooij dkk. (2013). Mekanisme tersebut kemungkinan lebih mudah untuk terjadi apabila lebar retak yang terjadi cenderung kecil. Mekanisme tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.23**.



Gambar 4. 23 Mekanisme penutupan retak pada BnF20B5M1000

Selain dari mekanisme *healing* secara fisik, mekanisme *healing* dengan cara pembentukan C-S-H baru oleh kandungan *fly ash* yang ada dalam matriks beton juga dapat terjadi. Maka dari itu analisa XRD digunakan pada material penutup celah retak beton untuk mengetahui kandungan mineral yang ada pada celah retak beton. Dari data **Tabel 4.36** di atas kemudian diplot dalam bentuk grafik untuk mempermudah pembacaan dan analisa. **Gambar 4.24** menunjukkan grafik hubungan luas permukaan retak terhadap umur pengamatan.



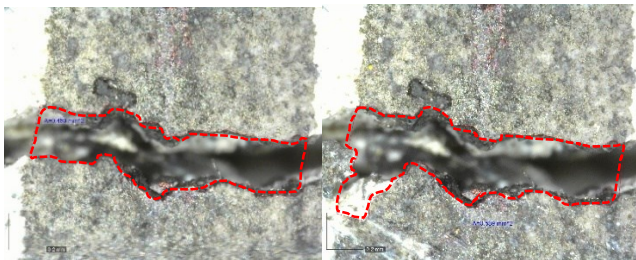
Gambar 4. 24 Hubungan umur *moist curing* terhadap luas permukaan retak

Pada **Gambar 4.24** didapatkan bahwa pada umumnya tidak terjadi mekanisme penyembuhan luasan retak, namun kecepatan *healing* perlu untuk disajikan analisisnya. Pada spesimen BnF0B0M1000 menunjukkan kenaikan luas permukaan retak beton, hal ini terjadi dikarenakan pecahnya partikel permukaan beton yang terdapat pada daerah sekitar retak. Pecahnya permukaan beton pada daerah retak beton ditunjukkan pada **Gambar 4.25**. Untuk spesimen yang lain pada umumnya tidak mengalami mekanisme *healing* yang berarti, dan dapat disimpulkan bahwa efektifitas *healing* tidak bisa ditentukan dengan parameter luas permukaan retak. Namun belum terlihat kecepatan *healing* yang dimiliki oleh masing-masing benda uji terutama pada spesimen BnF20B5M1000, maka dari itu perlu adanya analisa *healing ratio* pada pengamatan luas permukaan retak. *Healing ratio* berdasarkan luasan retak permukaan yang terjadi pada benda uji ditunjukkan pada **Tabel 4.37**. *Healing ratio* adalah presentase dari hasil perhitungan selisih kedalaman retak waktu tertentu dengan kedalaman retak mula-mula, yang dibagi dengan kedalaman retak mula-mula itu sendiri, dapat dihitung pada rumus (21) sebagai berikut :

$$R_A = \frac{(A_o - A_t)}{A_o} \dots \dots \dots (21)$$

Dimana :

- R_A = Rasio penyembuhan (*healing ratio*) luas retak permukaan
- A_t = Luas retak permukaan pada hari $-t$
- A_o = Luas retak permukaan awal



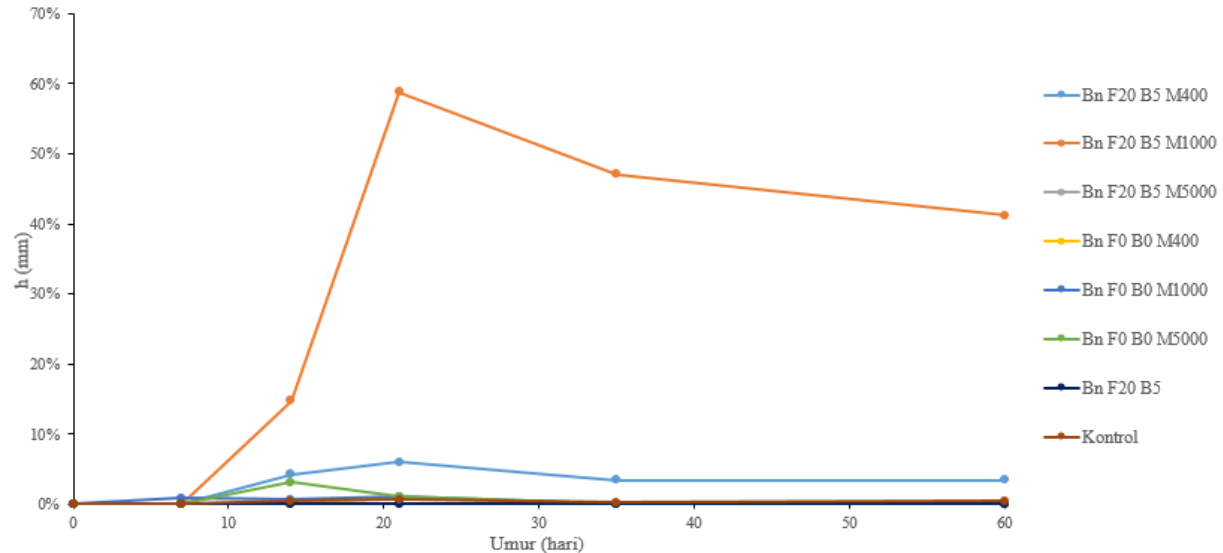
Gambar 4. 25 Pecahnya permukaan retak beton BnF0B0M1000

Tabel 4. 37 *Healing ratio* berdasarkan luas retak permukaan terhadap umur pengamatan

Spesimen	Tanggal							
	0 hari	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari	35 hari	60 hari	70 hari
	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)
Bn F20 B5 M400	0%	-3%	4%	6%	3%	3%	-8%	-9%
Bn F20 B5 M1000	0%	0%	15%	59%	47%	41%	47%	50%
Bn F20 B5 M5000	0%	0%	0%	0%	0%	-5%	-7%	-7%
Bn F0 B0 M400	0%	-2%	-3%	1%	-10%	-20%	-39%	-38%
Bn F0 B0 M1000	0%	1%	1%	1%	-18%	-10%	-10%	-13%
Bn F0 B0 M5000	0%	-7%	3%	1%	-12%	-14%	-11%	-12%
Bn F20 B5	0%	-8%	-15%	-16%	-15%	-15%	-21%	-23%
Kontrol	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	0%

Pada **Tabel 4.37** didapatkan data *healing ratio* yang menunjukkan angka minus, arti dari angka minus tersebut merupakan kenaikan nilai luar permukaan retak beton. Seperti yang disebutkan sebelumnya bahwa BnF0B0M1000 mengalami kenaikan nilai luas permukaan retak dikarenakan pecahnya sebagian beton pada daerah permukaan retak, benda uji lain seperti BnF0B0M400, BnF0B0M5000, dan BnF20B5 juga mengalami mekanisme pecahnya permukaan beton pada area retak.

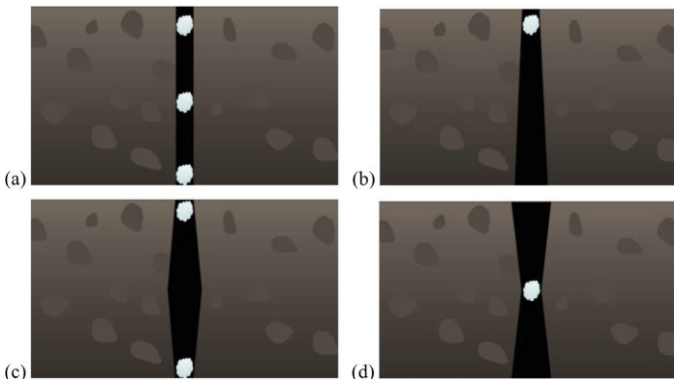
Maka untuk mempermudah analisa *healing ratio* berdasarkan luas permukaan retak angka minus dianggap 0 yang berarti benda uji tersebut tidak melakukan mekanisme *healing*. Grafik *healing ratio* ditunjukkan pada **Gambar 4.26**.



