



DISERTASI 5 - CS256611

**MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN *FLY ASH* DAN *SLAG*
SEBAGAI PELINDUNG BETON DARI SERANGAN
KARBONASI, KLORIDA, SULFAT, DAN BIOTA
PENEMPEL DI LINGKUNGAN LAUT**

RIZQI ABDI PERDANAWATI
7012222004

DOSEN PEMBIMBING:

Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.
Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D
Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D

**PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2026**



DISERTASI 5 - CS256611

**MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN *FLY ASH* DAN *SLAG*
SEBAGAI PELINDUNG BETON DARI SERANGAN
KARBONASI, KLORIDA, SULFAT, DAN BIOTA
PENEMPEL DI LINGKUNGAN LAUT**

**RIZQI ABDI PERDANAWATI
7012222004**

DOSEN PEMBIMBING:

**Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.
Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D
Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D**

**PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar

Doktor (Dr.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Rizqi Abdi Perdanawati

NRP. 7012222001

Tanggal Ujian: 20 Juli 2026

Periode Wisuda: September 2026

Disetujui Oleh:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

NIP. 197401122005012001



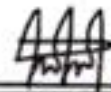
2. Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D

NIP. –



3. Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D

NIP. 198602012012122001



4. Dr. Candra Irawan, S.T., M.T.

NIP. 199008232015041001



5. Dr. Mahendra Andiek Maulana, S.T., M.T.

NIP. 198404092009121005



6. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

NIP. 196704061992031001



7. Prof. Dr. Mochammad Riyanto, S.Pi., M.Si.

NIP. 198210252007011001



Kepala Departemen,

Prof. Dafa Iranata, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19800430 200501 1 002

MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN *FLY ASH* DAN *SLAG* SEBAGAI PELINDUNG BETON DARI SERANGAN KARBONASI, KLORIDA, SULFAT, DAN BIOTA PENEMPEL DI LINGKUNGAN LAUT

Dosen Pembimbing:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.
2. Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D
3. Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D

Mahasiswa:

Rizqi Abdi Perdanawati (7012222001)

ABSTRAK

Degradasi beton di laut diawali dengan adanya interaksi air laut dengan beton sehingga ion agresif yaitu klorida, sulfat, dan karbonasi masuk dan menyerang beton. Selain itu, *biofouling*/biota penempel diduga merusak beton melalui proses biodegradasi dan berpotensi menambah berat struktur. Tujuan utama dalam penelitian ini adalah pengembangan mortar geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag* yang tahan terhadap serangan karbonasi, klorida, sulfat dan *biofouling*. Uji coba dilakukan dengan penyelidikan komposisi mortar geopolimer menggunakan *fly ash* halus dan *slag*, dilanjutkan dengan pengujian durabilitas di perairan Selat Madura selama satu tahun dengan paparan zona terendam. Beton konvensional (C) dan beton C sebagai inti yang dilapisi mortar geopolimer tanpa *slag* (M) dan mortar geopolimer dengan *slag* (MS) diuji untuk mengetahui kerentanan beton di daerah agresif yang direpresentasikan melalui kedalaman karbonasi, penetrasi ion klorida, dan ion sulfat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* halus menghasilkan mortar geopolimer dengan kelecakan yang baik, kuat tekan minimal 35 MPa serta memiliki permukaan yang lebih halus. Pelapis mortar geopolimer menurunkan persentaseutupan serta menurunkan laju pertumbuhan *biofouling*. Penambahan *slag* meningkatkan kuat tekan beton lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Mortar geopolimer tanpa *slag* (M) tidak mampu menghambat ion klorida dan sulfat bebas pada perendaman 189 hari. Penambahan *slag* (MS) mampu menjadi lapisan pelindung terhadap penetrasi ion agresif. MS juga mampu menahan penetrasi sulfat pada lapisan luar sehingga melindungi beton inti, meskipun kadar sulfat bebas pada lapisan mortar lebih. Sebaliknya, karbonasi pada mortar geopolimer relatif lebih tinggi dibandingkan beton konvensional karena tidak tersedianya cadangan Ca(OH)_2 . Keberadaan *biofouling* tidak berpengaruh terhadap kapasitas mekanik namun memperparah penetrasi ion agresif.

Kata kunci: Geopolimer, *fly ash*, durabilitas, pelindung beton, *biofouling*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

FLY ASH AND SLAG BASED GEOPOLYMER MORTAR AS A PROTECTIVE COATING FOR CONVENTIONAL CONCRETE AGAINST CARBONATION, CHLORIDE, SULFATE, AND MARINE *BIOFOULING*

Supervisors:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.
2. Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D
3. Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D

Student:

Rizqi Abdi Perdanawati (7012222001)

ABSTRACT

Concrete deterioration in marine environments is initiated by the ingress of aggressive agents that degrade concrete through the penetration of chloride, sulfate ions, and carbonation accelerating concrete degradation. In addition, marine *biofouling* is expected to influence concrete deterioration through biodeterioration processes and by increasing the structural dead load due to the accumulation of attached organisms. This study aimed to develop fly ash and slag based geopolymer mortar with enhanced resistance to carbonation, chloride ingress, sulfate attack, and marine *biofouling*. Experimental investigations included optimization of geopolymer mortar composition followed by one-year field exposure in the submerged zone of the Madura Strait, Indonesia. Conventional concrete (C) and geopolymer-coated concrete with and without *slag* (MS and M) were comparatively evaluated in terms of carbonation depth, chloride and sulfate penetration, *biofouling* colonization, compressive strength, and ion transport behavior. The effects of marine *biofouling* on concrete durability and degradation mechanisms were also investigated.

The results demonstrated that the use of fine fly ash produced geopolymer mortar with good workability, a compressive strength exceeding 35 MPa, and a smoother surface than conventional concrete. The geopolymer coating reduced both the percentage coverage and growth rate of *biofouling*. The incorporation of slag further increased the compressive strength beyond that of conventional concrete. Slag-free geopolymer mortar (M) was unable to effectively inhibit free chloride and sulfate ingress after 189 days of marine exposure. In contrast, slag-modified geopolymer mortar (MS) acted as an effective protective barrier against aggressive ion penetration. Marine *biofouling* did not significantly reduce the mechanical capacity of the coated concrete, instead, it formed a higher ion transport. This study concludes that although marine *biofouling* can function as a biological surface layer that partially limits aggressive ion ingress, the additional biomass accumulated on the structure may adversely affect structural performance and should therefore be controlled.

Kata kunci: Geopolymer, fly ash, durability, coating, *biofouling*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Bismillāhirrahmānirrahīm

Penuh syukur dipanjatkan atas segala kebaikan dan kasih sayang Allah SWT, Tuhan Semesta Alam, Sumber Ilmu Pengetahuan yang telah memberikan setetes ilmu Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan laporan disertasi yang berjudul ‘Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash Dan Slag Sebagai Pelindung Beton Dari Serangan Karbonasi, Klorida, Sulfat, Dan Biota Penempel Di Lingkungan Laut’.

Dalam proses penyusunan disertasi ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, arahan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T. selaku Promotor utama atas bimbingan, arahan, serta motivasi tiada henti yang diberikan secara penuh selama proses penelitian dan penyusunan laporan disertasi.
2. Assoc Prof. Davin H.E. Setiamarga, Ph. D selaku co-promotor atas arahan dan saran perbaikan yang diberikan untuk menyempurnakan penelitian dan penyusunan laporan disertasi.
4. Puput Risdanareni, ST., MT., Ph. D selaku co-promotor atas pencerahan dan petunjuk yang diberikan pada proses penelitian hingga pelaporan disertasi.
3. Dr. Candra Irawan, S.T., M.T., selaku penguji yang dengan teliti dan detail memberikan masukan pada proses penelitian dan saran perbaikan pada penyusunan laporan disertasi.
4. Dr. Mahendra Andiek Maulana, S.T., M.T., selaku penguji yang memberikan masukan dan kritik membangun selama tahapan penelitian hingga penyusunan laporan disertasi.
5. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D., selaku penguji yang selalu memberikan informasi berharga terkait penelitian serta saran perbaikan penulisan laporan disertasi.

6. Prof. Dr. Mochammad Riyanto, S.Pi., M.Si. dari IPB University selaku penguji luar yang memberikan wawasan berharga terkait *biofouling* untuk kesempurnaan penulisan laporan disertasi.
7. Kepala Departemen beserta seluruh dosen, tenaga kependidikan, dan laboran di Departemen Teknik Sipil ITS, yang telah membantu pelaksanaan penelitian serta penyelesaian administrasi selama masa studi.
8. Rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil ITS dan Grup Riset RETAs atas kebersamaan, dukungan, semangat, dan diskusi ilmiah selama menempuh pendidikan doktor.
9. Pimpinan, rekan sejawat, dan mahasiswa UIN Sunan Ampel yang selalu memberikan dukungan dan bantuan dalam proses studi hingga penelitian disertasi dapat diselesaikan.
10. Suami, anak, orang tua, dan saudara yang selalu mendoakan dan memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan studi dan penelitian disertasi.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan dalam berbagai bentuk selama proses penyelesaian disertasi ini.

Semoga segala bantuan, dukungan, dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan yang berlimpah dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Akhir kata, penulis berharap disertasi ini memberikan sumbangsih pengetahuan yang dapat dikembangkan dan memberikan kontribusi bagi ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang struktur melalui pemahaman teknologi beton di laut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi kalangan akademisi, praktisi, serta instansi pengelola bangunan laut dalam pengembangan penelitian, perencanaan, dan pengelolaan material yang digunakan di wilayah laut.

Surabaya, 27 Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	10
1.3 Tujuan Penelitian.....	11
1.4 Hipotesa Penelitian	12
1.5 Manfaat Penelitian.....	12
1.6 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian.....	13
1.7 Originalitas Penelitian	14
BAB 2	19
TINJAUAN PUSTAKA	19
2. 1 Durabilitas Beton pada Paparan Air Laut.....	19
2. 2 Mekanisme Penempelan Biota (<i>Biofouling</i>) dan Dampaknya Terhadap Durabilitas Beton.....	24
2. 3 Beton Geopolymer dan Durabilitasnya di Lingkungan Laut	34
2. 4 Pelapis Mortar Geopolimer	40
BAB 3	44
METODOLOGI	44
3.1 Gambaran Umum Penelitian	44
3.2 Tahapan Penelitian	46
3.3 Komposisi Mortar Geopolimer	48
3.4 Pengujian Lapangan	55
3.5 Interaksi <i>biofouling</i> dan beton	69
3.6 Mekanisme durabilitas	69
3.7 Kesimpulan.....	70

BAB 4	72
KARAKTERISASI MATERIAL DAN PENELITIAN PENDAHULUAN	72
4.1 Karakterisasi Material.....	72
4.2 Pengujian Pasta Geopolimer.....	74
BAB 5	80
PENYELIDIKAN MORTAR GEOPOLIMER SEBAGAI MATERIAL PELAPIS	
5.1 Pengujian waktu ikat dan kelecakan pasta geopolimer dengan <i>pulverized fly ash</i>	81
5.2 Pengujian mortar geopolimer.....	82
5.3 Pengaruh Kehalusan Fly ash Terhadap Kelecakan Dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer	88
5.4 Pengujian Persyaratan Mortar Geopolimer yang Mempengaruhi Penempelan Biota	91
BAB 6	96
PERTUMBUHAN <i>BIOFOULING</i> /BIOTA PENEMPEL PADA BETON KONVENSIONAL DAN MORTAR GEOPOLIMER.....	96
6.1 Kondisi Perairan Jembatan Suramadu	96
6.2 Pertumbuhan <i>Biofouling</i> pada Variasi Substrat Beton	100
BAB 7	112
KUAT TEKAN BETON KONVENSIONAL DAN YANG DILAPISI MORTAR GEOPOLIMER	112
7.1 Pengujian Tekan	112
7.2 Pengaruh Mortar Geopolimer dan <i>Biofouling</i> Terhadap Kuat Tekan.....	114
BAB 8	118
KADAR KLOORIDA, SULFAT, DAN KARBONASI PADA BETON KONVENSIONAL DAN MORTAR GEOPOLIMER	118
8.1 Kandungan Klorida, Kapasitas Pengikatan Klorida, dan Difusi Klorida .	118
8.2 Pengaruh Lapisan Mortar Geopolimer terhadap Penetrasi Klorida.....	133
8.3 Pengaruh <i>Biofouling</i> Terhadap Kadar Klorida Beton.....	134
8.3 Kandungan Sulfat Pada Beton	138
8.4 Pengaruh Mortar Geopolimer dan <i>Biofouling</i> Terhadap Kadar Sulfat Beton	141

8.5 Karbonasi Pada Beton	143
8.6 Pengaruh Mortar Geopolimer dan <i>Biofouling</i> pada Karbonasi Beton	150
BAB 9	152
MEKANISME DURABILITAS BETON	152
9.1 .Sinergi Degradasi Akibat Ion Agresif Dengan Pengaruh Adanya <i>Biofouling</i>	152
9.2 Prediksi Umur Layan.....	166
BAB 10	172
PENUTUP	172
10.1 Kesimpulan.....	172
10.2 Rekomendasi	174

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1.	(a) Biota penempel pada tiang pancang yang telah dilapisi oleh cat di pilar Jembatan Suramadu (Dokumentasi pribadi September 2022), (b) Serangan bakteri penempel (mikrofouling) (Lence, 2015), (c) Ilustrasi pengrusakan lapisan cat antikorosi oleh te teritip (barnacles) (Railkin, 2004).....	4
Gambar 1. 2.	Sampel beton yang ditumbuhi teritip pada 5 bulan perendaman di zona terendam pada Perairan Kenjeran, Surabaya (Ekaputri dkk, 2022).....	9
Gambar 2. 1	Jenis paparan di lingkungan laut (Zhou et al., 2019).....	19
Gambar 2. 2	Skema interaksi antara air laut dengan semen (Yi et al., 2020).....	21
Gambar 2. 3	(a) Pengujian Ds dihitung dari kemiringan grafik klorida dan waktu; b) Pengujian Dns diperoleh dari profil kedalaman klorida (Andrade, 2002).	23
Gambar 2. 4	Tahapan Penempelan Biota pada Substrat Beton (Ilustrasi dihasilkan oleh kecerdasan buatan)	25
Gambar 2. 5	Biota penempel pada subtrat beton dengan tambahan fly ash (Harilal et al., 2020).....	28
Gambar 2. 6	Cangkang teritip pada permukaan beton (Chlayon et al., 2020)	30
Gambar 2. 7	Fase metamorfosa Balanus amphitrite (Maruzzo et al., 2012; Railkin, 2004).....	30
Gambar 2. 8	Teritip pada tiang pancang jembatan Suramadu yang mati.....	31
Gambar 2. 9	Strategi Material Bioretensi pada Beton di Laut	33
Gambar 2. 10	Rantai alumino-silikat (Davidovits, 1994; Zhuang et al., 2016)	34
Gambar 2. 11	Proses leaching pada geopolimer yang terpapar air (Wan et al., 2020)	36
Gambar 2. 12	Ilustrasi permukaan N-A-S-H yang terpapar larutan sulfat (Zhang, Yu; Li, Tao; Hou, Dongshuai; Zhang, Jinglin; Jiang, 2018).....	37
Gambar 2. 13	Mekanisme pembentukan beton geopolimer berbahan dasar fly ash (Zhuang et al., 2016)	38

Gambar 2. 14	Kedalaman karbonasi pada beton (a) dengan percepatan karbonasi (Risdanareni et al., 2021), (b) paparan air laut pada zona splash (Pasupathy et al., 2021).....	39
Gambar 2. 15	Konsentrasi sulfat terhadap kedalaman (Pasupathy et al., 2021)...	40
Gambar 2. 16	(a) Klorida bebas pada perendaman zona splash (b) Total klorida pada perendaman zona splash (Pasupathy et al., 2021)	40
Gambar 2. 17	Ilustrasi perubahan komposisi menjadi C-A-S-H (a). Rantai Dreierketten pada ikatan C-S-H, (b). Cross-linking dari masuknya Alumunium. (Geng et al., 2017)	42
Gambar 3.1	Roadmap Kegiatan Penelitian.....	44
Gambar 3.2	Tahapan Penelitian Tahun Pertama	46
Gambar 3.3	Tahapan Penelitian Tahun Kedua dan Ketiga.....	47
Gambar 3.4	Tahapan pembuatan pasta geopolimer.....	50
Gambar 3.5	Tahapan Pembuatan Mortar Geopolymer.....	51
Gambar 3.6	Tahapan Pengujian Lapang.....	55
Gambar 3.7	Ilustrasi Benda Uji	59
Gambar 3.8	Lokasi perendaman benda uji	60
Gambar 3.9	Ilustrasi Perendaman Benda Uji Pada Zona Terendam (Fully Submerge).....	61
Gambar 3.10	Persiapan Benda Uji Sebelum Penenggelaman	61
Gambar 3.11	Sampel Uji Tekan	62
Gambar 3.12	Penyiapan Sampel Uji Kimia.....	64
Gambar 3.13	Pengambilan Data <i>Biofouling</i>	67
Gambar 4.1	(a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 1500x, Perbesaran 2500x, Perbesaran 3500x, Perbesaran 5000x, Perbesaran 10000x	73
Gambar 4.2	Pengujian Setting Time Pasta Fly ash dari PT. Petrokimia Gresik	74
Gambar 4.3	Hasil Pengujian Flow Table.....	74
Gambar 4.4	Foto Permukaan Pasta Geopolimer.....	77
Gambar 4.5	Pengujian XRD Pasta Geopolimer.....	78
Gambar 4.6	Komposisi mineral hasil XRD	78
Gambar 5.1	Tahapan Pengujian Mortar Geopolimer.....	80

Gambar 5.2	Pengujian Keleccakan dengan Mini Slump pada Pulvarized Fly ash.	81
Gambar 5.3	Pengujian keleccakan dengan Flow Table pada Pulverized fly ash.	82
Gambar 5.4	Variasi Komposisi Uji Coba Mortar Geopolimer	82
Gambar 5.5	Hasil Pengujian Flow Table Mortar dengan Pulvarized Fly ash/PFA	84
Gambar 5.6	Kuat tekan Mortar Geopolimer dengan Pulvarized Fly ash	84
Gambar 5.7	Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer (n=6).....	85
Gambar 5.8	Proses Pengujian Slant Shear Test.	86
Gambar 5.9	Pola Keruntuhan Pengujian Slant Shear Test	87
Gambar 5.10	Analisis XRD (X-Ray Diffraction) untuk variasi M dan MS.....	88
Gambar 5.11	Ilustrasi pelarutan fly ash asli dan fly ash halus oleh larutan NaOH	89
Gambar 5.12	Scanning Electron Microscopy Pasta Geopolymer dari: (a) Fly ash asli (Raw Fly ash) and (b) Fly ash Halus (Pulverized Fly ash)	90
Gambar 5.13	Pola XRD Pasta Geopolymer dari Fly ash asli (Raw Fly ash) and Fly ash Halus (Pulverized Fly ash)	90
Gambar 5.14	Dokumentasi dan uji kekasaran permukaan menggunakan uji AF ..	92
Gambar 5.15	Perbandingan nilai kekasaran permukaan setiap variasi benda uji	93
Gambar 5.16	Kemampuan Hidrofilik di Permukaan Variasi	93
Gambar 5.17	pH Pada Beton Konvensional dan Mortar Geopolimer (sampel Umur 28 hari).....	95
Gambar 5.18	Pengujian Porositas Pada Beton Konvensional dan Mortar Geopolimer (sampel Umur 28 hari)	95
Gambar 6.1	Lokasi Penelitian di Kaki Jembatan Suramadu sisi Surabaya di Zona Pasang Surut	96
Gambar 6.2	Tiang Pancang Jembatan Suramadu sisi Surabaya di Zona Terendam.....	96
Gambar 6.3	<i>Biofouling</i> yang Menempel Pada Beton Konvensional di hari ke 357 Pemantauan.....	103
Gambar 6.4	<i>Spirobranchus</i> sp. (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi (Riley & Susie, 2005).....	104

Gambar 6.5	Amphibalanus sp. (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi (Jaberimanesh et al., 2019).....	104
Gambar 6.6	Chaetomorpha sp. (a) Gambar Pengamatan (b) Gambar Referensi (Jayakumar & Saravanane, 2009).....	106
Gambar 6.7	Chaetomorpha sp. (a) Gambar Pengamatan (b) Gambar Referensi (WoRMS/World Register of Marine Species).....	107
Gambar 6.8	Amphibalanus sp. (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi (Motz G (2026)).....	107
Gambar 6.9	<i>Biofouling</i> diduga anemon laut	108
Gambar 6.10	Prosentase Tutupan <i>Biofouling</i> pada Variasi Beton di Zona terendam	110
Gambar 6.11	Penambahan Berat pada Beton/Berat <i>Biofouling</i>	112
Gambar 7.1	Pengujian Tekan Beton pada umur 370 hari (342 hari perendaman)	113
Gambar 7.2	Kuat Tekan Rata-rata Variasi Sampel Silinder (n=4).....	114
Gambar 8.1	Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Tanpa Slag (c) Mortar Geopolimer Dengan Slag pada 40 Hari Perendaman.	121
Gambar 8.2	Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Tanpa Slag (c) Mortar Geopolimer Dengan Slag pada 189 Hari Perendaman	122
Gambar 8.3	Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Dengan Slag pada 350 Hari Perendaman	123
Gambar 8.4	Penetrasi Klorida pada Beton Konvensional Variasi Cover (Tidak Ada Biota).....	125
Gambar 8.5	Penetrasi Klorida pada Beton Konvensional Variasi Expose (Ada Biota).....	126
Gambar 8.6	Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Tanpa Slag Variasi Cover (Tidak Ada Biota)	128
Gambar 8.7	Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Tanpa Slag Variasi Variasi Expose (Ada Biota)	128

Gambar 8.8	Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Dengan Slag Variasi Cover (Tidak Ada Biota)	131
Gambar 8.9	Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Dengan Slag Variasi Variasi Expose (Ada Biota).....	132
Gambar 8.10	Penetrasi Sulfat pada Variasi Beton pada Perendaman (a) 40 hari, (b) 189 hari, (c) 350 hari	140
Gambar 8.11	Karbonasi pada 40 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a) Total Karbonasi	146
Gambar 8.12	Karbonasi pada 189 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a) Total Karbonasi.....	147
Gambar 8.13	Karbonasi pada 350 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a) Total Karbonasi.....	148
Gambar 8.14	Pengujian Karbonasi dengan Indikator Fenoftalein	149
Gambar 9.1	Porositas Beton Selama Perendaman	155
Gambar 9.2	Permukaan Beton Konvensional variasi (a) cover/tidak ada biota dan (b) Expose/Ada Biota	159
Gambar 9.3	Permukaan Mortar Geopolimer variasi (a) cover/tidak ada biota dan (b) Expose/Ada Biota	166

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Matriks Originalitas Penelitian	14
Tabel 1. 2 Penelitian terdahulu terkait pelapis/coating geopolimer	16
Tabel 2. 1 Penjelasan Tahapan Penempelan Biota pada Substrat Beton	25
Tabel 2.2 Sifat-sifat Beton dan Dampaknya terhadap Penempelan Biota	26
Tabel 2. 3 Strategi untuk Meningkatkan Ketahanan Beton terhadap Kolonisasi <i>Biofouling</i> 32	
Tabel 2. 4 Komposisi Geopolimer	35
Tabel 3.1 Deskripsi Ringkas Kegiatan Penelitian.....	44
Tabel 3.2 Variasi Benda Uji SCGM	51
Tabel 3.3 Variasi Benda Uji Beton dengan Pelapis Mortar Geopolimer.....	56
Tabel 3.4 Kebutuhan Benda Uji Beton dengan Pelapis Mortar Geopolimer.....	56
Tabel 3.5 Komposisi Campuran Beton per m ³	57
Tabel 3.6 Kedalaman Lapisan Penggilingan.....	63
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kandungan Kimia melalui XRF	72
Tabel 4.2 Variasi Benda Uji Pasta Geopolimer	76
Tabel 4.3 Kuat Tekan Pasta Geopolimer	76
Tabel 5.1 <i>Setting time</i> /waktu pengerasan pasta geopolimer dengan PFA	81
Tabel 5.2 Komposisi Mortar Geopolimer	83
Tabel 5.3 Komposisi Mortar Geopolimer dengan Variasi <i>Slag</i>	85
Tabel 5.4 Hasil Kuat Lekat / <i>Slant Shear Test</i>	87
Tabel 5.5 Nilai Kekasaran Permukaan.....	93
Tabel 6.1 Komposisi Kimia Air Laut Perairan Suramadu	97
Tabel 6.2 Perhitungan Koloni Bakteri pada Variasi Substrat	100
Tabel 6.3 Benda Uji Selama Perendaman.....	101
Tabel 8.1 Kapasitas Pengikatan Klorida (<i>Chloride Binding Capacity</i>).....	120
Tabel 8.2 Koefisien Difusi.....	137
Tabel 9.1 Mekanisme Degradasi pada Beton Konvensional Akibat Ion Agresif	

Error! Bookmark not defined.

Tabel 9.2 Mekanisme Degradasi pada Mortar Geopolimer Akibat Ion Agresif

Error! Bookmark not defined.

Tabel 9.3 Klorida inisial dan klorida permukaan beton konvensional dan mortar geopolimer 167

Tabel 9.4 Prediksi Umur Layan Beton Dengan Variasi Tebal Selimut Beton.....168

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara maritim dengan garis pantai sepanjang 99.093 km (PUSDATIN-KKP, 2018) sehingga diperlukan fasilitas penunjang sebagai penghubung antarwilayah. Komite Percepatan Penyediaan Infrastruktur Prioritas Indonesia mencata terdapat 13 proyek pembangunan pelabuhan baru dan pengembangan kapasitas pelabuhan dan terdapat 1 proyek pembangunan tanggul pantai sebagai proyek strategis di Indonesia pada tahun 2022 (PP Nomor 109 Tahun 2020). Data Direktorat Kepelabuhanan menunjukkan pada tahun 2022 Indonesia memiliki 636 pelabuhan laut (Rizaty, 2021) serta terdapat 567 pelabuhan ikan (BPS, 2023). Infrastruktur dan fasilitas penunjang berupa pelabuhan, jetty, bangunan pelindung pantai, dan jembatan mayoritas menggunakan beton, termasuk beton bertulang. Pada pesisir dan laut, struktur beton bertulang menghadapi berbagai ancaman yang dapat mempengaruhi durabilitas hingga berdampak pada umur layan beton.

Beton di lingkungan laut menghadapi berbagai ancaman dan permasalahan yang mempengaruhi ketahanannya. Hal ini tergantung pada kemampuan materialnya untuk menahan perubahan cuaca, serangan iklim, abrasi atau segala proses kerusakan yang berasal dari lingkungan sehingga beton dapat mempertahankan bentuk asal (Monteiro, 2015). Keawetan beton di lingkungan laut telah diatur di SNI 2847:2019 tentang durabilitas beton pada Bab 19.3 mengenai kategori dan kelas paparan sulfat, kontak dengan air, dan proteksi korosi yang dilihat dari sumber klorida (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Kandungan klorida dalam beton juga telah di atur di SNI 03-2854-1992, bahwa pada beton bertulang yang berhubungan dengan klorida, maksimum ion klorida (CI terlarut) maksimal 0,15% terhadap masa semen (SNI 03-2854-1992, 1992). Namun, standar tersebut tidak menjamin kerusakan tidak terjadi pada selimut beton akibat pemadatan yang kurang baik serta terjadinya susut pada selimut beton (Melchers,

2020) yang berdampak pada masuknya senyawa agresif ke dalam beton akan tetap terjadi.

Mekanisme masuknya senyawa agresif ke dalam beton terjadi karena adanya interaksi air laut dengan beton melalui mekanisme fisik, yaitu adanya gelombang dan arus. Di samping itu, mekanisme biologis, yaitu adanya biota yang menempel pada beton, harus pula dipertimbangkan. Bone et al. (2022) menyebutkan bahwa lumut, biofilm, alga, bivalvia, dan gastropoda berkontribusi langsung maupun tidak langsung terhadap biodeteriorasi meskipun dapat memberikan manfaat perlindungan. Sejalan dengan Bastidas-Arteaga et al. (2008), model durabilitas beton perlu mempertimbangkan efek biodeteriorasi, yaitu menggabungkan aksi kimia, fisik, dan mekanis makhluk hidup karena dampaknya signifikan dan menyebabkan pengurangan umur layan. Biota penempel perlu dipertimbangkan karena sifatnya yang berkoloni pada suatu permukaan dan secara cepat berpotensi menambah berat struktur, baik statis maupun dinamis, bergantung pada kondisi geografis dan lingkungan (G. L. Wang et al., 2014).

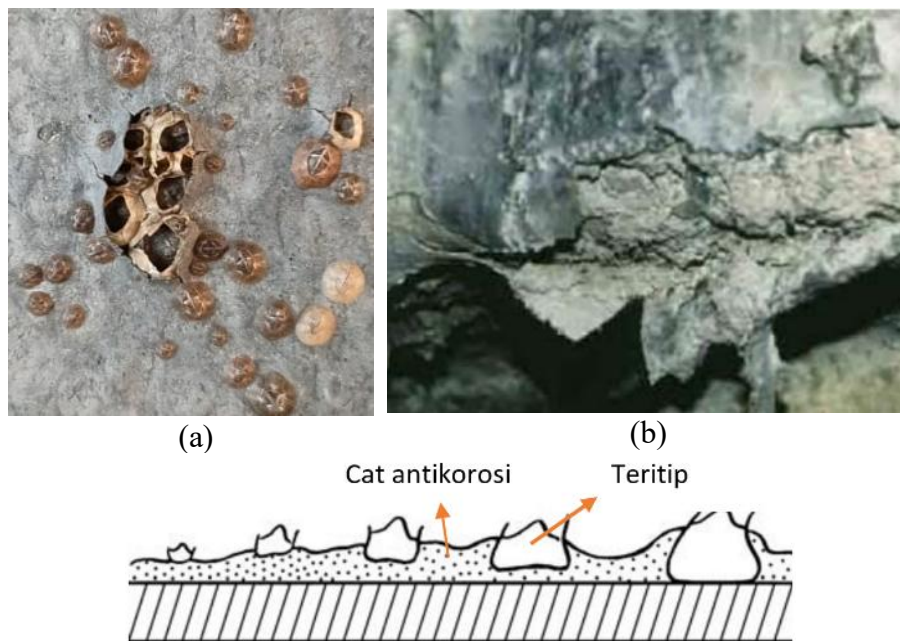
ASTM D1141-98 menyebutkan komposisi kimia air laut terdiri dari garam klorida (ASTM International, 1999) yang terdiri dari senyawa NaCl, MgCl, Na₂SO₄, CaCl₂, KCl, NaHCO₃, dan KBr. Senyawa tersebut berpotensi menyebabkan degradasi pada beton di lingkungan laut akibat adanya ion klorida dan ion sulfat. Penetrasi ion klorida merusak struktur bangunan, menyebabkan karat pada tulangan, sehingga terjadi penurunan kemampuan beton yang akhirnya mengurangi masa layan bangunan (Qu et al., 2021). Biaya yang timbul akibat perbaikan beton korosi setiap 100 tahun dapat mencapai \$450/m² atau sekitar Rp.6.750.000,-/m² (Gaylarde et al., 2003). Sulfat menyebabkan kerusakan karena adanya reaksi kimia akibat masuknya sulfat pada beton hingga menyebabkan retak (Ikumi & Segura, 2019). Kandungan kimia air laut, yaitu Na₂SO₄, saat memasuki beton yang porous akan bereaksi dengan semen. Portlandite (Ca(OH)₂) yang merupakan produk hidrasi semen dapat bereaksi dengan ion sulfat sehingga membentuk gipsum (CaSO₄·2H₂O). Kombinasi monosulfat (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O) dan sulfat eksternal akan membentuk senyawa ettringite (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O) (Qu et al., 2021; D. Sun et al., 2022; Ustabas & Erdoğan, 2016). Produk tersebut berpotensi mengalami peningkatan

volume selama proses kristalisasi berlangsung. Hal tersebut mengakibatkan terdesaknya semen dan menyebabkan retak hingga terkikisnya beton (Qu et al., 2021) sehingga dapat mengurangi massa beton dan berpengaruh pada kuat tekan (Cheng et al., 2021).

Selain itu, peningkatan kadar karbon dioksida di udara menyebabkan fenomena pengasaman laut. Hal ini meningkatkan potensi karbonasi pada permukaan beton di laut dengan kandungan karbon yang tinggi. Karbonasi terjadi karena kandungan CO_2 di udara bereaksi dengan air laut yang terkandung dalam pori-pori beton, membentuk asam karbonat (H_2CO_3). Asam karbonat adalah asam lemah yang melepaskan ion hidrogen (H^+) dan membentuk ion bikarbonat (HCO_3^-). Dengan bertambahnya ion hidrogen, pH beton akan turun. Karbonasi dapat melepaskan klorida yang terikat secara kimia dan meningkatkan penetrasi ion klorida (Qu et al., 2021). Fenomena karbonasi juga penting untuk diperhatikan dalam keawetan beton di lingkungan laut.

Ion agresif yang menyerang beton tidak terbatas hanya dari interaksi air laut saja namun juga dari biota penempel. Biota penempel yang menempel pada substrat laut secara invasif akan menyerang beton, tidak terbatas pada pilar/pancang jembatan, tetapi juga pada pipa, pemecah gelombang, tanggul, struktur pelabuhan, dan lain-lain. Salah satu contoh penempelan biota dapat ditemui di Jembatan Suramadu maupun di Tol Mandara, Bali. Secara kimiawi, biota penempel menyerang beton akibat sekresi yang dikeluarkan, salah satu contoh pada *Balanus Sp.* menghasilkan senyawa fenol asam amino tirosin dan enzim polifenoloksidase. Railkin (2004) menyatakan kandungan zat asam yang berada pada mikroorganisme dapat bereaksi dengan semen pada beton. Selain itu pelekatan oleh *barnacle*/teritip yang diulas secara biokimia dilaporkan oleh Liang et al., (2019) menyatakan bahwa teritip dewasa menghasilkan lipid, oksidan, serta protein dengan komposisi asam amino. Komponen penyusun lipid, yaitu asam lemak, yang merupakan ikatan atom karbon dengan gugus hidroksil (OH^-) yang mengandung senyawa hidrokarbon, diduga akan menambah potensi karbonasi pada beton dan perubahan pH beton. Biota penempel dengan jenis teritip bercangkang diduga dapat merusak ikatan kimia pada semen saat teritip berinteraksi dengan beton karena semen merupakan sumber kalsium (Ca) untuk pembentukan cangkang teritip.

Saat ini, pencegahan biota penempel yang pernah diterapkan yaitu menggunakan pelapis HDPE (Sonjaya, 2016) maupun cat *antifouling* (Nuraini et al., 2017). Penggunaan cat terbukti tidak efektif, ditandai dengan masih adanya spesies yang menempel pada tiang pancang yang telah dilapisi cat, seperti pada Gambar 1.1 (a). Hal ini telah diprediksi sebelumnya oleh Railkin (2004) yang memberikan ilustrasi mekanisme pengerusakan lapisan *coating* cat oleh biota penempel pada Gambar 1.1 (c). Biota penempel yang menyerang beton tidak hanya berupa spesies makro, tetapi juga mikro seperti bakteri. Bakteri menghasilkan zat asam yang dapat menyerang beton selimut tulang hingga rusak seperti pada Gambar 1.1 (b) (Lence, 2015).



Gambar 1. 1. (a) Biota penempel pada tiang pancang yang telah dilapisi oleh cat di pilar Jembatan Suramadu (Dokumentasi pribadi September 2022), (b) Serangan bakteri penempel (mikrofouling) (Lence, 2015), (c) Ilustrasi pengerusakan lapisan cat antikorosi oleh teritip (barnacles) (Railkin, 2004)

Selain tidak efektifnya pelapis cat untuk *antifouling*, diketahui pula bahwa bahan cat mengandung racun. Bahan cat antifouling utamanya mengandung biosida Cu_2O /*Copper oxide* dan CuPT /*Copper pyrithione* seperti yang digunakan untuk

melapisi pancang di tol Bali Mandara (Priyotomo et al., 2021). Bahan tembaga dikenal beracun bagi berbagai jenis invertebrata laut utamanya pada tahap larva yang efektif menolak biota menempel, hal ini berbahaya untuk kelestarian ekosistem laut (Fitridge et al., 2012). Metode lain adalah dengan membersihkan *biofouling* secara manual dengan penyemprotan menggunakan air bertekanan tinggi, namun metode ini tidak efektif jika diaplikasikan pada beton yang terendam dalam air laut. Metode terkini yang sedang berkembang adalah metode *Surface Applied Protection* (SAP) yaitu melapisi suatu bahan pada permukaan beton. Lapisan pelindung pada beton dapat mengontrol korosi tulangan dan menambah masa layan (*service life*) struktur beton yang terpapar lingkungan laut melalui mekanisme penghambatan penetrasi klorida pada beton (Rodrigues, Costa, Mendes, & Eusébio Marques, 2000). Salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai SAP/ *Surface Applied Protection* adalah geopolimer.

Penelitian terkait SAP/ *Surface Applied Protection* dengan geopolimer yang sudah dikembangkan salah satunya menggunakan metakaolin sebagai *coating* untuk melapisi beton pemecah gelombang. Penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al., (2010, 2012) meletakkan sampel uji pada tiga posisi lingkungan pemaparan pada zona pasang surut dengan tebal lapisan yang bervariasi. Hasil penelitian didapatkan bahwa lapisan geopolimer melekat kuat pada beton lama (*accropodes*) dan mampu menahan gelombang air laut. Hasil *X-Ray Diffraction* setelah 180 hari perendaman menunjukkan bahwa terdapat kalsit (CaCO_3) dalam jumlah sedikit serta tidak ditemukan sulfat pada *coating* geopolimer. Lapisan geopolimer yang menyatu dengan beton konvensional serta ditemukannya C-S-H (Kalsium silikat terhidrat), menghasilkan perlambatan penetrasi ion dan karbonasi (Rodrigues, Costa, Mendes, & Eusébio Marques, 2000). Hal ini menunjukkan geopolimer memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai bahan *coating*.

Sebagai bahan *coating*, geopolimer memiliki keunggulan karena dinilai dapat mengurangi emisi karbon (Davidovits, 2013) karena sama sekali tidak menggunakan semen Portland (OPC). Selain itu, geopolimer memiliki keunggulan dalam kemampuan mekanis, tahan terhadap bakar, dan tahan terhadap serangan kimia dibandingkan beton OPC (Rahman & Al-Ameri, 2022). Kelebihan tersebut menjadikan geopolimer cocok untuk daerah yang terpapar langsung oleh air laut

(Singh et al., 2015)(Nuruddin et al., 2016). Ketahanan geopolimer lebih baik dalam melindungi beton bertulang di lingkungan yang agresif seperti direndam pada asam sulfat, magnesium sulfat, dan asam nitrat (Zhang et al., 2010, 2012) (Prabhakar et al., 2022). Hal tersebut karena dalam proses geopolimerisasi, kandungan Si dan Al bereaksi membentuk ikatan polimerik Si-O-Al yang stabil dan tidak mengalami perubahan saat terpapar di udara ataupun terendam di air laut (Davidovits, 1994; Zhang et al., 2010). Pada penerapannya, beton geopolimer diketahui melekat dengan baik pada permukaan beton konvensional/eksisting (Purwanto et al., 2022). Lekatan geopolimer terhadap beton OPC membentuk layer baru dengan struktur kimia C-A-S-H (*Calcium Aluminate Silicate Hydrate*) yaitu lapisan yang memiliki porositas rendah dan lebih padat (P. Chindaprasirt & Chalee, 2014). Beton geopolimer yang mengandung unsur alumina saat dilapiskan ke beton OPC dengan ikatan kimia C-S-H (*Calcium Di-Silicate Hydrate*) dapat bereaksi membentuk C-A-S-H. Dengan berbagai keunggulan tersebut, mortar geopolimer menjadi pilihan untuk menjadi pelindung beton guna meningkatkan durabilitas beton di lingkungan laut.