Gambar 4. 26 Perbandingan rasio penyembuhan luas permukaan retak terhadap umur *moist curing*

Pada **Gambar 4.26** dapat dilihat data yang hanya bisa dianalisa merupakan spesimen BnF20B5M1000 dan BnF20B5M400 dan sisa benda uji lainnya dianggap tidak melakukan mekanisme healing. *Healing ratio* tertinggi pada spesimen BnF20B5M1000 sebesar hingga 59%, dan spesimen BnF20B5M400 sebesar 6%. Dapat dilihat juga pada **Tabel 4.36** pengaruh pemberian beban dinamis dan pemindahan benda uji dapat mempengaruhi besar luas permukaan retak pada umur 60 dan 70 hari pasca pemberian perilaku tersebut luas permukaan retak cenderung bertambah besar. Dari analisa UPV dan Dinolite di atas dapat disimpulkan bahwa pengamatan mekanisme *healing* tidak dapat dilakukan dengan pengamatan luas retak permukaan benda uji, karena retak yang terjadi sangat variatif. Tidak terjadinya mekanisme *healing* pada retak permukaan beton salah satu penyebabnya adalah faktor komposisi beton yang berada pada permukaan daerah retak sendiri. Jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wulandari (2018) yang menggunakan agregat halus buatan berbahan dasar geopolimer sebagai matriks beton dan di dalam agregat halus buatan tersebut mengandung *healing agent* dengan konsentrasi 400 ml/m³, pada penelitian tersebut *healing* pada luas retak permukaan dapat terjadi pada semua variasi benda uji hingga yang terbesar sebesar 54%. Mekanisme healing yang terjadi merupakan terbentuknya C-S-H baru dan Calcite oleh metabolisme bakteri. Agregat halus berbahan dasar *fly ash* tersebar merata hingga permukaan beton yang apabila bertemu dengan Ca(OH)₂ akan membentuk C-S-H baru serta metabolisme bakteri dalam membentuk calcite akan sangat mungkin terjadi karena bakteri dikapsulasi pada agregat halus yang tersebar, berbeda dengan penelitian yang dilakukan ini bakteri terkonsentrasi dalam agregat kasar buatan sehingga mekanisme *healing* di permukaan sulit untuk dicapai. Namun mekanisme pembentukan C-S-H baru ada kemungkinan terjadi karena menggunakan *fly ash* 20 persen. Untuk menjelaskan mekanisme penyembuhan pada spesimen BnF20B5M1000, Tittelboom (2013) menyampaikan bahwa proses penyembuhan secara alami

dapat menyembuhkan retak selebar 5-300 μm . Sahmaran (2015) menyadari bahwa semakin besar lebar retak yang dialami maka semakin sulit proses penyembuhan dapat dilakukan. Hal ini senada dengan apa yang terjadi pada spesimen BnF20B5M1000 yang mempunyai luas retak awal terkecil dari benda uji lainnya yaitu sebesar 0.034 mm. Hal ini juga didukung oleh Roig-Flores dkk. (2015) yang menyatakan bahwa material *healing* akan lebih mudah untuk mengendap ataupun mengkristal apabila retak yang terjadi lebih kecil. **Gambar 4.27** menunjukkan beberapa kemungkinan bentuk dari keretakan dan dimana pengendapan memulai menutup retak. Jika yang terbentuk dari proses retak adalah bentuk *concave crack* maka retak pada permukaan sulit untuk tertutup sementara kedalaman retak terjadi pengendapan. Hal ini yang menjelaskan bahwa hasil pengamatan luas retak permukaan tidak dapat dihubungkan dengan hasil pengamatan kedalaman retak.



Gambar 4. 27 Kemungkinan bentuk retak yang terjadi dan dimana pengendapan mulai menutup retak a) *uniform crack*, b) *pyramidal frustum crack*, c) *convex crack*, dan d) *concave crack*
 Sumber : Roig-Flores dkk. (2015)

4.5.4. Uji XRD Material pada Celah Retak

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dari material pada celah retak. Material pada celah retak ini diambil ketika umur pengamatan 70 hari, posisi pengambilan material celah retak ini berada pada sekitaran kedalaman awal benda uji balok beton. Pengambilan sampel XRD dilakukan dengan cara pengikisan pinggiran retak beton yang terkena agregat buatan geopolimer mengandung *healing agent*. Merujuk pada penelitian oleh Wulandari (2018) komposisi kimia yang dicari adalah tobermorite, calcite, dan portlandite. Mekanisme healing yang terjadi pada penelitian tersebut yang paling utama adalah pembentukan C-S-H dan kalsium karbonat (calcite). Tobermorite adalah gel C-S-H yang terbentuk oleh reaksi hidrasi semen maupun reaksi *fly ash* dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sedangkan calcite merupakan produk dari metabolisme bakteri serta reaksi terpaparnya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan CO_3 sehingga membentuk CaCO_3 . Untuk kandungan senyawa yang ada dalam celah beton dapat dilihat pada **Tabel 4.38-4.46**.

Tabel 4. 38 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M400

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	60.4
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	26.4
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	13.3

Tabel 4. 39 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M1000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	59.2
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	30.8
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	10

Tabel 4. 40 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5M5000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	59.8
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	32.9
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	7.2

Tabel 4. 41 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M400

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	54.7
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	28
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	17.3

Tabel 4. 42 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M1000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	55.5
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	30.1
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	14.4

Tabel 4. 43 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF0B0M5000

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	56
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	33.3
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	10.7

Tabel 4. 44 Kandungan mineral celah retak pada campuran BnF20B5

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	64.4
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	17.9
3	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	17.7

Tabel 4. 45 Kandungan mineral celah retak pada campuran Kontrol

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	81.2
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	11.4
3	Portlandite	Ca(OH)_2	7.4

Untuk mengetahui mekanisme healing yang ada pada celah retak, maka diperlukan adanya pengambilan sampel di daerah yang tidak selain celah retak pada spesimen BnF20B5M5000 untuk dianalisa dengan pengujian XRD. Untuk kandungan mineral tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.46**.

Tabel 4. 46 Kandungan mineral beton di daerah selain celah retak pada campuran BnF20B5M5000 Kontrol

Kode	Nama Mineral	Rumus Kimia	Jumlah (%)
1	Tobermorite	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	73.1
2	Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO_3	17.4
3	Portlandite	Ca(OH)_2	9.4

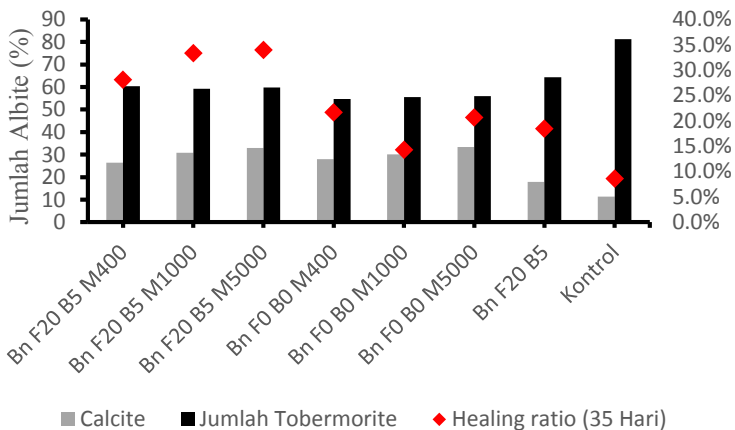
Dari data pengujian XRD pada umumnya seluruh spesimen yang memiliki *healing agent* terdapat kandungan kalsium karbonat dan tobermorite. Tobermorite merupakan C-S-H gel yang berasal dari reaksi hidrasi C_3S dan C_2S dengan air (H_2O) serta reaksi pozzolan antara *fly ash* dengan Ca(OH)_2 , sedangkan untuk kalsium karbonat terbentuk bukan dari reaksi hidrasi karena semen yang dipakai merupakan *hydraulic cement*. Kalsium karbonat dapat terbentuk ketika Ca(OH)_2 dalam beton bereaksi atau terpapar dengan CO_2 , pengaruh *healing agent* juga memberi andil dalam pembentukan CaCO_3 dimana menurut Tittelboom dkk. (2010)

bakteri dapat menghidrolisis urea menjadi CO_3^{2-} dan NH_4^+ hasil hidrolisis urea yang berupa CO_3^{2-} dapat berikatan dengan ion Ca^+ yang tersedia di lingkungannya dan membentuk CaCO_3 . Menurut Huang dkk. (2016) mekanisme yang terjadi pada *self healing* adalah mekanisme *autogenous healing* dan *healing* berbasis bakteri, senyawa tobermorite dan kalsium karbonat merupakan salah satu hasil dari proses *healing* dalam mekanisme *autogenous healing* dan *healing* berbasis bakteri.