Di sisi lain penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi. Studi menunjukkan *fly ash* menghasilkan performa yang tinggi dengan kapasitas pengikat ion klorida yang baik sehingga konsentrasi klorida pada beton sekitar baja tulangan lebih rendah (Pravallika & Lakshmi, 2014). Selain itu *fly ash* juga meningkatkan ketahanan terhadap biodeteriorasi dan *biofouling*, hal ini ditandai dengan berkurangnya tutupan biota penempel pada permukaan beton sejalan dengan peningkatan penggunaan *fly ash* (Harilal et al., 2020). Penghambatan penempelan biota dalam hal ini adalah teritip pada bahan *fly ash* diduga karena kandungan Kalsium (Ca) yang rendah pada *fly ash* sehingga *biofouling* tidak mendapatkan nutrisi yang cukup untuk pembentukan cangkang. Di sisi lain, pemanfaatan *fly ash* sangat perlu untuk dimaksimalkan mengingat ketersediaannya yang melimpah dengan masih didominasinya sumber energi yang digunakan di Indonesia pada bahan bakar fosil. Pemanfaatan *fly ash* di Indonesia sampai tahun 2018 tercatat sekitar 10% dibandingkan dengan India yang pemanfaatannya semakin meningkat hingga 50% pada akhir tahun 2018 (Ekaputri

& Al Bari, 2020). Sampai dengan 2050 diperkirakan kontribusi batubara sebagai sumber energi masih mencapai 31% (Damayanti, 2018).

Limbah potensial lain yang memiliki kemampuan baik terhadap durabilitas adalah *slag*. Menambahkan *slag* pada campuran komposisi beton berkontribusi pada kepadatan struktur pori hingga dapat meningkatkan kekuatan mekanik material serta mengurangi permeabilitas hingga meningkatkan daya tahan beton (W. Chen et al., 2024). Komposisi kimia *slag* yang terdiri dari 42% CaO, 40% SiO₂, dan 13% Al₂O₃ menghasilkan geopolimer yang lebih padat dengan hasil porositas total yang lebih rendah dibanding geopolimer tanpa penambahan *slag* (Amini & Ekaputri, 2023).

Di Indonesia penelitian tentang laju korosi beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* (kelas F) (BG) dengan beton konvensional (BK) yang direndam di air garam telah dilakukan oleh Halim, Ekaputri & Triwulan, pada tahun 2017. Hasil penelitian menyatakan bahwa di lingkungan garam maupun tawar, kuat tekan BG lebih tinggi daripada BK serta laju korosi pada BG lebih kecil dibandingkan pada BK. Dilanjutkan pada tahun 2020 telah dilakukan penelitian tentang pelapis geopolimer berbahan dasar *fly ash* yang berfungsi sebagai pelapis BK langsung di lingkungan air laut. Mortar geopolimer (MG) dimanfaatkan sebagai pelapis benda uji BK dengan variasi ketebalan. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa dengan ketebalan 4 cm memiliki laju korosi paling rendah pada rendaman NaCl 5% dengan uji *Accelerate Corrosion Test* (Nastiti et al., 2023). Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya potensi penggunaan pelapis geopolimer berbahan dasar *fly ash* sebagai pelindung akibat serangan klorida, namun belum diteliti apakah efektif untuk melindungi beton dari karbonasi, sulfat, dan biota penempel.

Selain itu, pertumbuhan biota yang menempel pada permukaan substrat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan laut, karakteristik substrat, serta durasi perendaman. Karakteristik beton, yaitu porositas dan permeabilitas yang tinggi mendukung masuknya air, nutrisi, dan mikroorganisme ke dalam matriks beton meningkatkan pertumbuhan *biofouling* (Kim et al., 2022). Selain itu, kekasaran permukaan signifikan mempercepat kolonisasi dengan menyediakan area lekatan mikroorganisme (Hayek et al., 2021; Veeger et al., 2021). Namun, pelapisan dengan material hidrofobik secara efektif menurunkan kolonisasi *biofouling* secara

signifikan dengan membatasi ketersediaan air dan nutrisi serta menghambat pertumbuhan mikroba.

Penelitian lanjutan untuk mengetahui kebenaran hipotesis tersebut perlu mempertimbangkan lokasi serta durasi waktu yang tepat agar diperoleh analisis yang lengkap berkaitan dengan efektivitas mortar geopolimer sebagai pelindung beton di lingkungan laut dari serangan klorida, sulfat, karbonasi, dan biota penempel. Penelitian oleh Zuquan et al., (2018) menunjukkan bahwa nilai dari kadar klorida pada kedalaman yang sama setelah 13 bulan perendaman dari urutan tertinggi hingga terendah adalah zona terendam kemudian zona pasang surut selanjutnya zona *splash* dan terakhir adalah zona atmosfer. Dampak sulfat terhadap durabilitas beton akan didapatkan saat beton pada zona terendam seperti disebutkan pada penelitian Zuquan et al., (2018) diperkuat oleh studi pendahuluan pada pengujian air laut di perairan Jembatan Suramadu didapatkan hasil pada zona terendam di kedalaman 3 meter kadar sulfat total mencapai 8.799,33 mg/L lebih tinggi dari zona pasang surut dengan kadar sulfat total 3.454,39 mg/L. Pada potensi adanya biota penempel, penelitian oleh Ekaputri dkk (2023) yang menguji beton pada zona terendam di perairan Kenjeran, Surabaya dengan kedalaman rata-rata 3 meter, benda uji dipenuhi oleh biota penempel seperti ditunjukkan pada Gambar 1.3. Beberapa hal ini menjadi dasar lokasi pengujian untuk mengetahui dampak klorida, sulfat, dan biota penempel sesuai dilakukan di zona terendam. Durasi waktu pengujian durabilitas mempertimbangkan dari sisi biota penempel, (Maruzzo et al., 2012; Railkin, 2004) menyebutkan bahwa untuk menjadi dewasa teritip membutuhkan waktu hingga 10 bulan sehingga pengujian durabilitas akan dilakukan selama 12 bulan.



Gambar 1. 2. Sampel beton yang ditumbuhi teritip pada 5 bulan perendaman di zona terendam pada Perairan Kenjeran, Surabaya (Ekaputri dkk, 2022)

Pembuatan mortar geopolimer sebagai pelapis beton konvensional di lingkungan laut harus memenuhi persyaratan tertentu, antara lain durabilitas, kuat lekatan dengan beton konvensional, serta persyaratan kelecakan. Sebagai pelapis pada beton konvensional di lingkungan agresif, geopolimer berupa mortar harus memenuhi persyaratan durabilitas SNI 2847:2019 pada Pasal 19. Geopolimer didesain untuk memenuhi kelas paparan berdasarkan kondisi lingkungan, yaitu kategori sulfat, kontak dengan air, dan proteksi tulangan, berdasarkan sumber klorida. Selain persyaratan tersebut, untuk menjadi material pelapis/*coating*, mortar harus memenuhi persyaratan uji kelecakan, yaitu diameter mortar 150–190 mm (Lashkari et al., 2021). Persyaratan uji kelecakan diperlukan untuk memastikan kemampuan kerja (*workability*) mortar. Beberapa jenis *fly ash* memerlukan *superplasticizer* (SP) dan metode tertentu untuk meningkatkan *workability*. Salah satu metode untuk dapat memenuhi kemampuan kerja/*workability* dari geopolimer adalah menggunakan ukuran butiran yang kecil pada agregat maupun binder seperti penggunaan *micro fly ash* (lolos ayakan ukuran 45 μ m sebesar 99%) sebagaimana pada penelitian Rahman & Al-Ameri (2022). Penggunaan butiran yang lebih halus diharapkan dapat meningkatkan *fluidity* pada beton sehingga mortar lebih *workable*. Selain itu, hal ini juga dapat menurunkan kekasaran permukaan sehingga tercipta produk yang lebih halus.

Harapan dari penelitian ini adalah untuk menjawab dampak *biofouling*/biota penempel terhadap durabilitas beton, yang dilihat dari masuknya ion agresif klorida dan sulfat, serta karbonasi pada beton. Selain itu, memberikan alternatif upaya perlindungan beton di lingkungan laut dengan menganalisis pengaruh mortar geopolimer berbasis *fly ash* halus dengan *slag* sebagai pelindung beton konvensional. Performa yang dianalisis antara lain pengaruhnya terhadap profil penetrasi klorida hingga koefisien difusi yang dihasilkan, profil penetrasi sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton yang dilapisi mortar geopolimer di laut dengan zona paparan terendam.

1.2 Permasalahan

Beton di lingkungan laut menghadapi permasalahan durabilitas karena adanya interaksi kimia senyawa agresif yaitu karbonat, sulfat dan klorida dengan beton yang diakibatkan dari komposisi kimia air laut dan biota penempel. Oleh karena itu diperlukan mekanisme perlindungan beton di laut untuk mencegah degradasi sehingga dapat meningkatkan durabilitasnya. Pada penelitian sebelumnya telah dikembangkan metode perlindungan beton di lingkungan laut dengan mortar geopolimer tetapi belum dipertimbangkan dampak dari biota penempel. Disertasi ini diusulkan untuk mengembangkan pelapis mortar geopolimer berbahan *fly ash* sebagai pelindung beton terhadap karbonasi, ion klorida dan sulfat mempertimbangkan adanya biota penempel (*biofouling*). Durabilitas beton yang mempertimbangkan dampak klorida, sulfat, dan karbonasi dari air laut dengan adanya biota penempel didapatkan melalui pengujian lapangan di zona terendam. Permasalahan yang diselesaikan pada penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana komposisi mortar geopolimer berbahan *fly ash* halus dan *slag* sebagai pelapis pada beton konvensional?
2. Bagaimana pengaruh pelapis mortar geopolimer terhadap pertumbuhan *biofouling*/biota penempel pada beton di laut dengan zona paparan terendam?

3. Bagaimana pengaruh pelapis mortar geopolimer terhadap kuat tekan, profil penetrasi klorida dan sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton laut dengan zona paparan terendam?
4. Bagaimana pengaruh biota penempel terhadap kuat tekan, profil penetrasi klorida dan sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton yang dilapisi mortar geopolimer di laut dengan zona paparan terendam?
5. Bagaimana model durabilitas yang dinyatakan dengan koefisien difusi klorida pada mortar geopolimer dan beton konvensional di laut dengan zona paparan terendam?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian disertasi ini adalah mengembangkan mortar geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag* sebagai pelindung beton konvensional terhadap serangan karbonasi, klorida, sulfat dan biota penempel (*biofouling*) di laut.

Detil tujuan pada penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kehalusan *fly ash* terhadap sifat dasar mortar geopolimer yang dapat digunakan sebagai pelapis pelindung pada beton konvensional di laut.
2. Menganalisis pengaruh pelapis mortar geopolimer terhadap pertumbuhan *biofouling*/biota penempel pada beton di laut dengan zona paparan terendam.
3. Menganalisis pengaruh pelapis mortar geopolimer terhadap kuat tekan, profil penetrasi klorida dan sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton laut dengan zona paparan terendam.
4. Menganalisis pengaruh biota penempel terhadap kuat tekan, profil penetrasi klorida dan sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton yang dilapisi mortar geopolimer di laut dengan zona paparan terendam.
5. Mendapatkan model durabilitas yang dinyatakan dengan koefisien difusi klorida pada mortar geopolimer dan beton konvensional di laut pada zona paparan terendam.

1.4 Hipotesa Penelitian

Pada penjelasan yang telah disebutkan, beberapa hipotesis yang perlu untuk dibuktikan kebenarannya antara lain:

1. Kemampuan lekat yang baik antara mortar geopolimer dan beton berbahan semen portland (konvensional).
2. *Biofouling*/biota penempel berkoloni pada permukaan substrat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. Penggunaan material pelapis dengan kekasaran permukaan yang rendah dapat menghambat penempelan *biofouling*.
3. *Biofouling*/biota penempel memberikan dampak perlindungan terhadap paparan ion agresif klorida, sulfat, dan karbonasi pada tahap awal penempelan. Namun, semakin lama dapat memperparah masuknya ion agresif akibat kerusakan matriks semen.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat teoritis:

1. Pada bidang material di lingkungan agresif hasil penelitian menjawab permasalahan durabilitas beton akibat karbonasi, klorida, sulfat dan biota penempel di lingkungan laut.
2. Pada bidang konstruksi berkelanjutan, memberikan solusi pelindung beton di lingkungan laut menggunakan mortar geopolimer yang ramah lingkungan dengan tidak menggunakan bahan beracun bagi ekosistem di laut.
3. Pada bidang lingkungan penggunaan *fly ash* dapat mengurangi timbunan limbah hasil pembakaran batu bara yang semakin meningkat.

Manfaat praktis:

1. Pada bidang industri material konstruksi memberikan alternatif produk *coating* dari mortar geopolimer sebagai pelapis beton unggulan.
2. Pada bidang ekonomi, memanfaatkan limbah *fly ash* dan *slag* dapat menambah nilai material tersebut sehingga dapat mendukung ekonomi sirkular.

1.6 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

1. Material yang digunakan sebagai bahan dasar pembuatan mortar geopolimer adalah *Fly ash* yang bersumber dari PT. Petrokimia Gresik.
2. Sifat dasar mortar geopolimer adalah kemampuan kerja, kuat tekan, porositas, lekatan dengan beton konvensional.
3. Perendaman untuk menguji durabilitas beton dilakukan di Jembatan Suramadu pada zona paparan terendam (*fully submerged zone*) yang dilakukan pada kurun waktu satu tahun.
4. Model durabilitas beton yang dikembangkan menggunakan hukum *fick's second law* yang menghasilkan koefisien difusi.
5. Material yang dilapisi oleh mortar geopolimer adalah beton, untuk material baja tidak diteliti.
6. Pengaruh biota penempel terhadap durabilitas yang diteliti merupakan jenis biota penempel yang muncul di perairan Jembatan Suramadu. Observasi biota penempel antara lain tentang jenis biota dengan identifikasi morfologi serta prosentase tutupan biota penempel dengan *image-analysis-based method*.

1.7 Originalitas Penelitian

Tabel 1. 1 Matriks Originalitas Penelitian

Material Beton	Penyebab yang dilihat dari lingkungan paparan			Ion agresif yang mempengaruhi durabilitas beton			Akibat yang timbul	
	Interaksi dengan air larutan garam/sulfat	Interaksi hanya dengan air laut	Interaksi mempertimbangkan biota penempel/ <i>biofouling</i>	Karbonasi	Klorida	Sulfat	Sifat mekanis	Mikrostruktur
Beton konvensional (berbasis semen maupun dengan substitusi pozzolan)	(Xiao et al., 2017)	(Yi et al., 2020); (Qu et al., 2021); (Chlayon et al., 2018); (J. F. Lv et al., 2015); (Chlayon et al., 2020); (J. Lv et al., 2021)	(Chlayon et al., 2018); (J. F. Lv et al., 2015); (Chlayon et al., 2020); (J. Lv et al., 2021)	(Yi et al., 2020); (Qu et al., 2021); (J. F. Lv et al., 2015); (Herath et al., 2020); (J. Lv et al., 2021)	(Yi et al., 2020); (Qu et al., 2021); (Chlayon et al., 2018); (J. F. Lv et al., 2015); (Herath et al., 2020); (Chlayon et al., 2020); (J. Lv et al., 2021)	(Yi et al., 2020); (Herath et al., 2020)	(Yi et al., 2020); (Qu et al., 2021); (J. F. Lv et al., 2015); (Herath et al., 2020)	(Yi et al., 2020); (Chlayon et al., 2018); (J. F. Lv et al., 2015); (Chlayon et al., 2020); (J. Lv et al., 2021)
Beton geopolimer	(Ren et al., 2017); (Simatupang, 2017); (Okoye et al., 2017)	(Pasupathy et al., 2021)	-	(Pasupathy et al., 2021)	(Ren et al., 2017); (Okoye et al., 2017); (Pasupathy et al., 2021)	(Ren et al., 2017); (Simatupang, 2017); (Okoye et al., 2017); (Pasupathy et al., 2021)	(Ren et al., 2017); (Simatupang, 2017); (Okoye et al., 2017); (Pasupathy et al., 2021)	(Ren et al., 2017); (Pasupathy et al., 2021)
Beton konvensional dengan pelapis geopolimer	(Zhang et al., 2010); (Yusof et al., 2014); (Aguirre-	(Zhang et al., 2012)	-	(Zhang et al., 2012); (Sikora et al., 2018)	(Zhang et al., 2010); (Aguirre-Guerrero et al., 2017);	(Zhang et al., 2012); (Yusof et al., 2014); (Sikora et al., 2018)	(Zhang et al., 2010); (Yusof et al., 2014); (Aguirre-Guerrero et	(Zhang et al., 2012)

Material Beton	Penyebab yang dilihat dari lingkungan paparan			Ion agresif yang mempengaruhi durabilitas beton			Akibat yang timbul	
	Interaksi dengan air larutan garam/sulfat	Interaksi hanya dengan air laut	Interaksi mempertimbangkan biota penempel/ <i>biofouling</i>	Karbonasi	Klorida	Sulfat	Sifat mekanis	Mikrostruktur
	Guerrero et al., 2017); (Sikora et al., 2018); (Jiang et al., 2020); (Gupta et al., 2021)	DIUSULKAN	DIUSULKAN	DIUSULKAN	(Sikora et al., 2018); (Jiang et al., 2020) DIUSULKAN	DIUSULKAN	al., 2017); (Sikora et al., 2018); (Jiang et al., 2020) DIUSULKAN	DIUSULKAN
Penelitian yang diusulkan: Durabilitas beton konvensional dengan pelapis geopolimer karena interaksi air laut dan biota penempel ditinjau dari ion agresif karbonat, klorida, dan sulfat yang dievaluasi dari sifat mekanis dan mikrostruktur								

Tabel 1. 2 Penelitian terdahulu terkait pelapis geopolimer

No	Penulis, tahun	Material	Lingkungan Paparan	Durasi
1	Yusof et al., 2015	<i>Fly ash</i>	Paparan larutan 3% asam sulfat	30 hari
2	Simatupang, 2017	<i>Fly ash</i> kelas C dan F	Paparan larutan asam sulfat 10%	65 hari
3	Guerrero et al., 2017	<i>Fly ash</i> dan Metakaolin	Larutan NaCl 3,5%	15 hari
4	Sikora et al., 2018	<i>Fly ash</i> , GGBFS, Silica fume	Larutan CH ₃ COOH, C ₃ H ₆ O ₃ , HCL, HNO ₃ , NaCl	28 hari
5	Zhang et al., 2010	Metakaolin, GBFS	<i>Artificial sea water – corrosion test</i>	
6	Zhang et al., 2012	Metakaolin, GBFS	Laut Shanghai Jinshan	180 hari
7	Jiang et al., 2020	<i>Fly ash</i> , GGBFS, Metakaolin,	<i>Artificial seawater</i>	28 hari
8	Gupta et al., 2021	<i>Fly ash</i>	Larutan NaCl dan uji <i>accelerate corrosion</i>	90 hari
9	Lashkari et al., 2021	GGBFS dan Silica Fume	<i>Marine simulator environment</i>	90 hari
10	(Pasupathy et al., 2021)	<i>Slag</i> dan <i>Fly ash</i>	Paparan zona splash di laut	4 dan 6 tahun
11	Nastiti et al, 2023	<i>Fly ash</i>	<i>Corrosion test</i>	

Penelitian tentang *coating*/pelapis geopolimer telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Simatupang, (2017) dan Yusof et al., (2014) menggunakan *fly ash* sebagai bahan geopolimer dengan paparan larutan asam sulfat selama 30 dan 65 hari. hasil menunjukkan geopolimer dengan konsentrasi NaOH yang tinggi berpotensi mencegah kerusakan akibat lingkungan asam. Ketahanan geopolimer terhadap klorida dengan material *fly ash* diteliti oleh Gupta et al., (2021) yang melakukan uji *accelerate corrotion* yang menunjukkan kemampuan menahan garam dengan lama paparan 3 bulan. Pencampuran *fly ash* dan metakaolin dilakukan oleh Aguirre-Guerrero et al., (2017) serta Sikora et al., (2018) yang menambahkan GGBFS dan *silica fume* sebagai bahan precursor *fly ash* dengan paparan NaCl. Pada paparan larutan garam dan asam artifisial/buatan dengan lama paparan 30 – 90 hari menunjukkan performa yang baik terhadap ketahanan geopolimer terhadap lingkungan agresif. Penelitian terbaru terkait pelapis geopolimer telah dilakukan oleh Nastiti et al., (2023) yang membahas tentang pemanfaatan mortar geopolimer sebagai bahan perbaikan alternatif untuk mengurangi laju korosi.

Pengukuran laju korosi menunjukkan bahwa spesimen dengan lapisan mortar geopolimer ketebalan 4 cm mempunyai laju korosi yang paling rendah.

Pada paparan di lapang/*field exposure* performa *coating* geopolimer telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Geopolimer digunakan sebagai *coating* untuk melapisi beton pemecah gelombang. Sampel diletakkan di laut Shanghai Jinsan pada zona pasang surut dengan tebal *coating* yang bervariasi. Lapisan geopolimer melekat kuat pada beton lama (*accropodes*) dan mampu menahan gelombang air laut hasil XRD menunjukkan bahwa terdapat kalsit (CaCO_3) dalam jumlah yang sedikit serta tidak ditemukan sulfat yang telah diaplikasikan selama 180 hari pada *coating* geopolimer. Lapisan geopolimer yang menyatu serta ditemukan sedikit C-S-H (Kalsium silikat terhidrat) (Zhang et al., 2010) (Zhang et al., 2012). Pengaruh konsentrasi natrium hidroksida ($\text{Na}(\text{OH})$) terhadap penetrasi klorida, korosi baja dan kuat tekan beton geopolimer berbasis abu terbang di lingkungan laut telah dipelajari oleh Chindaprasirt et. al., (2014). Sampel dirawat di laboratorium selama 28 hari dan kemudian dipaparkan pada zona pasang surut lingkungan laut di Teluk Thailand. Setelah pemaparan selama 3 tahun, spesimen diuji kuat tekan, penetrasi klorida, dan korosi batang baja tertanam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penetrasi klorida dan korosi baja tertanam menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi $\text{Na}(\text{OH})$ pada mortar. Selain itu, peningkatan konsentrasi $\text{Na}(\text{OH})$ pada beton geopolimer mengakibatkan penurunan kapasitas pengikatan klorida.

Penelitian yang sudah ada menunjukkan adanya potensi mortar geopolimer sebagai pelindung beton dilingkungan agresif dilihat dari kemampuan menahan klorida baik pada air garam buatan maupun air laut. Namun penelitian tentang pelindung beton dengan mortar geopolimer untuk zona paparan terendam dengan jangka waktu yang memungkinkan biota penempel muncul belum diketahui dampaknya terhadap durabilitas. Selain itu saat mortar geopolimer digunakan sebagai *coating*/pelapis di laut ancaman durabilitas tidak hanya dari kandungan ion klorida saja namun jg ancaman karbonasi dan sulfat. Sehingga penelitian ini diperlukan untuk menjawab kemampuan durabilitas mortar geopolimer tidak hanya dari serangan klorida, karbonasi, sulfat, namun juga bagaimana interaksinya dengan biota penempel. Sekaligus penelitian ini menjawab bagaimana dampak biota penempel yang dievaluasi dari sifat mekanis dan mikrostruktur.

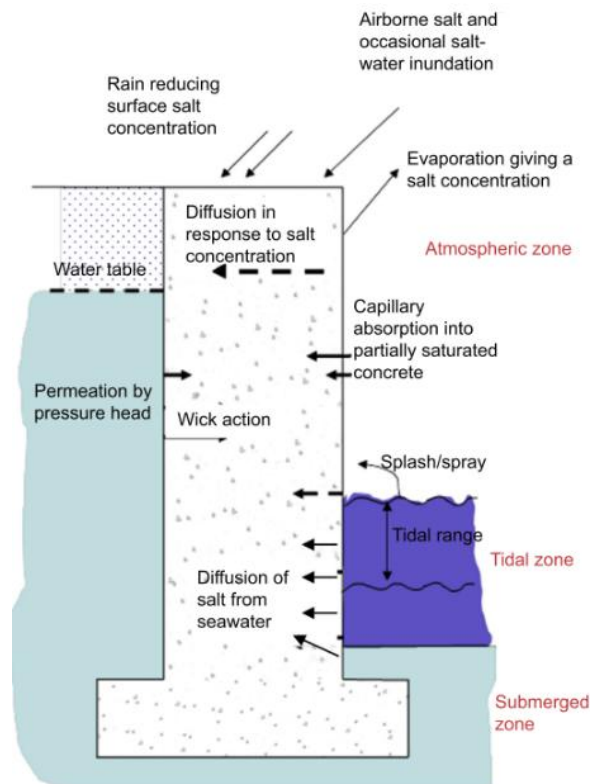
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Durabilitas Beton pada Paparan Air Laut

Durabilitas merupakan kemampuan suatu material untuk menahan perubahan cuaca, serangan iklim, abrasi atau segala proses kerusakan yang berasal dari lingkungan sehingga beton dapat mempertahankan bentuk asal, kemampuan, kualitas dan umur layannya. Pada struktur beton bertulang durabilitas lebih menekankan pada kemampuan struktur untuk menahan terjadinya pelapukan, serangan bahan-bahan kimia, abrasi maupun proses-proses lain yang dapat merusak struktur tersebut dengan mempertahankan sifat-sifat dan kemampuannya (Monteiro, 2015). Ketahanan struktur beton bertulang pada dasarnya mengacu kemampuan dari suatu struktur dapat bertahan tanpa adanya kerusakan maupun gangguan pada performance yang berarti (Green & Chess, 2019). Struktur beton di laut menghadapi potensi degradasi yang berbeda tergantung dari lokasi zona terpaparannya. Jenis-jenis zona paparan/*exposure* di laut dibagi menjadi tiga bagian (Gambar 2.1).

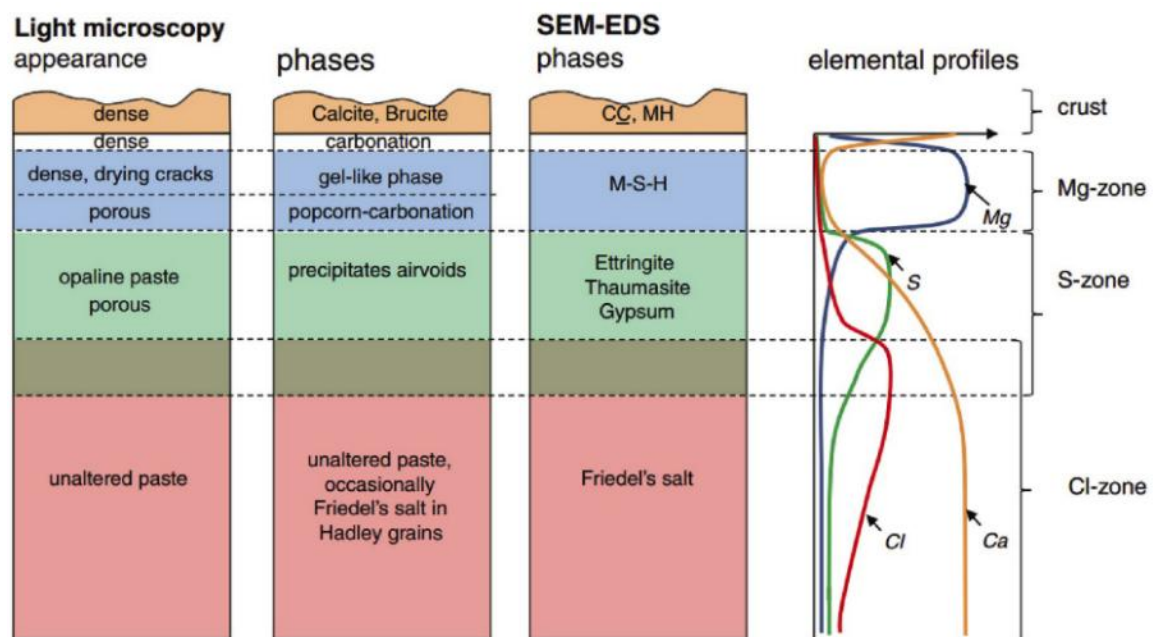


Gambar 2. 1 Jenis paparan di lingkungan laut (Zhou et al., 2019)

Mekanisme fisika yang dapat menurunkan mutu beton di laut antara lain adanya siklus pembekuan dan pencairan, siklus pembasahan dan pengeringan, serta dampak gelombang (Yi et al., 2020). Mekanisme gelombang menyebabkan kerusakan fisik yaitu abrasi dan erosi serta siklus basah-kering menimbulkan kristalisasi garam (Liu et al., 2014). Menurut Imran, (2022) dan Yi et al., (2020) beton di paparan zona terendam/*submerge*, degradasi beton diakibatkan oleh masuknya garam dari air laut sehingga terjadi penetrasi klorida, masuknya sulfat, dan *leaching*. Penurunan mutu akibat serangan kimia berpotensi membuat adanya retak dan keropos sehingga meningkatkan potensi kerusakan pada tulangan. Pada zona paparan pasang surut/*tidal* selain kerusakan akibat faktor kimia juga diperparah dengan fenomena fisika yaitu abrasi akibat gelombang. Pada zona atmosfer, garam klorida mengenai beton akibat terbawa oleh angin. Mekanisme pengangkutan kandungan zat agresif air laut ke dalam beton berlangsung dengan difusi, adsorpsi, wick action dan permeasi.

Komposisi kimia air laut yang agresif merupakan ancaman yang perlu untuk diantisipasi agar beton dapat mencapai umur layan. Komposisi kimia pada air laut yang terdiri dari NaCl, MgCl₂, Na₂SO₄, CaCl₂, KCl, NaHCO₃ dan KBr (Qu et al., 2021) yang dibentuk oleh ion Cl⁻, Na⁺, SO₄⁻, Mg²⁺ (Santhanam & Otieno, 2016) berkontribusi terhadap kerusakan beton akibat faktor kimia. American Concrete Institute, (2019) dan SNI 2847:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019) mengatur persyaratan beton struktural yang berada pada lingkungan agresif antara lain tebal selimut beton, kandungan klorida bebas yang diijinkan, serta penggunaan jenis semen. Pada ACI 318-19 tabel 20.5.1.3.1 dan SNI 2847:2019 tabel 20.6.1.3.1 mensyaratkan beton yang berada pada lingkungan terpapar cuaca dan kontak langsung dengan tanah disyaratkan tebal minimum selimut beton adalah 40 mm. Tabel 19.3.2.1 SNI 2847:2019 mengatur batas maksimal kandungan ion klorida terlarut maksimum (Cl⁻) pada beton non prategang yang terpapar air laut adalah 0,15% terhadap berat semen. Persyaratan campuran beton saat berada di kategori kelas paparan S2 dan S3 *w/cm* maks adalah 0,45 dengan *fc'* min 31 MPa, untuk kategori W1 *w/cm* maks adalah 0,5 dengan *fc'* min 28 MPa, untuk kategori C2 *w/cm* maks adalah 0,4 dengan *fc'* min 35 MPa (Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Degradasi beton berbahan utama semen di lingkungan laut adalah karena adanya interaksi ion klorida dan sulfat dengan senyawa kimia yang terbentuk oleh pasta semen yaitu C-S-H (*calcium silicate hydrate*). Secara bertahap, mekanisme penurunan mutu beton konvensional dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Skema interaksi antara air laut dengan semen (Yi et al., 2020)

Interaksi diawali karena kandungan CO_2 di udara yang bereaksi dengan air laut yang terkandung pada pori-pori beton sehingga membentuk asam karbonat (H_2CO_3). Asam karbonat merupakan asam lemah yang melepaskan ion hidrogen (H^+) dan menjadi HCO_3^- , sehingga menambah ion hidrogen yang mengakibatkan pH pada beton turun. Hal tersebut dapat melepaskan klorida yang terikat secara kimia yang berdampak pada meningkatnya penetrasi ion klorida (Qu et al., 2021). Kedalaman karbonasi bergantung pada waktu serta lokasi dimana struktur beton berada. Umumnya karbonasi ditemukan bagian permukaan/*surface* beton karena tingginya kelembaban di lingkungan pantai (pori-pori lebih jenuh) (Yi et al., 2020).

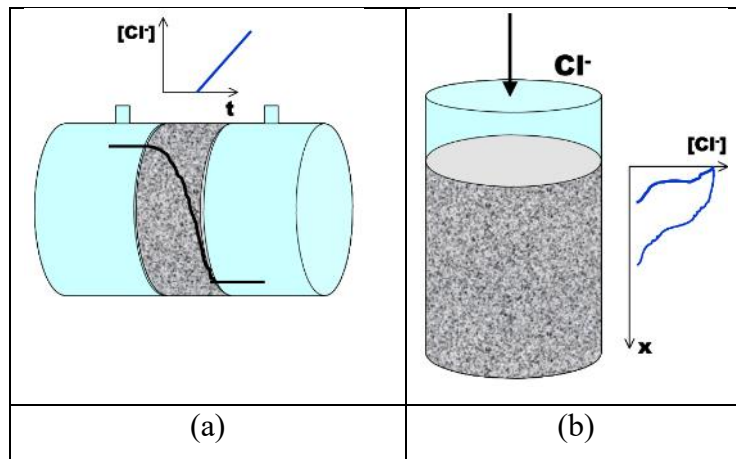
Pada air laut yang mengandung Mg^+ yang bereaksi dengan calcium hidroksida pada beton akan merubah ikatan C-S-H pada semen menjadi M-S-H/Magnesium-silicate-hydrate yang bersifat *non-cementitious*. Kondisi tersebut menambah faktor degradasi sehingga ion klorida dan sulfat dapat masuk lebih jauh ke dalam beton. Ion sulfat eksternal (SO_4^-) bereaksi dengan portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ membentuk gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dilanjutkan dengan reaksi pada monosulfat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) dan sulfat eksternal membentuk senyawa ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) (Qu et al., 2021; D. Sun et al., 2022; Ustabaş & Erdoğdu, 2016). Ion klorida bereaksi dengan kalsium aluminat (C3A) dan monosulfoaluminat (AFm) membentuk garam Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) dan garam Kuzel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{CaCl}_2 \cdot 0.5\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (Yi et al., 2020).

Reaksi antara ion sulfat dan klorida pada semen menciptakan produk kristalinasi sehingga ada penambahan volume yang berpotensi menimbulkan retak (Qu et al., 2021). Produk tersebut berpotensi mengalami peningkatan volume saat terjadi proses kristalisasi. Hal tersebut mengakibatkan terdesaknya semen dan menyebabkan retak hingga terkikisnya beton (Qu et al., 2021) sehingga dapat mengurangi massa beton dan berpengaruh pada kuat tekan (Cheng et al., 2021).

Setiap beton memiliki permasalahan durabilitas yang berbeda tergantung dari lingkungan yang dihadapi dan *properties* pada beton. Berkaitan dengan *properties* beton, masuknya klorida ke dalam beton erat kaitanya dengan porositas yang dimiliki oleh beton. Ukuran pori-pori pada beton memungkinkan senyawa-senyawa seperti klorida dan sulfat di air laut berinfiltrasi ke dalam beton. Mekanisme infiltrasi klorida dalam beton salah satunya adalah dengan proses difusi. Laju perpindahan zat yang berdifusi melintasi satuan luas dinyatakan dengan koefisien difusi. Koefisien difusi diperoleh melalui dua metode mengikuti ketentuan yang disyaratkan yaitu *steady state diffusion coefficient* (D_s) dan *non steady state diffusion coefficient* (D_{ns}). *Steady state diffusion coefficient* (D_s) digunakan saat pengujian dilakukan di mana satu ruang berisi larutan klorida dan ruang lainnya bebas dari kandungan klorida. Setelah waktu tertentu klorida menembus sampel dan bereaksi dengan fase semen kemudian klorida akan menempati larutan bebas klorida. Peningkatan konsentrasi klorida menghasilkan hasil yang konstan terhadap waktu jika reaksi dalam sampel telah selesai. Nilai koefisien D_s diperoleh dari kemiringan grafik antara konsentrasi klorida dengan waktu. Namun dalam kenyataannya, terdapat fungsi waktu untuk dapat memindahkan klorida bebas dan terikat hingga ke bagian bawah ruang sehingga perhitungan dapat menggunakan D_{ns} . D_{ns} dihitung menggunakan Hukum Fick II dengan asumsi konsentrasi klorida yang masuk ke dalam ruang adalah konstan sebagaimana disebutkan pada persamaan 2.1 (Andrade, 2002).

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns} t}} \right) \right] \quad (2.2)$$

Dimana C_x adalah konsentrasi klorida di kedalaman (x) dan waktu (t), nilai C_s adalah konsentrasi klorida di permukaan.



Gambar 2. 3 (a) Pengujian Ds dihitung dari kemiringan grafik klorida dan waktu; b) Pengujian Dns diperoleh dari profil kedalaman klorida (Andrade, 2002).

Koefisien difusi didapatkan dengan dari dua metode pengujian yaitu secara natural dan uji migrasi (*accelerate test*). Pengujian accelerate tidak disarankan untuk karena konsentrasi klorida yang didapatkan belum memperhitungkan nilai klorida binding (Andrade, 2002). Pada penerapannya pengujian untuk mendapatkan koefisien difusi dilakukan dengan *immersion test*/alami mengikuti peraturan Nordtest NT 443 atau ASTM C1556 dengan ketentuan *one dimensional diffusion* yaitu hanya satu sisi permukaan yang terpapar klorida dengan waktu perendaman paling sedikit 35 hari (Xu & Ye, 2023). NT BUILD 443: Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration (1995) dan ASTM, (2007) menjabarkan konsentrasi klorida sebagaimana persamaan 2.3.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_a t}} \right) \quad (2.3)$$

Dimana:

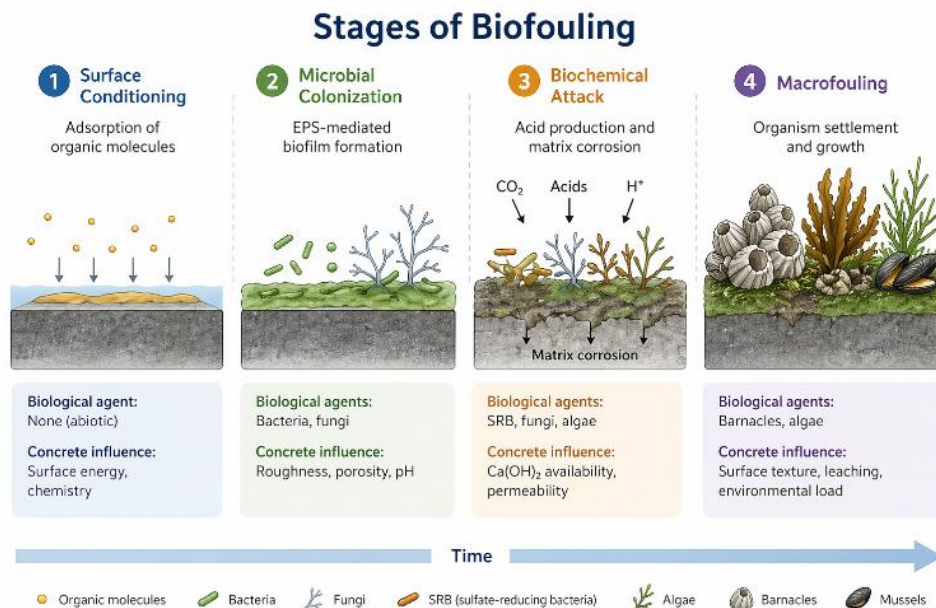
- $C(x, t)$ = konsentrasi klorida, pada kedalaman x dan waktu pemaparan t dalam % massa
- C_s = proyeksi konsentrasi klorida pada antarmuka antara cairan pemaparan dan benda uji yang ditentukan oleh analisis regresi dalam % massa
- C_i = konsentrasi ion klorida awal dari campuran semen sebelum direndam dalam larutan pemaparan dalam % massa
- x = kedalaman di bawah permukaan terbuka (sampai pertengahan lapisan) dalam meter
- D_a = koefisien difusi klorida semu dalam m^2/dtk
- t = waktu pemaparan dalam detik
- erf = fungsi kesalahan

2. 2. Mekanisme Penempelan Biota (*Biofouling*) dan Dampaknya Terhadap Durabilitas Beton

Proses pembentukan biota penempel pada permukaan substrat diawali dengan menempelnya organisme, seperti bakteri dan diatom, yang tumbuh sangat cepat. Pembentukan lapisan biofilm dimulai dengan melekatnya debris dan bahan organik lainnya, yang menjadi merupakan tahapan primer dimana mikroorganisme berperan sebagai perintis bagi organisme penempel berikutnya yang secara umum berukuran lebih besar (Railkin, 2004). Proses pembentukan biota penempel terdiri dari beberapa tahapan, di antaranya proses akumulasi material organik, penempelan serta pertumbuhan bakteri sebagai pembentuk biofilm, dan proses suksesi dari *microfoulers* dan *macrofoulers*.