Dari hasil pengamatan yang telah dilakukan, jumlah tobermorite selalu lebih besar daripada jumlah calcite. Tobermorite terbentuk dari hasil hidrasi ataupun hidrasi lanjut semen yang belum bereaksi dengan air, serta peran *fly ash* yang ada dalam campuran untuk bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Kandungan senyawa kalsium karbonat terbesar dimiliki oleh spesimen BnF0B0M5000 sebesar 33.3%, sedangkan spesimen kontrol memiliki jumlah kalsium karbonat yang paling sedikit dengan besar 11.4%. Untuk kandungan tobermorite yang paling besar dimiliki oleh spesimen kontrol sebesar 81.2% dan spesimen BnF0B0M400 memiliki jumlah tobermorite yang paling sedikit sebesar 54.7%. Namun semua spesimen yang tidak mengandung *fly ash* dan *bottom ash* rata-rata memiliki nilai kandungan tobermorite yang hampir sama..

Dengan data di atas maka dapat ditarik garis besar pola kandungan senyawa oksida oleh masing-masing benda uji. Tobermorite pada kontrol mempunyai kandungan yang terbesar karena kandungan kalsium karbonat dalam benda uji tersebut sedikit. Tobermorite ditemukan lebih banyak pada benda uji yang memiliki kandungan FABA daripada benda uji yang tidak memiliki kandungan FABA. Hal ini terjadi karena reaksi lanjutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan FABA. Kalsium karbonat bertambah seiring dengan penambahan jumlah *healing agent*, dengan mempengaruhi konsentrasi portlandite, namun ditemukan lebih sedikit pada benda uji BnF20B5 yang tidak mengandung *healing agent*. Pada umumnya kandungan kalsium karbonat pada semua benda uji yang mengandung bakteri mempunyai besaran yang relatif sama. Kandungan portlandite terlihat semakin menurun seiring dengan

adanya penambahan bakteri dan FABA karena mengalami reaksi lanjutan. Pengambilan sampel yang berada di dekat permukaan beton menjadi data pendukung bahwa selain pembentukan kalsium karbonat oleh bakteri namun pembentukan kalsium karbonat dapat terjadi akibat reaksi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan CO_2 di permukaan beton. Menurunnya kandungan portlandite menjadi bukti bahwa portlandite mengalami reaksi lanjutan dengan CO_2 , CO_3^{2-} , dan FABA. Pada spesimen BnF20B5000 Kontrol didapatkan jumlah kalsium karbonat yang lebih sedikit, dikarenakan lokasi pengambilan sampel terpapar CO_2 yang lebih sedikit dan keberadaan agregat buatan yang memiliki bakteri pada sampel tersebut tidak ditinjau. Spesimen kontrol dianggap tidak mengalami mekanisme healing baik itu secara *autogenous* maupun *autonomous*. Untuk mengetahui mekanisme *healing* yang terjadi pada masing-masing benda uji maka perlu disajikan hubungan jumlah tobermorite+kalsium karbonat dengan *healing ratio* terhadap kedalaman retak beton. Grafik hubungan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.28**.









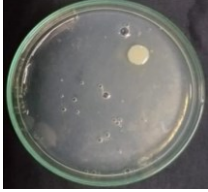
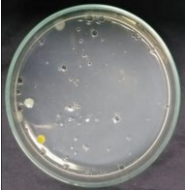
Gambar 4. 28 Grafik hubungan jumlah tobermorite+kalsium karbonat dengan healing ratio terhadap kedalaman retak beton

Dari **Gambar 4.28** dapat ditarik kesimpulan bahwa kemampuan *healing* kedalaman retak sebanding dengan jumlah tobermorite+calcite, namun terkecuali pada spesimen kontrol yang dianggap tidak mengalami *healing* walaupun memang komposisi tobermorite+calcite tidak sebanding dengan laju *healing* kedalaman retak beton. Maka sesuai dengan data diatas dapat disimpulkan bahwa *healing agent* membawa pengaruh kepada pembentukan CaCO_3 dan FABA memberi pengaruh kepada pembentukan C-S-H baru dan mekanisme *healing* yang terjadi pada penelitian ini sesuai dengan pendapat Huang dkk. (2016) yaitu mekanisme *autogenous* dan *autonomous healing*. *Autogenous healing* dijelaskan lebih lanjut oleh de Rooij dkk (2013) dan Tittelboom dkk (2012) yang menjelaskan tentang pengaruh *fly ash* sebagai material *autogenous healing*. Kemudian *autonomous healing* yang disebabkan oleh bakteri dan mekanisme tersebut juga sesuai dengan apa yang dijelaskan oleh Tittelboom dkk. (2010).

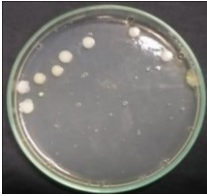

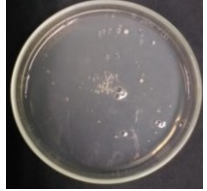

4.5.5. Pengujian Jumlah Bakteri

Pengujian ini dilakukan untuk melihat jumlah bakteri yang terdapat pada benda uji balok beton pada umur 70 hari. Namun *healing agent* pada agregat buatan sebelum dicampur ke dalam benda uji balok beton berumur 28 hari, sehingga total umurnya menjadi 98 hari. Sampel pengujian ini diambil pada agregat buatan yang mengandung bakteri pada beton. Jumlah bakteri yang hidup ini merupakan bentuk viabilitas bakteri yang ada dalam beton pada umur tertentu namun untuk mengendapkan CaCO_3 diperlukan juga kandungan sumber kalsium yang ada dalam lingkungan bakteri. Jumlah koloni bakteri yang hidup ditunjukkan pada **Tabel 4.47**.

Tabel 4. 47 Jumlah koloni bakteri *sporosarcina pasteurii*

NO	Sampel	Jumlah Koloni	Foto	
			Ulangan 1	Ulangan 2
1	400M 10^{-1}	U1: 79 U2: 14 Jumlah: 4.65×10^2		
2	400M 10^{-2}	U1: 2 U2: 23 Jumlah: 1.25×10^3		
3	1000M 10^{-1}	U1: 20 U2: 8 Jumlah: 1.4×10^2		
4	1000M 10^{-2}	U1: 3 U2: 4 Jumlah: 3.5×10^2		

Tabel 4.47 Jumlah koloni bakteri *sporosarcina pasteurii*

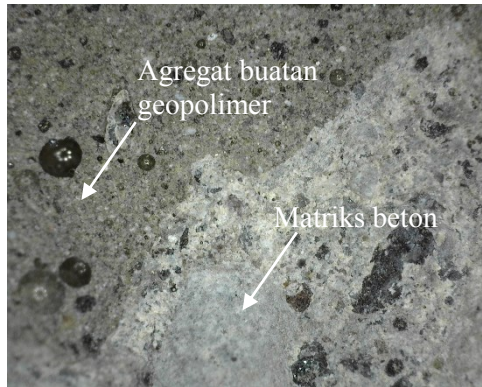
NO	Sampel	Jumlah Koloni	Foto	
			Ulangan 1	Ulangan 2
5	5000M 10 ⁻¹	U1: 13 U2: 45 Jumlah: 2.9 x 10 ²		
6	5000M 10 ⁻²	U1: 56 U2: 3 Jumlah: 2.9 x 10 ³		

Dapat dilihat dari data di atas bahwa koloni masih terbentuk pada benda uji yang berumur 70 hari, M5000 memiliki jumlah koloni terbanyak sejumlah 2.9×10^3 cfu. Sedangkan untuk benda uji M400 dan M1000 mempunyai besaran yang relatif sama. Pengujian ini membuktikan bahwa bakteri masih hidup pada umur 70 hari benda uji, dengan terbentuknya koloni menunjukkan bakteri masih dapat bermetabolisme.

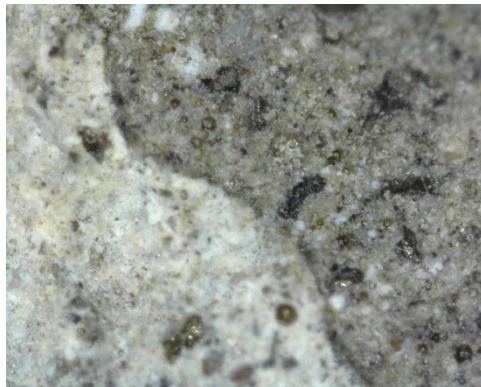
4.5.6. Analisa ITZ (*Interfacial Transitional Zone*)

Analisa ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana ITZ agregat buatan yang terjadi terhadap matriks beton. ITZ ini merupakan zona yang memiliki efek penting pada sifat-sifat beton, karena cenderung bertindak sebagai penghubung yang lemah dalam matriks beton ketika beton sudah mengalami penurunan kemampuan menahan beban secara bertahap setelah beban puncak yang menyebabkan terjadinya microcrack bermula pada ITZ (Scrivener 2004). **Gambar 4.29** menunjukkan kondisi

ITZ agregat buatan geopolimer dengan lingkungannya. ITZ ditangkap dengan kamera Dinolite dengan perbesaran tertentu.



Gambar 4. 29 ITZ agregat buatan dengan perbesaran 50 kali



Gambar 4. 30 ITZ agregat buatan dengan perbesaran 250 kali

Dapat dilihat dari **Gambar 4.30.** di atas, agregat buatan secara baik menyatu pada matriks beton dan terlihat komposit.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh FABA terhadap penyembuhan luas retak permukaan tidak dapat dikorelasikan karena luas permukaan retak awal yang berbeda-beda dan hasil pengamatan Dinolite menunjukkan bahwa pada umumnya benda uji tidak mengalami penurunan luas retak, namun benda uji yang memiliki luas retak terkecil yaitu BnF20B5M1000 mengalami penurunan nilai luas retak permukaan.
2. Pengaruh FABA memberikan dampak yang tidak signifikan terhadap peningkatan penyembuhan kedalaman retak. Senyawa *healing* yang kemungkinan terbentuk pada celah retak dihasilkan dengan mekanisme *autogenous healing* yang membentuk C-S-H baru berupa tobermorite.
3. Pengaruh volume *healing agent* terhadap penyembuhan luas retak permukaan tidak dapat dikorelasikan karena tidak terjadi mekanisme penyembuhan oleh bakteri pada permukaan beton.
4. Pengaruh volume *healing agent* memberikan dampak yang tidak signifikan terhadap peningkatan penyembuhan luas retak permukaan. Senyawa *healing* yang kemungkinan terbentuk pada celah retak adalah calcite yang dihasilkan melalui mekanisme *autonomous healing*.
5. Penambahan *healing agent* yang dimasukkan ke dalam pasta geopolimer tidak mempengaruhi berat jenis pasta geopolimer, baik dengan jumlah 400 ml/m³, 1000 ml/m³, dan 5000 ml/m³. Variasi penambahan *healing agent* tersebut memiliki nilai berat jenis yang relatif sama.
6. Lebar retak awal maupun luas permukaan retak awal dapat mempengaruhi kemampuan *healing* beton. Semakin kecil

luas retak permukaan semakin tinggi kemampuan *healing* dari beton.

7. Agregat buatan geopolimer yang memiliki konsentrasi NaOH 8 Molar dengan kandungan *fly ash*:alkali aktivator sebesar 75:25 dapat digunakan sebagai agregat kasar yang tahan terhadap kausan, namun memiliki nilai penyerapan air yang tinggi.
8. Penambahan *healing agent* tidak memberikan pengaruh secara signifikan pada umur 7 hari, namun kuat tekan terbesar diperoleh M5000 pada umur 7 hari sebesar 31.2 MPa sedangkan untuk M0 sebesar 30 MPa. Hal ini membuktikan bahwa pengaruh *healing agent* tidak signifikan namun dapat dikatakan bahwa *healing agent* memberikan *strength development* di umur 7 hari.
9. Penambahan *healing agent* memberikan pengaruh penurunan kuat tekan pada umur 28 hari. Dengan adanya *healing agent* Na pada sistem mengikat CO₃ yang dihasilkan oleh metabolisme bakteri di dalam *healing agent*. CO₃ yang dihasilkan oleh metabolisme bakteri juga memungkinkan untuk bereaksi dengan Ca yang bersumber dari *fly ash*.
10. Bakteri *sporosarcina pasteurii* masih aktif bermetabolisme pada umur 98 hari.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Perlu dilakukan eksperimen pengaruh variasi *healing agent* terhadap penyembuhan retak pasta geopolimer. Sehingga bisa secara optimal mengetahui senyawa apa yang terbentuk dari penambahan *healing agent*.
2. Perlu dilakukan pengembangbiakan dan purifikasi terhadap bakteri *sporosarcina pasteurii* agar jumlah bakteri semakin banyak sehingga dapat memberikan efek *healing* yang lebih signifikan.
3. Menambahkan perilaku yang berbeda dengan penyemprotan cairan *healing agent* pada permukaan agar healing terjadi pada retak permukaan.
4. Mengingat banyak faktor yang mempengaruhi *healing* pada benda uji, maka pembuatan dan perawatan terhadap benda uji tersebut harus terkontrol secara baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Alida, Ku Amirul Rahman Ku Yin, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Kamarudin Hussin, dan Mien Van Tran. 2015. *Comparison of Mechanical Properties of Fly Ash Artificial Geopolymer Aggregates with Natural Aggregate*. Applied Mechanics dan Materials. 294.
- ACI 224R-01. 2001. *Control of Cracking in Concrete Structure*. New York: American Concrete Institute.
- Alehyen, S., M. El Achouri, dan M. Taibi. 2017. *Characterization, microstructure and properties of fly ash-based geopolymer*. Journal of Materials dan Environmental Sciences. 1783-1796.
- Andrade, L. B., J. C. Rocha, dan M. Cheriaf. 2007. *Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement*. Waste Management. 27.1190-1199.
- Andrade, L. B., J. C. Rocha, dan M. Cheriaf. 2009. *Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete*. Construction and Building Materials. 609-614.
- Aregawi, Samson, Abiy Goshu, Bisrat Alemu, Dagmay Woldaregay, Nathnael Abdulkadir, dan Yonatan Mesfin. 2016. *Investigation of The Compressive Strength of Portland Cement Mixtures by Application of Bacteria - 'Sporosarcina Pateurii'*. Integrated Solutions for Infrastructure Development.
- ASTM C 127-01. 2001. *Standart Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C 128-01. 2001. *Standart Test Method fo Density, Relative Density (Spesific Gravity), and Absorption of Fine Agregate*. ASTM International.
- ASTM C 131-03. 2003. *Standart Test Method for Resistance to Degradation pf Small-Size Coarse Aggregate by*

- Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.* ASTM International.
- ASTM C 136-01. 2001. *Standart Test Method fo Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate.* ASTM International.
- ASTM C 188-16. 2016. *Standart Test Method for Density of Hydraulic Cement.* ASTM International.
- ASTM C 33-03. 2001. *Standard Specification for Concrete Aggregates.* ASTM International.
- ASTM C 39-05. 20015. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.* ASTM International.
- ASTM C 597-02. 2002. *Standart Test Metdhod for Pulse Velocity through Concrete.* New York: ASTM International.
- ASTM C 618-05. 20015. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* ASTM International.
- Bagio, Tony Hartono, Makno Basoeki, Julistyana Tistogondo, dan Sofyan Ali Pradana. 2017. *Optimum concrete compression strength using bio-enzyme.* EACEF 2017. MATEC Web of Conferences. 138.
- Bakri, A. M. Mustafa Al, H. Kamarudin, M. Bnhussain, I. Khairul Nizar, A. R. Rafiza, dan Y. Zarina. 2011. *Microstructur of Different NaOH Molarity of Fly Ash-Based Green Polymeric Cement.* Journal of Engineering and Technology Research. 44-49.
- Bang, Sookie S., Johnna K. Galinat, dan V. Ramakrishnan. 2001. *Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus Pasteurii.* Enzyme and Microbial Technology. 404-409.
- Bentz, Dale P., dan E. Stutzman. 2006. *Curing,hydration, and Microstructure of cement paste.* ACI material journal.
- Bhaskar, Sini. 2016. *Self-Healing Bacterial Cementitious Concrete Composites: Development and Performance Evaluation.* PhD Dissertation. Department of Civil

- Engineering, Ryerson University. Toronto, Ontario, Canada.
- Bose, Kaushik, dan Samir Kumar Bandyopadhyay. 2016. *Crack Detection and Classification in Concrete*. Journal for Research.
- Chidara, Rakesh, Rahul Nagulagama, dan Smitha Yadav. 2014. *Achievement of Early Compressive Strength in Concrete Using Sporosarcina Pasteurii Bacteria as an Admixture*. Advances in Civil Engineering.
- Damayanti, Retno. 2018. **Abu Batubara dan Pemanfaatannya : Tinjauan Teknis Karakteristik secara Kimia dan Toksikologinya**. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara Volume 14, Nomor3, September 2018. 213-231.
- Davidovits, Joseph. 2008. *Geopolymer Chemistry & Applications 2nd Edition page 494*. Institut Geopolymere.
- de Koster, S. A. L., R. M. Mors, H. W. Nugteren, H. M. Jonkers, G.M. H. Meesters, dan J. R. van Ommen. 2015. *Geopolymer coating of bacteria-containing granules for use in self-healing concrete*. The 7th World Congress on Particle Technology (WCPT7). Procedia Engineering. 475-484.
- Ekaputri, Januarta Jaya, Triwulan, Khorin Agus Priadana, Tri Eddy Susanto, dan Subaer Junaedi. 2013. *Physico-Chemical Characterization of Fly Ash*. Advances in Structural Engineering and Mechanics.
- Fawzy, Mohamed Hussein. 2016. *Effectiveness of Self-Healing in Repair of Strategic Concrete Structures "A Simplified Model"*. MSc Theses. The American University in Cairo School of Sciences and Engineering.
- Federal Highway Administration Research. 2016. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. U.S. Department of Transportation, Publication Number : FHWA-RD-97-148.