Tahapan biokolonisasi pada substrat berbahan semen di lingkungan laut dapat dilihat pada Gambar 2.4 dengan uraian yang dijabarkan pada Tabel 2.1. Tahap pertama dimulai saat substrat terendam dalam air laut. Kandungan organik dan mineral pada air laut teradsorpsi pada permukaan, yang disebut pengkondisian permukaan (*surface conditioning*). Hal itu berpotensi meningkatkan stabilitas mekanisme adhesi bakteri. Selanjutnya, beberapa spesies bakteri menempel pada permukaan dan membentuk bakteri biofilm (*microfouling*). Biofilm bakteri terdiri dari satu atau lebih spesies bakteri yang melekat pada permukaan dan terbungkus dalam matriks zat polimer ekstraseluler (EPS) yang terdiri dari protein, glikoprotein, glikolipid, DNA ekstraseluler, dan polisakarida (Chambers et al., 2006). Beberapa hari hingga beberapa bulan kemudian, mikro dan makroorganisme lain seperti diatom, ganggang, dan larva menempel di permukaan, sehingga memunculkan pembentukan makrofouling (Hayek et al., 2021).

Jika dilihat berdasarkan zona daratan yang secara melandai menuju ke laut atau disebut dengan mintakat litoral, teritip umumnya akan berada pada daerah yang terendam pada sebagian besar waktu. Mintakat tersebut hanya mengalami siklus kering satu hingga tiga jam. Pada mintakat ini terdapat teritip baran (*acorn barnacle*), teritip bertangkai, bintang laut, dan avertebrata lain (Romimohtarto, Kasijan; Juwana, 2009).



Gambar 2. 4 Tahapan Penempelan Biota pada Substrat Beton (Ilustrasi dihasilkan oleh kecerdasan buatan)

Tabel 2. 1 Penjelasan Tahapan Penempelan Biota pada Substrat Beton

Tahapan	Proses Utama	Agen Biologis	Faktor yang mempengaruhi
Pengkondisian permukaan	Adsorpsi molekul organik	Abiotik	Sifat kimia permukaan
Kolonisasi Mikroba (<i>Microbial Colonization</i>)	Pembentukan biofilm yang dimediasi oleh EPS	Bakteri, fungi	Kekasaran, porositas, dan pH
Serangan Biokimia (<i>Biochemical Attack</i>)	Produksi asam dan korosi matriks semen	Bakteri pereduksi sulfat (SRB), fungi, alga	Ketersediaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan permeabilitas
Makro fouling (<i>Macrofouling</i>)	Perlekatan dan pertumbuhan organisme	Teritip (<i>barnacles</i>), alga	Tekstur permukaan, pelindian (<i>leaching</i>), dan beban lingkungan

Jenis-jenis biota penempel terdiri dari *algae fouling* dan *animal fouling*. *Algae fouling* antara lain *green algae*, *brown algae*, dan *red algae*. *Animal fouling* terdiri dari organisme bercangkang/*hard shell* seperti *barnacles*, *tubeworms*, dan *spirobis*. Selain itu juga terdapat jenis rerumputan seperti *bryozoan* dan *hydroid* serta *spineless* organisme seperti *spon*, *asidian*, dan *tunikata* (Bressy & Lejars, 2014). Kolonisasi jenis biota penempel bergantung pada material substrat (Guillitte, 1995) sebagaimana dijabarkan pada Tabel 2.2. Penelitian sebelumnya tentang biorespektivitas pada material semen menyatakan bahwa kekasaran permukaan mempengaruhi koloni bakteri yang menjadi awal fase mekanisme *biofouling*. Semakin kasar permukaan substrat, semakin tinggi koloni bakteri,

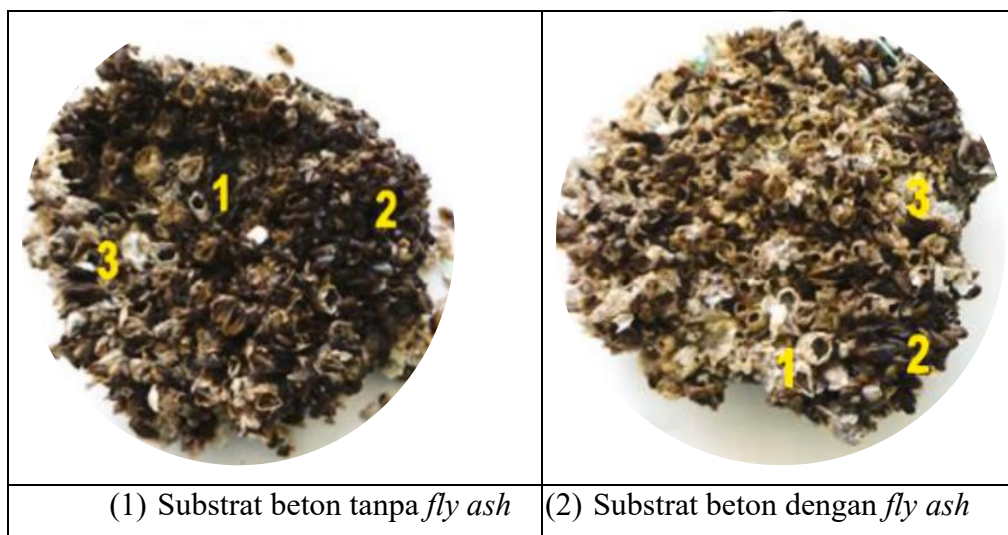
termasuk dengan penambahan *slag* pada campuran beton (Hayek et al., 2021; Kim et al., 2022; Veeger et al., 2021). Penggunaan *fly ash* pada beton berhasil mengurangi biota penempel dengan menunjukkan pengurangan biomassa hingga 23% setelah perendaman 180 hari (Harilal et al., 2020) dengan jenis biota *barnacle*/teritip, *mussel* dan *bivalve*/kerang-kerangan (Gambar 2.5). Selain itu, faktor yang juga dapat menghambat penempelan biota adalah sifat hidrofobik permukaan substrat. Medeiros & Helene, (2009) dan Hayek et al., (2021) sepakat menyatakan bahwa sifat hidrofobik menghambat penempelan biota sehingga dapat menunda kerusakan substrat yang diakibatkan oleh biota penempel.

Tabel 2. 2 Sifat-sifat Beton dan Dampaknya terhadap Penempelan Biota

Referensi	Tipe Beton	Bahan/perlakuan khusus	Paparan	Parameter yang mempengaruhi	Dampak terhadap Penempelan Biota
Harilal et al., 2020	Beton semen portland dengan <i>fly ash</i>	nano-TiO ₂ , nano-CaCO ₃ , NaNO ₂	Zona terendam selama 6 bulan	<i>Photocatalytic activity</i> menyebabkan sifat antimikroba	Penambahan nano-TiO ₂ , nano-CaCO ₃ , dan NaNO ₂ menghambat penempelan <i>biofouling</i> .
Hayek et al., 2021	Beton semen portland dengan <i>slag</i>	Metode perawatan, kekasaran permukaan, penggunaan <i>slag</i>	Kolam air laut selama 5 bulan	hidrofobik	1. Sifat hidrofobik menghambat penempelan biota. 2. Permukaan yang kasar meningkatkan bioreseptivitas. 3. Penggunaan <i>slag</i> meningkatkan bioreseptivitas
Giannantonio et al., 2009	Beton semen portland dengan <i>fly ash</i> , <i>slag</i> , <i>silica fume</i> , dan metakaolin	TiO ₂	Kolam air di laboratorium selama 1 bulan	<i>Photocatalytic activity</i>	1. Semakin tinggi w/c ratio meningkatkan penempelan fungi. 2. Penambahan TiO ₂ pada semen secara signifikan menghambat pertumbuhan fungi saat terpapar sinar UV 3. Kekasaran permukaan dan jenis SCM tidak secara signifikan mempengaruhi pertumbuhan jamur
Veeger et al., 2021	Beton dengan OPC and <i>Magnesium Phosphate Cement</i>	<i>Crushed expanded clay</i> (CEC), <i>bone ash</i> , <i>water to cement ratio</i> ,	Perendaman selama 8 minggu	Bioreseptivitas	1. <i>Bone ash</i> meningkatkan pembentukan biofilm dari nutrisi fosfor 2. Kekasaran permukaan yang tinggi meningkatkan bioreseptivitas

Referensi	Tipe Beton	Bahan/perlakuan khusus	Paparan	Parameter yang mempengaruhi	Dampak terhadap Penempelan Biota
		surface retarder			
Medeiros & Helene, 2009	<i>Portland Cement</i>	Agen hidrofobik dengan silan/siloksan, Akrilik, dan Pelapis poliuretan	Metode kapiler dengan larutan NaCl 3%	hidrofobik di permukaan beton	1. Lapisan poliuretan mengurangi difusi klorida 2. Perawatan permukaan mengurangi penyerapan air dan menunda kerusakan akibat penempelan biota.
Kim et al., 2022	Beton menggunakan Semen OPC, semen alumina (AC), dan semen magnesium (MgO, MC)	<i>Foaming agent</i> dan Polimer superabsorben	Kolam air di laboratorium	Bioreseptivitas	1. Polimer superabsorben meningkatkan kelembapan 2. <i>Foaming agent</i> meningkatkan porositas terbuka hingga memfasilitasi pelekatan organisme 3. Permukaan kasar meningkatkan bioreseptivitas
Hickling et al., 2022	Beton semen dan alkali aktivasi material dengan GGBS	<i>Micro silica</i> (pozzolan) dan kekasaran permukaan	Zona pasang surut selama 12 bulan	Bioreseptivitas	1. Tidak ada perbedaan signifikan dalam kekayaan spesies atau keanekaragaman di antara berbagai jenis beton. 2. Beton AAM dan beton semen menunjukkan perkembangan <i>biofouling</i> yang serupa. 3. Permukaan kasar dengan mikro-silika tidak meningkatkan keanekaragaman atau biomassa namun menarik bryozoa saat menggunakan mikro-silika.
Natanzi et al., 2021	Beton dari semen Portland dengan GGBS	-	Zona Subtidal selama 1 bulan	Bioreseptivitas dan alkali yang rendah	1. Penambahan GGBS pada beton secara signifikan meningkatkan biomassa diatom, sianobakteri, dan alga hijau karena alkalinitas yang lebih rendah. 2. Kelimpahan teritip juga meningkat pada beton berbasis GGBS, terutama dengan agregat granit dan

Referensi	Tipe Beton	Bahan/perlakuan khusus	Paparan	Parameter yang mempengaruhi	Dampak terhadap Penempelan Biota
					plasticizer. 3. GGBS meningkatkan ketahanan terhadap klorida.
McManus et al., 2018	Beton dari semen	PFA (<i>Pulverized Fly ash</i>) dan GGBS (<i>Ground Granulated Blast-furnace Slag</i>),	Zona terendam selama 7 minggu	Bioreseptivitas	1. GGBS mengurangi kekayaan spesies makrofouling. 2. Tidak ada efek signifikan pada kekayaan biofilm antara penambahan PFA atau GGBS, tetapi waktu meningkatkan cakupan. Selain itu, tidak ada efek pada komposisi atau kelimpahan spesies non-asli.



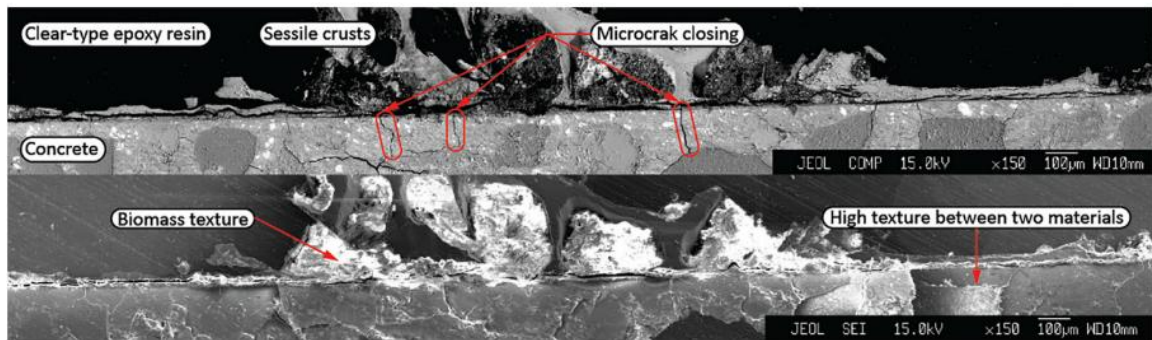
Gambar 2. 5 Biota penempel pada substrat beton dengan tambahan *fly ash* (Harilal et al., 2020)

Tabel 2.2 menunjukkan bahwa porositas dan permeabilitas yang tinggi berpengaruh terhadap peningkatan pertumbuhan *biofouling* karena memfasilitasi masuknya air, nutrisi, dan mikroorganisme ke dalam matriks beton. Selain itu, kekasaran permukaan juga berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan kolonisasi karena menyediakan lebih banyak area untuk melekatnya mikroorganisme. Di sisi lain, pelapisan dengan material hidrofobik dan zat aditif antimikroba secara efektif menurunkan kolonisasi *biofouling* secara signifikan dengan membatasi ketersediaan air dan nutrisi serta menghambat pertumbuhan mikroba. Sifat beton yang meningkatkan permeabilitas, kekasaran, dan ketersediaan nutrisi cenderung meningkatkan *biofouling*, sementara perlakuan yang

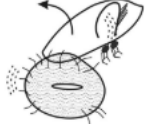
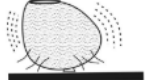
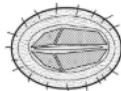
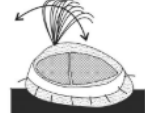
membatasi kelembapan dan memberikan aksi antimikroba, mampu menekan kolonisasi biologis.

Biota penempel pada substrat beton menimbulkan dampak kerusakan pada permukaan substrat melalui mekanisme biokimia dan fisik. Biota penempel jenis *macro-algae* (*Chaetomorpha antennina* dan *Ulva fasciata*) menyebabkan terkikisnya matriks semen yang diakibatkan oleh zat asam $C_{20}H_{38}O_2$ (Nonadecylenate) (Jayakumar & Saravanane, 2009, 2010). Noeiaghaci et al. (2017) menyebutkan bahwa sekresi enzim serta produk asam yang dihasilkan oleh biota penempel dapat bereaksi dengan komposisi semen pada beton. Beberapa jenis biota penempel jenis *Balanus Sp.* menghasilkan senyawa fenol seperti asam amino tirosin dan enzim polifenoloksidase serta kandungan zat asam yang berada pada mikroorganisme dapat bereaksi dengan semen pada beton (Li et al., 2021; Railkin, 2004). Pelekatan oleh *barnacle*/teritip diulas secara biokimia diperlihatkan oleh Liang et al. (2019) yang menyatakan bahwa teritip dewasa akan menghasilkan lipid dan oksidan, serta protein dengan komposisi asam amino dan sifat struktural yang berbeda. Asam lemak merupakan komponen penyusun lipid yang terbentuk dari ikatan gugus karboksil (COOH) dengan senyawa hidrokarbon jenuh atau tak jenuh. Hal itu yang menyebabkan munculkan fenomena biodegradasi/biodeteriorasi yaitu kerusakan beton akibat biota pada beton yang berpotensi memperpendek umur layan beton sebagai substrat biota penempel (Bastidas-Arteaga et al., 2008).

Secara kontradiktif, peneliti lain menyatakan bahwa biota penempel dapat melindungi beton melalui mekanisme bioproteksi. Chlayon et al. (2018, 2020) menunjukkan adanya biofilm dan *barnacle* (teritip) yang menempel pada beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi. *Barnacle* (teritip) dapat menutup retak pada beton sehingga air laut dapat dicegah masuk ke dalam beton serta adanya bakteri pada biofilm memberikan efek *self-healing* pada beton. Biota penempel jenis *Crassostrea gigas* juga menunjukkan performa serupa yaitu terbentuknya layer pada permukaan beton dapat meningkatkan durabilitas beton (J. Lv et al., 2021; J. F. Lv et al., 2015). Pada Gambar 2.6 terlihat *Crassostrea gigas* yang menutup retak-retak kecil dibawah cangkang spesies biota penempel.

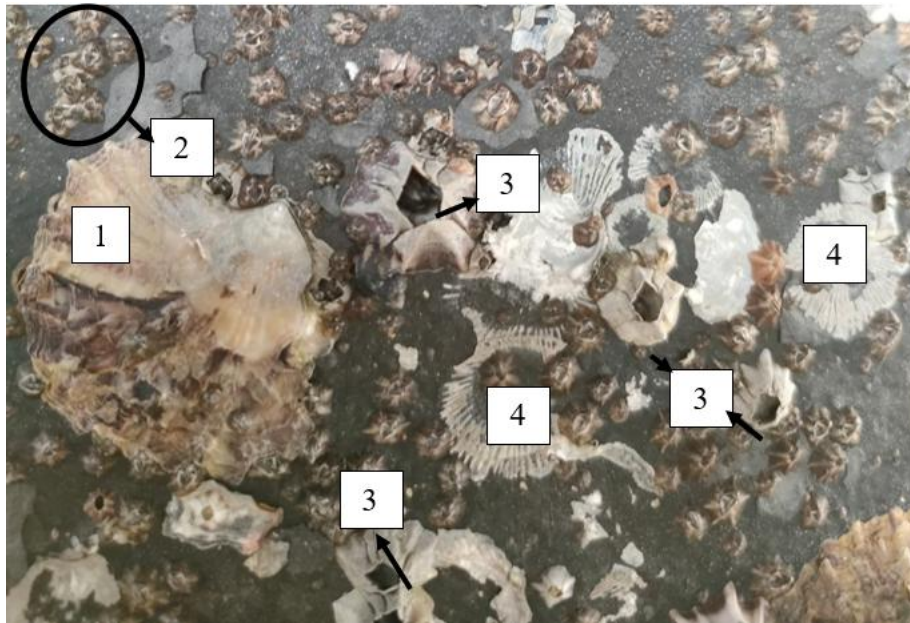


Gambar 2. 6 Cangkang teritip pada permukaan beton (Chlayon et al., 2020)

PHASE 1 CEMENTED CYPRID   1. Durasi: awal mula penempelan	PHASE 2 EARLY METAMORPHOSIS   2. Durasi: 0-4 jam
PHASE 3 PROGRESSION OF METAMORPHOSIS   3. Durasi: 1-4 jam	PHASE 4 SHEDDING OF THE CARAPACE   4. Durasi: 2-30 menit
PHASE 5 EARLY JUVENILE   5. Durasi: sekitar 24 jam	PHASE 6 JUVENILE   6. Durasi: 7 hari s.d 2 bulan
7. <i>Adult barnacle</i>: 5 s.d 10 bulan	

Gambar 2. 7 Fase metamorfosa Balanus amphitrite (Maruzzo et al., 2012; Railkin, 2004)

Proses perlindungan dan *self-healing* pada substrat beton oleh *barnacle*/teritip tidak dapat bertahan terus-menerus karena siklus hidupnya yang terbatas. Pada Gambar 2.7 teritip mulai memiliki cangkang diperkirakan setelah 7 hari sampai dengan 2 bulan membentuk juvenil sempurna yang didahului oleh proses metamorfosa dari fase cyprid (Maruzzo et al., 2012) kemudian menjadi teritip dewasa/*adult barnacle* hingga 10 bulan (Railkin, 2004). Saat melewati 10 bulan, siklus hidup teritip selesai, meninggalkan cangkang yang melekat pada substrat, yang kemudian mengelupas dan meninggalkan bekas sebagaimana terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Teritip Pada Tiang Pancang Jembatan Suramadu Yang Mati

Pada Gambar 2.8.(1) Cangkang *Saccostrea Sp* yang mati terlihat melekat kuat pada substrat dengan telah ditempeli oleh biota penempel *Chtamalus Sp* (2). Pada Gambar 2.8.(3) *Amphibalanus Sp.* telah mati, beberapa individu hanya menyisakan cangkangnya, namun beberapa individu lain cangkangnya ditempati oleh spesies jenis keong-keongan kecil. Pada Gambar 2.8.(4) cangkang biota penempel yang telah mati mengelupas hingga meninggalkan bekas dengan pola salur putih pada substrat. Kondisi ini menandakan bahwa bioproteksi oleh biota penempel bercangkang tidak bertahan lama sehingga dimungkinkan masuknya senyawa agresif, baik sulfat maupun klorida, tetap terjadi. Selain itu, kondisi tersebut juga meningkatkan kekasaran permukaan pada beton.

Kekasaran permukaan mendorong *biofouling* lebih lanjut oleh organisme lain (Bone et al., 2022b; Hakim et al., 2019; Isdianto et al., 2020). Selain itu, cangkang teritip dan endapan kalsiumnya menambah berat yang signifikan pada struktur laut, dengan kepadatan cangkang berkisar antara 1050 hingga 1325 kg/m³ (Miller & Macleod, 2016). Maduka et al., (2023) meninjau tentang beban hidrodinamik pada struktur turbin angin lepas pantai. Hasil studi menyatakan bahwa *biofouling* menimbulkan ketidakpastian pada perhitungan koefisien hidrodinamik yang bergantung pada persentase tutupan *biofouling*, kekasaran permukaan yang dihasilkan, geometri dan bentuk kekasaran, spesies *biofouling*, dan tebal lapisan *biofouling*. Di sisi lain, dampak organisme makrofoiling pada substrat beton tidak hanya pada struktur tetapi juga mempengaruhi ekosistem perairan karena sifat invasifnya. Spesies invasif merusak keanekaragaman hayati asli dengan memperkenalkan spesies dari luar habitat alaminya. Jaberimanesh et al. (2019) menyatakan bahwa

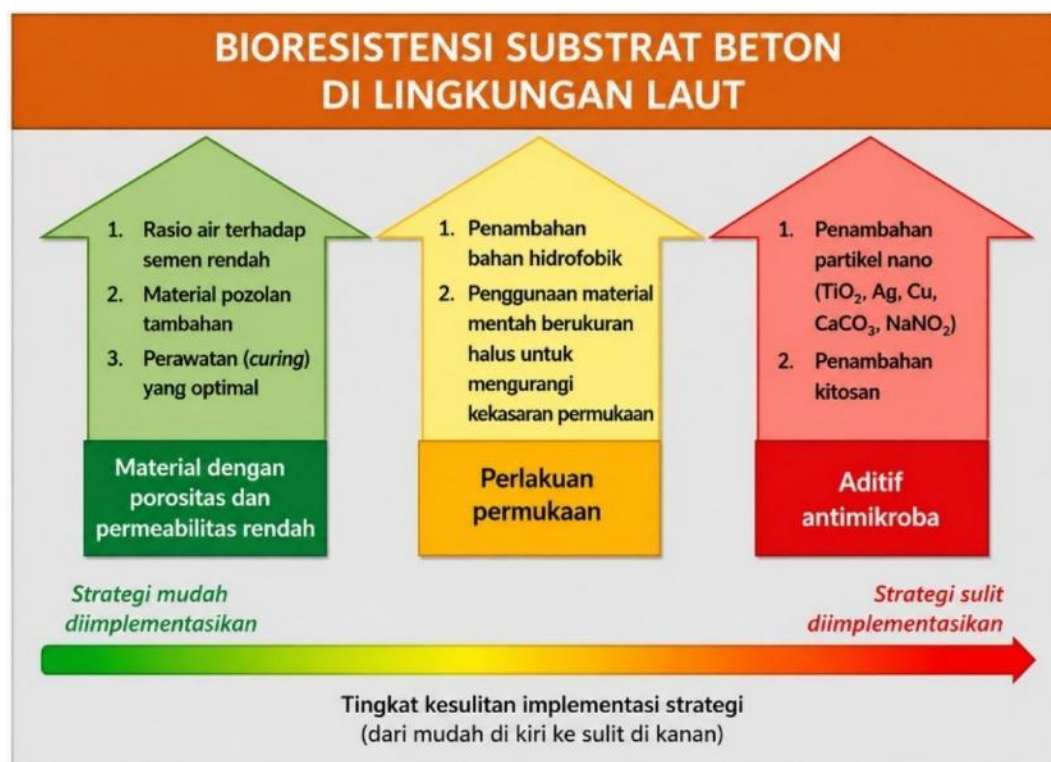
Amphibalanus sp. adalah teritip invasif, spesies ini juga ditemukan di Indonesia yaitu di Selat Madura (Al-Kautsar et al., 2020; Iswadi et al., 2022).

Jenis dan pertumbuhan makrofouling dipengaruhi oleh lingkungan laut, karakteristik substrat, serta durasi perendaman. Dampaknya terhadap substrat beton, seperti degradasi kimia, perubahan kekasaran permukaan, dan penambahan berat, menandakan perlunya strategi untuk mengurangi kerusakan tersebut. Alternatif penggunaan lapisan pelindung, seperti lapisan antifouling, perawatan permukaan, dan penambahan material tertentu yang bersifat menghambat atau menolak penempelan, menjadi penting untuk memperpanjang umur struktur beton di laut. Berbagai upaya untuk menghambat biota penempel dijabarkan pada Tabel 2.3. Gambar 2.9 menunjukkan skema strategi peningkatan bioresistensi beton di lingkungan laut yang dibagi menjadi tiga pendekatan berdasarkan tingkat kemudahan implementasi, yaitu material berporositas dan permeabilitas rendah, perlakuan permukaan, serta aditif antimikroba. Strategi pertama berfokus pada penggunaan rasio air-semen rendah, material pozzolan, dan curing optimal untuk menghasilkan beton yang lebih padat sehingga menghambat penetrasi air, nutrisi, dan mikroorganisme. Selanjutnya, melalui perlakuan permukaan seperti penambahan bahan hidrofobik dan pengurangan kekasaran permukaan untuk menurunkan kemampuan mikroorganisme beradhesi. Terakhir merupakan pendekatan yang kompleks dengan penggunaan nanopartikel dan kitosan yang bekerja secara aktif melalui mekanisme antimikroba.

Tabel 2. 3 Strategi untuk Meningkatkan Ketahanan Beton terhadap Kolonisasi *Biofouling*

Strategi	Mekanisme Kerja	Pengaruh terhadap <i>Biofouling</i>	Referensi
Porositas terbuka yang rendah	Membatasi masuknya air, nutrisi, dan mikroba	Mengurangi kolonisasi mikroba dan biofilm	(Mehta & Monteiro, 2001; Neville & Brooks, 2010)
Aditif yang bersifat pozzolan	Memperpadat matriks, mengurangi konektivitas pori melalui pembentukan C-S-H sekunder	Mengurangi permeabilitas beton	(Mehta & Monteiro, 2001; Natanzi et al., 2021)
Nano-TiO ₂	mekanisme fotokatalitik di bawah paparan cahaya	Mengurangi pembentukan biofilm	(Giannantonio et al., 2009; Harilal et al., 2020)
Silver Nanoparticles (AgNPs)	Ion Ag ⁺ dapat mengganggu DNA, protein, dan membran mikroba.	Mengurangi pertumbuhan bakteri	(Lira et al., 2019)
Chitosan	Biopolimer mengganggu membran mikroba secara elektrostatik.	Mengurangi adhesi bakteri	(Subaer et al., 2019)

Strategi	Mekanisme Kerja	Pengaruh terhadap <i>Biofouling</i>	Referensi
Zinc/Copper Oxide Nanoparticles	Ion logam merusak enzim mikroba dan struktur membran.	Mengurangi adhesi dan pertumbuhan bakteri	(Rondinella et al., 2022)
Bahan hidrofobik (Silane, (Polydimethylsiloxane)/PDMS)	Menolak air dan mencegah permukaan menjadi basah	Mengurangi retensi kelembapan sehingga mengurangi nutrisi dan mencegah penempelan biota	(Medeiros & Helene, 2009; Pasupathy et al., 2022; Růžek et al., 2023; Sidhu & Kumar, 2023; Zhong et al., 2022)
Heat Curing (Geopolymers)	Meningkatkan pembentukan gel geopolimer dan pemadatan matriks.	Mengurangi porositas terbuka sehingga menurunkan kolonisasi.	(Ekaputri et al., 2017)

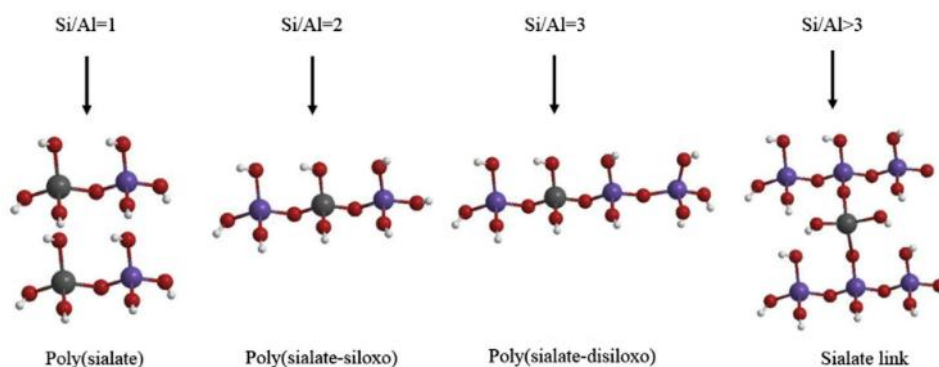


Gambar 2. 9 Strategi Material Bioretensi pada Beton di Laut

Strategi terintegrasi antara porositas terbuka rendah, aditif antimikroba, dan modifikasi permukaan hidrofobik dapat membentuk pertahanan potensial terhadap *biofouling* pada beton. Komposisi desain campuran yang tepat, mekanisme perawatan, dan pemilihan zat aditif pada semen portland maupun berbasis geopolimer dapat mengoptimalkan kepadatan matriks sehingga berpotensi mengurangi pembentukan biofilm dan masuknya mikroba. Selain itu, alternatif bahan aditif ramah lingkungan seperti kitosan dan perawatan permukaan substrat akan semakin meningkatkan daya tahan dan kinerja lingkungan beton di lingkungan yang memungkinkan paparan biota penempel.

2. 3. Beton Geopolymer dan Durabilitasnya di Lingkungan Laut

Beton geopolimer adalah material konstruksi yang memanfaatkan reaksi kimia antara material pengikat aluminosilikat (seperti abu terbang) dan larutan alkali sebagai aktivator (natrium atau kalium) untuk membentuk matriks yang padat. Proses ini menghasilkan struktur molekuler yang kuat dan tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan (Davidovits, 2013). Struktur ikatan kimia pada geopolimer berbasis silika-aluminat berbentuk poli(sialat). Sialat adalah singkatan dari silikon-oxo-aluminate. Jaringan sialat terdiri dari tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang dihubungkan secara bergantian dengan berbagi semua oksigen. Ion positif (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+) harus ada dalam ikatan untuk menyeimbangkan muatan negatif Al^{3+} pada koordinasi tetrahedral. Poli(sialates) mempunyai rumus empiris $\text{M}_n\{-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2\}_n, w\text{H}_2\text{O}$ dimana M adalah kation seperti kalium, natrium atau kalsium, dan (n) adalah derajat polikondensasi; (z) adalah 1, 2, 3. Poli(sialat) adalah polimer rantai dan cincin dengan Si^{4+} dan Al^{3+} dalam koordinasi tetrahedral dengan oksigen dan berkisar dari amorf hingga semikristal (Davidovits, 1994). Framework pada mekanisme polimerasi antara lain poly(sialate), poly(sialate-siloxo), dan poly(sialate-disiloxo), sesuai dengan komposisi Si dan Al pada material penyusun geopolimer (Gambar 2.10).



Gambar 2. 10 Rantai alumino-silikat (Davidovits, 1994; Zhuang et al., 2016)

Secara umum, geopolimer dapat dibuat dalam tiga bagian, yaitu pasta geopolimer, mortar geopolimer, dan beton geopolimer. Masing-masing jenis geopolimer dibedakan berdasarkan komposisinya sebagaimana tercantum pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Komposisi Geopolimer

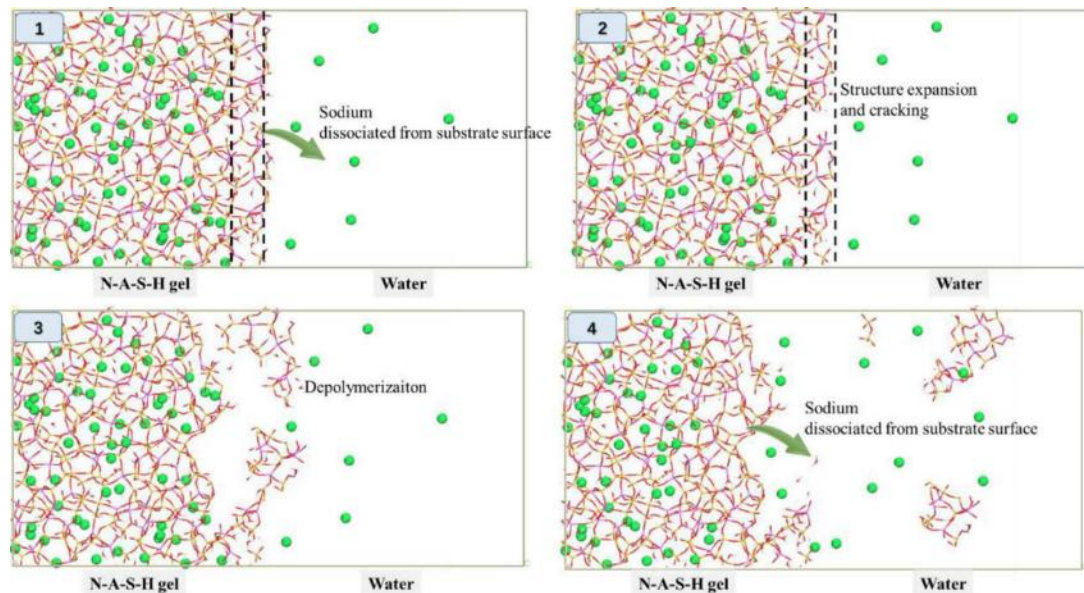
Beton	Mortar	Pasta	Binder/prekursor/material alumino silikat: 1. Bahan alam: lumpur/ <i>clay</i> , tanah laterit, bahan alam yang mengandung kaolin, zeolit. 2. Limbah industri: abu terbang/ <i>fly ash</i> , <i>blast furnace slag</i> , <i>red mud</i> , abu sekam (RHA),
			Alkali aktivator: 1. Na_2SiO_3 dan NaOH 2. Na_2CO_3 dan kapur 3. Potasium Asam aktivator: Larutan asam fosfat
		Agregat halus: pasir	
	Agregat kasar: batu pecah, koral		
	Admixture: superplastisizer		

Sumber: (Cong & Cheng, 2021; Davidovits, 2013; Zerfu & Ekaputri, 2016)

Faktor terpenting yang mempengaruhi sifat geopolimer adalah pada komposisi pasta yang dilihat dari rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, rasio $\text{R}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, rasio $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}$ ($\text{R} = \text{Na}^+$ atau K^+) dan rasio cair/*liquid*-padat/*solid* (Singh et al., 2015). Selain faktor tersebut, reaktifitas dari material penyusunnya dapat mempengaruhi kuat tekan geopolimer (Castillo et al., 2021). Rasio Si/Al yang optimum sehingga membuat kuat tekan tinggi berada diantara 1,5 sampai dengan 2,0 (Castillo et al., 2022). Si/Al menjadi hal yang penting dalam tahapan geopolimerisasi. Dengan rasio Si/Al yang rendah, spesies Al akan cukup untuk menarik spesies Si sehingga membentuk ikatan kimia. Pada rasio Si/Al yang lebih kecil, polimerisasi akan terjadi lebih tinggi sehingga area struktur geopolimer akan lebih luas. Hal ini berbanding terbalik jika rasio Si/Al lebih tinggi jumlah spesies Al akan lebih sedikit sehingga tidak cukup menarik spesies Si pada ikatan polimerisasi (X. Chen & Mondal, 2020).

Rasio Si/Al tergantung pada bagaimana reaktivitas bahan yang digunakan. Reaktivitas bahan dapat diperoleh bergantung pada konsentrasi larutan NaOH . Dengan jumlah larutan NaOH yang lebih banyak akan menambah *dissolve* spesies Si dan Al pada bahan aluminosilikat sehingga polimerisasi dapat terjadi. Pada penelitian Subaer, (2004) pada geopolimer berbahan metakaolin, rasio Na/Al yang menghasilkan sangat sedikit metakaolin tidak reaktif terjadi saat $\text{Na}/\text{Al} = 1$.

Saat geopolimer dihadapkan pada larutan atau lingkungan yang agresif, akan mengalami proses *leaching*. Ikatan geopolimer yang membentuk N-A-S-H gel memiliki Na^+ atau K^+ yang terikat bebas di dekat AlO_4 yang bermuatan negatif, yang bertugas menjaga keseimbangan ikatan alumina tetrahedron. Pada Gambar 2.11 terlihat permukaan N-A-S-H terpapar air menyebabkan Na^+ tidak stabil karena minimnya gaya elektrostatis dan geometri sehingga mudah tertarik oleh OH^- .

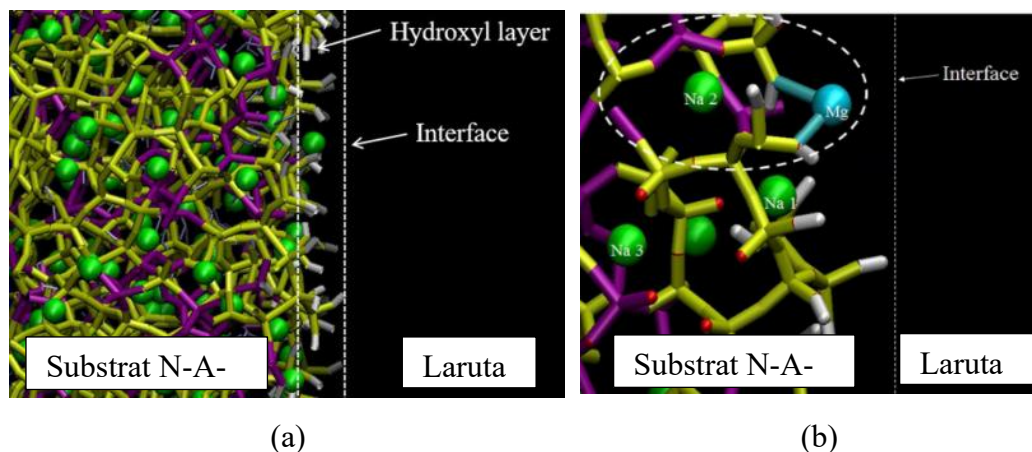


Gambar 2. 11 Proses leaching pada geopolimer yang terpapar air (Wan et al., 2020)

Hal itu mengakibatkan struktur SiO_4 dan AlO_4 keduanya bermuatan negatif, sehingga terjadi tolakan antarsruktur dan *stretching*/pembengkakan. Akibat stretching, struktur kimia N-A-S-H gel mengalami depolimerisasi sehingga ikatan polimer menjadi tidak stabil. *Leaching* tidak hanya menyebabkan pembengkakan pada struktur kimia N-A-S-H tetapi juga pelemahan pada ikatan Si-O dan Al-O yang mengakibatkan pelemahan pada tingkat polimerisasi pada N-A-S-H. Saat Na^+ hilang dari ikatan polimer N-A-S-H maka oksigen yang asalnya stabil menjadi aktif menarik hidrogen disekitarnya membentuk Si/Al-OH dan OH^- (H. Wan et al., 2020).