- Ghafur, A. 2009. **Pengaruh penggunaan abu ampas tebu terhadap kuat tekan dan pola retak beton**. Medan: Universitas Sumatra Utara
- Gollapudi, U. K., C. L. Knutson, dan M. R. Islam. 1995. *A New Method for Controlling Leaching Through Permeable Channels*. Chemosphere. 697-705.
- Granger, S., A. Loukili, G. Pijauder-Cabot, dan G. Chanvillard. 20017. *Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material : Mechanical test and acoustic emission analysis*. Cement and Concrete Research. 519-527.
- Hardjito, Djwantoro, dan B. V. Rangan. 2005. *Development and Properties of Low-Calcium Fly-Based Geopolymer Concrete*. Research Report GC 1, Perth: Faculty of Engineering Curtin University of Technology.
- Huang, Haoliang, Guang Ye, Chunxiang Qian, dan Erik Schlangen. 2016. *Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service condition*. Materials and Design. 499-511.
- Huang, Haoliang dan Ye, Guang. 2016. *Numerical Studies of the Effects of Water Capsules on Self-Healing Efficiency and Mechanical Properties in Cementitious Materials*. Advances in Materials Science and Engineering.
- Jo, Byung-wan, Seung-kook Park, dan Jong-bin Park. 2007. *Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA)*. Cement & Concrete Composites. 128-135.
- Jonkers, Henk M. 2011. *Bacteria-based self-healing concrete*. HERON.
- Jonkers, Henk M., Arjan Thijssen, Gerard Muyzer, Oguzhan Copuroglu, dan Erik Schlangen. 2010. *Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete*. Ecological Engineering. 230-235.
- Karyawan, I Dewa Made Alit, Ervina Ahyudanari, dan Januarti Jaya Ekaputri. 2017. *Potential Use of Fly Ash Base-*

- Geopolymer as Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixture.*** International Journal of Engineering and Technology 9 (5): 3744.
- Kementrian ESDM, Republik Indonesia. 2015. **Penandatanganan Kesepakatan Bersama antara Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan KESDM, Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah dan Bahan Berbahaya dan Beracun KLHK. Siaran Pers No.62/SJI/2015.** Badan Penelitian dan Pengembangan Kemen PUPR.
- Kim, Hyun Jung, Hyo Jung Eom, Chulwoo Park, Jaejoon Jung, Shin Bora, Wok Kim, Namhyun Chung, In-Geol Choi, dan Woojun Park. 2016. ***Calcium Carbonate Precipitation by Bacillus and Sporosarcina Strains Isolated from Concrete and Analysis of the Bacterial Community of Concrete.*** J. Microbiology. Biotechnology. 540-548.
- Komnitsas, Konstantinos A. 2011. ***Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities.*** 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities. 1023-1032.
- Luo, Mian, Quan, Chun-Xiang, dan Li, Rui-Yang. 2015. ***Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete.*** Construction and Building Materials. 87. 1-7.
- Lv, Zhong, dan Huisu Chen. 2012. ***Modeling of self-healing efficiency for cracks due to unhydrated cement nuclei in hardened cement paste.*** 2011 Chinese Materials Conference. 281-290.
- McCormac, Jack C., dan Russel H. Brown. 2014. ***Design of Reinforced Concrete 9th Edition.*** Hoboken, NJ : Wiley
- Meharie, Meseret Getnet, James Wambua Kaluli, Zachary Abierogariy, dan Nandyala Darga Kumar. 2017. ***Factors Affecting the Self-Healing Efficiency of Cracked.*** American Journal of Construction and Building Materials. 86-92.

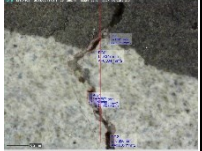
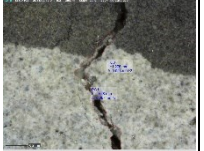


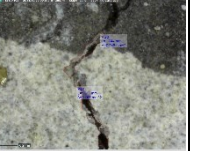
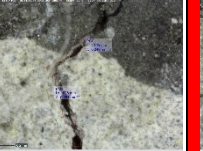

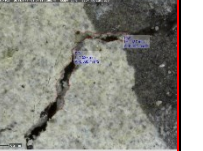
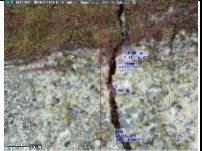

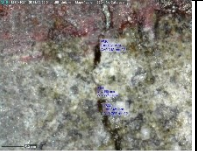
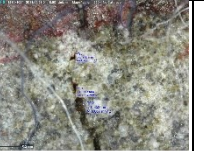
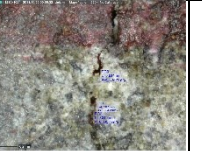
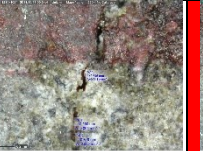


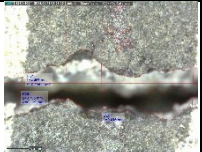
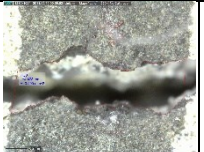
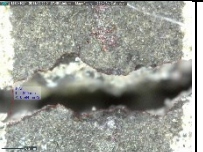
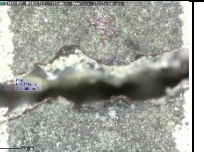

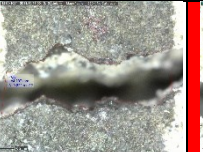

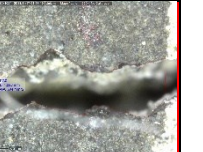
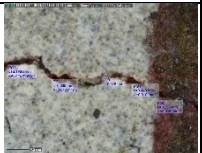







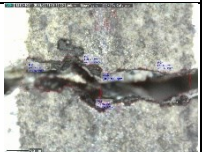

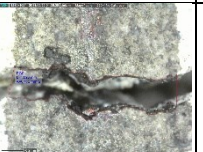
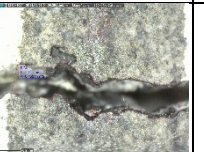
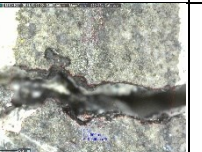



- Nawy, Edward G. 2010. **Beton Bertulang Sebuah Pendekatan Mendasar Edisi Kelima Jilid 1**. Diterjemahkan oleh Tavio dan Benny Kusuma. Surabaya : ITS Press
- Parshwanath, Rajamane Nirmalakumar, N. Lakshmanan, dan M. C. Nataraja. 2011. *An introduction to geopolymer concrete*. Indian Concrete Journal.
- Priyadharsini, P., G. Mohan Ganesh, dan A. S. Santhi. 2012. *A Review on Artificial Aggregates*. International Journal of Earth Sciences and Engineering. 540-546.
- Roig-Flores, M., S. Moscato, S. Serna, dan L. Ferrara. 2015. *Self healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments*. Construction and Building Materials. 1-11.
- de Rooij, Mario , Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, dan Erik Schlangen. 2013. *Self Healing Phenomena in Cement-Based Material*. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, Springer.
- Sahmaran, M., Yildirim, G., Noori, R., Ozbay, E., dan Lachemi, M. 2015. *Repeatability and Pervasiveness of Self-Healing in Engineered Cementitious Composites*. ACI Materials Journal. 112.
- Sangadji, Senot. 2017. *Can self-healing mechanism helps concrete structures sustainable*. Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, SCESCM 2016. 238-249.
- Scrivener, Karen L., Alison K. Crumbie, dan Peter Laugesen. 2004. *The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete*. Interface Science. 411-421.
- Singh, B., Ishwarya G., M. Gupta, dan S. K. Bhattacharyya. 2015. *Geopolymer concrete : A review of some recent developments*. Construction and Building Material. 78-90.
- SNI 03-2834-2000. 2000. **Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal**. Standar Nasional Indonesia.

- SNI 03-6815-2002. 2002. **Tata Cara Mengevaluasi Hasil Uji Kekuatan Beton**. Standar Nasional Indonesia.
- SNI 15-2049-2004. 2004. **Semen Portland**. Standar Nasional Indonesia.
- Stutzman, Paul E., Pan Feng, dan Jeffrey W. Bullard. 2016. *Phase Analysis of Portland Cement by Combined Quantitative X-Ray Powder Diffraction and Scanning Electron Microscopy*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology.
- Sun, Li, Liang, Dezhi, GAO, Qianqian, dan Zhou, Jianhong. 2013. *Analysis on Factors Affecting the Self-Repair Capability of SMA Wire Concrete Beam*. Journal of Mathematical Problems in Engineering.
- Talaiekhosravi, Amirreza, Majid, Muhd. Zaimi Abd, Fulazzaky, Mohamad Ali, dan Lee, Chew Tin. 2014. *A Review of Self-healing Concrete Research Development*. Journal of Environmental Treatment Techniques. 2.1-11.
- Tittelboom, Kim Van, dan Nele De Belie. 2013. *Self-Healing in Cementitious Materials—A Review*. Materials. 2187-2217.
- Tittelboom, Kim Van, Elke Gruyaert, Hubert Rahier, dan Nele De Belie. 2012. *Influence of Mix Composition on The Extent of Autogenous Crack Healing by Continued Hydration or Calcium Carbonate Formation*. Construction and Building Materials. 349-359.
- Tittelboom, Kim Van, Nele De Belie, Willem De Muynck, dan Willy Verstate. 2010. *Use of bacteria to repair cracks in concrete*. Cement and Concrete Research. 157-166.
- U.S. Geological Survey. 2017. **Mineral commodity summaries 2017:U.S. Geological Survey**. 202 , <https://doi.org/10.3133/70180197> page 45
- Vijay, Kunamineni, Meena Murmu, dan Shirish V. Deo. 2017. *Bacteria based self healing concrete - a review*. Construction and Building Materials. 1008-1014.

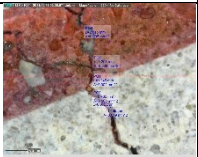

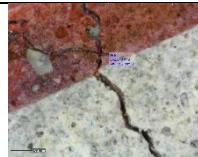
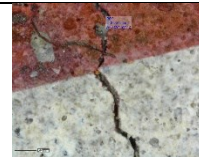
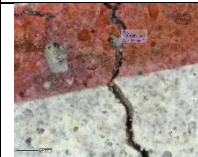
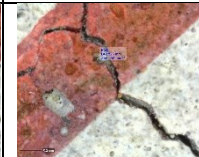
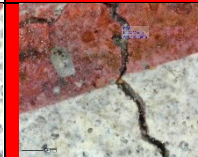
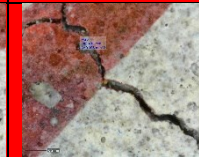

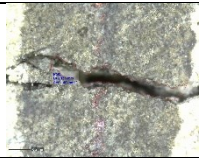
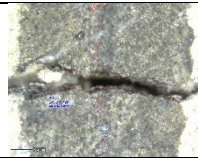
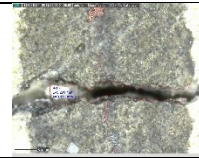
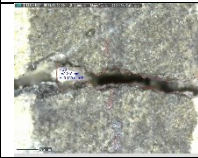
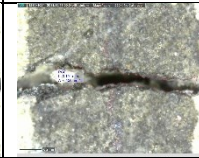

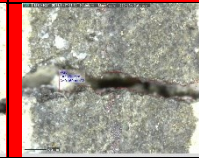
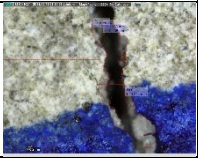
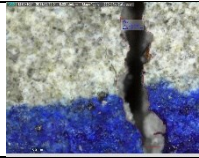
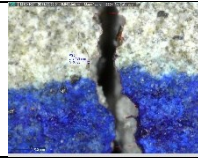
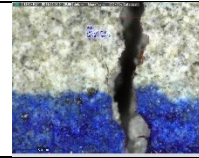
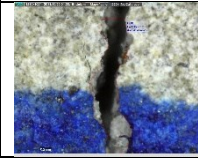
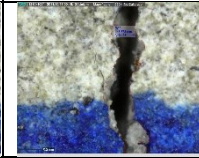
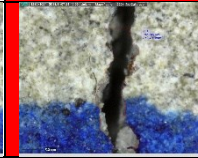
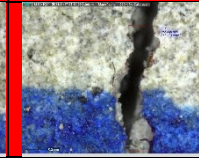
- Wang, J. Y., H. Soens, W. Verstate, dan Nele De Belie. 2014. *Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores*. Cement and Concrete Research. 139-152.
- Wang, Yongjing, Pham, Duc Truong, dan Ji, Chunqian. 2015. *Self-healing composites: A review*. Cogent Engineering. 2.
- Wiktor, Virginie, dan Henk M. Jonkers. 2011. *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete*. Cement and Concrete Composites. 763-770.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Ozawa Meida, L., 2001. **Carbon dioxide emissions from the global cement industry**. Annu. Rev. Energy Environ. 26. 326
- Wulandari, Kiki Dwi, Januarti Jaya Ekaputri, Triwulan, Chikako Fujiyama, dan Davin H. E. Setiamarga. 2018. *Effects of Microbial Agents to the Properties of Fly Ash-Based Paste*. ICRMCE . MATEC Web of Conferences.

LAMPIRAN

Sampel pengamatan retak

	Umur Pengamatan							
	0 hari	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari	35 hari	60 hari	70 hari
Bn F20 B5 M400								
Luas (mm ²)	0.117	0.12	0.112	0.11	0.113	0.113	0.126	0.127
Bn F20 B5 M1000								
Luas (mm ²)	0.034	0.034	0.029	0.014	0.018	0.02	0.018	0.017
Bn F20 B5 M5000								
Luas (mm ²)	0.594	0.595	0.594	0.593	0.595	0.622	0.636	0.634
Bn F0 B0 M400								
Luas (mm ²)	0.112	0.114	0.115	0.111	0.123	0.134	0.156	0.154
Bn F0 B0 M1000								
Luas (mm ²)	0.455	0.451	0.452	0.45	0.539	0.502	0.502	0.515

Sampel pengamatan retak (lanjutan)

Spesimen	Umur Pengamatan							
	0 hari	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari	35 hari	60 hari	70 hari
Bn F0 B0 M5000								
Luas (mm ²)	0.095	0.102	0.092	0.094	0.106	0.108	0.105	0.106
Bn F20 B5								
Luas (mm ²)	0.13	0.14	0.149	0.151	0.15	0.15	0.157	0.16
Kontrol								
Luas (mm ²)	0.425	0.424	0.423	0.422	0.424	0.423	0.42	0.424

Lampiran

1. Deskripsi sampel

- Nama : 400 8mM
- Bentuk : Serbuk
- Kemasan : Plastik Zip-Lock
- Diterima : Mei 2018
- Jenis analisa : Isolasi dan Identifikasi Mikroorganisme

2. Metode uji :

A. Tahap Isolasi

- Sebanyak 1 gram sampel serbuk ditimbang secara aseptis.
- Pengenceran bertingkat dilakukan hingga 10^{-3} pada sampel uji dengan menggunakan akuades steril
- Sebanyak 0,1 ml sampel pada pengenceran 10^{-1} , 10^{-2} , dan 10^{-3} disebar pada medium *Nutrient Agar* (NA), lalu diinkubasi pada suhu ruang selama 24 jam pada suhu 37C.
- Jumlah masing-masing koloni yang tumbuh pada setiap cawan dicatat dan ditentukan koloni yang dominan.

B. Tahap Purifikasi

- Isolat dominan ditentukan berdasarkan morfologi koloni yang paling sering muncul pada setiap cawan.
- Purifikasi isolat dominan dilakukan dengan mengambil satu ose koloni bakteri dominan, kemudian diinokulasikan ke dalam medium NA baru dengan metode 16 gores, kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37C.