Geopolimer dengan ikatan kimia N-A-S-H yang dipaparkan pada lingkungan laut mengalami gangguan stabilitas akibat leaching sehingga muncul OH^- bebas, ditambah dengan kandungan air pada geopolimer, baik dalam bentuk free water pada pori maupun yang diserap pada permukaan gel, membentuk layer hidroksil yang berpotensi berikatan dengan unsur lain (Gambar 2.12.(a)). Kandungan air laut di antaranya adalah NaSO_4 dan MgSO_4 mengalami penyerapan pada permukaan substrat N-A-S-H dengan gugus hidroksil layer. Kation Mg^{2+} yang memiliki ukuran ion lebih kecil dibandingkan Na^+ lebih mudah

menembus lapisan hidroksil pada permukaan N-A-S-H sehingga berikatan dan membentuk Mg-O. Ikatan Mg^{2+} pada lapisan hidroksil akan memperbaiki struktur silikat-aluminat yang rusak sehingga dapat menstabilkan jaringan (Gambar 2.10.(b)). Ikatan N-A-S-H dengan Mg pada permukaan berdampak pada penghambatan imigrasi ion Na^+ ke dalam larutan serta mengunci SO_4 pada lapisan luar N-A-S-H membentuk $Mg-SO_4$. Selain itu terdapat pula kemungkinan SO_4 yang masuk ke dalam geopolimer membentuk ikatan dengan *free water* pada pori (Zhang, Yu; Li, Tao; Hou, Dongshuai; Zhang, Jinglin; Jiang, 2018).

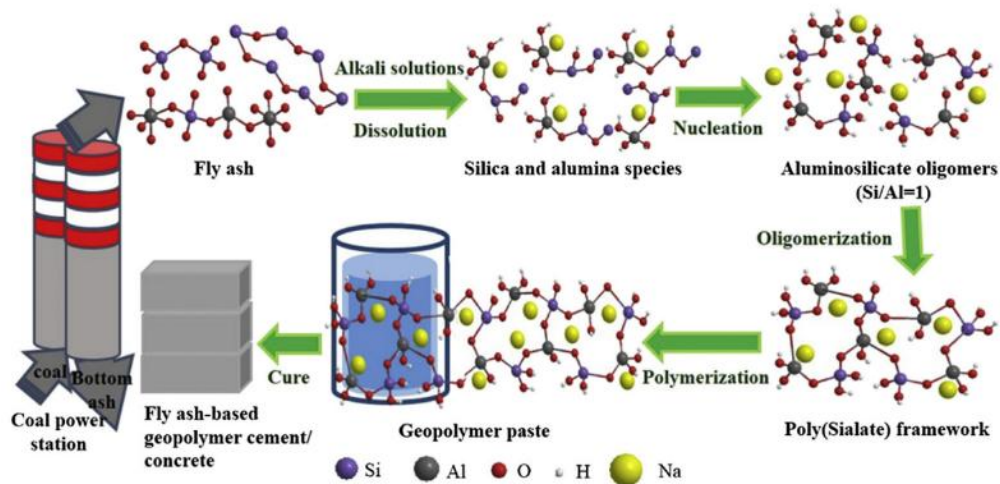


Gambar 2. 12 Ilustrasi permukaan N-A-S-H yang terpapar larutan sulfat (Zhang, Yu; Li, Tao; Hou, Dongshuai; Zhang, Jinglin; Jiang, 2018)

Pada kasus geopolimer yang terpapar air laut, kation dan anion dapat diserap oleh ikatan N-A-S-H. Kation di air laut akan lebih terabsorpsi dari pada anion karena mekanisme *leaching* yang mengakibatkan reaksi hidroksil pada permukaan N-A-S-H bersifat negatif. Saat ikatan polimer tidak stabil, kation pada air laut yang mengandung Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ akan bereaksi dengan rantai silika-alumina yang terlepas. Na^+ dan K^+ pada air laut akan menggantikan ion Na^+ dan K^+ pada gel N-A-S-H, dan Mg^{2+} akan menghubungkan struktur silikat-aluminat yang terputus dengan membentuk Mg-O. Kation pada permukaan N-A-S-H akan menarik anion pada air laut (SO_4^- , Cl^- , CO_3^{2-}) sehingga terjadi akumulasi ion di permukaan, selain itu terjadi pula kemungkinan adanya anion yang terikat dengan air bebas pada geopolimer ($HO-OSO_4$) namun terperangkap di pori bebas. Penghambatan perpindahan kation Na^+ ke dalam larutan serta pengikatan anion agresif pada lapisan luar N-A-S-H maupun yang terikat pada pori sehingga anion (SO_4^- , Cl^- , CO_3^{2-}) terperangkap, membuktikan bahwa beton geopolimer memiliki mekanisme pertahanan durabilitas yang baik saat terpapar air laut.

Geopolimer yang pada proses pengerasan nya merupakan sistem poli(sialat) membutuhkan material dengan sumber silika dan alumina sebagai bahan precursor.

Material aluminosilikat yang sumber nya besar dan perlu untuk dimanfaatkan secara masif salah satunya adalah *fly ash* (Ekaputri & Al Bari, 2020). Gambar 2.13. menunjukkan mekanisme pembentukan geopolimer berbahan *fly ash*. *Fly ash* yang komposisi utamanya SiO_2 dan Al_2O_3 dihidrolisis oleh material pengikat dalam larutan alkali aktivator (Na_2SiO_3 , NaOH , KOH atau K_2SiO_3) hingga melepaskan Al^{3+} dan Si^{4+} .

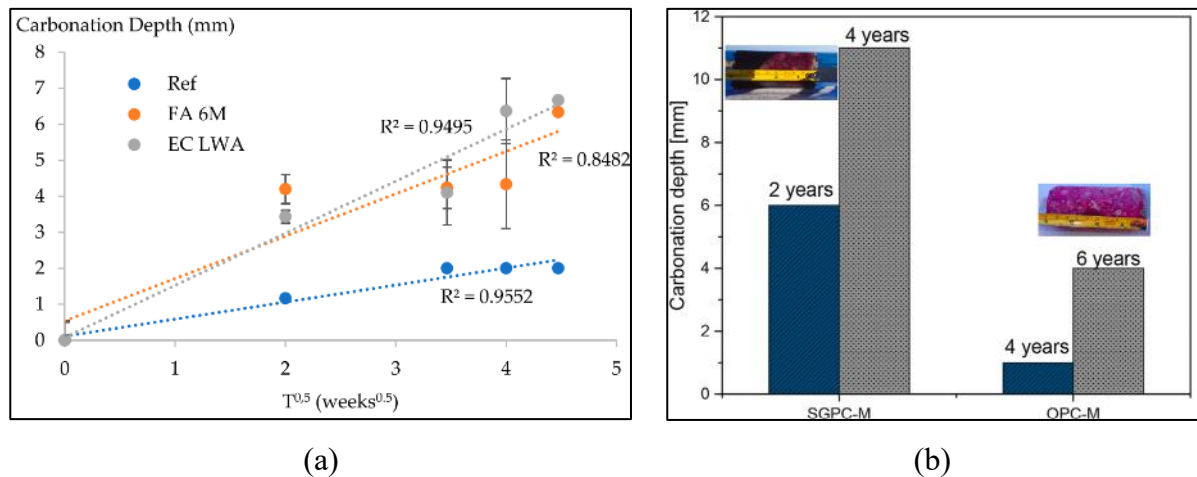


Gambar 2. 13 Mekanisme pembentukan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* (Zhuang et al., 2016)

Spesies aktif Al^{3+} dan Si^{4+} bereaksi membentuk gel dan oligomer aluminosilikat yang terdiri dari SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra. Rantai dalam oligomer aluminosilikat dapat berbentuk rantai polisialat, rantai polisialat silokso, dan rantai polisialat disilokso, bergantung pada rasio Si/Al (Zhuang et al., 2016). *Fly ash* menjadi salah satu pilihan material aluminosilikat yang menjanjikan karena keunggulan nya dalam menahan biodeteriorasi dan *biofouling* (Harilal et al., 2020).

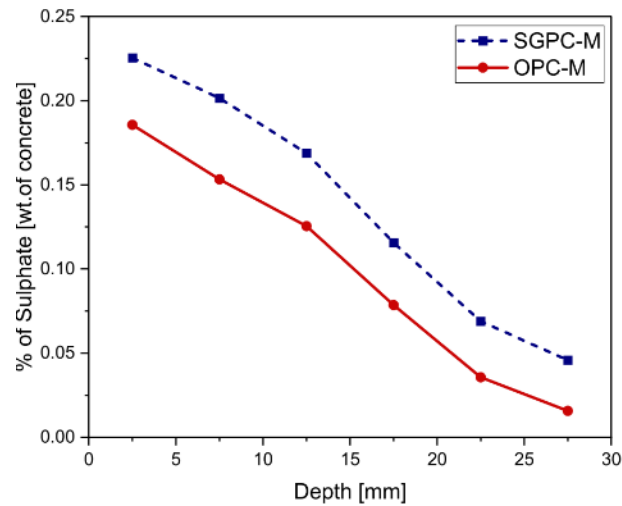
Geopolimer yang dipaparkan pada lingkungan agresif menghasilkan mekanisme ketahanan. Pada pengujian ketebalan karbonasi Risdanareni et al., (2021) melakukan pengujian terhadap beton dengan agregat buatan dari geopolimer berbahan *fly ash*. Hasil visual observasi pada sampel yang diberi indikator fenolftalein menunjukkan pada lima minggu pemaparan pada *carbonation chamber*, karbonasi terjadi pada ketebalan 7 mm dari permukaan. Hasil pengujian karbonasi dapat dilihat pada Gambar 2.14 (a). Hasil serupa ditunjukkan oleh Pasupathy et al., (2021) yang menguji kedalaman karbonasi sampel beton pada paparan air laut di zona splash selama 4 tahun dan 6 tahun. Jika dibandingkan dengan beton berbahan semen OPC, geopolimer berbahan *slag* memiliki kedalaman karbonasi 275% lebih tinggi dari semen (Gambar 2.14 (b)). Hal ini diakibatkan

karena porositas geopolimer yang lebih tinggi sehingga CO₂ dapat masuk ke dalam geopolimer.



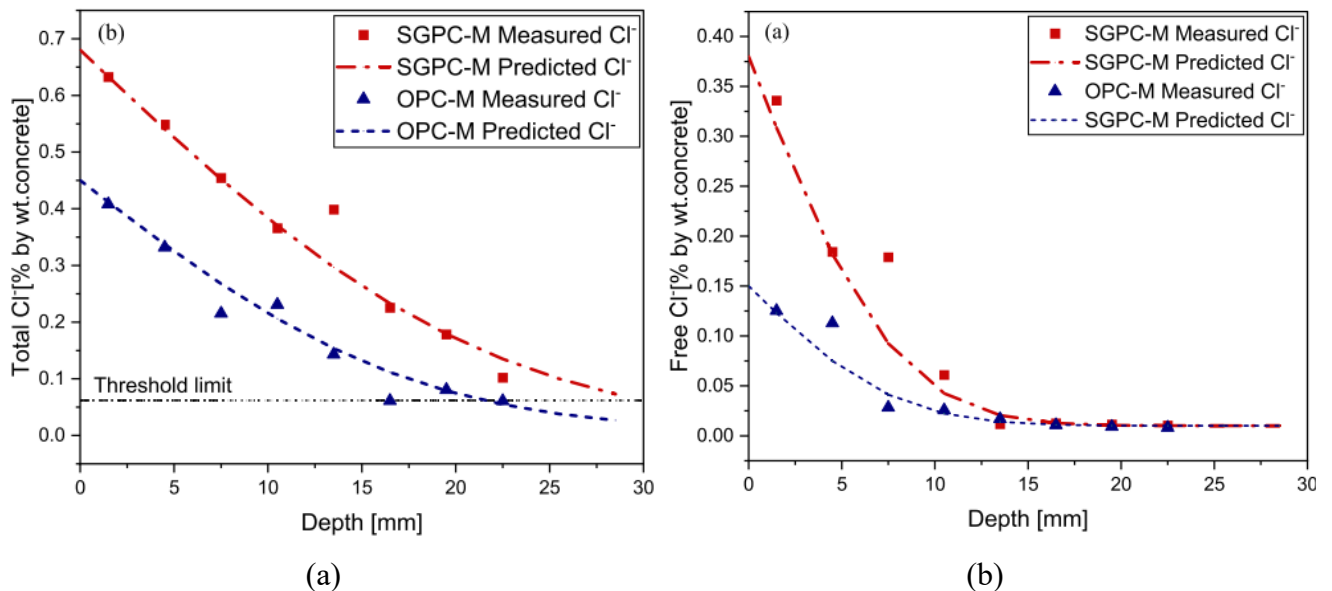
Gambar 2. 14 Kedalaman karbonasi pada beton (a) dengan percepatan karbonasi (Risdanareni et al., 2021), (b) paparan air laut pada zona splash (Pasupathy et al., 2021)

Penetrasi sulfat pada pengujian durabilitas beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan *slag* yang dilakukan oleh Pasupathy et al., (2021) menghasilkan profil konsentrasi sulfat terhadap kedalaman sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada paparan zona splash, infiltrasi sulfat pada beton geopolimer (SGPC-M) memiliki konsentrasi lebih tinggi dari pada beton berbasis semen (OPC-M). Beton geopolimer mengikat sulfat lebih tinggi pada usia 4 tahun perendaman dibanding dengan beton semen pada usia perendaman 6 tahun. Hal ini menandakan reaksi antara sulfat dan produk geopolimerisasi berbeda dengan mekanisme pada beton semen diperlukan penyelidikan lebih lanjut untuk mengetahui mekanisme degradasi serangan sulfat pada beton geopolimer.



Gambar 2. 15 Konsentrasi sulfat terhadap kedalaman (Pasupathy et al., 2021)

Konsentrasi klorida yang ditemukan pada beton geopolimer dan beton berbasis semen ditunjukkan pada Gambar 2.16. Konsentrasi klorida pada penelitian Pasupathy et al., (2021) didapatkan setelah 4 tahun dan 6 tahun perendaman menghasilkan klorida bebas tidak mengalami perubahan prosentase setelah kedalaman 15 mm dari permukaan terpapar air laut (Gambar 2.16 (b)). Pada prosentase konsentrasi klorida total mendekati batas limit setelah di kedalaman 27,5 mm (Gambar 2.16 (a)).



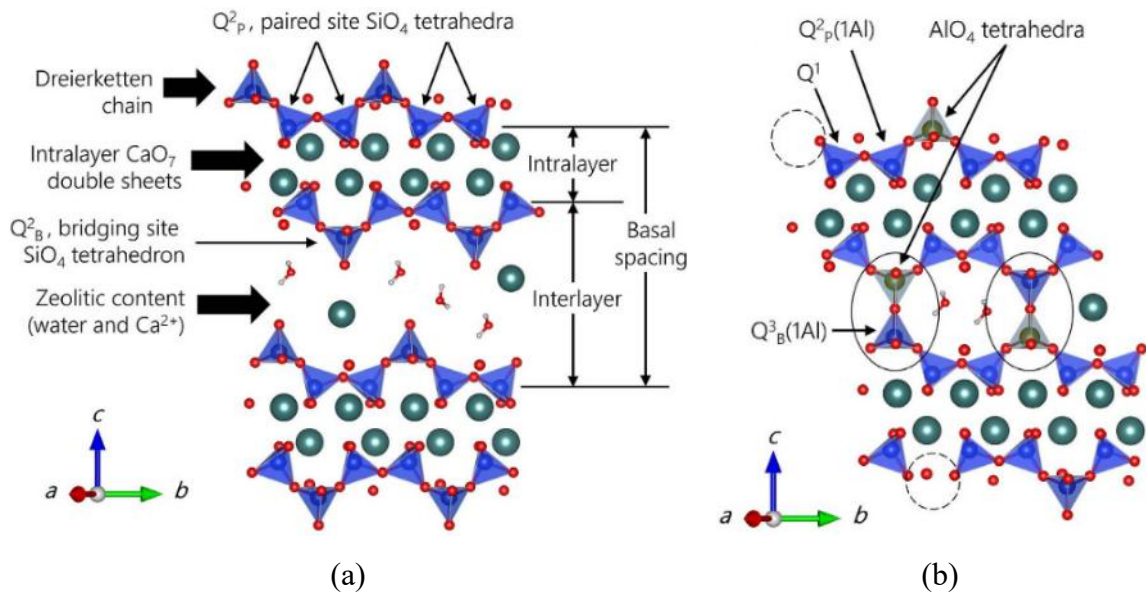
Gambar 2. 16(a) Klorida bebas pada perendaman zona splash (b) Total klorida pada perendaman zona splash (Pasupathy et al., 2021)

2. 4. Pelapis Mortar Geopolimer

Penelitian tentang coating/pelapis geopolimer telah dilakukan oleh (Aguirre-Guerrero et al., 2017) yang melapisi beton berbasis semen (OPC) menunjukkan bahwa adanya

produk layer yang secara homogen menyambungkan C-S-H gel dengan geopolimer menjadi C-A-S-H. Ikatan C-A-S-H terjadi akibat adanya Alumina yang masuk kedalam ikatan C-S-H.

Pada Gambar 2.17. (a) menunjukkan ikatan pada beton OPC yang berbasis C-S-H (*Calcium Di-Silicate Hydrate*) berupa rantai dreierketten. C-S-H yang ada dalam semen Portland memiliki kristalisasi yang rendah. Rantai dreierketten C-S-H dapat digambarkan sebagai lapisan kalsium (hidr)oksida (CaO_7) dengan rantai silika yang melekat pada kedua sisinya yang tersusun dalam struktur dreierketten (rantai berulang dari tiga silika tetrahedra) yang disebut sebagai intralayer. Kedua intralayer yang terdiri dari rantai dreierketten SiO_4 dan CaO_7 , dihubungkan oleh suatu lapisan yang mengandung air, kalsium, basa dan ion-ion lainnya yang kemudian disebut intralayer. Pada proses pelapisan geopolimer pada beton OPC yang membawa ion alumunium akan terjadi reaksi antara Al yang dibawa oleh geopolimer dengan C-S-H beton OPC. Saat Al masuk kedalam ikatan C-S-H, Al akan bereaksi dengan SiO_4 pada interlayer sehingga dapat menyambungkan intralayer menjadi satu reaksi baru yaitu C-(A)-S-H (L'Hôpital et al., 2015). Saat ikatan C-A-S-H bertemu dengan ion agresif misalnya sulfat, maka akan terjadi mekanisme dekalsifikasi dan dealuminasi yaitu pelemahan ikatan Ca dan rantai alumina menyebabkan terjadinya pengikatan ion sulfat dengan kalsium dan alumina (Yang et al., 2022). Fenomena tersebut memungkinkan adanya penjerapan ion agresif di lapisan C-A-S-H sehingga ion agresif tidak dapat menembus ke dalam ikatan C-S-H karena telah diserap oleh rantai alumina. Dengan adanya mekanisme tersebut menunjukkan bahwa penggunaan geopolimer sebagai pelapis beton OPC dapat memberikan perlindungan dari serangan ion agresif dari air laut karena kepadatan pada layer C-A-S-H.



Gambar 2. 17 Ilustrasi perubahan komposisi menjadi C-A-S-H (a). Rantai Dreierketten pada ikatan C-S-H, (b). Cross-linking dari masuknya Aluminium. (Geng et al., 2017)

Sebagai pelapis/*coating* pada beton konvensional dilingkungan agresif, geopolimer berupa mortar harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu. SNI 2847-2019 memberikan persyaratan durabilitas pada pasal 19. Ketentuan desain mengikuti kelas paparan yang dibagi menurut kondisi lingkungan yaitu kategori sulfat, kontak dengan air, dan proteksi tulangan dilihat dari sumber kloridanya. Pada penjelasan tabel 19.3.1.1, beton yang terpapar di air laut termasuk pada kategori sulfat S1, namun di beberapa perairan air laut mengalami pencemaran dengan kandungan sulfat SO_4^{2-} larut dalam air tinggi sehingga mortar didesain untuk kelas paparan S2 dan S3. Kategori kontak dengan air laut, mortar menghadapi kelas paparan W1 dan kelas paparan C2. Persyaratan campuran beton saat berada di kategori kelas paparan S2 dan S3 w/cm maks adalah 0,45 dengan fc' min 31 MPa, untuk kategori W1 w/cm maks adalah 0,5 dengan fc' min 28 MPa, untuk kategori C2 w/cm maks adalah 0,4 dengan fc' min 35 MPa (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Selain persyaratan tersebut, untuk menjadi material pelapis/*coating*, mortar harus memenuhi persyaratan uji kelecakan yaitu diameter mortar 150–190 mm (Lashkari et al., 2021).

Persyaratan pada uji kelecakan diperlukan untuk memastikan kemampuan diaplikasikan/*workability* dari mortar sehingga pada beberapa jenis *fly ash* yang memerlukan *superplasticizer* (SP) dan metode tertentu lainnya. Metode lain untuk dapat memenuhi kemampuan kerja/*workability* dari geopolimer adalah melalui *Self Compacting Geopolymer Mortar/SCGM*. SCGM dapat diperoleh melalui beberapa metode yaitu dengan menggunakan ukuran butiran baik pada agregat maupun pada binder dengan

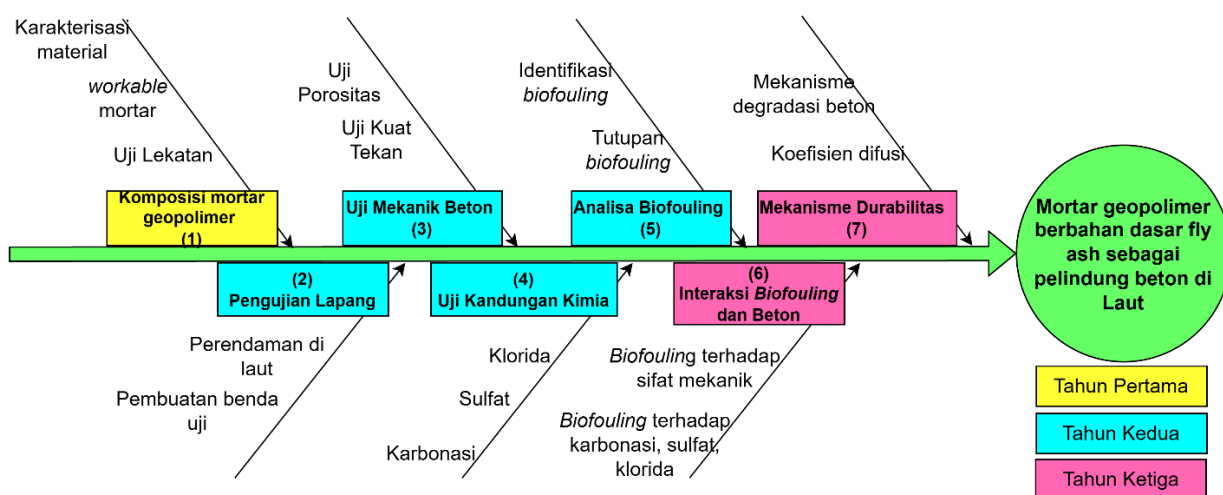
ukuran yang kecil. (Rahman & Al-Ameri, 2022) menggunakan *micro fly ash* yaitu *fly ash* dengan butiran lolos ayakan ukuran 45 μ m sebesar 99%. Penggunaan butiran yang lebih halus diharapkan dapat meningkatkan *fluidity* pada beton. Selain itu untuk meningkatkan *workability* diusulkan oleh Ghafoor et al., (2021) dengan penambahan air/*extra water*. Metode penambahan air pada geopolimer dilakukan setelah *fly ash* dan agregat halus dicampurkan dengan alkali aktivator dilanjutkan dengan menambahkan SP. Penambahan air sebagaimana pada penelitian Ghafoor et al., (2021) berpotensi mengurangi molaritas pada larutan NaOH yang berdampak pada proses geopolimerisasi sehingga terdapat alternatif untuk menambahkan semen sebagai pengikat air tambahan/*extra water*. Mix desain pada SCGC pada studi Purwanto et al., (2022) menambahkan semen, air, dan superplastisizer untuk meningkatkan workabilitas. Hal ini sejalan dengan penelitian Amini & Ekaputri, (2023) yang menambahkan semen pada *fly ash* secara *dry mix* kemudian dicampurkan dengan liquid yang terdiri dari alkali aktivator, air, dan SP. Penambahan semen bertujuan untuk mengikat tambahan air sehingga tidak mempengaruhi proses geopolimerisasi.

BAB 3

METODOLOGI

3.1. Gambaran Umum Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilaksanakan sesuai dengan metodologi yang terarah sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Tujuan penelitian ini utama nya adalah untuk menganalisa pengaruh mortar geopolimer berbahan *fly ash* sebagai pelindung beton di lingkungan laut terhadap serangan karbonasi, sulfat, klorida dan biota penempel. Terdapat tujuh tahapan utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan penjelasannya pada Tabel 3.1.



Gambar 3.1 Roadmap Kegiatan Penelitian

Tabel 3.1 Deskripsi Ringkas Kegiatan Penelitian

No.	Kegiatan	Deskripsi	Output
1	Komposisi mortar geopolimer	- Memproduksi <i>workable</i> mortar berbahan dasar <i>fly ash</i> sebagai /pelapis beton konvensional - Menganalisa kekuatan lekatan mortar geopolimer dengan beton konvensional	1. Paten 2. Publikasi tentang: Pengaruh kehalusan <i>fly ash</i> terhadap sifat mekanis dan konsentrasi klorida dan sulfat
2	Pengujian lapang	Memproduksi benda uji dan melakukan perendaman benda uji di laut Suramadu	
3	Uji mekanik beton	Menguji kemampuan mekanik beton konvensional dengan pelapis geopolimer	-

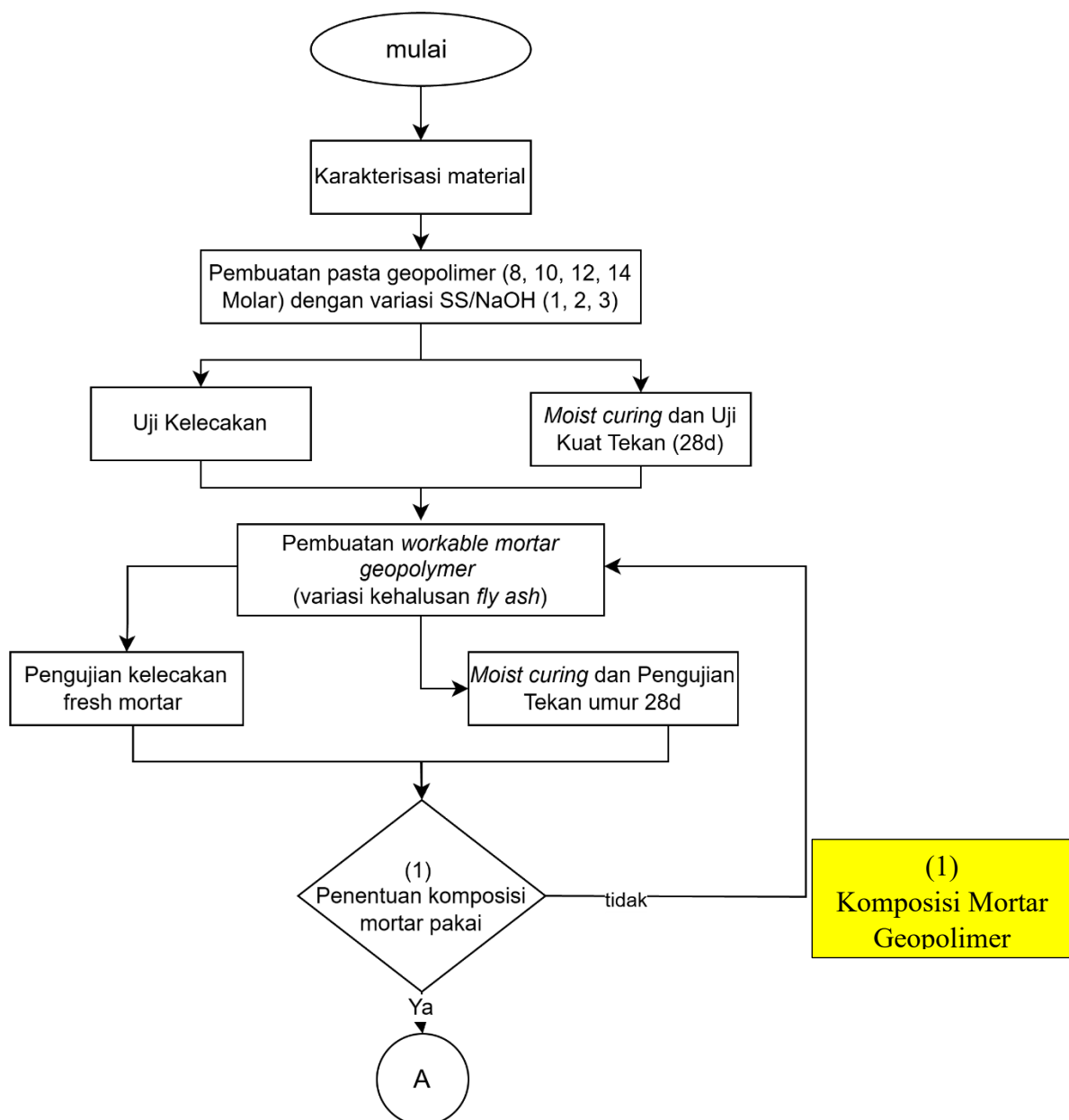
No.	Kegiatan	Deskripsi	Output
4	Uji kandungan kimia	- Menguji kandungan kimia pada beton konvensional dengan pelapis geopolimer - Mendapatkan <i>profiling</i> karbonasi, sulfat, dan klorida	-
5	Analisa <i>biofouling</i>	- Menganalisa prosentaseutupan <i>biofouling</i> - Mendapatkan jenis <i>biofouling</i> dengan identifikasi morfologi - Menganalisis penambahan berat akibat biomassa	3. Publikasi tentang: Analisautupan biota penempel
6	Interaksi <i>biofouling</i> dan beton	- Menganalisa dampak <i>biofouling</i> terhadap sifat mekanik - Menganalisa dampak <i>biofouling</i> terhadap karbonasi, sulfat, dan klorida	4. Publikasi tentang: Pengaruh <i>biofouling</i> terhadap kandungan karbonasi, sulfat, dan klorida
7	Mekanisme durabilitas	- Menganalisa mekanisme degradasi geopolimer - Mendapatkan koefisien difusi karbonasi, sulfat, dan klorida	5. Publikasi tentang: Mekanisme degradasi geopolimer di laut

Pada tahun pertama difokuskan untuk mendapatkan komposisi mortar geopolimer sebagai pelindung beton. Tahapan awal diperlukan karakterisasi material yang akan digunakan untuk penelitian selanjutnya. Pada tahap ini dilakukan pengujian laboratorium pada *fly ash* dari PT. Petrokimia Gresik dan dilanjutkan uji coba pada pasta serta mortar. Penentuan mortar yang digunakan sebagai pelindung harus memenuhi ketentuan uji kelecakan, uji mekanik, dan uji durabilitas mortar. Komposisi mortar yang telah didapatkan selanjutnya digunakan uji pada skala yang lebih besar pada tahun kedua.

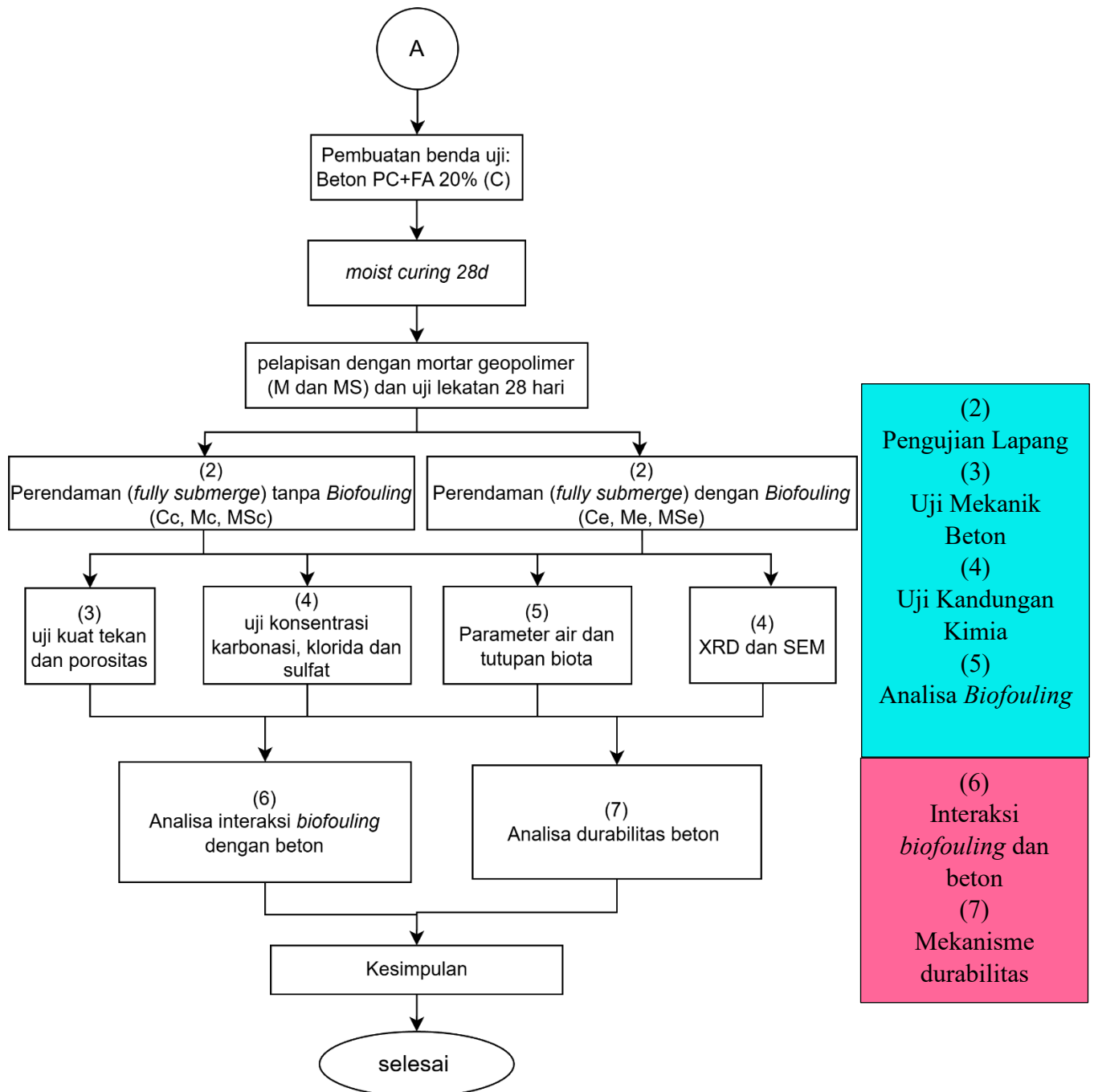
Pada tahun kedua mortar geopolimer di aplikasikan pada beton PC+*fly ash* 20% selanjutnya akan diuji lekatan nya. Pengujian berkala setiap bulan yang dilakukan antara lain sifat mekanik, konsentasi klorida dan sulfat serta biota penempel. Benda uji untuk perendaman dibuat dengan variasi *biofouling* menempel dan *biofouling* tidak bisa menempel. Proses perendaman serta pengambilan data dilakukan hingga total usia perendaman 1 tahun. Pada tahun ketiga dilakukan analisa terkait mekanisme degradasi geopolimer serta kedalaman karbonasi, infiltrasi sulfat dan klorida.

3.2. Tahapan Penelitian

Secara detail tahapan penelitian dilaksanakan mengikuti Gambar 3.2 dan Gambar 3.3. Tahun pertama kegiatan penelitian fokus pada komposisi mortar geopolimer yang akan digunakan sebagai *coating*. Sebelum menentukan komposisi yang akan digunakan material *fly ash* perlu diuji untuk mengetahui karakteristik mekanisnya terutama kuat tekan. Hal ini dikarenakan adanya persyaratan durabilitas pada beton kelas paparan C2 (terpapar langsung dengan klorida) minimal 35 MPa, sehingga diperlukan uji coba pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan molaritas tinggi sebagai acuan pembuatan mortar selanjutnya.