C. Tahap Identifikasi

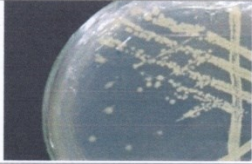
- Identifikasi bakteri dilakukan berdasarkan pengamatan mikroskopis dan karakter biokimiawi isolat bakteri dominan dari hasil purifikasi.
- Karakteristik biokimiawi yang diamati dari isolat dominan adalah sifat Gram, kehadiran endospora, dan kebutuhan oksigen. Semua uji biokimia dilakukan menurut protokol Harley dan Prescott (2002).
- Karakteristik biokimiawi isolat dominan kemudian dicocokkan dengan buku *Bergey's Manual Determinative of Bacteriology* (Holt et al., 1994) untuk melihat kemiripannya dengan genus *Sporosarcina*.

3. Hasil Uji


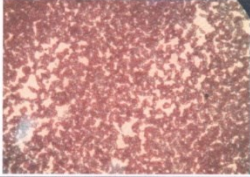

3.1 Hasil Uji TPC

NO	Pengenceran	Hasil
1.	10^{-1}	3×10^1 cfu/gr = 30 cfu/gr
2.	10^{-2}	0
3.	10^{-3}	0

3.2 Hasil Uji Purifikasi

NO	Keterangan	Gambar	Hasil
1.	Hasil Purifikasi		Didapatkan koloni murni dengan karakter: Bentuk: Sirkular Elevasi: Rata Tepi: Entirer Warna: Putih Kekuningan

3.3 Hasil Uji Karakteristik Biokimiawi Isolat

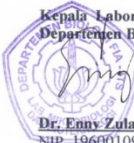
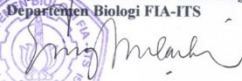
NO	Keterangan	Gambar	Hasil
1.	Pewarnaan Gram		Gram Positif (berwarna ungu)
2.	Pewarnaan Endospora		Terdapat Endospora (bulat hijau)
3.	Kebutuhan Oksigen		Aerob obligat (tumbuh hanya dipermukaan medium)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa diketahui densitas sel bakteri pada sampel serbuk 400 8mM berjumlah 30 cfu/gram. Isolat bakteri dominan pada sampel 400 8 mM memiliki kesamaan karakteristik biokimia dengan genus *Sporosarcina* yaitu memiliki bentuk sel batang pendek diplo dan tetrad, dinding sel jenis Gram positif, memiliki endospora, dan bersifat aerob obligat.

Surabaya, 10 Agustus 2018

Kepala Laboratorium Mikrobiologi & Bioteknologi,
Departemen Biologi FIA-ITS



Dr. Enny Zulaika, M.P.
NIP. 19600109 198803 2 001

Lampiran

1. Deskripsi sampel

- Nama : 1000 8 M
- Bentuk : Serbuk
- Kemasan : Plastik Zip-Lock
- Diterima : Mei 2018
- Jenis analisa : Isolasi dan Identifikasi Mikroorganisme

2. Metode uji :

A. Tahap Isolasi

- Sebanyak 1 gram sampel serbuk ditimbang secara aseptis.
- Dilakukan pengenceran bertingkat hingga 10^{-3} pada sampel uji dengan menggunakan akuades steril
- Kemudian 0,1 ml sampel pada pengenceran 10^{-1} , 10^{-2} , dan 10^{-3} disebar pada medium *Nutrient Agar* (NA), lalu diinkubasi pada suhu ruang selama 24 jam pada suhu 37C.
- Jumlah masing-masing koloni yang tumbuh pada setiap cawan dicatat dan ditentukan koloni yang dominan.

B. Tahap Purifikasi

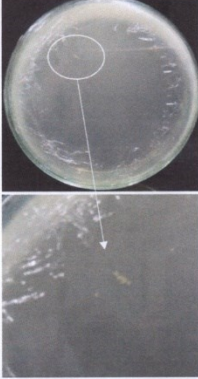

- Isolat dominan ditentukan berdasarkan morfologi koloni yang paling sering muncul pada setiap cawan.
- Purifikasi isolat dominan dilakukan dengan mengambil satu ose koloni bakteri dominan, kemudian diinokulasikan ke dalam medium NA baru dengan metode 16 gores, kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37C.

C. Tahap Identifikasi

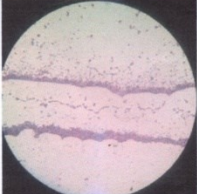
- Identifikasi bakteri dilakukan berdasarkan pengamatan mikroskopis dan karakter biokimiawi isolat bakteri dominan dari hasil purifikasi.
- Karakteristik biokimiawi yang diamati dari isolat dominan adalah sifat Gram, kehadiran endospora, dan kebutuhan oksigen. Semua uji biokimia dilakukan menurut protokol Harley dan Prescott (2002).
- Karakteristik biokimiawi isolat dominan kemudian dicocokkan dengan buku *Bergey's Manual Determinative of Bacteriology* (Holt et al., 1994) untuk melihat kemiripannya dengan genus *Sporosarcina*.

3. Hasil Uji



3.1. Hasil TPC dan Purifikasi

No.	Uji	Gambar	Keterangan
1	TPC		Jumlah koloni pada sampel sebesar 7×10^1 CFU/gram
2	Purifikasi		Form = Circular Elevation = Raised Margin = Entire Color = White

3.2. Hasil Uji Biokimia

No.	Parameter	Gambar Hasil	Keterangan
1	Pewarnaan Gram		Batang, gram positif

3

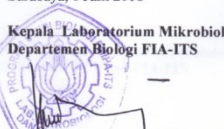
2	Pewarnaan Endospore		Endospore
3	Kebutuhan Oksigen		Aerob obligat

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa diketahui densitas sel bakteri pada sampel serbuk 1000 8 M berjumlah . Isolat bakteri dominan pada sampel 1000 8 M memiliki kesamaan karakteristik biokimia dengan genus *Sporosarcina* yaitu memiliki dinding sel jenis Gram positif, memiliki endospora, dan bersifat aerob obligat.

Surabaya, 6 Juni 2018

Kepala Laboratorium Mikrobiologi & Bioteknologi,
Departemen Biologi FIA-ITS


Nur Hidayatul Alami, S.Si., M.Si
NIP. 19850501 201212 2 001

Lampiran

1. Deskripsi sampel







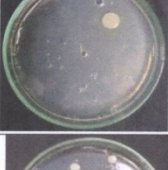



- Nama : 400 M, 1000 M, 5000 M
- Bentuk : Serbuk
- Kemasan : Plastik Zip-Lock
- Diterima : Desember 2018
- Jenis analisa : Perhitungan Jumlah Bakteri Pada Serbuk Beton



2. Metode uji :**A. Perhitungan Jumlah Bakteri**

- Masing-masing sebanyak 1 gram sampel serbuk ditimbang secara aseptis.
- Dilakukan pengenceran bertingkat hingga 10^{-2} pada sampel uji dengan menggunakan larutan fisiologis steril.
- Kemudian 0,1 ml sampel pada pengenceran 10^{-1} dan 10^{-2} disebar pada medium *Nutrient Agar* (NA), lalu diinkubasi pada suhu ruang selama 24 jam pada suhu 37C.
- Dihitung jumlah bakteri yang tumbuh pada cawan dengan menggunakan *Digital Colony Counter*.

3. Hasil Uji

3.1 Hasil Perhitungan Bakteri

NO	Sampel	Jumlah Koloni	Foto	
			Ulangan 1	Ulangan 2
1	400M 10 ⁻¹	U1: 79 U2: 14 Jumlah: 4.65 x 10 ²		
2	400M 10 ⁻²	U1: 2 U2: 23 Jumlah: 1.25 x 10 ³		
3	1000M 10 ⁻¹	U1: 20 U2: 8 Jumlah: 1.4 x 10 ²		
4	1000M 10 ⁻²	U1: 3 U2: 4 Jumlah: 3.5 x 10 ²		
5	5000M 10 ⁻¹	U1: 13 U2: 45 Jumlah: 2.9 x 10 ²		


6	5000M 10 ⁻²	U1: 56 U2: 3 Jumlah: 2,9 x 10 ³		
---	------------------------	--	---	---

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa diketahui sampel serbuk dengan densitas sel bakteri terbanyak adalah sampel 5000M dengan jumlah bakteri $2,9 \times 10^3$ cfu/gram. Sedangkan sampel dengan jumlah bakteri paling rendah adalah 1000M dengan jumlah bakteri $1,4 \times 10^2$ cfu/gram.