Gambar 3.2 Tahapan Penelitian Tahun Pertama



Gambar 3.3 Tahapan Penelitian Tahun Kedua dan Ketiga

3.3. Komposisi Mortar Geopolimer

3.3.1. Karakterisasi Material

Material mortar geopolimer yang digunakan antara lain *fly ash*, NaOH/Sodium Hidroksida (SH), Na₂SiO₃/Sodium Silikat (SS), Agregat halus (pasir), dan Semen.

i. *Fly ash*

Fly ash yang digunakan untuk membuat mortar geopolimer berasal dari PT. Petrokimia Gresik. Pengujian pada *fly ash* mengikuti ASTM C618-19 diantaranya uji komposisi kimia melalui XRF (*X-Ray Fluorescence*), uji kehalusan menggunakan ayakan no. 325, Berat Jenis, dan pH.

ii. NaOH/Sodium Hidroksida (SH)

Alkali aktivator yang digunakan adalah NaOH flake. NaOH dilarutkan dengan aquades mengikuti konsentrasi molaritas yang digunakan. Perhitungan untuk menghasilkan larutan NaOH sebagaimana persamaan 3.1.

$$n = V \times M \quad (3.1)$$

$$\text{massa NaOH} = n \text{ mol} \times Mr \quad (3.2)$$

dimana,

n = jumlah mol terlarut (mol)

V = volume larutan (liter)

M = kemolaran larutan (mol/liter)

massa NaOH = berat NaOH yang dibutuhkan (gram)

n mol = jumlah zat terlarut (mol)

Mr = massa relatif atom (gram/mol)

iii. Na₂SiO₃/Sodium Silikat (SS)

Sodium silikat/ Na₂SiO₃ yang digunakan merupakan tipe BE-52 dengan komposisi Na₂O = 15%, SiO₂ = 30%, dan H₂O = 55%. Sodium silikat akan dicampurkan dengan larutan NaOH untuk menjadi alkali aktivator.

iv. Agregat halus

Salah komposisi mortar geopolimer diperlukan agregat halus yaitu pasir yang didapatkan dari toko bangunan. Pengujian pasir sebagai agregat halus adalah:

- Pengujian berat jenis pasir (ASTM C128-01)
- Pengujian air resapan pasir (ASTM C128-01)

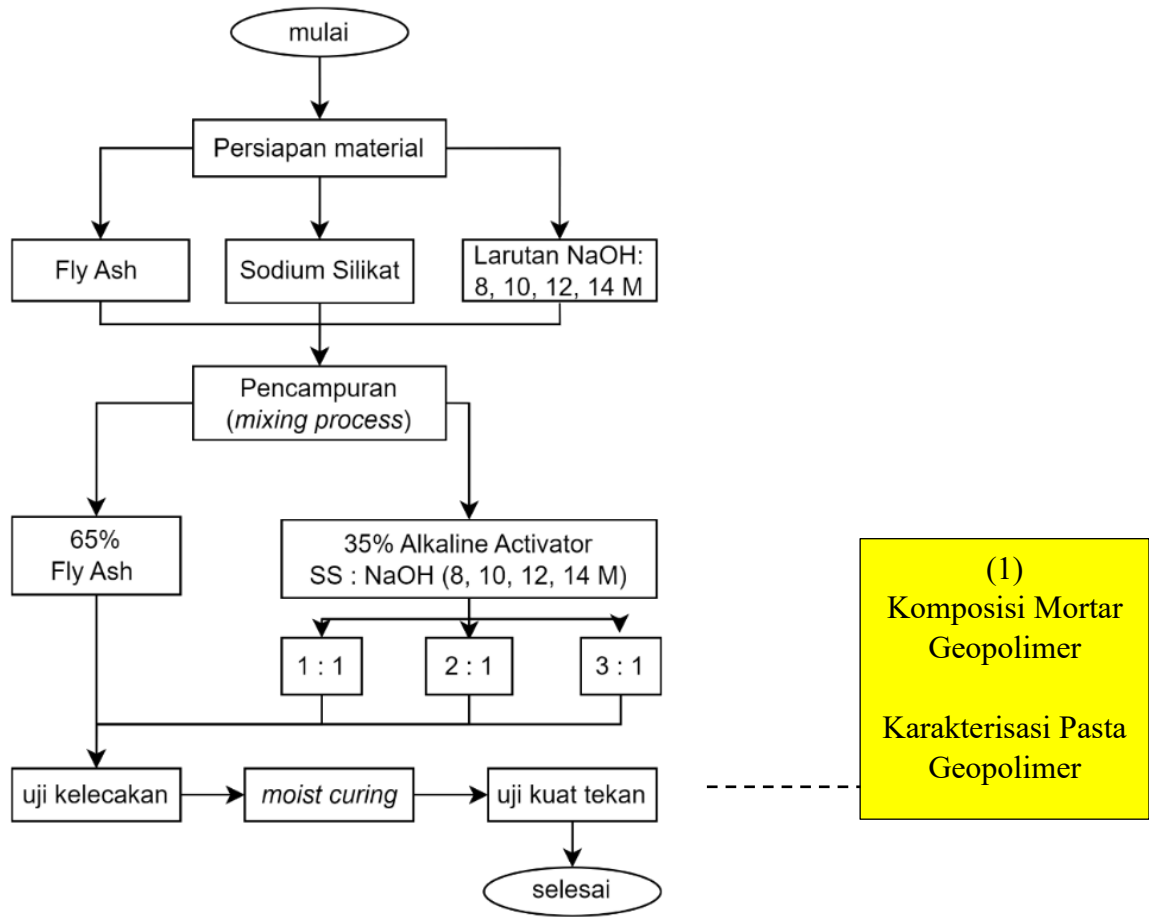
Sebelum digunakan sebagai agregat halus pada mortar pasir dicuci bersih dan dibuat dalam kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*). Kondisi SSD pada pasir diperoleh dengan merendam selama 24 jam kemudian dikeringkan dengan diangin-anginkan. Kondisi SSD pasir didapatkan saat kerucut terpancung diangkat, pasir yang runtuh masih berbentuk kerucut.

v. Semen

Semen yang digunakan adalah semen jenis PCC produksi Semen Gresik. Sebagai penambah/aditif binder pada pembuatan mortar geopolimer, semen OPC diayak dengan ayakan nomor 200.

3.3.2. Pasta Geopolimer

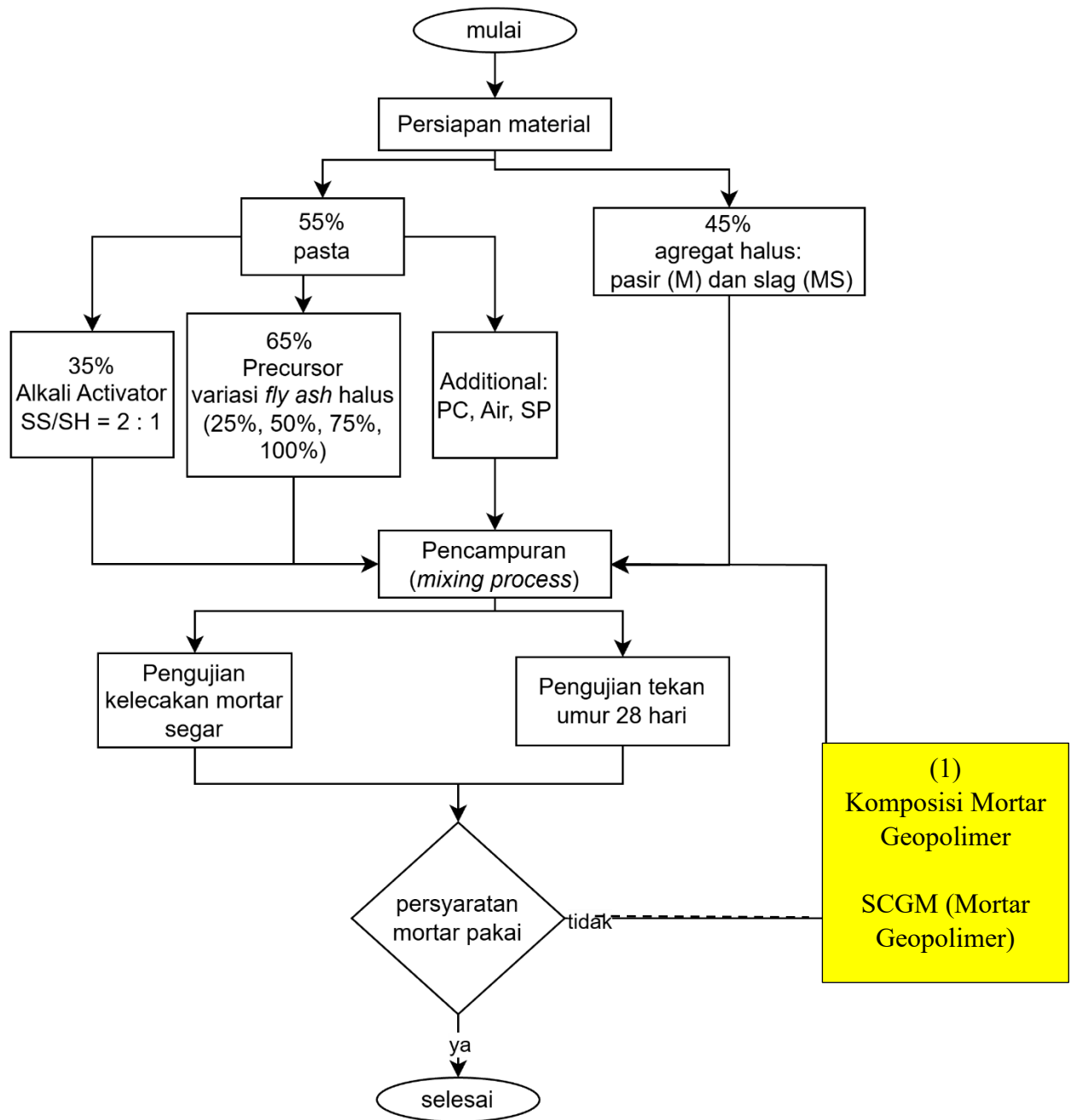
Komposisi mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* diawali dengan pengujian pasta. Pengujian pasta bertujuan untuk mengetahui *workability*/uji kelecakan, setting time, dan kuat tekan. Hal ini menjadi acuan untuk mendesain komposisi mortar yang sesuai dengan persyaratan. Mortar geopolimer di lingkungan agresif harus memenuhi persyaratan kuat tekan minimal 35 MPa yang dapat dicapai menggunakan molaritas yang tinggi untuk larutan NaOH. Ketersediaan Na^+ yang cukup akan membantu mengurai spesies Al^{3+} dan Si^{4+} pada *fly ash* sehingga karakterisasi pasta geopolimer dibuat sesuai dengan variasi pada Gambar 3.4. Variasi SS:NaOH berpengaruh terhadap rasio Si/Al, dengan menentukan rasio Si/Al yang tepat akan menentukan area struktur geopolimer. Saat jumlah spesies Al yang seimbang, akan cukup menarik spesies Si pada ikatan polimerisasi. Pada tahap ini pengujian pasta yang dilakukan adalah uji kelecakan pasta segar untuk mengetahui tingkat workabilitasnya dan uji kuat tekan.



Gambar 3.4 Tahapan pembuatan pasta geopolimer

3.3.3. Mortar Geopolimer

Selanjutnya hasil dari pengujian kelecakan dan pengujian kuat tekan pada pasta geopolimer akan dilanjutkan untuk menjadi komposisi mortar geopolimer yang memenuhi syarat *self compacting geopolimer mortar* (SCGM). Pemilihan menjadi SCGM adalah untuk dapat memenuhi kemampuan kerja/*workability* dari geopolimer sebagai *coating*. Tahapan pada pembuatan mortar geopolimer (SCGM) mengikuti Gambar 3.5. Pada tahap ini dilakukan uji kelecakan untuk mortar segar dan kuat tekan mortar umur 28 hari. Penggunaan *fly ash* halus dengan butiran lolos ayakan ukuran $45\mu\text{m}$ sebesar 99% melalui proses penghancuran menggunakan mesin *pulvarize* selama 10 menit sebagai precursor karena kemampuannya meningkatkan *fluidity* pada mortar. Penambahan air yang mungkin mengganggu proses polimerasi diikuti dengan menambahkan semen untuk mengikat air.



Gambar 3.5 Tahapan Pembuatan Mortar Geopolymer

Tabel 3.2 Variasi Benda Uji SCGM

Kode	<i>Fly ash</i>	<i>Fly ash</i> halus	Semen	Air	SP
	Precursor (%)		Additional (% berat precursor)		
G0	100	0	3	5	2
G25	75	25			
G50	50	50			
G75	25	75			
G100	0	100			

Pada tahapan ini akan ditentukan satu komposisi mortar pakai yang memenuhi persyaratan antara persyaratan uji kelecakan mortar ASTM C1437 dengan target diameter mortar $12 > D > 14$ cm dan persyaratan kuat tekan ASTM C109 dengan Target $f'_c > 35$ MPa. Setelah persyaratan kelecakan dan kuat tekan pada mortar geopolimer dengan fly ash halus tanpa slag didapatkan, selanjutnya menambah variasi dengan penambahan slag 10% dari berat prekursor sebagai substitusi agregat halus. Tahap selanjutnya melakukan uji porositas dan kuat lekat dengan slant shear test. Output pada tahapan ini adalah menganalisa pengaruh penambahan *fly ash* halus terhadap sifat dasar mortar geopolimer antara lain uji kelecakan, porositas, kuat tekan, serta kuat lekat. Analisa pada tahapan ini diambil satu komposisi penggunaan *fly ash* halus pada campuran mortar yang telah memenuhi persyaratan sebagai mortar geopolimer pelindung beton konvensional.

3.3.3.1. Uji Kelecakan (ASTM C1437)

Uji kelecakan mengikuti ASTM C1437 *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, bertujuan untuk mendapatkan kemampuan kerja mortar dari kemampuannya mengalir dalam kondisi tertentu, yang dapat mempengaruhi kemudahan pemasangan atau aplikasi. Pengujian dilakukan dengan *flow table* dengan cara menempatkan lapisan mortar dengan ketebalan sekitar 25 mm (1 inci) di dalam cetakan dan padatkan 20 kali dengan tamper. Penuhi isi cetakan kerucut dengan mortar dan padatkan seperti yang ditentukan untuk lapisan pertama. Potong mortar hingga rata dengan permukaan bagian atas cetakan dengan gerakan menggergaji melintasi bagian atas cetakan. Lap bagian atas meja hingga bersih dan kering, berhati-hatilah untuk menghilangkan air dari sekitar tepi cetakan aliran. Angkat cetakan dari mortar 1 menit dan segera mengetukkan meja sebanyak 25 kali dalam 15 detik. Catat diameter yang mortar yang terbentuk setelah 25 ketukan dengan perulangan 4 garis. Hasil diperoleh dengan menghitung peningkatan rata-rata aliran diameter mortar yang dinyatakan dalam persentase diameter dasar asli.

3.3.3.2. Uji Kuat Tekan Mortar (ASTM C109)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan mortar pada umur 3, 14, dan 28 hari mengikuti ASTM C109 *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. Pengetesan dilakukan pada setiap variasi dengan 6 buah benda uji ditiap variasi. Pengujian kuat

tekan akan didapatkan beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji dan dihitung kuat tekan mortar dengan menggunakan rumus 3.1

$$\sigma'_x = \frac{P}{A} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = \frac{P/A}{g} (MPa) \quad (3.1)$$

Dimana:

σ'_x = Kuat tekan hancur umur x hari, dalam MPa atau dalam kg/cm^2

P = Gaya yang ditunjukkan mesin pada saat pengetesan

A = Luas permukaan tekan dalam mm^2 atau cm^2

g = Percepatan gravitasi = 9.8 m/s^2

3.3.3.3. Uji Porositas (ASTM C642)

Pengujian porositas dikerjakan dengan tata cara mengikuti ASTM C642 - *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Mortar geopolimer dilakukan dengan spesimen dengan berat tidak boleh kurang dari 350 cm^3 (atau untuk beton dengan berat normal, kira-kira 800 g). Sampel yang diambil harus bebas dari retakan, retakan, atau pinggirannya yang pecah. Uji porositas mortar geopolimer dilakukan pada umur 28 hari dan setelah 35 hari uji rendaman. Porositas mortar yang didapatkan adalah porositas terbuka dan tertutup mengikuti rumus 3.2 sampai dengan 3.6.

$$\text{Kepadatan absolut } (\rho) = \frac{m_0}{v_0} \quad (3.2)$$

$$\text{Kepadatan visual } (\alpha) = \frac{M_0}{Mh - \mu} \quad (3.3)$$

$$\text{Porositas total } (\pi t) = 100 \times \left[1 - \frac{\alpha}{\rho} \right] \quad (3.4)$$

$$\text{Porositas terbuka } (\pi t) = 100 \times \left[\frac{Mh - M_0}{Mh - \mu} \right] \quad (3.5)$$

$$\text{Porositas tertutup } (\pi f) = \pi t - \pi_0 \quad (3.6)$$

Dimana,

m_0 = berat dalam keadaan halus

v_0 = volume dalam keadaan halus (volume air yang keluar)

M_0 = berat dalam keadaan kering oven

Mh = berat dalam keadaan SSD

μ = berat saat ditimbang dalam air

$Mh - \mu$ = volume yang tampak

3.3.3.4. Uji Lekatan Mortar Geopolimer dengan Beton Konvensional (*slant shear test*)

Pengujian lekatan dilakukan untuk mengetahui perilaku geser antarmuka beton konvensional dan mortar geopolimer yang dilakukan pada umur 28 hari setelah pelapisan dan 35 hari setelah uji rendaman. Pengujian *slant shear test* mengikuti ASTM C882 dengan membuat spesimen uji sebagaimana ilustrasi pada Gambar 3.6. Kuat lekatan antara beton konvensional dan mortar geopolimer dengan memberikan beban spesimen selanjutnya dicatat beban maksimum yang dapat diterima oleh spesimen dan dihitung mengikuti persamaan (3.8).

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (3.8)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2} \sigma_0 \sin 2\theta \quad (3.9)$$

$$\sigma_n = \sigma_0 \sin^2 \theta \quad (3.10)$$

Dimana:

τ_n = Kuat Tekan Geser (MPa)

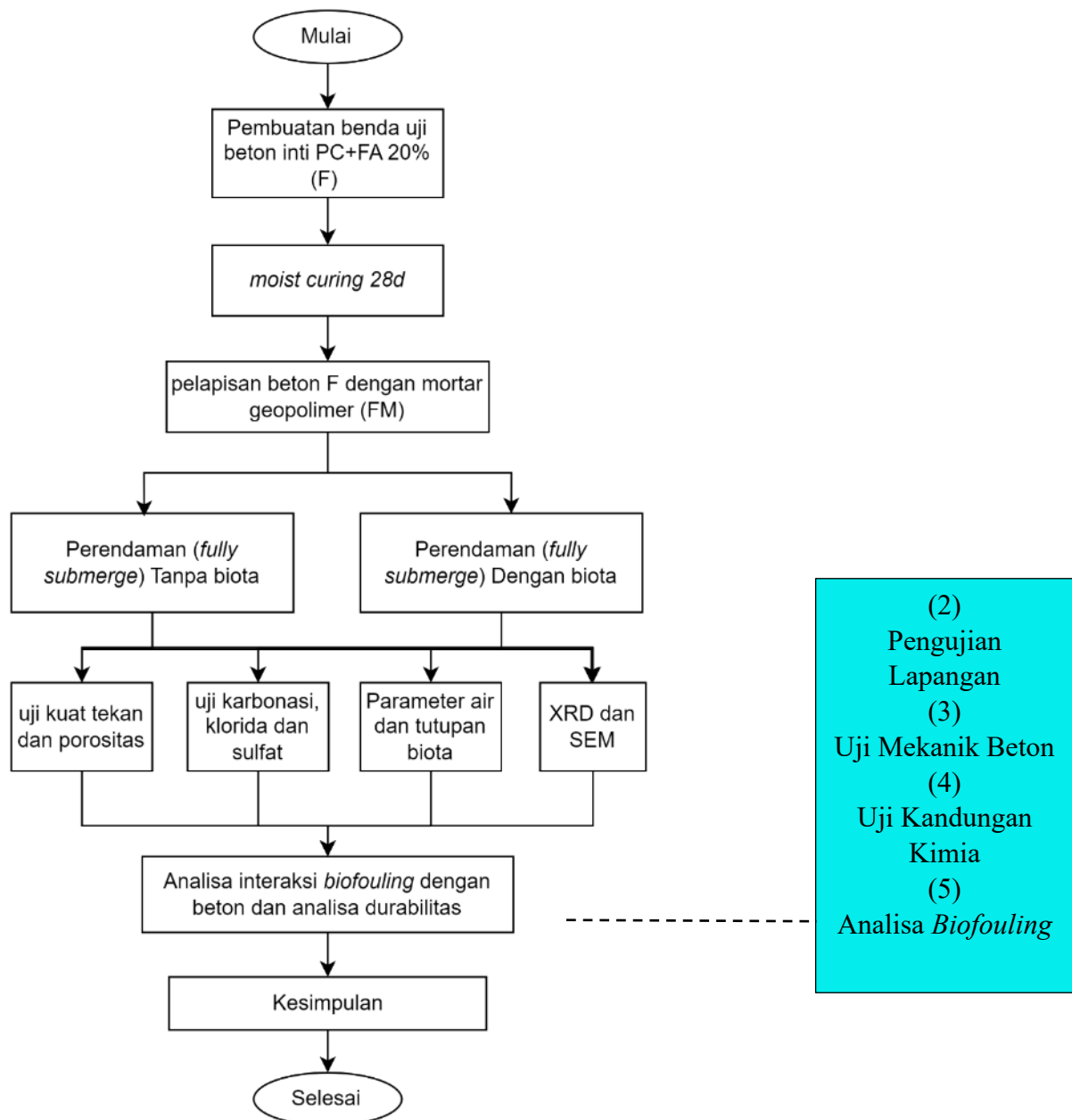
F = Gaya Tekan (N)

A_0 = Luas Permukaan (mm²)

θ = sudut potong

3.4. Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan dilakukan dalam dua tahap yaitu pembuatan benda uji dan perendaman benda uji seperti pada Gambar 3.7. Tahapan ini dibutuhkan untuk mendapatkan mekanisme durabilitas beton dengan pelindung mortar geopolimer dengan data yang didapatkan dari lingkungan agresif sesungguhnya sehingga diharapkan hasil yang diperoleh mewakili kondisi sebenarnya di lapangan.



Gambar 3.6 Tahapan Pengujian Lapang

3.4.1. Pembuatan Benda Uji

Benda uji untuk penelitian memahami durabilitas beton di laut dibuat dengan membandingkan hasil pengujian pada beton semen dengan tambahan *fly ash* 20% (C) dengan beton C yang dilapisi mortar geopolimer berbahan *fly ash* halus tanpa *slag* (M) dan mortar geopolimer berbahan *fly ash* halus dengan *slag* (MS). Pada tahapan memahami dampak biota penempel terhadap durabilitas pengujian dilakukan dengan memvariasikan benda uji dengan *biofouling* dan tanpa *biofouling*. Variasi benda uji dapat dilihat pada Tabel 3.3 dengan kebutuhan benda uji untuk memenuhi umur 12 bulan atau satu tahun perendaman di laut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Variasi Benda Uji Beton dengan Pelapis Mortar Geopolimer

Kode	Uraian	Keterangan
Cc	Beton PC+FA(20%) dengan <i>biofouling</i>	Benda uji di-coating dan terpapar sisi atas <i>Biofouling</i> bebas menempel
Mc	Beton C dengan pelindung mortar geopolimer tanpa <i>slag</i> tebal 5 cm dengan <i>biofouling</i>	
MSc	Beton C dengan pelindung mortar geopolimer dengan <i>slag</i> tebal 5 cm dengan <i>biofouling</i>	
Ce	Beton PC+FA(20%) tanpa <i>biofouling</i>	Benda uji dicoating dan terpapar sisi atas <i>Biofouling</i> terhalang menempel dengan memasukkan sampel ke dalam kantong kain yang diganti secara periodik
Me	Beton C dengan pelindung mortar geopolimer tanpa <i>slag</i> tebal 5 cm tanpa <i>biofouling</i>	
MSe	Beton C dengan pelindung mortar geopolimer dengan <i>slag</i> tebal 5 cm tanpa <i>biofouling</i>	

Tabel 3.4 Kebutuhan Benda Uji Beton dengan Pelapis Mortar Geopolimer

Kode	Pengujian					Total
	kuat tekan	Porositas	Klorida dan sulfat	Karbonasi	Tutupan <i>biofouling</i>	
	Silinder ukuran 10 x 20 cm ³				Kubus 15x15x15 cm ³	
Cc	5	1	2	1	3	15
Mc	5	1	2	1	3	15
MSc	5	1	2	1	-	12
Ce	5	1	2	1	-	12
Me	5	1	2	1	-	12
MSe	5	1	2	1	-	12
Total 1 umur	30	6	12	6	6	60
Jumlah umur pengujian	12	12	12	6	1	-
Total	360	72	144	36	6	618

- Benda Uji Beton (C)

Beton pada penelitian ini dibuat dengan substitusi *fly ash* sebesar 20%. Beton dibuat dengan campuran semen, *fly ash*, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan kuat tekan rencana 35 MPa dan rasio *w/cm* adalah 0,40 sehingga didapatkan komposisi beton untuk 1 m³ pada Tabel 3.5. Ilustrasi benda uji ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Beton dibuat dengan tiga ukuran yaitu

- i. Silinder dengan diameter 5 cm dan tinggi 10 cm. Benda uji ini digunakan sebagai beton inti bagian dalam benda uji untuk ditambahkan *coating*/pelapis mortar geopolimer.
- ii. Silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm.
- iii. Kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm³. Benda uji ini digunakan untuk mengambil datautupan *biofouling*.

Tabel 3.5 Komposisi Campuran Beton per m³

Agregat Kasar	Agregat Halus	<i>Fly ash</i>	Semen	Air	satuan
796,46	666,67	115,71	462,86	243	Kg

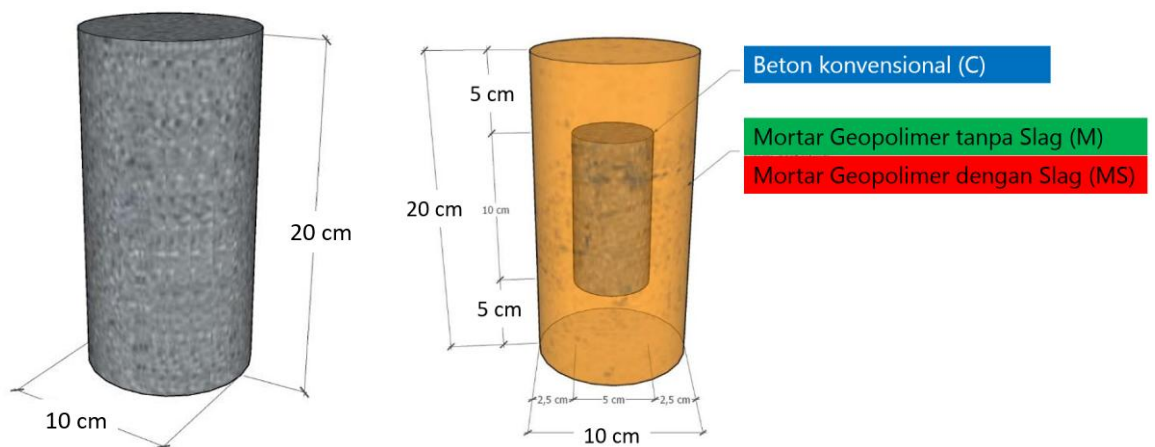
- Benda Uji Beton (M dan MS)

Benda uji beton (M dan MS) adalah benda uji beton C yang dilapisi dengan mortar geopolimer seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Pelapisan beton C dengan mortar geopolimer dilakukan setelah 28 hari. Komposisi mortar yang digunakan adalah mortar terpilih (M) hasil *trial*/ uji coba dengan variasi penggunaan *fly ash* halus sebagaimana disebutkan pada tabel 3.2 dengan tahapan pada Gambar 3.8. Benda uji beton M dan MS dibuat dalam cetakan silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Benda uji ini dibuat dengan melapiskan mortar geopolimer terpilih dengan ketebalan 5 cm.

Pembuatan spesimen beton berlapis mortar geopolimer dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

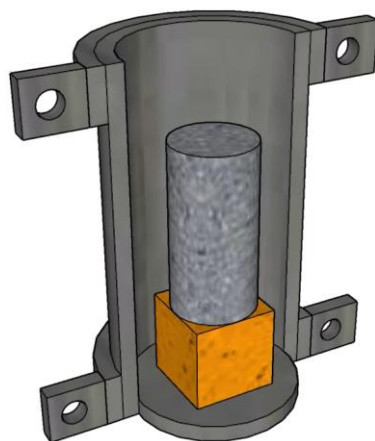
1. Persiapan cetakan silinder yang bagian dalamnya dilapisi menggunakan lembaran plastik mika untuk mempermudah proses *demoulding* serta menghasilkan permukaan spesimen yang lebih baik.
2. Persiapkan batang baja berdiameter kecil yang digunakan sebagai alat pemadat (*rodding*) untuk membantu mengeluarkan udara yang terperangkap selama proses pengecoran.

3. Selanjutnya benda uji geopolimer berbentuk kubus (umur 1 hari) ditempatkan pada bagian tengah dasar cetakan silinder sebagai acuan posisi selama proses pengecoran.
4. Mortar geopolimer disiapkan melalui proses pencampuran secara bertahap. Tahap pertama dilakukan dengan mencampurkan *fly ash* asli dan *fly ash* halus dalam kondisi kering hingga tercampur secara homogen. Setelah itu, larutan natrium hidroksida (NaOH) ditambahkan dan diaduk hingga seluruh partikel *fly ash* terbasahi secara merata. Hal ini dimaksudkan untuk melarutkan/memecah kandungan silika dan alumina pada *fly ash*. Selanjutnya, larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dimasukkan dan proses pengadukan hingga campuran menjadi homogen. Pada tahap berikutnya ditambahkan campuran semen, air, dan *superplasticizer* lalu campuran diaduk hingga tercampur sempurna. Setelah pasta terbentuk, pasir dimasukkan secara bertahap hingga diperoleh mortar yang homogen. Untuk variasi mortar geopolimer dengan slag, ditambahkan pada tahap terakhir pencampuran untuk memastikan distribusi material yang seragam sebelum proses pengecoran.
5. Proses pengecoran dilakukan dengan menuangkan mortar geopolimer ke dalam cetakan hingga hampir mencapai elevasi mortar kubus sebagai alas pelapis dan dirojok sampai rata memenuhi ruang. Selanjutnya, beton silinder sebagai beton inti ditempatkan di atas mortar kubus. Setelah posisi beton inti dipastikan berada di tengah cetakan, mortar geopolimer kembali dituangkan hingga 2/3 bagian kosong dan dirojok hingga rata. Lapisan akhir dipenuhi untuk seluruh volume cetakan sehingga seluruh permukaan beton inti tertutup oleh lapisan mortar geopolimer.
6. Selama proses pengecoran untuk memastikan pemadatan maksimal juga digunakan meja getar serta pemadatan manual (*rodding*) untuk mengurangi terbentuknya rongga udara dan memastikan kontak yang baik antara mortar geopolimer dan beton inti. Hal ini dikarenakan setting time mortar yang relatif cepat sehingga bantuan meja getar diperlukan untuk mengejar waktu pencetakan. Setelah cetakan terisi penuh, permukaan spesimen diratakan dan dibiarkan hingga mencapai kondisi awal pengerasan sebelum dilakukan proses *curing*.
7. *Curing*/perawatan dilakukan dengan metode *moist curing*/lembab dengan membungkus sampel dengan kain basah dan selanjutnya ditutup dengan plastik.



(a) Beton PC+FA 20% (C)

(b) Beton F dengan pelindung geopolimer tebal 5 cm (M dan MS)



(c) Ilustrasi pembuatan sampel M dan MS

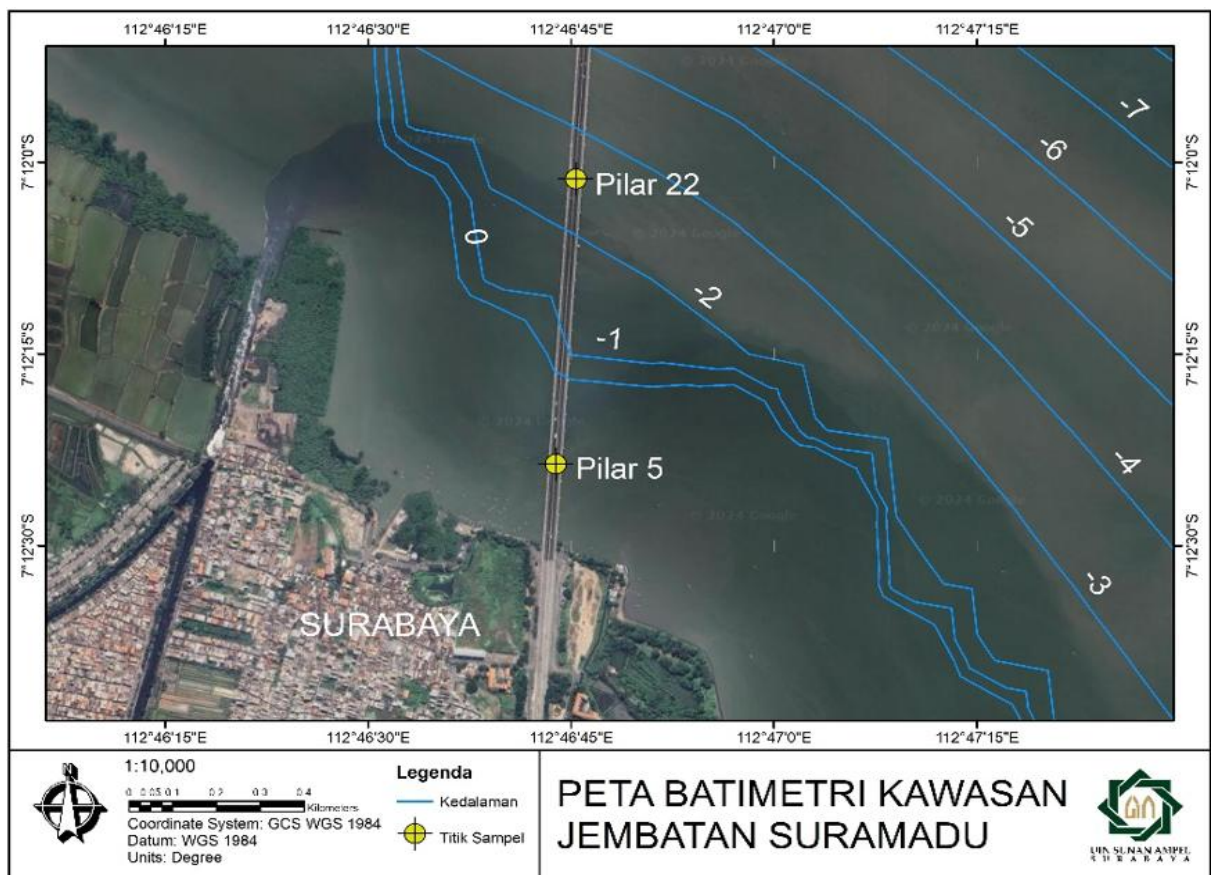
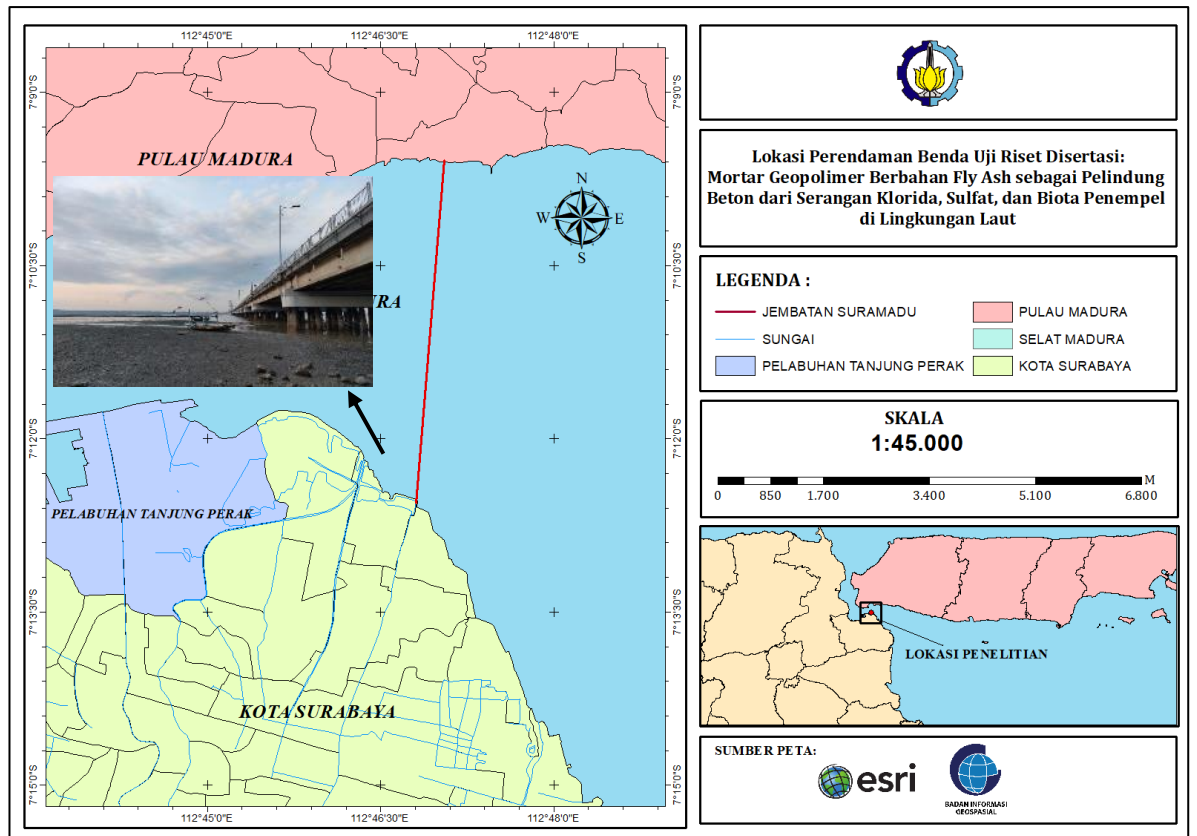


(d) Sampel M dan MS saat dibelah

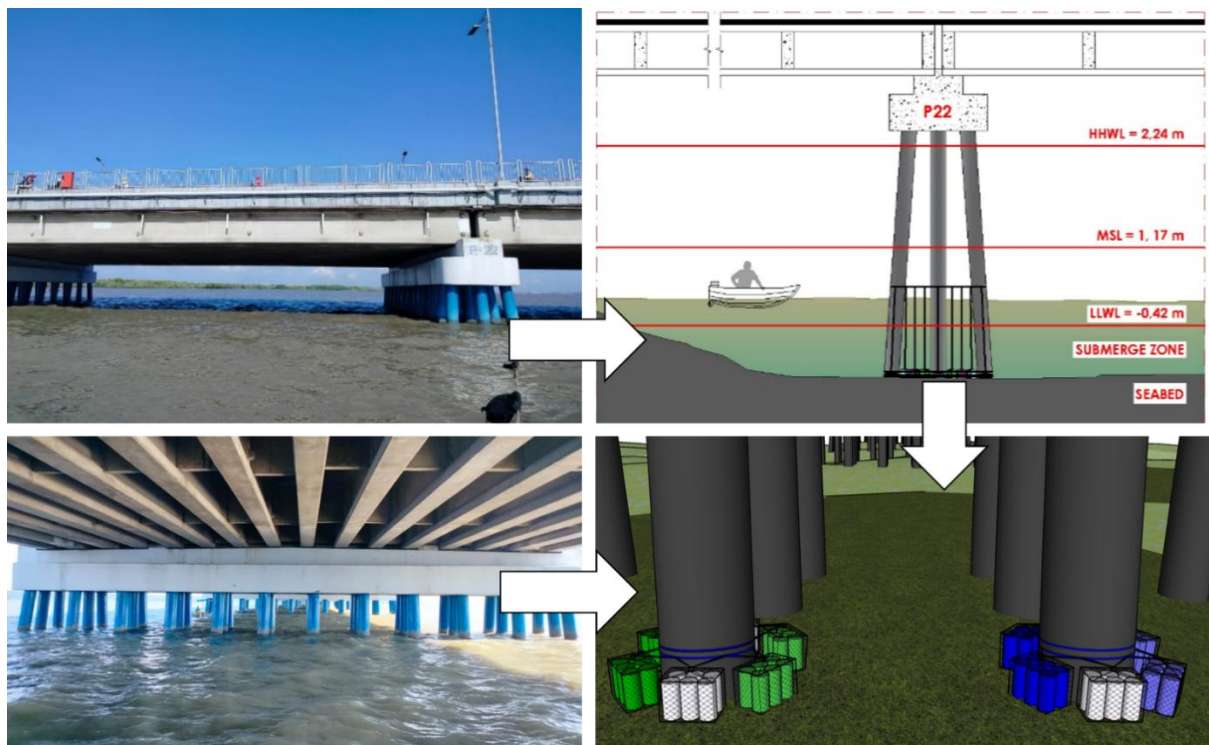
Gambar 3.7 Ilustrasi Benda Uji

3.4.2. Perendaman Benda Uji

Pengujian durability beton dan mortar geopolimer dilakukan di perairan jembatan suramadu pada zona terendam sepanjang hari (*fully submerge*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8 dan Gambar 3.9. Benda uji ditenggelamkan di perairan Selat Madura tepatnya di bawah jembatan suramadu di zona terendam dengan variasi C, M, dan MS dengan *biofouling* dan tanpa *biofouling* seperti dicontohkan pada Gambar 3.10. Semua benda uji dianalisa dan diambil datanya minimal sebulan sekali untuk dilakukan pengujian. Pada sampel tanpa *biofouling* beton dibungkus dengan kain strimin dengan pola yang masih memungkinkan air laut masuk dan berinteraksi dengan beton.