Surabaya, 03 Januari 2019

**Kepala Laboratorium Mikrobiologi & Bioteknologi,
Departemen Biologi Fakultas Sains-ITS**


Nurhidayatul Alami, S.Si., M.Si.
NIP. 19850501 201212 2 001

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
PROGRAM SARJANA (S1) DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL FTSLK – ITS

BERITA ACARA PENYELENGGARAAN UJIAN
SEMINAR DAN LISAN
TUGAS AKHIR

Pada hari ini Selasa tanggal 15 Januari 2019 jam 09:00 WIB telah diselenggarakan **UJIAN SEMINAR DAN LISAN TUGAS AKHIR** Program Sarjana (S1) Departemen Teknik Sipil FTSLK-ITS bagi mahasiswa:

NRP	Nama	Judul Tugas Akhir
0311144000093	Rahman Adima Adrianta	Pengaruh Abu Batubara dan Healing Agent terhadap Kemampuan Self Healing Beton

1. Dengan perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :

Pindahkan / kerjakan juga tabel / grafik di power point ke buku TA.

Stressing pada pembahasan lebar retak mula³ untuk setiap benda uji harus dijelaskan secara detail.

Pertu dijelaskan apa itu healing agent pada penelitian. Grafik hal .5 dan 21 harus diperbaiki (tanpa warna). Grafik kuat tekan hal 10 jangan dihubungkan dengan garis. Perbaiki / edit penulisan daftar pustaka. Dalam kesimpulan, perbaiki statement "kuat tekan awal".

Kesimpulan harus menjawab permasalahan / tujuan.

Jelaskan lebih baik penjelasan tentang grafik 48 dll di hal 113.

2. Rentang nilai dari hasil diskusi Tim Penguji Tugas Akhir adalah : A / AB / B / BC / C / D / E

3. Dengan hasil ujian (wajib dibacakan oleh Ketua Sidang di depan Peserta Ujian dan Penguji) :

Lulus Tanpa Perbaikan

Mengulang Ujian Seminar dan Lisan

Lulus Dengan Perbaikan

Mengulang Ujian Lisan

Tim Penguji (Anggota)	Tanda Tangan
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT (Pembimbing 1)	
Ir. Faimun, MSc. PhD	
Harun Alrasyid, ST. MT. PhD.	
Bambang Piscesa, ST. MT. PhD	

Surabaya, 15 Januari 2019

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. techn. Umboro Lasminto, ST. MSc

Ketua Sidang

(.....Januarti.....)

**FORM TAMBAHAN PERBAIKAN/PENYEMPURNAAN
SEMINAR & LISAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL FTSLK - ITS**

Nama Mahasiswa : Rahman Adima Adrianta
NRP : 0311144000093

Saran/Masukan :

Perlu dilakukan komparasi speed healing vs lebar retak awal.
Lebih baik dijelaskan lagi kemampuan hidup bakteri sampai
umur berapa dibuktikan dengan cara bagaimana.

Tambahkan fenomena kemungkinan agregat mengalami shrinkage
di dekat permukaan beton. & Tunjukkan POMITS jurnal

Surabaya,

J. S. S.
(Januarti J. S.)



Form AK/TA-04

rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng. Jauwanti Jaya Ekaputri., ST.MT
NAMA MAHASISWA	: Rehman Adima Adrianto.
NRP	: 0311144 000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Bahubara dan Healing Agent terhadap Kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 028 823.

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
1	14/03 2018	Pengecoran M 0, M 400, M 800, M 1000 4 Molar	Cor mortar Dogbone 4 Molar.	
2	23/03 2018.	Pengecoran Dogbone 4 Molar. Saran: Karena mesin Tensile test rusak maka uji coba dogbone diganti dengan silinder mortar.	Lanjutkan ke pengepresan tekan silinder dan pembuatan mortar silinder.	
3	6/04 2018	Pengubahan komposisi variabel. Saran: Karena hasil 4M dengan perbandingan FA : Alkali = 65 : 35 pada saat tes keausan tidak memenuhi syarat maka komposisi variabel	Pengecoran 8 Molar 75 : 25 dengan healing agent 400 ml/m ³ , 1000 ml/m ³ , dan 500 ml/m ³ .	



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri., ST. MT
NAMA MAHASISWA	: Rahman Adima Adhanta.
NRP	: 0311144000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Batubara dan Healing Agent terhadap kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 028823

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
		Yang digunakan saat Tugas Akhir menggunakan SM dengan perbandingan FA: Alkali = 75:25. Perubahan komposisi healing agent menjadi 400 ml/m ³ , 1000 ml/m ³ , dan 5000 ml/m ³		Y
4	20/04 2018	Pengeroran SM geopolimer 75:25. Hasil = Geopolimer terlihat lebih rapat.	Langutuhan.	Y
5.	4/05/ 2018.	Praktikum ke Lab Biologi; untuk Determination of Bacterial Number menggunakan benda uji Ligand Polomrt dan serbuk Mikro	Melanjutkan identifikasi bakteri B Molar geopolimer	Y



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng. Januanti Jaya Ekaputri., ST. MT
NAMA MAHASISWA	: Rahman Adima Adrianta
NRP	: 0311144000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Batu bara dan Healing Agent terhadap kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 028823

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
		Hasil : Pada benda uji liquid Polomit terdapat Colony Forming Unit banyak 6koloni dan 10 koloni sedangkan serbuk M1000 terdapat 2 koloni		
6.	31/05 2018.	Hasil identifikasi bakteri pada serbuk M1000 memiliki kesamaan karakteristik biokimia dengan genus Sporosarcina	Melanjutkan identifikasi bakteri pada serbuk M400.	
7.	22/06 2018.	Hasil belah silinder mortar menunjukkan belah yang tidak teratur dan tidak dapat di susun kembali	Pengerutan pada benda uji Balok.	



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)
Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng - Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT
NAMA MAHASISWA	: Rahman Adhina Adhianta
NRP	: 0311144 0000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Batu bara dan Healing Agent terhadap Kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 028 823

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
		Saran: benda uji belah mortar tidak signifikan sehingga harus berfokus pada balok dan benda uji belah silinder mortar ditradakan.		rn
8.	13/07 2018	Pengecoran Balok Hasil = pengecoran balok dengan agregat buatan terlihat keropos	Pengecoran balok kontrol	rn
9	21/07 2018.	Hasil Pengecoran Balok kontrol bagus, namun tidak dengan balok yang menggunakan	Disarankan untuk membuat benda uji silinder dengan variabel komposisi yang	rn



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT
NAMA MAHASISWA	: Rahmah Adima Adrianta
NRP	: 0311144000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Basuhawa dan Healing Agent terhadap Kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 028 823

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
		<p>agregat buatan.</p> <p>Saran: Karena kerat jenis agregat buatan yang relatif rendah dan beda dengan kerat jenis agregat kasar alami maka terlihat mempunyai volume yang lebih besar sehingga terkesehan terlalu banyak agregat kasar buatan pada campuran beton sehingga menyebabkan beton kempes. Maka disarankan untuk kontrol volume dengan BJ yang berbeda.</p>	<p>sama dengan benda uji balok. Dan melanjutkan pengcoran balok dengan kontrol volume agregat kasar buatan disamakan dengan agregat kasar alami.</p>	



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukotilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	: Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST. MT
NAMA MAHASISWA	: Rahman Adima Adrianta.
NRP	: 03111440000093
JUDUL TUGAS AKHIR	: Pengaruh Abu Batubara dan Healing Agent terhadap Kemampuan Self-Healing Beton.
TANGGAL PROPOSAL	: 1 Februari 2018
NO. SP-MMTA	: 020823.

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
10	31/07 2018.	Hasil pengeringan beton dengan agregat buatan sudah tidak berporos lagi dan mudah untuk dirojak.	Pengelasan Lantai balok dan pengelasan kewan silinder	

BIODATA PENULIS



Rahman Adima Adrianta,
Penulis dilahirkan di Malang, 20 Maret 1996, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Baitul Makmur (Malang), SDN Percobaan 1 (Malang), SMP Negeri 1 (Malang), SMA Negeri 3 (Malang). Setelah lulus dari SMA Negeri 3 Malang tahun 2014, Penulis melanjutkan studi sarjana di jurusan Teknik Sipil ITS pada tahun 2014 (S-57).

Selama perkuliahan selain akademik penulis aktif dalam keiatan Himpunan Mahasiswa Sipil FTSLK menjadi Ketua Departemen Keprofesian dan Keilmiahan pada tahun jabatan 2016/2017. Penulis juga aktif pada kepanitiaan ITS EXPO 2016 sebagai Staff Ahli Sie. Sponsorship. Penulis sempat mengikut kerja praktik di proyek “Apartemen Grand Sungkono Lagoon, PT.PP (Persero)” pada tahun 2017. Penulis bersama tim yaitu Andini dan Jonathan pernah menjadi Finalis of International Concrete Competition yang diselenggarakan oleh CIVIL EXPO 2017. Penulis dapat dihubungi melalui email: rahmanadima@gmail.com