Gambar 3.8 Lokasi perendaman benda uji



Gambar 3.9 Ilustrasi Perendaman Benda Uji Pada Zona Terendam (*Fully Submerge*)



(a) Persiapan Sampel untuk ditenggelamkan



(b) Sampel ditutup kain untuk variasi tanpa *biofouling*



(c) Sampel yang dilapisi *sikagard* dengan *biofouling*



(d) Sampel yang dilapisi *sikagard* tanpa *biofouling*

Gambar 3.10 Persiapan Benda Uji Sebelum Penenggelaman

3.4.3. Pengujian Sampel

3.4.3.1. Uji kuat tekan beton (ASTM C39)

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai dengan ASTM C39 dengan benda uji silinder. Pengujian dilakukan setelah benda uji silinder direndam pada perairan suramadu dengan periode pengambilan data pada lama perendaman 30, 60, 150, 240, dan 360 hari. Sebelum pengujian kuat tekan benda uji didiamkan pada suhu ruangan minimal 48 jam untuk membuang kelebihan air seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10. Benda uji ditekan dengan pembebanan $1.5\text{--}3.5 \text{ kg/cm}^2/\text{detik}$ sesuai dengan ketentuan ASTM. Kuat tekan beton didapatkan dengan membagi antara beban yang diterima dengan luas area beton tersebut.



(a) Sampel Beton yang Baru Diangkat



(b) Sampel Uji Tekan Kondisi Basah



(c) Sampel Uji Tekan Kondisi Kering

Gambar 3.11 Sampel Uji Tekan

3.4.3.2. Uji porositas (ASTM C642)

Pengujian porositas dilakukan dengan spesimen yang dipotong-potong dari sampel beton untuk memastikan tidak ada retakan atau pinggirannya yang pecah. Pengujian porositas masing-masing variasi dilakukan sebanyak 3 perulangan dan menghasilkan

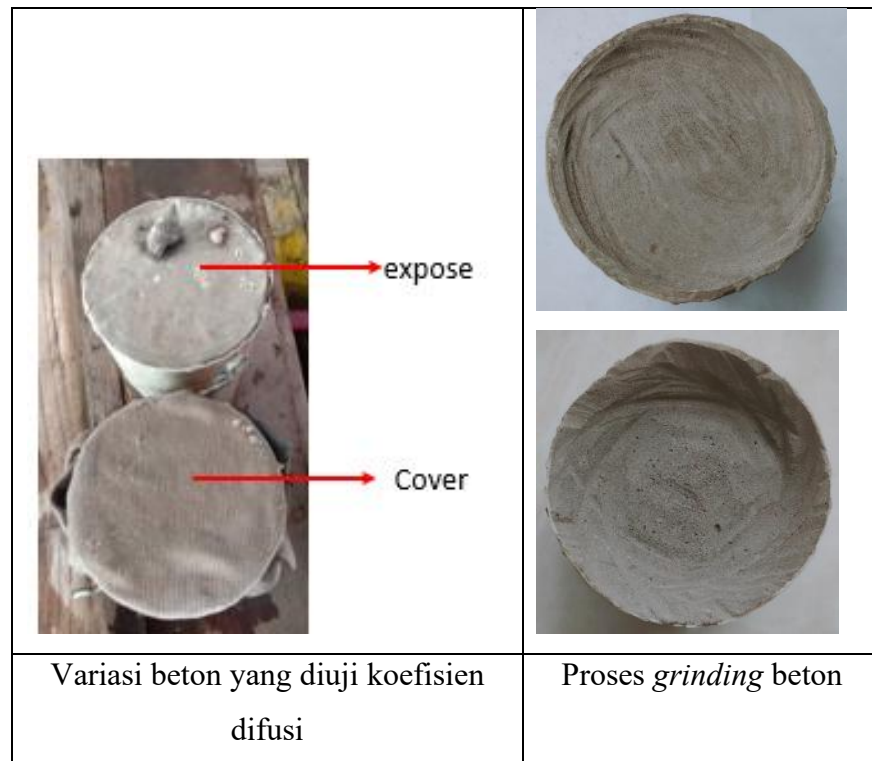
rata-rata porositas terbuka, porositas tertutup, dan porositas total. Pengujian porositas dilakukan pada sampel dengan umur perendaman 189 hari dan 350 hari.

3.4.3.3. Pengujian Kandungan Kimia

Profil klorida dan sulfat diukur segera setelah pemaparan dengan menggiling material dalam lapisan yang sejajar dengan permukaan yang terpapar. Penggilingan dilakukan pada sisi dalam dengan diameter kira-kira 10 mm lebih kecil dari diameter total sehingga area penggilingan maksimal pada diameter 8 cm. Hal ini bertujuan untuk menghindari risiko efek tepi dan gangguan pada lapisan. Penggilingan dilakukan pada setiap lapisan dengan pada titik dari sisi paling luar secara tegak lurus terpapar air laut sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.6 dan proses penggilingan pada Gambar 3.12.

Tabel 3.6 Kedalaman Lapisan Penggilingan

Lapisan ke	Kedalaman (mm)	Pengujian
1	0 – 1	Klorida, Sulfat, Karbonasi
2	1 – 3	Klorida
3	3 – 5	Klorida
4	5 – 7	Klorida
5	7 – 10	Klorida
6	10 – 13	Klorida, Sulfat, Karbonasi
7	13 – 16	Klorida
8	16 – 20	Klorida
9	22 – 25	Klorida, Sulfat, Karbonasi
10	52 – 55	Klorida, Sulfat, Karbonasi



Gambar 3.12 Penyiapan Sampel Uji Kimia

1. Uji konsentrasi klorida pada beton (ASTM C1152)

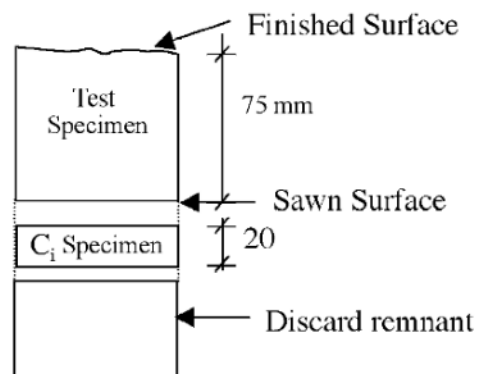
Kadar klorida harus diuji mengikuti ASTM C1152/C1152M–04 *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete* (American Society for Testing and Materials, 2012). Pengujian titrasi argentometri dilakukan untuk mengetahui kadar klorida pada beton. Konsentrasi dari klorida diketahui melalui proses titrasi dengan menggunakan perak nitrat (AgNO_3). Kadar zat dalam larutan tertentu ditentukan dengan melihat proses titrasi pengendapan atau terbentuknya endapan ion perak. Hal ini dilakukan untuk melihat hubungan anantara pertambahan jumlah klorida dan waktu pengujian. Argentometri merupakan salah satu cara untuk menentukan kadar zat dalam suatu larutan yang dilakukan dengan titrasi berdasarkan pada pembentukan endapan dengan ion Ag^+ .

Output dari pengujian kadar klorida adalah untuk mendapatkan grafik profil penetrasi klorida dari lapisan terluar mortar geopolimer yang langsung terpapar air laut hingga bagian beton inti. Profil penetrasi klorida dilihat dari konsentrasi klorida bebas pada beton dan total klorida pada beton dalam % massa. Hal ini bertujuan untuk mengetahui sampai kedalaman berapa klorida bebas masuk ke dalam beton apakah klorida masuk hingga kedalam beton inti serta mengetahui pada kedalaman berapa

klorida beton berada pada kadar batas yang disyaratkan (CI terlarut maksimal 0,15% terhadap masa semen).

2. Koefisien Difusi (ASTM C1556)

Perhitungan koefisien difusi dilakukan pada variasi benda uji dengan asumsi one dimensional diffusion yaitu hanya satu sisi permukaan yang terpapar klorida dengan waktu perendaman paling sedikit 35 hari seperti yang diatur pada ASTM C1556 *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. Sampel direndam dalam larutan NaCl dengan konsentrasi 165gram perliter dan ditutup rapat hingga tidak terjadi penguapan. Sampel di *coating* diseluruh permukaan dengan menyisakan satu bagian permukaan yang akan terpapar langsung oleh klorida. Setelah pemaparan minimal 35 hari spesimen dipotong sebanyak delapan lapisan dan dibuat serbuk dengan minimal sampel 10 gram setiap lapis sebagaimana ilustrasi pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 1. Aturan pengambilan sampel pada ASTM C1556

Nilai Koefisien difusi (D_a) didapatkan dengan rumus pada persamaan 3.8.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_e t}} \right) \quad (3.8)$$

Dimana:

$C(x, t)$ = konsentrasi klorida, pada kedalaman x dan waktu pemaparan t dalam % massa

C_s = proyeksi konsentrasi klorida pada antarmuka antara cairan pemaparan dan benda uji yang ditentukan oleh analisis regresi dalam % massa

C_i = konsentrasi ion klorida awal dari campuran semen sebelum direndam dalam larutan pemaparan dalam % massa

- x = kedalaman di bawah permukaan terbuka (sampai pertengahan lapisan) dalam meter
- De = koefisien difusi klorida semu dalam m^2/dtk
- t = waktu pemaparan dalam detik
- erf* = fungsi kesalahan

3. Uji konsentrasi sulfat pada beton (ASTM C114-09)

Menurut ASTM C114-09 untuk mendapatkan kadar sulfat setiap layer dapat dilakukan dengan uji spektrofotometri. Pada uji spektrofotometri diperlukan reagen sebagai larutan standar serta sampel yang telah dilarutkan. Kadar sulfat didapat dengan menembakkan gelombang dengan panjang gelombang tertentu. Output dari pengujian kadar sulfat adalah untuk mendapatkan grafik profil penetrasi klorida dari lapisan terluar mortar geopolimer yang langsung terpapar air laut hingga bagian beton inti. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah sulfat masuk hingga kedalam beton inti

4. Uji kedalaman karbonasi pada beton

Uji kedalaman karbonasi pada beton dilakukan dengan uji pH level menggunakan fenolftalein. Pengujian dengan indikator fenolftalein 1% dilakukan dengan memecah silinder kemudia pada permukaan dalam yang pecah disemprotkan indikator fenolftalein. Perubahan warna yang muncul pada beton mengindikasikan karbonasi pada beton. Karbonasi yaitu kandungan CO_2 yang tinggi ditandai dengan pH yang rendah pada beton, sebaliknya CO_2 yang rendah ditandai dengan pH tinggi pada beton. Beton akan menghasilkan warna merah jambu pada area permukaan yang pH larutan porinya lebih tinggi dari sekitar pH 9 (tidak terjadi karbonasi), sedangkan area yang pH larutan porinya lebih rendah dari pH 9 tidak berubah warna (terjadi karbonasi). Output dari pengujian ini adalah ketebalan karbonasi yang diukur dari permukaan terluar terpapar air laut. Uji karbonasi pada beton juga dilakukan dengan melihat kadar karbonat bikarbonat yang diuji menggunakan titrasi asidi-alkalimetri.

3.4.3.4. Analisa *Biofouling*

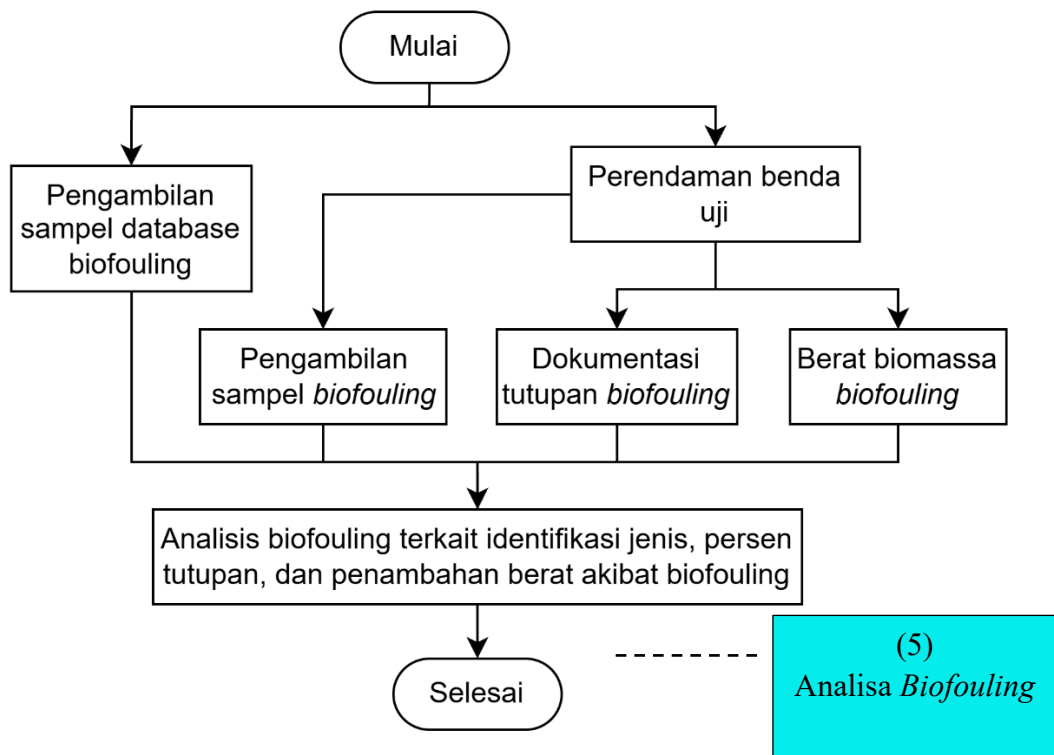
1. Parameter perairan

Pengukuran pH, salinitas, dan suhu menggunakan alat CTD (*Conductivity Temperature Depth*). Nilai kecerahan perairan diambil menggunakan secchi disc. Data padatan tersuspensi (TSS/Total Suspended Solid) dengan metode gravimetri.

Pengambilan data perairan dilakukan satu bulan sekali. Konsentrasi klorida bebas dan sulfat bebas air laut 6 bulan sekali.

2. Identifikasi dan tutupan biota penempel

Biofouling kemungkinan besar yang menempel pada permukaan geopolimer berbeda dengan pada permukaan beton konvensional. Mekanisme terbentuknya *fouling* mulai dari skala mikro sampai makro dianalisa dengan menggunakan identifikasi morfologi. Data terkait biota penempel diambil dengan tahapan sebagaimana Gambar 3.12.



Gambar 3.13 Pengambilan Data *Biofouling*

a. Database *biofouling*.

Sebagai *database*, diperlukan data *biofouling* yang menempel di infrastruktur sekitar lokasi penelitian. Pada penelitian ini yang akan diambil sampel nya adalah yang menempel pada tiang pancang jembatan suramadu. Sampel biota penempel diambil secara manual dan segera dimasukkan ke dalam botol sampel dan dilakukan dokumentasi serta diidentifikasi dari morfologi yang dibandingkan dengan referensi.

b. Pengambilan sampel *biofouling* pada beton kubus.

1. Data *micro-fouling*

Pada awal penempelan substrat beton akan ditemplei dulu oleh bakteri biofilm. Pada tahap ini akan diambil data jumlah koloni bakteri *biofouling* (CFU/mL) secara berkala dengan pengamatan hari ke 5, 10, 15 dan 20 yang didapatkan dengan metode kultur dan *counting* bakteri. Pengamatan bakteri biofilm menggunakan spesimen mortar dengan ukuran 5x5x5 cm³ dengan variasi mortar geopolimer (M) dan beton PC+20%FA (C).

Spesimen mortar yang diambil dari laut dimasukkan ke botol berisi air laut steril hingga terendam penuh kemudian dimasukkan ke ultrasonic bath untuk melepaskan bakteri yang menempel pada mortar ke air laut. Air laut yang mengandung bakteri biofilm dituangkan ke media kultur marine agar dan di inkubasi hingga 73 jam kemudian dihitung jumlah koloni bakterinya. Output dari tahap ini adalah jumlah koloni bakteri per mL (*Colony-forming units per mili liter*/CFU/ mL). Selain itu juga dilakukan identifikasi bentuk dan pewarnaan gram jenis bakteri biofilm.

2. Data *macro-fouling*

Spesies biota penempel diambil secara manual dari sampel. Pengambilan sampel dilakukan setiap bulan hingga satu tahun untuk mendapatkan perbedaan jenis biota penempel berdasarkan umur penenggelaman sampel. Individu biota penempel yang telah diambil segera dimasukkan kedalam botol berisi ethanol >90% hingga semua terendam dan disimpan pada lemari pendingin. Identifikasi *macro-fouling* untuk mendapatkan jenis spesies biota penempel dengan metode identifikasi morfologi.

3. Data tutupan biota penempel

Data tutupan biota penempel diambil dengan dokumentasi sampel pada benda uji kubus. Pengambilan dokumentasi dilakukan pada umur perendaman 10, 20, 30, 41, 51, 60, 71, 80, 90, 100, 111, 127, 142, 175, 217, 245, 287, 322, and 357 hari lima permukaan kubus. Pengambilan foto menggunakan kamera DSLR dengan kualitas foto dengan resolusi tinggi. Hasil foto kemudian diolah menggunakan software imageJ sehingga didapatkan perbedaan warna pada substrat yang tertempeli dan tidak. Perbedaan warna yang muncul akan didapatkan prosentase tutupan biota penempel pada permukaan substrat. Output

dari tahapan ini adalah grafik prosentaseutupan secara berkala (*time series*) dari umur 1 sampai dengan 360 hari perendaman.

3.5. Interaksi *biofouling* dan beton

3.5.1 Analisa dampak *biofouling* terhadap sifat mekanik

Pada tahapan ini output yang dihasilkan adalah analisa terkait interaksi biota penempel dan sifat mekanis beton. Analisa dilakukan terhadap:

1. Perubahan kuat tekan beton terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel;
2. Perubahan porositas beton terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel.

3.5.2 Analisa dampak *biofouling* terhadap karbonasi, sulfat, dan klorida

Pada tahapan ini output yang dihasilkan adalah analisa terkait interaksi biota penempel dan kandungan kimia pada beton. Analisa dilakukan terhadap:

1. Perubahan kedalaman karbonasi terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel;
2. Perubahan konsentasi sulfat terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel;
3. Perubahan konsentasi klorida bebas terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel;
4. Perubahan konsentasi total klorida terhadap umur perendaman pada variasi beton dengan biota penempel dan tanpa biota penempel.

3.6. Mekanisme durabilitas

3.6.1 Analisa mekanisme degradasi geopolimer

Pada tahapan ini analisa terkait durabilitas beton geopolimer akan didapatkan dari perilaku geopolimer dalam menghadapi serangan karbonasi, sulfat, klorida serta biota penempel. Output dari tahapan ini adalah hasil dari pengujian sebelumnya terkait profil karbonasi, sulfat, dan klorida akan diperoleh perilaku *blocking* ion agresif pada lapisan mortar sehingga akan diperoleh manakah faktor dominan yang menentukan degradasi pada beton dan mortar geopolimer. Analisa ini didukung dengan pengujian XRD dan SEM pada masing-masing bagian beton C dan M. Uji XRD dan SEM akan didapatkan mineral yang terbentuk pada spesimen pada umur perendaman 1 tahun.

3.6.2 Mendapatkan koefisien difusi klorida

Pada tahapan ini akan dilakukan perhitungan koefisien difusi klorida menggunakan persamaan 2.3. Koefisien difusi klorida dihitung untuk data usia perendaman 40, 189, dan 350 hari pada beton C, M, dan MS.

3.7. Kesimpulan

Pada tahapan ini akan disimpulkan hasil temuan antara lain:

1. Komposisi mortar geopolimer sebagai pelapis beton konvensional di laut.
2. Mekanisme pertumbuhan *biofouling* pada permukaan beton konvensional maupun mortar geopolimer di laut pada zona terendam.
3. Pengaruh mortar geopolimer terhadap sifat mekanik, profil penetrasi klorida dan sulfat, kedalaman karbonasi pada beton di laut pada zona terendam.
4. Pengaruh biota penempel terhadap sifat mekanik, profil penetrasi klorida dan sulfat, serta kedalaman karbonasi pada beton yang dilapisi mortar geopolimer di laut pada zona terendam.
5. Mendapatkan koefisien difusi klorida pada mortar geopolimer dan beton konvensional di laut pada zona terendam.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

KARAKTERISASI MATERIAL DAN PENELITIAN PENDAHULUAN

4.1 Karakterisasi Material

Material utama yang digunakan untuk pengembangan pelapis geopolimer adalah *fly ash*. *Fly ash* yang digunakan sebagai bahan utama penelitian berasal dari PT. Petrokimia Gresik. Pada tahap awal, *fly ash* dilakukan karakterisasi antara lain pengujian pH, Berat Jenis, Kehalusan, LOI, XRF, dan SEM.

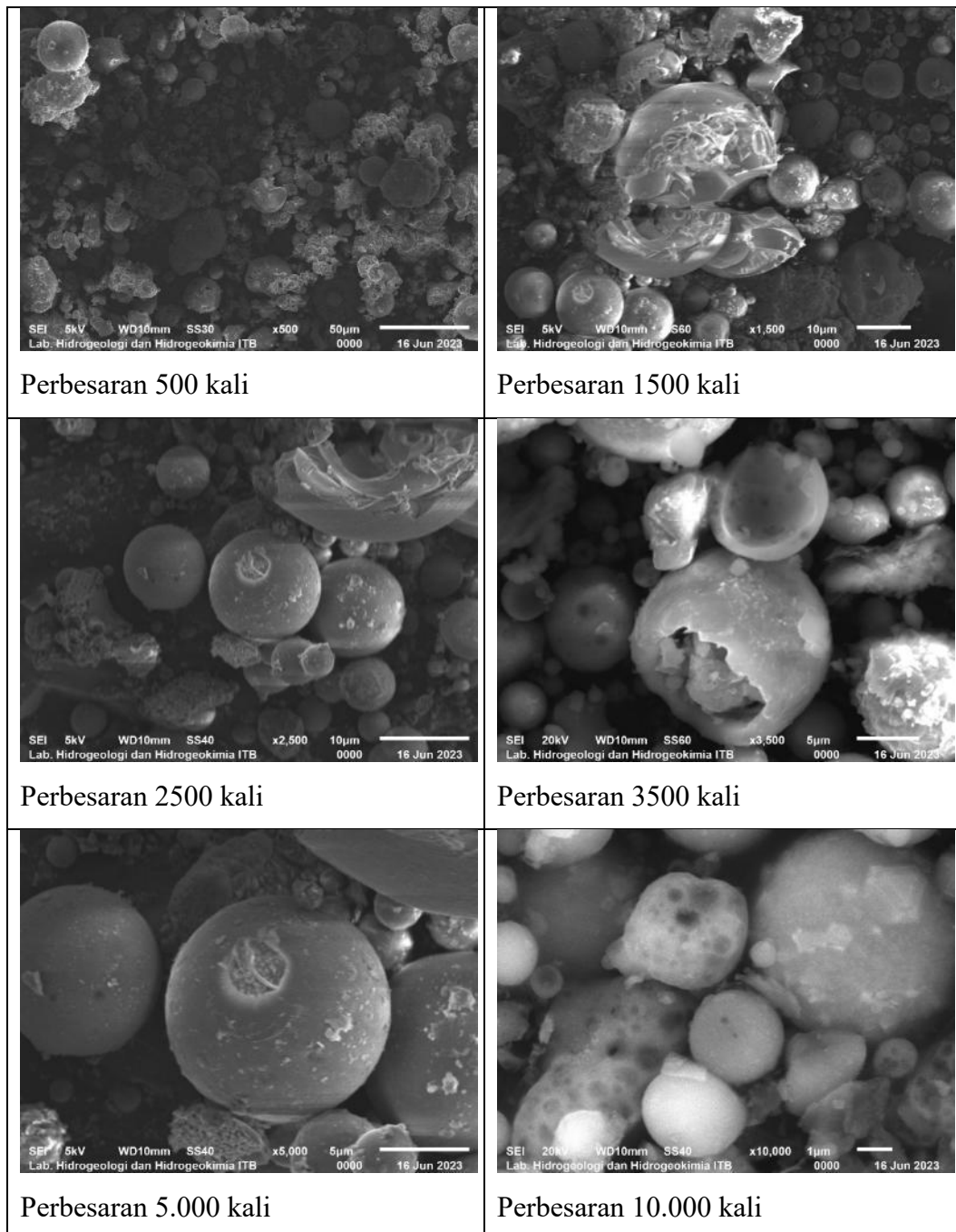
Hasil dari Uji pH *fly ash* yang didapatkan dari PT. Petrokimia Gresik dengan dua kali perulangan mendapatkan hasil pH rata-rata 11,915. Pengujian berat jenis *fly ash* dilakukan berdasarkan standar ASTM C 118-95. Berat jenis *fly ash* untuk dua kali perulangan mendapatkan nilai berat jenis rata-rata adalah 2,274 gr/cm³. Hasil dari pengujian kehalusan/*fineness fly ash* mendapatkan hasil 84,9% yang dinilai dari dua kali perulangan. Uji kehalusan/*fineness* dilakukan menggunakan *shieve shaker*, di catat berat *fly ash* lolos ayakan #325. Pengujian LOI dilakukan dengan membakar *fly ash* pada suhu tertentu untuk mengetahui persentase kandungan zat yang hilang dari sampel. LOI dari *fly ash* yang bersumber dari PT. Petrokimia Gresik adalah 1,09%.

Material *fly ash* yang berasal dari PT. Petrokimia Gresik, dianalisis komposisi kimianya dengan XRF (X-Ray Fluorescence). Data hasil analisa kimia XRF yang dilakukan di PT. Sucofindo seperti pada Tabel 4.1. Analisa raw material *fly ash* sesuai dengan ASTM C618 *Standard Specification for Coal Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete fly ash* dari PT. Petrokimia Gresik dapat digolongkan sebagai kelas F.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kandungan Kimia melalui XRF

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	MnO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	LOI (%)
58.35	23.51	8.13	4.65	2.19	0.49	1.86	0.99	0.07	0.33	0.02	1.77	1.09

Pengujian SEM *Fly ash* PT. Petrokimia Gresik dilakukan dengan perbesaran 500x, 1500x, 2500x, 3500x, 5000x, 10000x. Pengujian mikrostruktur SEM pada *fly ash* dilakukan untuk mengetahui bentuk karakteristik struktur mikroskopis.



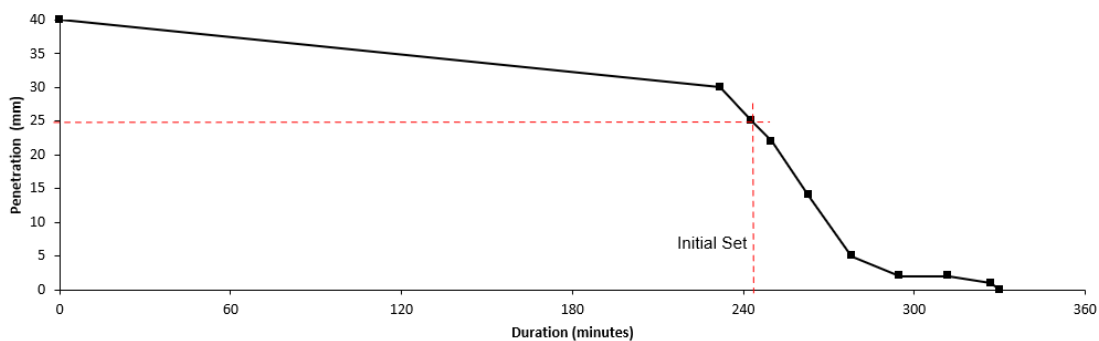
Gambar 4.1 (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 1500x, Perbesaran 2500x, Perbesaran 3500x, Perbesaran 5000x, Perbesaran 10000x

Hasil SEM yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. a hingga f menunjukkan hasil yang teratur dengan bentuk bola/*spherical*. *Fly ash* dengan bentuk teratur dan bulat memiliki luas permukaan yang optimum sehingga akan memiliki kemampuan reaksi dengan bahan yang lain secara maksimal. Pada *fly ash* yang memiliki bentuk bulat memiliki *workability*/kemampuan kerja yang baik (P. Chindaprasirt & Rukzon, 2008; Ekaputri & Triwulan, 2013).

4.2 Pengujian Pasta Geopolimer

Komposisi mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* diawali dengan pengujian pasta. Pengujian pasta bertujuan untuk mengetahui *workability*/kemampuan alir, *setting time*, dan kuat tekan. Hal ini menjadi acuan untuk mendesain komposisi mortar yang sesuai dengan persyaratan. Pengujian pasta geopolimer diawali dengan pengujian *setting time* untuk mengetahui berapa lama pasta mengeras.

Pengujian *setting time* paste geopolimer dilakukan untuk komposisi Binder 65%: Alkali Aktivator 35%, rasio Sodium Silikat dan NaOH= 2:1, dengan konsentrasi NaOH 8 Molar. Hasil dari *setting time* pasta didapatkan bahwa final set terjadi setelah 330 menit dari mulai pencampuran bahan sebagaimana hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.2 Pengujian *Setting Time* Pasta *Fly ash* dari PT. Petrokimia Gresik

Pada tahap pertama diuji coba berupa pasta geopolimer untuk mengetahui *workability*/uji kelecakan serta kuat tekan pasta geopolimer. Uji kelecakan menggunakan alat *flow table* dilakukan dengan memberikan ketukan selama 25 kali kemudian dicatat perubahan diameter yang terjadi. Hasil menunjukkan bahwa dengan meningkatnya molaritas pada larutan NaOH *workability* pasta menurun yang ditandai dengan berkurangnya diameter pasta setelah pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6. Hal ini akan menjadi pertimbangan sebagai upaya meningkatkan *workability* geopolimer saat dikembangkan menjadi mortar.



Gambar 4.3 Hasil Pengujian *Flow Table*

Tahapan selanjutnya adalah memahami mutu pasta geopolimer yang nantinya akan dipakai sebagai komposisi mortar. Pengujian dilakukan antara lain dengan menyelidiki efek variasi molaritas larutan natrium hidroksida (NaOH) yang dibuat dengan aquades maupun air laut pada kekuatan tekan spesimen geopolimer. Selain itu dievaluasi pula variasi sodium silika sehingga Si/Al yang optimum diketahui. Selain itu, penyelidikan awal ini mengeksplorasi dampak metode perawatan, yaitu *moist curing* dan *steam curing* pada kinerja beton geopolimer ketika direndam dalam air laut sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2. Dengan penyelidikan awal tersebut diharapkan didapatkan komposisi optimum pasta geopolimer yang nantinya akan dikembangkan sebagai mortar geopolimer serta kemungkinan implementasinya. Hasil kuat tekan pengujian pasta geopolimer ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Hasil menunjukkan bahwa Pada hari ke 3, kekuatan sampel yang dirawat dengan steam (3 hari) hampir sama dengan sampel yang dirawat dengan cara moist berumur 28 hari. (Kovalchuk et al., 2007) menyatakan adanya peran penting suhu dan kelembaban dalam pengembangan struktur mikro dan sifat bahan Alkali Activator FA. Penerapan panas mempercepat reaksi geopolimer (Ekaputri et al., 2017). Hal tersebut menandakan bahwa dengan mengaplikasikan steam dapat memperpendek waktu beton untuk mencapai kuat tekan yang tinggi.

Pada umur 28 hari, kuat tekan sampel yang dirawat dengan steam curing kemudian direndam air laut lebih tinggi dibandingkan sampel yang dirawat dengan moist curing hingga 11%, dan lebih tinggi dari sampel yang disteam kemudian direndam di air biasa hingga 15%. Hal itu sejalan dengan pernyataan Bayuaji, dkk (2015) beton geopolimer yang dirawat dalam air laut memberikan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan air tawar dan suhu ruangan. Pengawetan sampel dalam air laut menghindari lepasnya unsur-unsur reaktan yang diperlukan dari sampel geopolimer ke media sekitarnya (Giasuddin et al., 2013). Hal ini menunjukkan potensi yang baik bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan yang baik dilingkungan agresif.

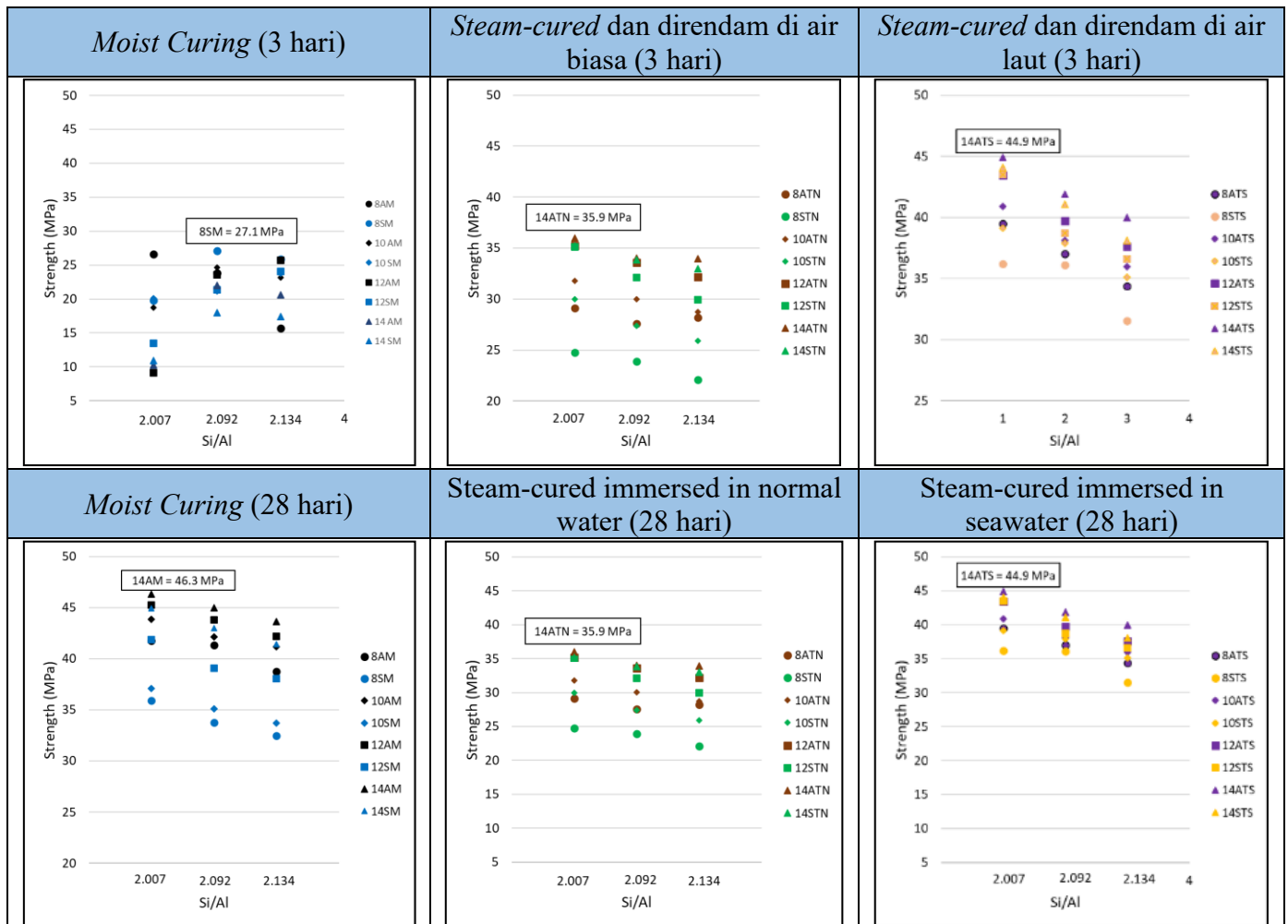
Pada kuat tekan awal, air laut sebagai larutan NaOH berkontribusi terhadap penurunan kekuatan. Kehadiran Na^+ dan OH^- dalam air laut menyebabkan penurunan kuat tekan, hal itu terjadi karena kelebihan natrium karbonat dan OH^- dalam campuran (Castillo et al., 2021; Hardjito et al., 2008). Hal yang sama terjadi pula untuk kuat tekan pasta pada umur 28 hari. Penggunaan air laut sebagai alkali aktivator atau pelarut NaOH dimungkinkan dengan menggunakan konsentrasi NaOH/molaritas yang tinggi yaitu diatas 12 Molar. Pada seluruh pengujian kuat tekan pada tabel 4.3 dapat disimpulkan bahwa kuat

tekan pada umur 28 hari diperoleh minimal 24 MPa pada pasta dengan komposisi molaritas 8 M dengan air laut sebagai pelarut dan SS/SH=3:1. Kuat tekan tertinggi diperoleh 46 MPa dengan komposisi 14M dan rasio SS/SH=1:1. Hasil ini menjadi acuan pada pembuatan mortar geopolimer selanjutnya.

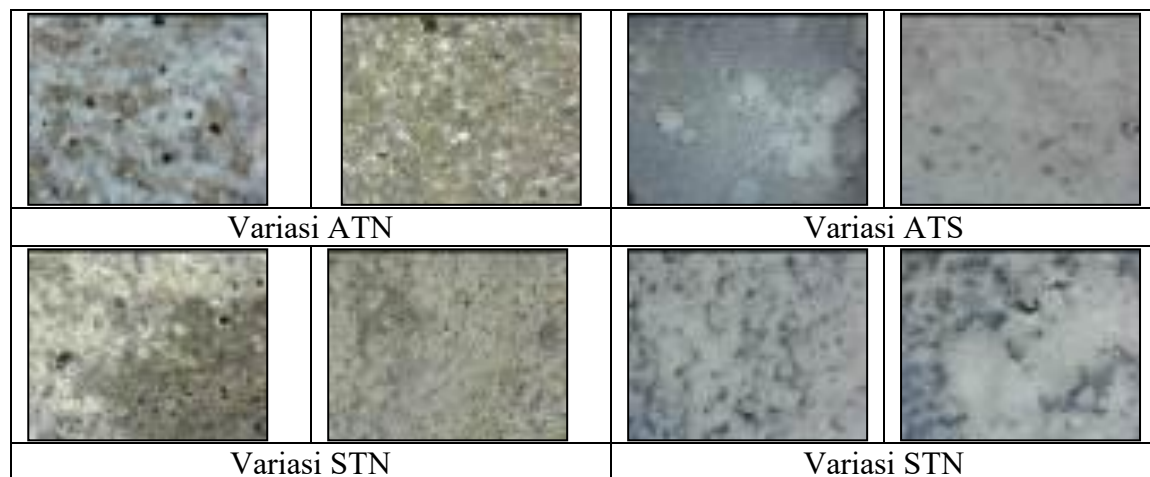
Tabel 4.2 Variasi Benda Uji Pasta Geopolimer

Kode	Larutan Alkali Aktivator	Metode Perawatan	Media Perawatan
XAM	Aquades	<i>Moist Curing</i>	Suhu ruang
XSM	Air Laut		
XATN	Aquades	<i>Steam curing</i> pada suhu 65°C selama 2 jam	Air Biasa
XSTN	Air Laut		Air Laut
XATS	Aquades		
XSTS	Air Laut		

Tabel 4.3 Kuat Tekan Pasta Geopolimer



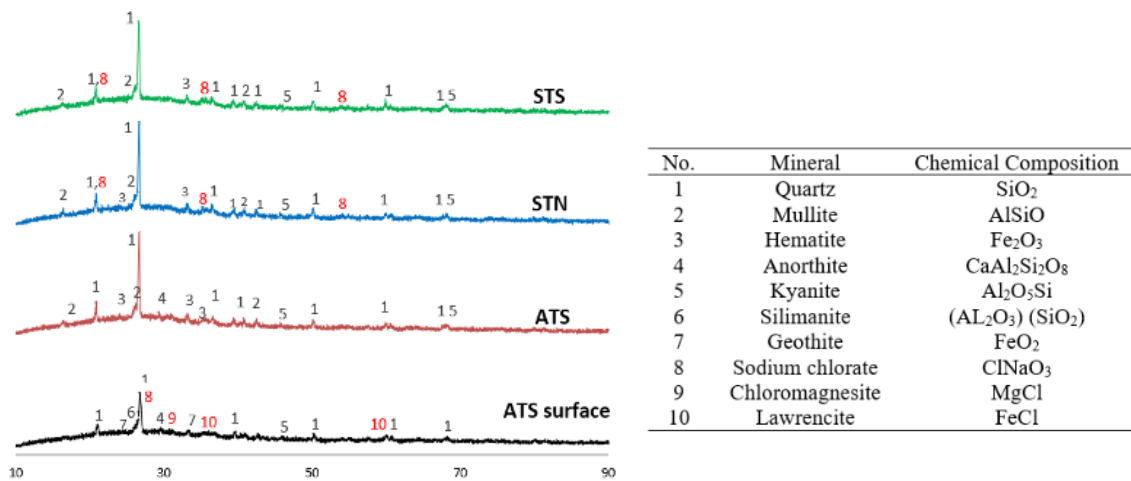
Dampak air laut terhadap tampilan visual pasta geopolimer dievaluasi melalui pengamatan visual setelah periode pemaparan selama 28 hari, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pasta geopolimer yang dibuat dengan air suling dan air laut dan kemudian direndam dalam air normal (Kode ATN dan STN) menunjukkan terjadinya *efflorescence*. Fenomena ini disebabkan oleh kelebihan NaOH yang bereaksi dengan CO₂ yang ada dalam air normal sehingga menghasilkan pembentukan garam *efflorescence*. Garam *efflorescence*, termasuk senyawa seperti natrium sulfat, natrium klorida, dan magnesium sulfat, muncul pada permukaan beton. Garam-garam ini terbentuk akibat reaksi antara kelebihan ion natrium dan ion sulfat atau klorida yang ada di lingkungan sekitarnya (Liu et al., 2014). Kondisi berbeda terjadi ketika spesimen mengalami proses perawatan air laut, lapisan putih terlihat jelas pada permukaan pasta.



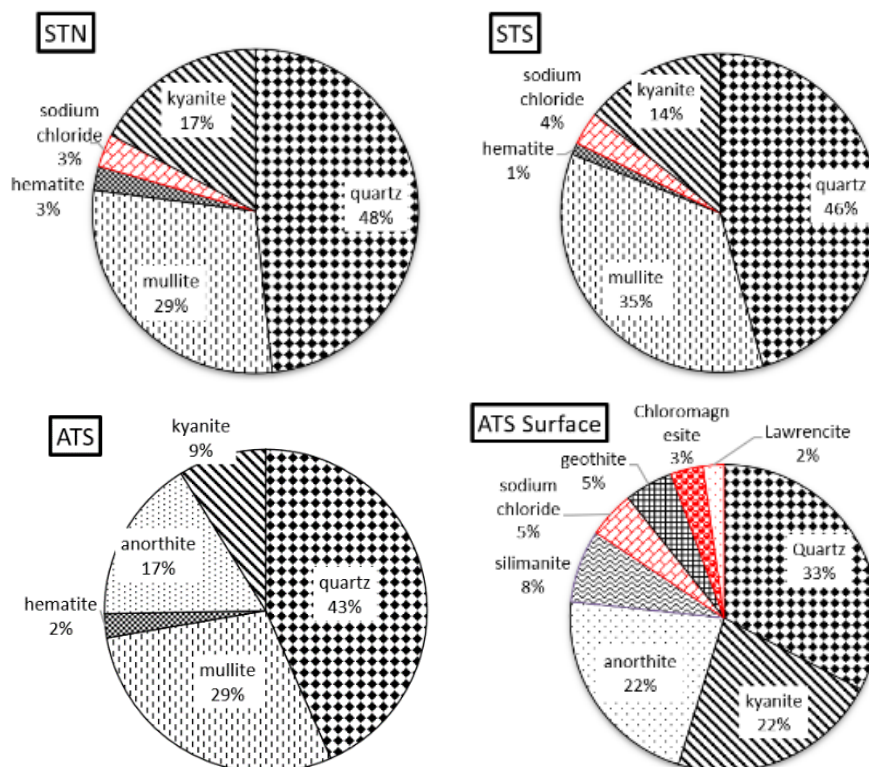
Gambar 4.4 Foto Permukaan Pasta Geopolimer

Pasta geopolimer yang telah berumur 28 hari dilakukan pengujian X-Ray Diffraction untuk mengetahui perbedaan kandungan kimia pasta. Pengujian XRD dilakukan pada pasta yang berumur 28 hari dengan konsentrasi 10 molar, spesimen diambil hanya pada bagian dalam (Kode: ATS, STN, STS). Selain itu, untuk memastikan komposisi kimia pada lapisan permukaan, spesimen pasta luar juga dikumpulkan. Hasil pengujian XRD ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Pada Gambar 4.6 dari hasil analisa XRD terlihat komponen utama pada semua variasi pasta adalah kuarsa, mullite, kyanite, dan anorthite. Komposisi XRD menunjukkan tidak adanya ion klorida di dalam pasta tetapi di permukaan pasta terdapat klorida dalam pembentukan garam (natrium klorida, klormagnesit dan lawrensit). Ion klorida yang terdapat pada permukaan pasta tidak mengganggu proses polimerisasi sehingga tidak menyebabkan penurunan kuat tekan. Pembentukan garam di permukaan mencegah *leaching*/pelindian elemen reaktif seperti Na

yang diperlukan dari pasta geopolimer (Giasuddin et al., 2013). Pola XRD dari spesimen yang dibuat dengan air laut terdapat natrium klorida dalam spesimen. Infiltrasi klorida tidak terjadi pada pasta geopolimer setelah perendaman 28 hari.



Gambar 4.5 Pengujian XRD Pasta Geopolimer



Gambar 4.6 Komposisi mineral hasil XRD

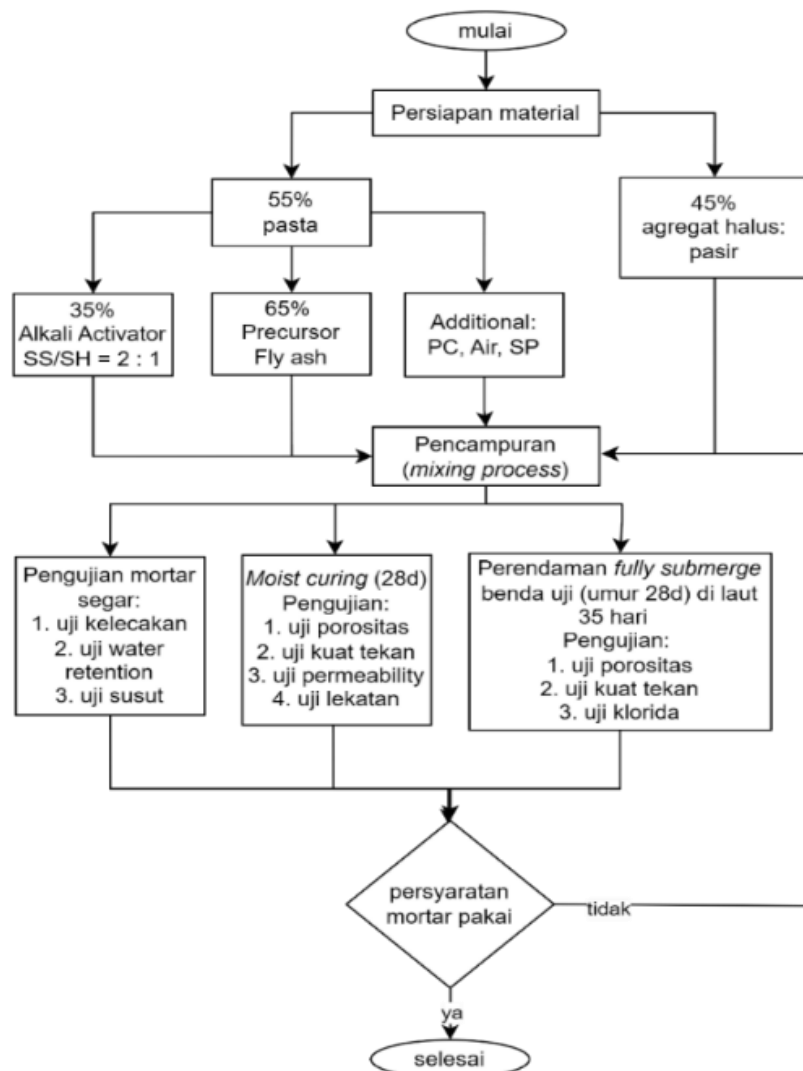
Hasil penelitian pendahuluan ini mengindikasikan adanya potensi geopolimer dari *fly ash* dapat digunakan sebagai pelindung beton di lingkungan laut dan dapat dikembangkan sebagai mortar. Pada syarat kuat tekan 35 MPa pasta geopolimer dicapai minimal menggunakan larutan NaOH 10 Molar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENYELIDIKAN MORTAR GEOPOLIMER SEBAGAI MATERIAL PELAPIS

Hasil dari pengujian kelecakan dan pengujian kuat tekan pada pasta geopolimer dilanjutkan untuk menjadi komposisi mortar geopolimer yang memenuhi syarat *self compacting geopolimer mortar* (SCGM). Pemilihan menjadi SCGM adalah untuk dapat memenuhi kemampuan alir/*workability* dari geopolimer sebagai coating. Tahapan pada pembuatan mortar geopolimer (SCGM) mengikuti Gambar 4.10. Penggunaan *pulvarized fly ash* (PFA) butiran lolos ayakan ukuran 45 μ m sebesar 99% melalui penghancuran mesin pulvarize selama 10 menit sebagai precursor karena kemampuannya meningkatkan *fluidity* pada mortar.



Gambar 5.1. Tahapan Pengujian Mortar Geopolimer

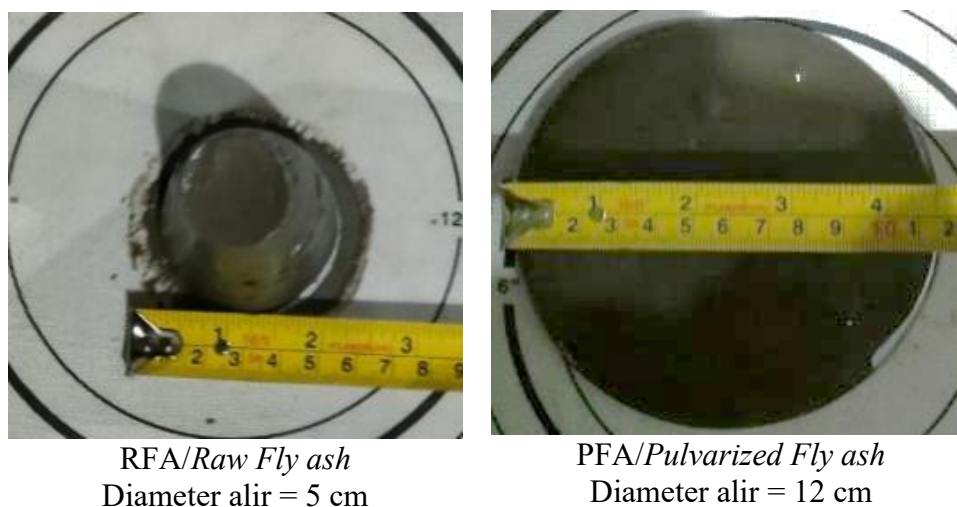
5.1 Pengujian waktu ikat dan kelecakan pasta geopolimer dengan *pulverized fly ash*.

Pengujian pada *fly ash* yang telah dipulverisasi (PFA) antara lain uji setting time pasta dengan komposisi SS:NaOH = 65:35. Molaritas NaOH yang digunakan adalah 14 molar dengan variasi RFA dan PFA. Pada uji setting time didapatkan hasil sebagaimana pada Tabel 4.4. Pada 100% PFA didapatkan setting time yang lebih cepat 50% mengindikasikan adanya proses percepatan reaksi geopolimerisasi.

Tabel 5.1. *Setting time*/waktu pengerasan pasta geopolimer dengan PFA

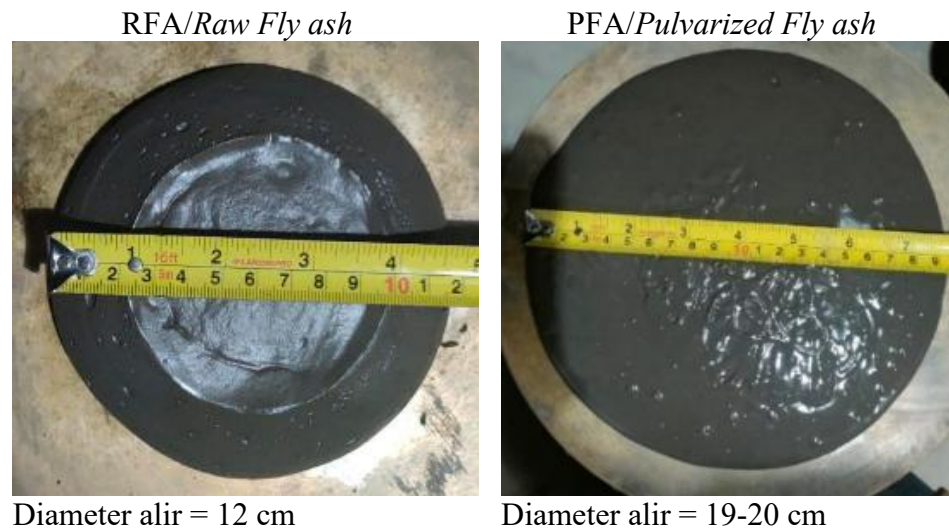
Variasi	Jam buat	Jam Final set	Durasi (menit)
RFA (<i>Raw Fly ash</i>)	10.35	19.15	8 jam 30 menit
PFA (<i>Pulvarized Fly ash</i>)	11.20	17.20	4 Jam

Pengujian pada PFA selanjutnya adalah pengujian *workability*/uji kelecakan dengan mini slump maupun flow table. Uji kelecakan dilakukan dengan komposisi SS:NaOH = 65:35, Molaritas NaOH yang digunakan adalah konsentrasi 14 Molar dengan variasi RFA dan PFA. Hasil pengujian uji kelecakan dengan *mini slump* ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Pengujian Kelecakan dengan *Mini Slump* pada *Pulvarized Fly ash*.

Hasil pengujian kelecakan menggunakan uji mini slump pada PFA menunjukkan diameter yang lebih besar dari RFA yaitu adanya peningkatan diameter lebih dari 100%. Hal ini menandakan perbaikan *workability* pada mortar dengan *fly ash* yang telah dipulvarized. Pengujian diperkuat dengan uji *flow table* pada variasi yang sama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.3.

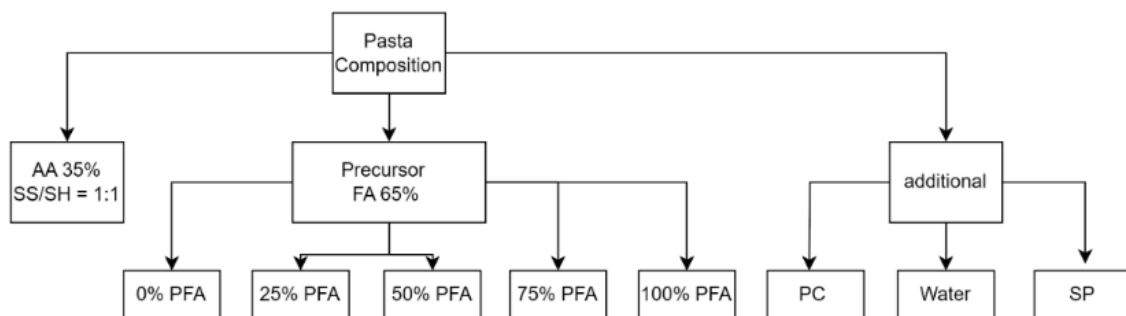


Gambar 5.3. Pengujian kelecakan dengan Flow Table pada *Pulverized fly ash*

Sebagaimana uji menggunakan *mini slump*, hasil uji kelecakan dengan flow table pada PFA menunjukkan diameter yang lebih besar daripada RFA. Hal ini menandakan adanya peningkatan *workability* pada *fly ash* yang telah dipulvarized. Dengan hasil tersebut, penyelidikan dilanjutkan dengan pengembangan mortar geopolimer sebagai pelindung beton dengan melihat performa dari *fly ash* yang telah dipulverisasi selama 10 menit.

5.2 Pengujian mortar geopolimer.

Penyelidikan mortar geopolimer dilanjutkan dengan pengujian kelecakan dan kuat tekan dengan variasi komposisi seperti pada Gambar 5.4 dengan komposisi campuran yang digunakan mengikuti ketentuan pada Tabel 4.5.



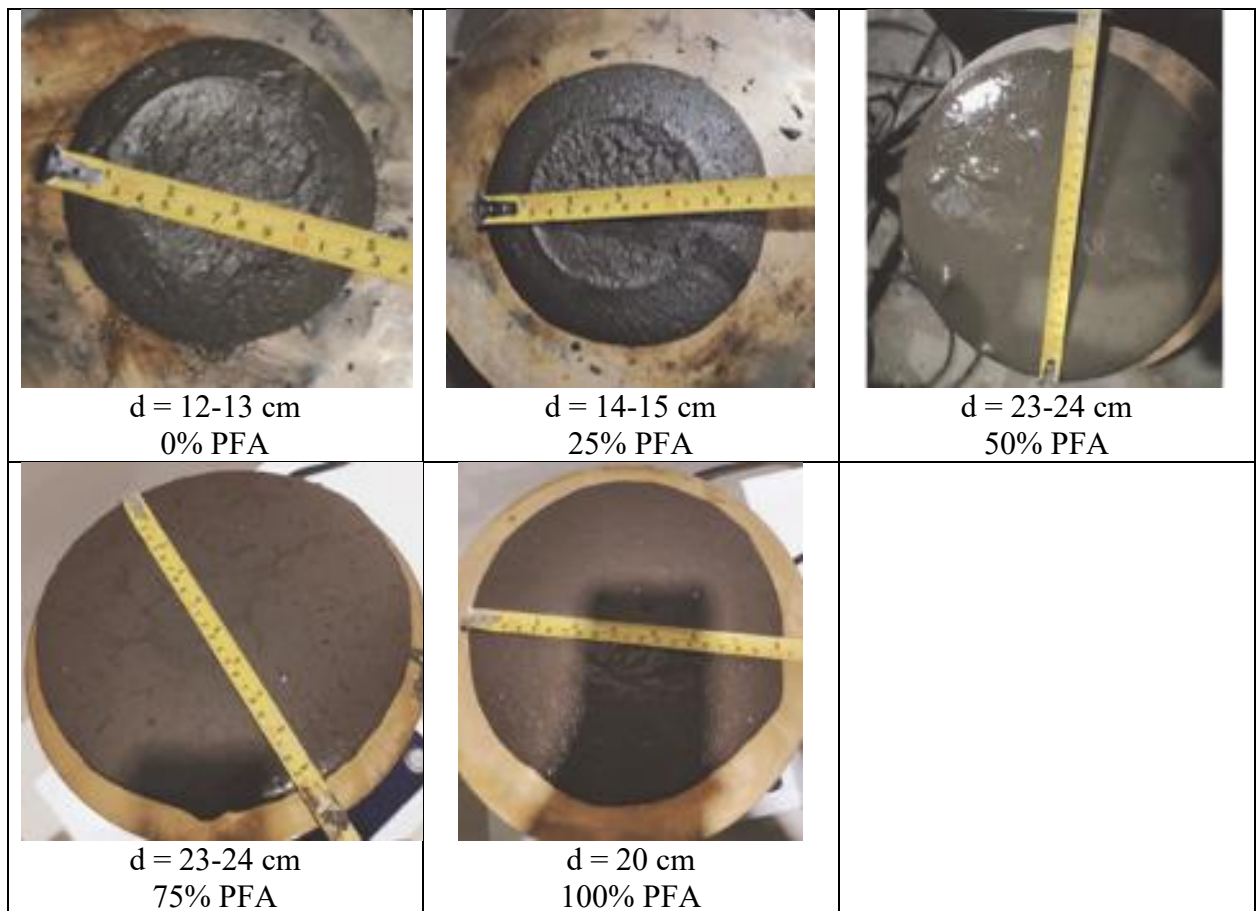
Gambar 5.4. Variasi Komposisi Uji Coba Mortar Geopolimer

Tabel 5.2. Komposisi Mortar Geopolimer

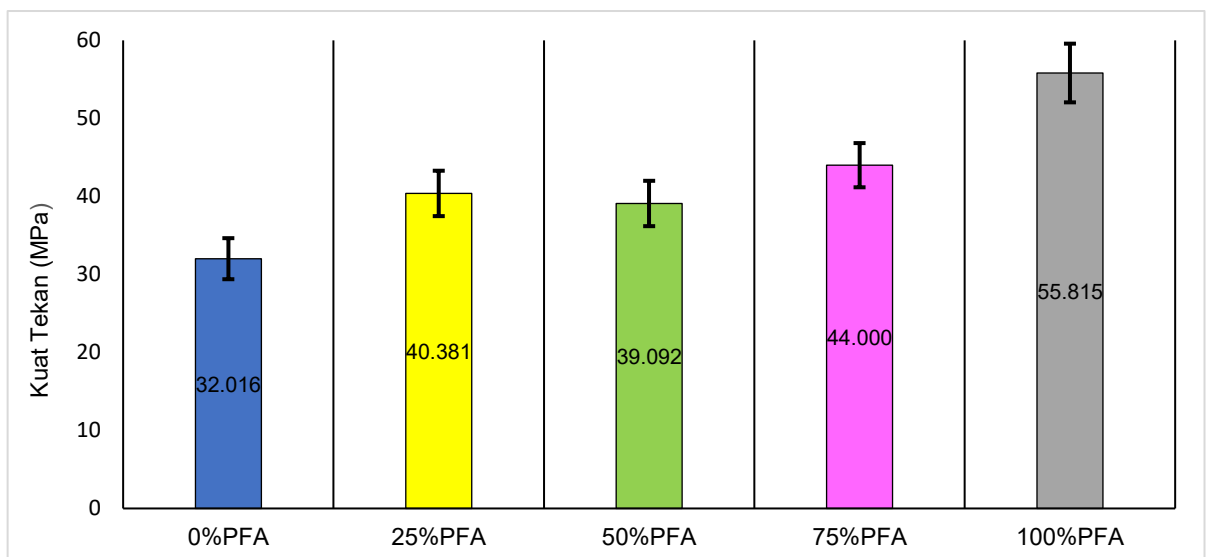
Material	Komposisi
Pasta : Agregat (Pasir)	55 : 45
Alkali Aktivator : Prekursor (<i>Fly ash</i>)	35 : 65
Alkali Aktivator = Na_2SiO_3 : NaOH	2 : 1
Prekursor (<i>Fly ash</i>) = RFA : MFA	1. 100 : 0 2. 75 : 25 3. 50 : 50 4. 25 : 75 5. 0 : 100
Molaritas NaOH	16,5
Additional (% berat prekursor)	1. PC = 3% 2. Air = 6% 3. SP/ <i>Superplatisizer</i> = 3%

Pada Gambar 5.5 ditunjukkan hasil pengujian flow table dengan variasi 0% PFA, 25% PFA, 50% PFA, 75% PFA, dan 100% PFA. Pengujian flow tabel mortar dengan penambahan *Pulverized Fly ash/PFA* menunjukkan bahwa dengan menggunakan PFA sebesar 25%, diameter mortar telah memenuhi syarat mortar, yaitu 14–15 cm. Semakin tinggi penggunaan PFA, diameter mortar semakin besar, lalu kembali menurun pada variasi 100% PFA. Pada variasi 100% PFA, mortar segar menunjukkan sifat *sticky*/lengket. Pada tahapan ini, dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai persyaratan uji kelecakan dapat digunakan PFA sebesar 25%. Hasil ini dilanjutkan dengan menguji tekan mortar yang telah berumur 28 hari.

Mortar geopolimer diuji kuat tekan pada umur 28 hari dengan sampel berbentuk kubus ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dengan penggunaan SP 3%. Hasil pengujian kuat tekan mortar dari rata-rata enam sampel kubus menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan PFA hasil kuat tekan semakin naik. Kuat tekan mendekati persyaratan 35 MPa diperoleh dengan penggunaan PFA 25%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.6.



Gambar 5.5. Hasil Pengujian Flow Table Mortar dengan Pulvarized Fly ash/PFA

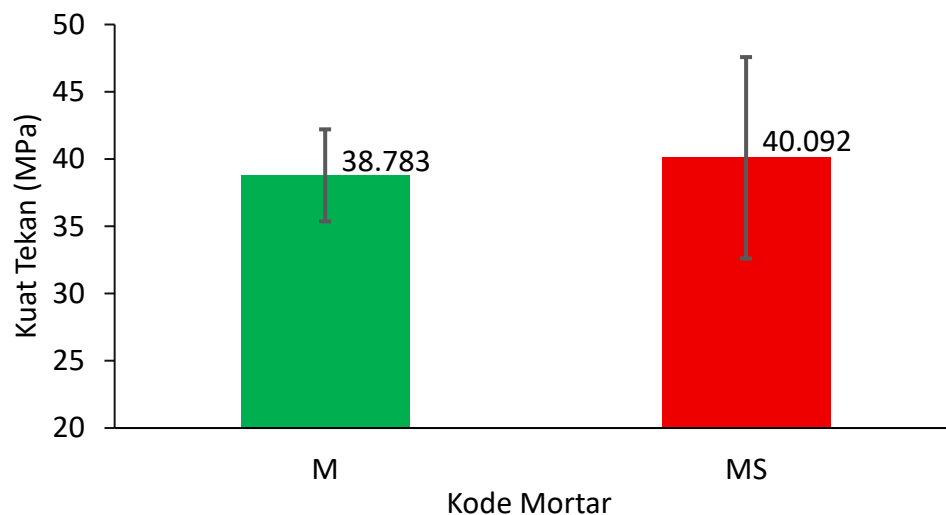


Gambar 5.6. Kuat tekan Mortar Geopolimer dengan Pulvarized Fly ash

Pengujian dilanjutkan dengan variasi penambahan *slag* untuk memastikan mortar yang dibuat merupakan material durabel tidak hanya terhadap klorida namun juga sulfat. Penambahan *slag* diambil sebesar 10% dari berat binder menggantikan pasir mengikuti hasil penelitian terdahulu oleh (Amini & Ekaputri, 2023). Mix design mortar geopolimer seperti pada Tabel 5.3. Hasil pengujian *workability* mortar geopolimer dengan penambahan *slag* menunjukkan diameter uji *flow table* sebesar 14 – 15 cm. Nilai ini menandakan komposisi mortar memenuhi syarat. Pengujian dilanjutkan dengan menganalisis kuat tekan pada mortar dengan tambahan *slag*. Hasil kuat tekan menunjukkan rata-rata kuat tekan dengan penambahan *slag* meningkat 3,37% yaitu 40,092 MPa.

Tabel 5.3. Komposisi Mortar Geopolimer dengan Variasi *Slag*

Kode	RFA	PFA	Na ₂ SiO ₃	NaOH	PC	Air	SP	Pasir	<i>Slag</i>
M	534,5	229,1	249,8	124,9	22,9	34,8	12,9	990	0
MS	534,5	229,1	249,8	124,9	22,9	34,8	12,9	913,6	76,3



Gambar 5.7. Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer (n=6)

Sebagai *coating* mortar geopolimer perlu untuk diuji kuat lekatnya pada beton konvensional. Uji kuat lekat dengan metode *slant shear test* dengan memotong benda uji silinder pada sudut $\pm 30^\circ$ kemudian dilayer dengan mortar geopolimer. Uji *slant shear test* ditunjukkan pada Gambar 5.8.



Dilapisi M dan MS



Diuji tekan dan dicatat kuat tekan hancur

Gambar 5.8. Proses Pengujian *Slant Shear Test*.

Pengujian kuat lekat dilakukan dengan menekan benda uji dengan alat compressive test dan menghitung kuat tekan hancurnya. Selain itu dilihat pula bagaimana pola kerusakan yang terjadi. Pengujian mikrostruktur pada pertemuan antara beton konvensional dan mortar geopolimer dilakukan melalui pengujian XRD dan SEM untuk melihat reaksi kimia yang terjadi antara C-S-H dan N-A-S-H. Kuat lekat dengan *slant shear test* dilihat pada Tabel 5.4. Hasil kuat lekat menurut ASTM C882 tentang *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear* telah memenuhi persyaratan lebih besar dari 10 MPa (American Society for Testing and Material, 1999).

Berdasarkan hasil pengujian *slant shear* yang ditampilkan pada Tabel 5.4, diperoleh nilai kuat geser bidang miring dengan standar deviasi yang tinggi. Hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya error pada sudut yang kurang tepat saat proses pembuatan sampel uji. Pola kegagalan spesimen hasil pengujian ditunjukkan dalam Gambar 5.9. Kondisi (a) dan (b) memperlihatkan bahwa spesimen tidak mengalami kegagalan di bidang pertemuan antar lapisan, melainkan mengalami kegagalan pada bagian dalam beton. Hal ini menandakan kualitas sambungan antar lapisan yang baik. Sementara kondisi (c) menunjukkan spesimen mengalami sedikit kerusakan pada bidang pertemuan antar lapisan beton, yang mengindikasikan bahwa bidang sambungan

merupakan titik lemah pada spesimen ini. Meskipun terjadi kegagalan di pertemuan antara beton C dan MS, tegangan geser/ τ pada kedua sampel menunjukkan nilai ≥ 10 MPa.

Gambar 5.10 menunjukkan pola XRD dari dua sampel yaitu variasi M yaitu hanya *fly ash* dan MS yaitu variasi *fly ash* dengan *slag*, dengan derajat kristalinitas (DOC) masing-masing 19,25% dan 21,06%. Peningkatan DOC pada sampel MS mengindikasikan bahwa penambahan *slag* meningkatkan terbentuknya fase kristalin. Peak/puncak diduga adalah quartz dan mullite dari *fly ash*, serta anorthite atau gehlenite yang mungkin terbentuk dari reaksi Calsium dari *slag* dan silika/alumina. Naiknya fase kristal juga bisa disebabkan oleh pembentukan C-A-S-H. Ini menunjukkan bahwa *slag* tidak hanya meningkatkan reaktivitas awal, tetapi juga mempengaruhi struktur fasa akhir menjadi lebih kristalin.

Tabel 5.4. Hasil Kuat Lekat /*Slant Shear Test*

Kode	Maximum load (N)	θ (degree)	σ_0 (N/mm ²)	Kegagalan di pertemuan
M-1	161.620,03	31,78	20,589	Tidak
M-2	289.273,46	24,09	36,850	Tidak
MS-1	335.400,29	32,45	42,726	Tidak
MS-2	149748,61	37,05	19,076	Ya



(a) Tidak rusak di pertemuan layer



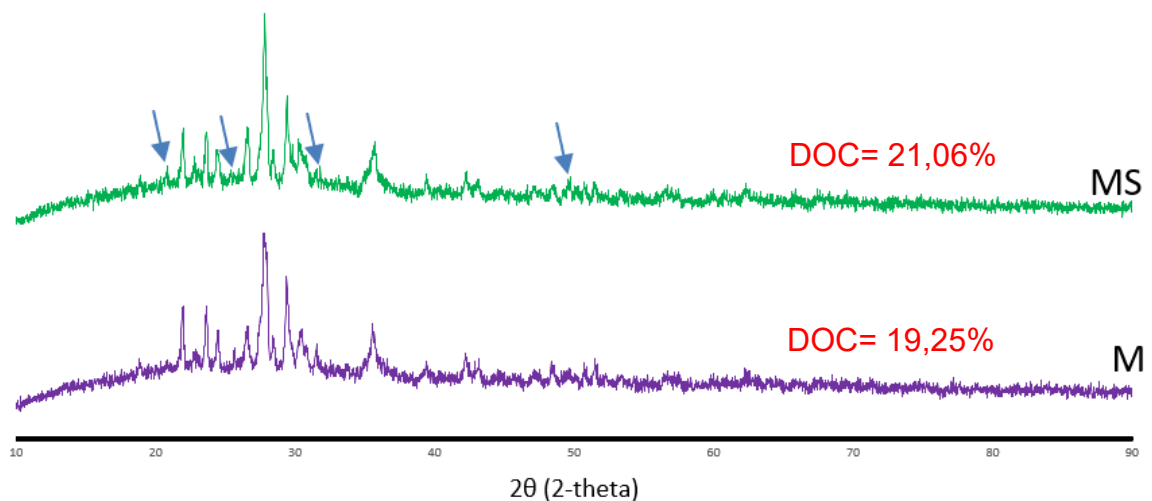
(b) Tidak Rusak di Pertemuan Layer



(c) Rusak di Pertemuan Layer

Gambar 5.9.

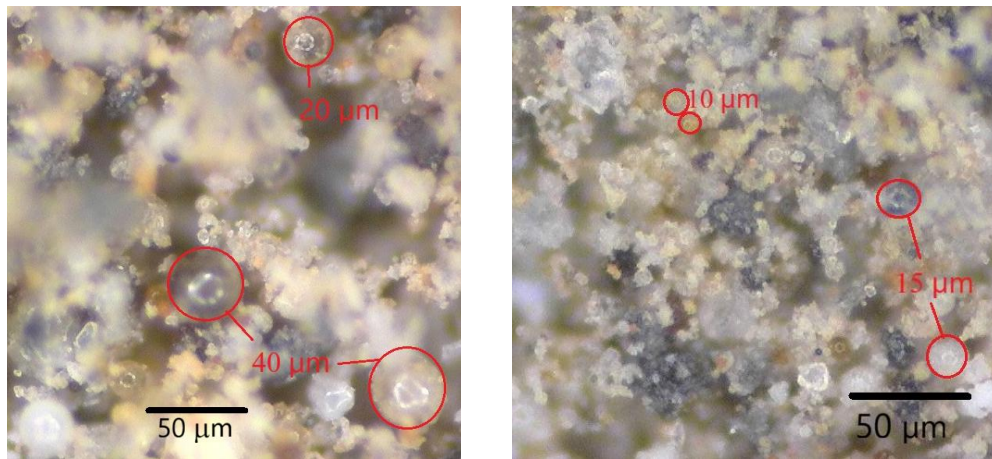
Pola Keruntuhan Pengujian *Slant Shear Test*



Gambar 5.10. Analisis XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk variasi M dan MS

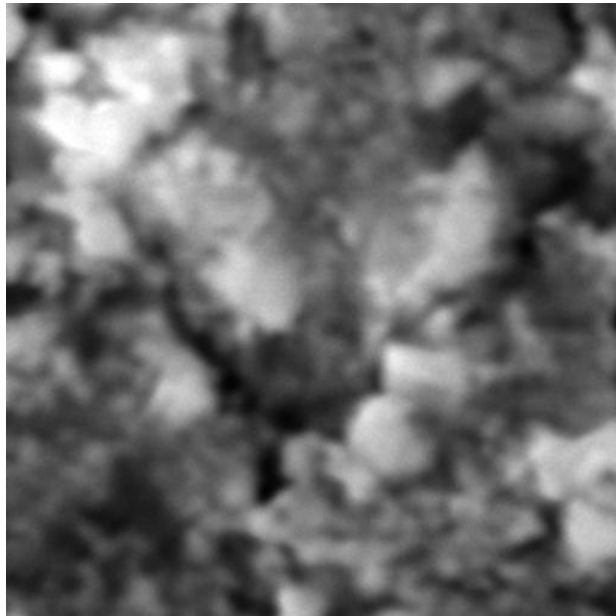
5.3 Pengaruh Kehalusan *Fly ash* Terhadap Keleccakan Dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Pengaruh kehalusan abu terbang terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer telah dilaporkan dalam beberapa penelitian. Prinya Chindaprasirt (2005) menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* halus mengurangi porositas kapiler dan meningkatkan kekuatan jangka panjang pada umur 90 hari. Demikian pula, Jamkar et al. (2013) menunjukkan bahwa partikel dengan kehalusan yang lebih tinggi tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan, tetapi juga mempersingkat waktu pengerasan, sehingga partikel yang lebih halus mempercepat kinetika geopolimerisasi. Penelitian terbaru oleh Q. Sun et al. (2023) mengkonfirmasi bahwa penggilingan *fly ash* secara mekanis untuk mengurangi ukuran partikel secara signifikan meningkatkan kekuatan 28 hari dengan mengekspos lebih banyak permukaan reaktif silika dan alumina. Mekanisme reaktivitas *fly ash* halus/*pulverized fly ash* berkaitan dengan pelarutannya dalam larutan NaOH/natrium hidroksida. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.11, larutan alkali (NaOH) hanya melarutkan sebagian spesies SiO_4 dan AlO_2 dari *fly ash* kasar ($1\text{--}100\ \mu\text{m}$), meninggalkan inti yang tidak bereaksi. Sebaliknya, *fly ash* yang dihaluskan ($<25\ \mu\text{m}$) memiliki luas permukaan reaktif yang lebih besar, memungkinkan pelarutan lengkap spesies Si(OH)_4 dan Al(OH)_4 , yang menghasilkan peningkatan reaksi geopolimer.

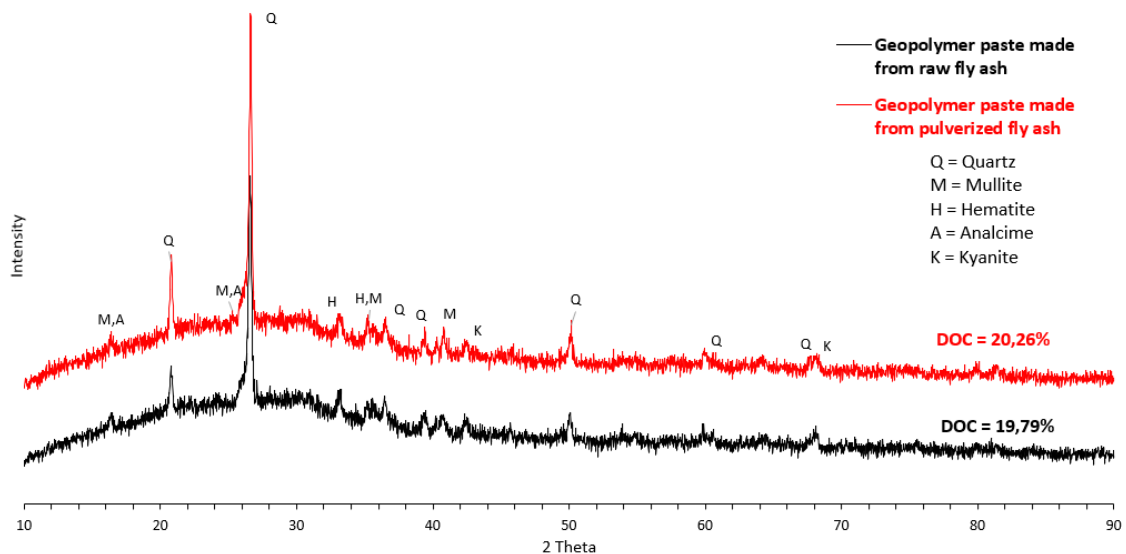


Gambar 5.11. Ilustrasi pelarutan *fly ash* asli dan *fly ash* halus oleh larutan NaOH

Mikroskop elektron pemindaian (SEM) pada Gambar 5.12 memberikan bukti perbedaan antara abu terbang kasar dan halus dalam sistem geopolimer. Gambar SEM dari pasta geopolimer berbasis abu terbang kasar (RFA) dan pasta geopolimer berbasis abu terbang halus (PFA) setelah 5 hari pencampuran. Struktur pasta geopolimer yang terbuat dari abu terbang mentah (abu terbang kasar) menunjukkan abu terbang yang tidak bereaksi dan sebagian bereaksi. Gel N-A-S-H dan kristal kuarsa hadir dalam jumlah yang lebih kecil; Rongga-rongga yang tersebar di dalam matriks menunjukkan geopolimerisasi yang tidak lengkap. Strukturnya heterogen, mencerminkan pelarutan spesies Si dan Al yang terbatas dari abu terbang kasar. Sebaliknya, pasta geopolimer abu terbang halus memiliki matriks yang lebih padat, menunjukkan pelarutan abu terbang yang lengkap dan pembentukan gel N-A-S-H. Selain itu, komponen utama pasta geopolimer yang ditunjukkan pada Gambar 5.13 adalah kuarsa, mullit, hematit, analcim, dan kyanit. Pola XRD menunjukkan perbedaan derajat kristalisasi. Pasta geopolimer abu terbang halus menunjukkan puncak yang sedikit lebih tajam daripada pasta geopolimer abu terbang kasar, menghasilkan indeks kristalinitas yang lebih tinggi hingga 2,5%.



Gambar 5.12. *Scanning Electron Microscopy* Pasta Geopolymer dari: (a) *Fly ash* asli (*Raw Fly ash*) and (b) *Fly ash* Halus (*Pulverized Fly ash*)



Gambar 5.13. Pola XRD Pasta Geopolymer dari *Fly ash* asli (*Raw Fly ash*) and *Fly ash* Halus (*Pulverized Fly ash*)

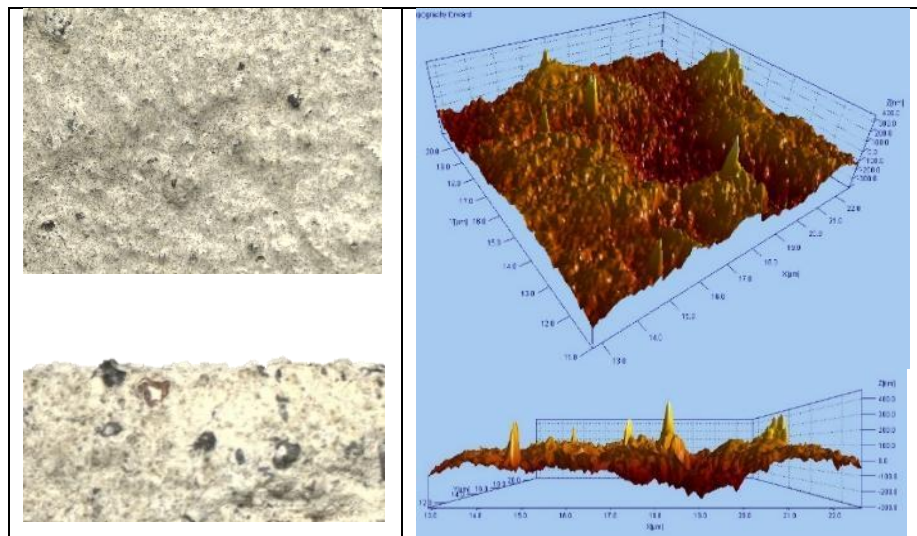
Meskipun 75 hingga 100% PFA menghasilkan kekuatan tekan yang lebih unggul, 100% PFA menunjukkan kemampuan kerja yang lengket. Namun, hal ini dapat menjadi rumit dalam aplikasi lapangan, terutama pada pelapisan skala besar. Dari perspektif praktis, kisaran PFA 25–30% menawarkan keseimbangan antara kemampuan kerja yang baik (penyebaran 14–15 cm pada uji meja alir) dan kekuatan yang memadai (>35 MPa). Kompromi ini menunjukkan bahwa fraksi PFA yang dioptimalkan dapat mencapai persyaratan pelapisan tanpa mengorbankan sifat penanganan.

5.4 Pengujian Persyaratan Mortar Geopolimer yang Mempengaruhi Penempelan Biota

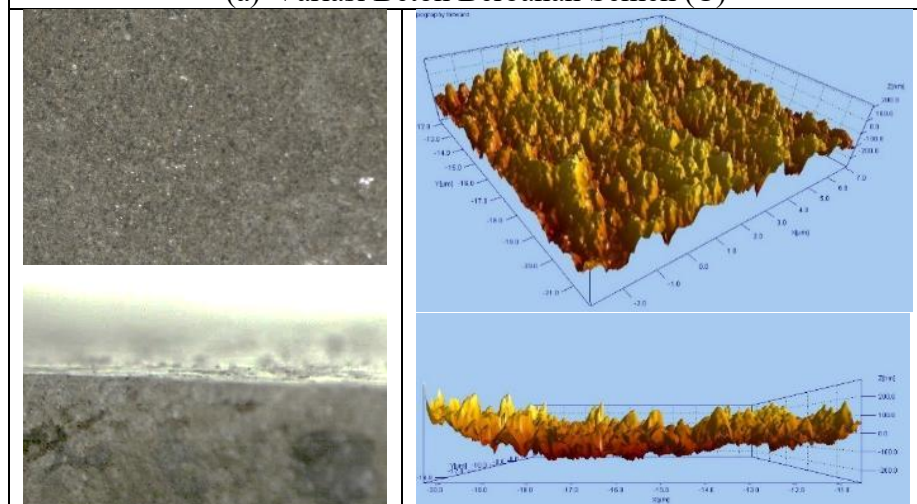
Sifat pengujian permukaan mortar yang dilakukan antara lain pengujian kekasaran permukaan, uji hidrofobik, uji pH, dan uji porositas pada variasi Mortar Geopolimer tanpa menggunakan *slag* (M), dan Mortar Geopolimer tanpa menggunakan *slag* (MS). Selain itu sebagai kontrol dilakukan pula pada variasi beton berbahan semen (C). Dokumentasi pada Gambar 5.10 terlihat kontur permukaan paling kasar adalah variasi C kemudian pada permukaan M dan MS terlihat lebih halus. Hasil ini diperkuat dengan uji kekasaran permukaan menggunakan uji AFM (*Atomic Force Microscopy*) direkam topografi nya serta dihitung nilai kekasaran nya yang direpresentasikan dengan nilai Ra dan Rq.

Pengamatan permukaan dengan mikroskop optik dan AFM menunjukkan bahwa kekasaran permukaan pada variasi M dan MS terlihat lebih halus dibandingkan dengan variasi C. Hal ini dikonfirmasi oleh nilai rata-rata kekasaran permukaan (Ra dan Rq), di mana C memiliki kekasaran permukaan tertinggi dilanjutkan M dan MS. Kekasaran permukaan yang lebih halus berpotensi mengurangi kemungkinan penempelan mikroorganisme karena berkurangnya jumlah ceruk atau rongga mikro yang dapat digunakan sebagai tempat perlindungan atau titik awal kolonisasi. Penelitian sebelumnya oleh Hayek et al. (2021) dan Veeger et al. (2021) menyatakan bahwa permukaan yang kasar dapat meningkatkan *bioreceptivity*, yaitu kemampuan material untuk menjadi ekosistem bagi biota. Tabel 5.5 dan Gambar 5.15 menunjukkan nilai Ra dan Rq yang diambil dari 3 perulangan pada permukaan.

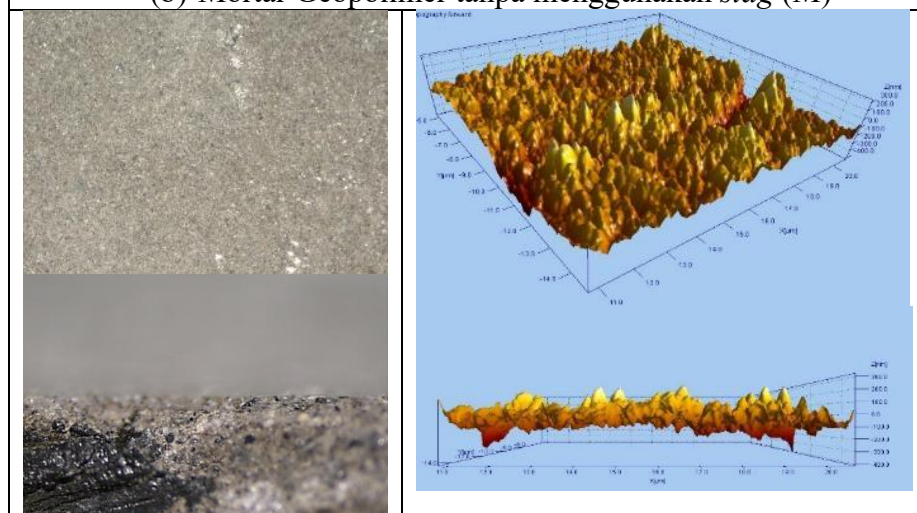
Kekasaran permukaan mendorong adanya *biofouling*. Permukaan beton yang kasar dan bertekstur menyediakan lebih banyak relung mikro untuk permukiman mikroba dan larva, yang mendukung kolonisasi tahap awal. Studi oleh Hickling et al., (2022) mengamati kelimpahan bryozoa dan biomassa biofilm pada permukaan beton mendapatkan hasil yang lebih tinggi pada permukaan beton dengan agregat terbuka dan bertekstur kasar dibandingkan dengan permukaan halus.



(a) Variasi Beton Berbahan Semen (C)

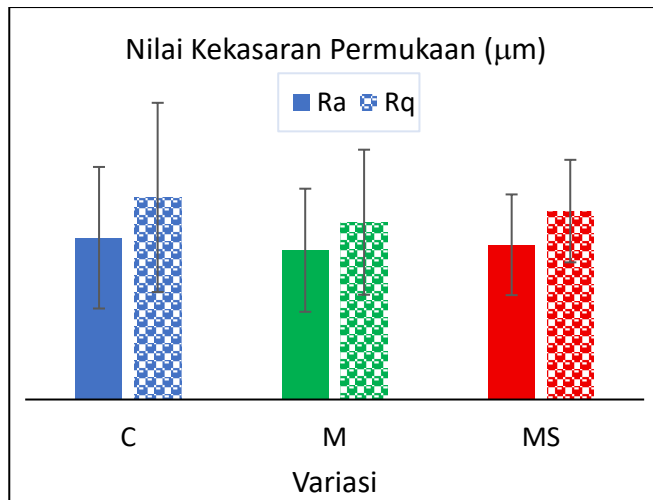


(b) Mortar Geopolimer tanpa menggunakan *slag* (M)



(c) Mortar Geopolimer dengan menggunakan *slag* (MS)

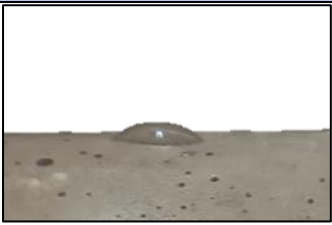
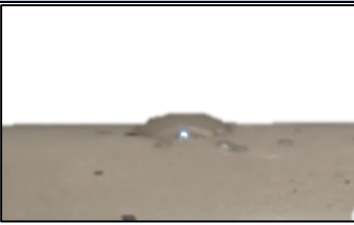
Gambar 5.14. Dokumentasi dan uji kekasaran permukaan menggunakan uji AFM



Tabel 5.5. Nilai Kekasaran Permukaan

Gambar 5.15. Perbandingan nilai kekasaran permukaan setiap variasi benda uji

Bioreceptivity yang mendukung adanya penempelan biota juga ditentukan oleh faktor lain yaitu *moisture retention* atau tingkat kelembapan material. Salah satu indikator adanya kemampuan *moisture retention* adalah tingkat hidrofobik permukaan material dan kemampuan resapnya. Pada ketiga variasi beton diuji *contact angel* pada permukaan nya dan di amati berapa lama air dapat meresap ke dalam beton. Hasil uji *contact angel* ditampilkan pada Gambar 5.16.

Variasi C	Variasi M	Variasi MS
		
Hidrofilik	Hidrofilik	Hidrofilik
Sangat cepat meresap ke dalam beton < dari 1 menit	Lebih lama meresap ke dalam beton > dari 1 menit	Lebih lama meresap ke dalam beton > dari 1 menit
(a)	(b)	(c)

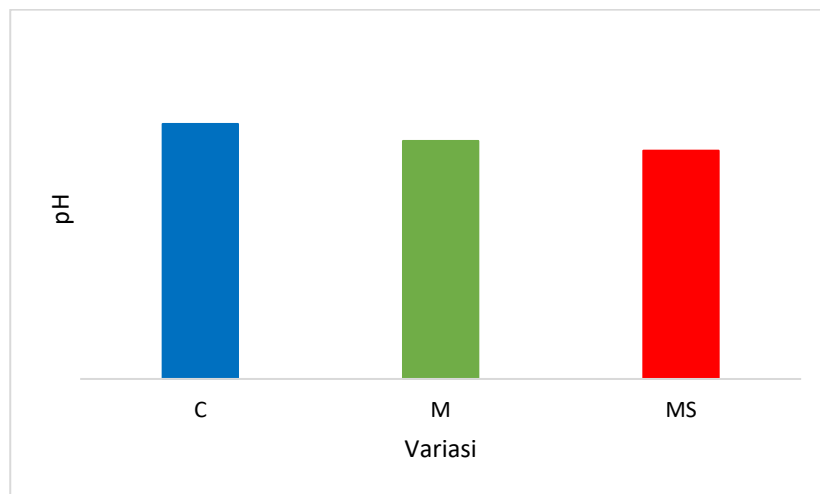
Gambar 5.16. Kemampuan Hidrofilik di Permukaan Variasi

Pada Gambar 5.16. menunjukkan seluruh variasi di permukaan adalah hidrofilik dengan sudut kontak kurang dari 90°C. Kemampuan meresap beton berbahan semen dengan pengamatan visual pada variasi C lebih cepat dibandingkan pada variasi M dan MS. Hal ini akan meningkatkan kelembapan/*moisture* pada beton yang dapat meningkatkan *bioreceptivity* (Medeiros & Helene, 2009).

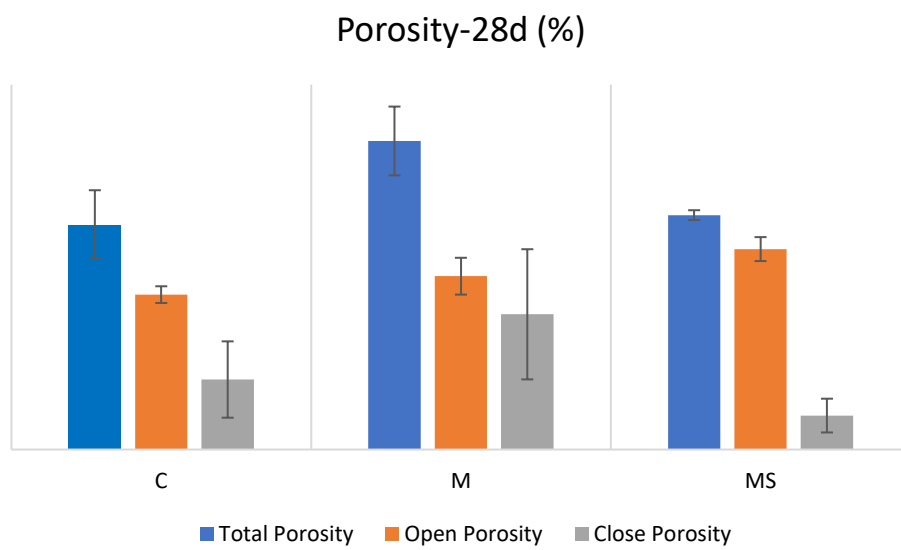
Kaitannya dengan bioresseptivitas, variasi sampel sebagai substrat diuji dengan pengujian pH. Hasil pengujian pada Gambar 5.17 menunjukkan bahwa pada umur 28 hari, beton semen (C) memiliki pH tertinggi sebesar 12,25, sedangkan geopolimer tanpa *slag* (M) dan geopolimer dengan *slag* (MS) memiliki pH yang lebih rendah, masing-masing sebesar 11,9 dan 11,7. Perbedaan ini menunjukkan bahwa lingkungan permukaan beton semen lebih alkalin dibandingkan material geopolimer. Tingginya pH pada beton semen disebabkan oleh keberadaan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil proses hidrasi semen yang menghasilkan larutan pori sangat basa. Sebaliknya, sistem geopolimer memiliki kandungan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang jauh lebih rendah sehingga pH permukaannya relatif lebih rendah. Kondisi ini penting dalam proses kolonisasi organisme laut karena pH permukaan, selain kekasaran permukaan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kemampuan mikroorganisme untuk menempel dan membentuk biofilm (Kurth et al., 2007).

Pada tahap awal paparan, permukaan dengan alkalinitas sangat tinggi dapat menghambat aktivitas beberapa mikroorganisme yang sensitif terhadap kondisi basa ekstrem. Oleh karena itu, beton semen berpotensi mengalami proses kolonisasi awal yang lebih lambat dibandingkan dengan material geopolimer. Sebaliknya, pH geopolimer yang lebih rendah dan lebih mendekati kondisi alami air laut dapat menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi pembentukan biofilm awal oleh bakteri, diatom, dan mikroalga. Namun demikian, seluruh nilai pH yang diperoleh masih berada pada rentang basa kuat (>11), sehingga perbedaan pengaruh terhadap kolonisasi awal kemungkinan tidak terlalu besar. Setelah beberapa minggu hingga bulan pertama paparan, pH permukaan material umumnya mulai menurun akibat proses pelindian (*leaching*) dan interaksi dengan air laut sehingga faktor lain, seperti kekasaran permukaan dan porositas, menjadi lebih dominan dalam mengendalikan perkembangan *biofouling*.

Selanjutnya, pada pengujian porositas (Gambar 5.18), geopolimer tanpa *slag* (M) memiliki total porositas tertinggi (38,07%), diikuti geopolimer dengan *slag* (MS) sebesar 28,92%, dan beton semen (C) sebesar 27,74%. Nilai porositas tertutup (*close porosity*) juga menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan, yaitu 16,68% pada M, 8,64% pada C, dan hanya 4,19% pada MS. Dari perspektif *biofouling*, porositas merupakan parameter penting karena jumlah pori yang lebih besar umumnya menyediakan lebih banyak ruang perlindungan bagi mikroorganisme pionir untuk melekat dan berkembang (Kim et al., 2022). Oleh karena itu, geopolimer tanpa *slag* yang memiliki total porositas tertinggi diperkirakan memiliki potensi kolonisasi awal yang lebih besar dibandingkan dengan dua material lainnya.



Gambar 5.17. pH Pada Beton Konvensional dan Mortar Geopolimer (sampel Umur 28 hari)



Gambar 5.18. Pengujian Porositas Pada Beton Konvensional dan Mortar Geopolimer (sampel Umur 28 hari)

BAB 6

PERTUMBUHAN *BIOFOULING*/BIOTA PENEMPEL PADA BETON KONVENSIONAL DAN MORTAR GEOPOLIMER

6.1 Kondisi Perairan Jembatan Suramadu

Perendaman benda uji dilakukan di kaki jembatan Suramadu sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.1. pada sisi pasang surut dan Gambar 6.2 di zona terendam. Lokasi dipilih karena menunjukkan adanya biota penempel pada tiang pancang jembatan sehingga dampak dari biota akan dapat dipahami.



Gambar 6.1. Lokasi Penelitian di Kaki Jembatan Suramadu sisi Surabaya di Zona Pasang Surut



Gambar 6.2. Tiang Pancang Jembatan Suramadu sisi Surabaya di Zona Terendam

Parameter air yang diuji untuk perairan antara lain untuk komposisi kimia yang diambil reguler setiap pemantauan. Tabel 6.1 menunjukkan komposisi kimia air laut perairan Suramadu yang di ambil di pilar no. 22 sesuai dengan lokasi penempatan sampel. Beton yang diletakkan di perairan Suramadu pada pilar 22 jika dilihat dari

paparan klorida dapat dikategorikan pada Paparan C2. Hal ini dikarenakan beton terus menerus terpapar klorida sekalipun nilai nya fluktuatif. Selain itu jika dilihat dari paparan sulfat maka beton termasuk pada kategori paparan sulfat S2 yaitu berada pada kisaran nilai $1500 < \text{SO}_4^{2-} < 10.000$. Nilai sulfat bebas yang ditemukan di perairan Suramadu adalah 1507,16 pada September 2024 mg/L dan sedikit meningkat pada Maret 2025 sebesar 1653,36 mg/L (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Kondisi pengasaman laut jika dilihat dari komposisi bikarbonat mengalami peningkatan dari tahun 2023 ke tahun 2024 maupun 2025 namun sedikit turun untuk April 2026.

Tabel 6.1 Komposisi Kimia Air Laut Perairan Suramadu

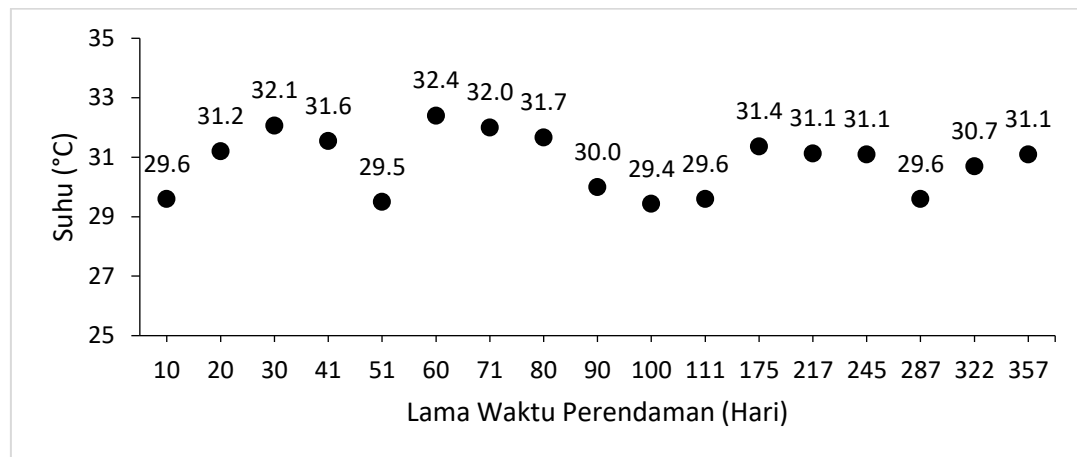
Parameter	sat	metode analisis	Pengambilan data bulan-				
			Oktober 2023	September 2024	Maret 2025	September 2025	April 2026
Klorida bebas	mg/L	Argentometri	N/A				
Klorida terikat	mg/L	Argentometri		N/A			
Sulfat bebas	mg/L	Spektrofotometri					N/A
Sulfat terikat	mg/L	Spektrofotometri		N/A			
Karbonat (CO_3)	mg/L	Asidi-Alkalimetri		N/A		N/A	
Bikarbonat (HCO_3)	mg/L	Asidi-Alkalimetri	N/A		N/A		
Nitrat	mg/L	Spektrofotometri		N/A			
Fosfat	mg/L	Spektrofotometri				N/A	
Magnesium	mg/L	ICP	N/A				N/A

Selain itu dilakukan pula pengambilan data parameter air laut yaitu suhu, Ph, DO, salinitas, dan kecerahan. Parameter ini untuk mengetahui kondisi lingkungan yang sesuai atau tidak dengan pertumbuhan biota. Berdasarkan hasil pemantauan parameter air selama 287 hari seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22, beberapa parameter menunjukkan kesesuaian dengan baku mutu lingkungan laut sesuai PP No.22 Tahun 2021 untuk Biota Laut, sementara beberapa lainnya masih di bawah standar dan dapat mempengaruhi keberlangsungan biota penempel.

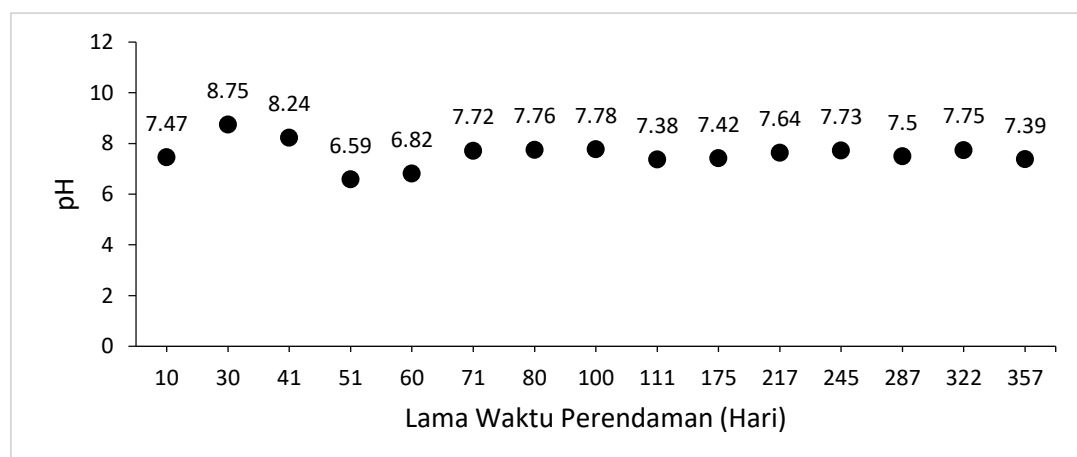
Suhu rata-rata perairan cenderung tinggi melebihi 30°C yang melebihi batas atas baku mutu ($28\text{--}30^\circ\text{C}$). Suhu yang tinggi dapat mempercepat metabolisme biota laut namun juga berpotensi menurunkan kadar oksigen terlarut namun menurut Nybakken (1988) suhu tersebut masih dapat ditolerir oleh *biofouling* maksimal pada suhu 30°C . pH rata-rata berada pada rentang ideal yaitu $7\text{--}8,5$ meskipun ada satu waktu yang tercatat tinggi di angka 8,75. Namun nilai pH tersebut masih mendukung kehidupan biota laut, termasuk mikroorganisme penempel seperti bakteri pembentuk biofilm. Kadar oksigen terlarut (DO)

menunjukkan nilai fluktuatif tetapi sebagian besar menunjukkan nilai DO >5 ppm, sehingga masih cukup menunjang respirasi organisme air. Nilai salinitas sebagian besar waktu pemantauan berada di bawah rentang standar baku mutu yaitu 33–34 ppt. Hal ini berpotensi mempengaruhi jenis biota laut yang mungkin terpengaruh pada perubahan kadar garam, termasuk jenis bakteri dan makrofouling seperti barnacle.

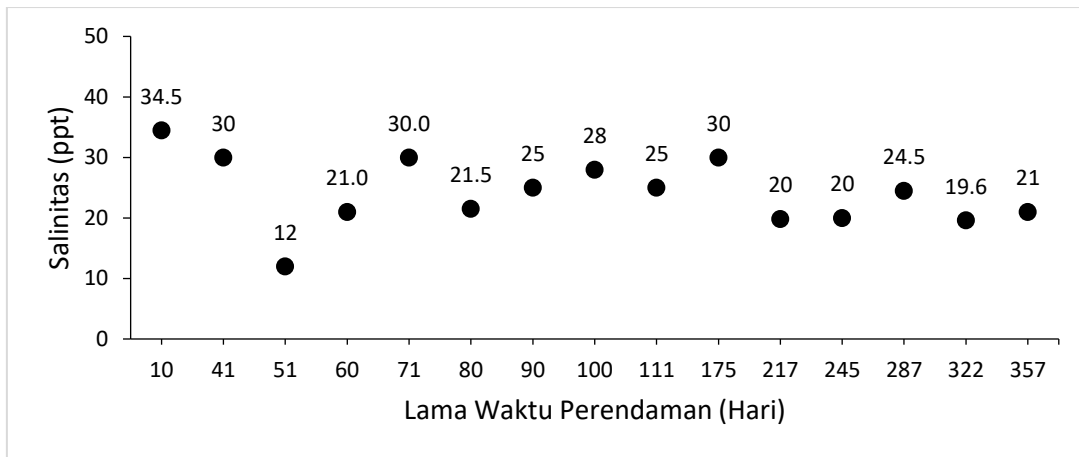
Pemantauan secara reguler baik pada durasi 10 hari, kemudian meningkat 15 hari dan kemudian menjadi 30 hari menunjukkan parameter pH dan DO mendukung untuk pertumbuhan biota. Hasil pemantauan suhu yang melebihi baku mutu, kecerahan yang sangat rendah dibawah baku mutu, serta salinitas di bawah standar baku mutu dapat menjadi faktor yang menghambat kolonisasi biota dan keberagaman biota penempel pada substrat variasi beton.



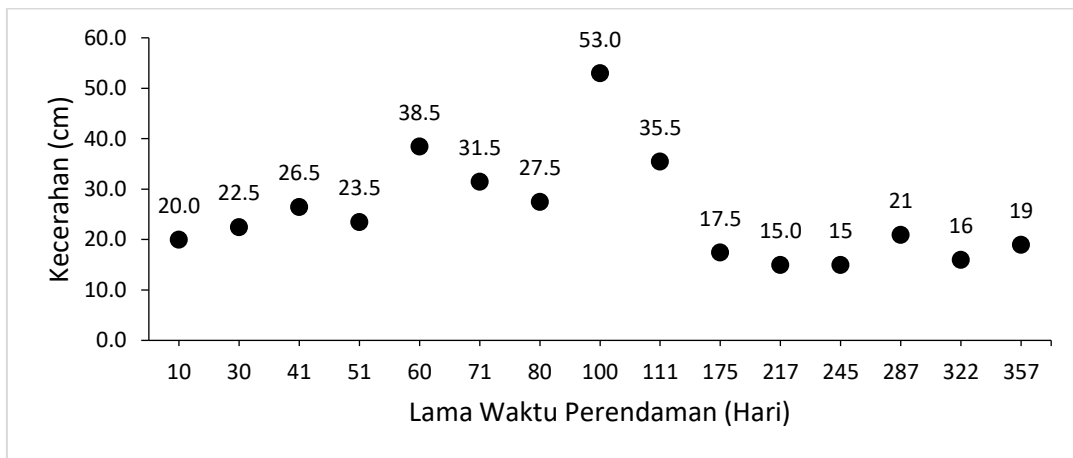
(a)



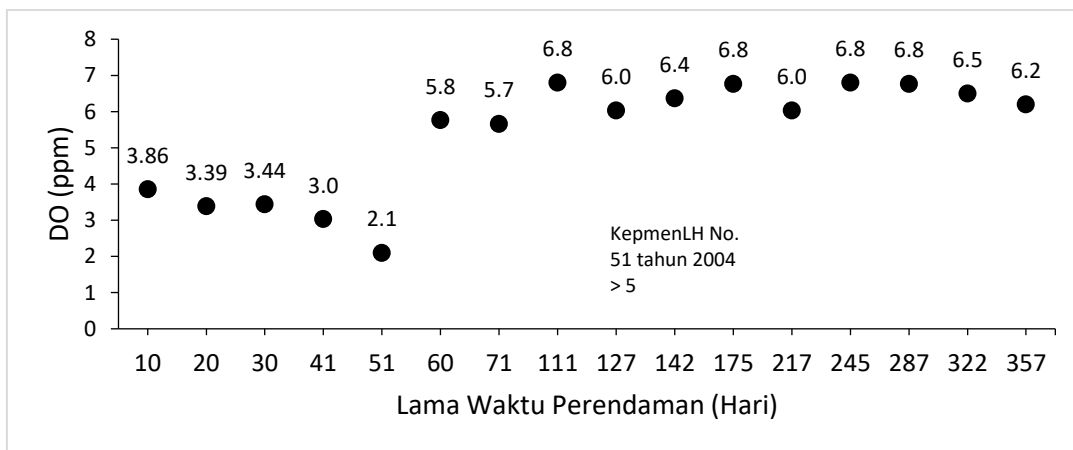
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.22. Parameter Kimia Perairan Suramadu (a) Suhu, (b) pH, (c) Salinitas, (d) Kecerahan, (e) DO

Tabel 4.10. Kesesuaian Baku Mutu Perairan Menurut PP No. 22 Tahun 2021

No.	Nama	Kriteria Baku Mutu PP No. 22 Tahun 2021
1	Suhu	28°C – 30°C
2	Kecerahan	> 3 m
3	pH	7 - 8,5
4	Salinitas	33 - 34 ppt
5	DO	> 5 mg/L

6.2 Pertumbuhan *Biofouling* pada Variasi Substrat Beton

Pertumbuhan *biofouling* diawali dengan penempelan bakteri. Hal ini mengindikasikan pemantauan pertumbuhan bakteri pada variasi substrat beton C dan CM diperlukan untuk melihat dampak perbedaan substrat terhadap penempelan bakteri. Sampel substrat dibuat dengan benda uji kubus berukuran masing-masing sisi 5 cm yang ditenggelamkan di pilar 22 dan dipantau dengan durasi 5 hari pada usia perendaman 5, 10, 15, dan 20. Pertumbuhan bakteri *microfouling* direpresentasikan dengan perhitungan TPC (*Total Plate Count*). Hasil perhitungan TPC ditunjukkan pada Tabel 6.2.

Berdasarkan Tabel 6.2 variasi C yaitu beton semen dengan 20% *fly ash* menunjukkan jumlah koloni yang lebih tinggi dibandingkan pada variasi M (mortar geopolimer), terutama pada waktu perendaman 15 dan 20 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa permukaan C memiliki *bioreceptivity* lebih tinggi dibandingkan M sebagai habitat bakteri. Hal ini didukung oleh tekstur permukaan C yang lebih kasar dibanding M. Kekasaran permukaan pada variasi C memberikan ruang ceruk sebagai habitat dan menyediakan nutrisi lebih besar bagi pertumbuhan bakteri (Hayek et al., 2021). Visual dokumentasi benda uji selama perendaman dapat dilihat pada Tabel 6.3. Pada pemantauan hari ke 15 jumlah koloni bakteri menurun dan pada hari ke 20 ditemukan *macrofouling* sehingga perhitungan koloni bakteri dihentikan.

Tabel 6.2 Perhitungan Koloni Bakteri pada Variasi Substrat

Kode	Jumlah isolat	Jumlah Koloni Bakteri (CFU/mL) Durasi Perendaman (Hari)			
		5	10	15	20
C	9	$7,3 \times 10^3$	11×10^3	$9,1 \times 10^3$	<i>macrofouling</i>
M	5	$5,9 \times 10^3$	$9,4 \times 10^3$	$7,6 \times 10^3$	<i>macrofouling</i>

Tabel 6.3 Benda Uji Selama Perendaman

Variasi benda uji	5 hari
Mortar Semen	
Mortar geopolimer	

Tahap penempelan *macrofouling* pengamatan yang dilakukan antara lain identifikasi jenis *biofouling*, persentaseutupan *biofouling*, dan berat biomassa *biofouling*. Pengamatan *macrofouling* selain dilakukan pada variasi substrat beton (variasi C dan CM), juga melihat pengaruh zona paparan terhadap pertumbuhannya. Sehingga diamati juga sampel beton C pada variasi zona pasang surut yang diletakkan di pilar no. 5 dan zona terendam yang diletakkan di pilar no.22. Identifikasi jenis *biofouling* menggunakan identifikasi morfologi, yaitu membandingkan spesies yang ditemukan dengan referensi yang ada. Prosentaseutupan *biofouling* dilakukan dengan mengambil dokumentasi dan mengolahnnya dengan image analisis. Penambahan berat dilakukan secara manual dengan menimbang sampel pada setiap kali pemantauan.

a. Identifikasi jenis *biofouling*

Biota yang menempel pada sampel beton diobservasi pada zona pasang surut dan zona terendam. Sampel zona pasang surut diletakkan di pilar nomor 5 dan zona terendam diletakkan di pilar nomor 22. Contoh sampel yang tertempel biota dapat dilihat pada Gambar 6.3. Terdapat perbedaan jenis *biofouling* yang hidup di zona pasang surut dan terendam. Pada zona pasang surut, *biofouling* makro / *macrofouling* yang ditemukan adalah *Amphibalanus sp.*, *Spirobranchus sp.* dan *Chaetomorpha sp.*

dengan jumlah yang lebih banyak menempel adalah Teritip jenis *Amphibalanus sp.* Sedangkan jenis *macrofouling* yang ada pada zona terendam adalah *Spirobranchus sp.*, *Sorites sp.*, larva teritip dan pemukiman dengan jumlah penempel tertinggi adalah *Spirobranchus sp.*

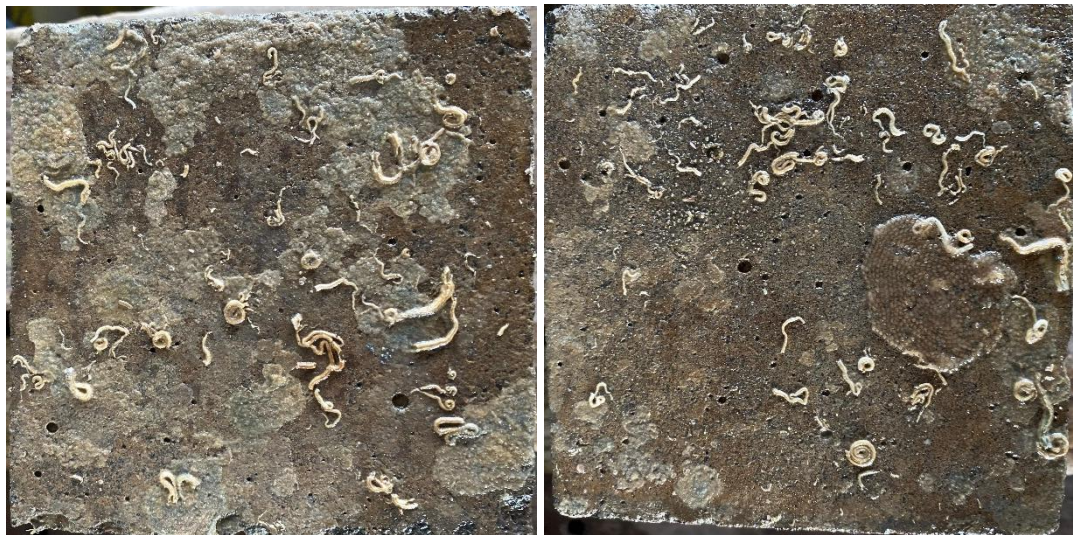
Amphibalanus sp. dan *Spirobranchus sp.* bukan merupakan biota asli Indonesia. Asal *Amphibalanus sp.* sulit untuk ditentukan karena jenis ini merupakan bagian dari penyebaran transportasi melalui lambung kapal. Teritip ini kemungkinan berasal dari seluruh wilayah Pasifik Barat dan Samudra Hindia, mulai dari Afrika Tenggara hingga Tiongkok Selatan. Sedangkan *Spirobranchus sp.* umum ditemukan di Inggris, Irlandia, pesisir barat laut Eropa hingga Mediterania (Riley & Susie, 2005). Keberadaan kedua spesies ini di perairan Suramadu diduga berasal dari *biofouler* yang menempel di lambung kapal dan bersandar di wilayah perairan Indonesia khususnya Jawa Timur. Kedua spesies ini tergolong sebagai biota invasive yang memiliki penyebaran cepat dan kemampuan adaptasi yang baik sehingga dapat hidup dengan baik di Indonesia. Selain *Spirobranchus sp.* terdapat pula jenis *Einhornia sp.* yang melapisi permukaan beton. Lapisan ini diduga dapat menghambat masuknya ion agresif ke dalam beton sehingga berdampak pada durabilitasnya.

Jika dilihat dari komposisinya, spesies di zona pasang surut didominasi oleh spesies bercangkang kapur serta sesuai bagi spesies yang mampu bertahan terhadap perubahan lingkungan, seperti teritip dan alga filamen. Zona terendam memiliki lebih sedikit spesies yang bercangkang kapur dan lebih banyak spesies yang membentuk lapisan. Perbedaan dominasi spesies antara kedua zona yang dipengaruhi oleh lingkungan mengindikasikan bahwa perlindungan substrat beton di laut harus mempertimbangkan jenis zona perendaman, karena hal ini akan mempengaruhi jenis *biofouling* dan potensi degradasi material yang terjadi.

Railkin (2004) menyebutkan bahwa *biofouling* tidak hanya terbentuk oleh kelompok kingdom *animalia* saja namun terdapat pula kingdom *plantae* yang termasuk *biofouling*. Kingdom *animalia* yang termasuk *macrofouling* antara lain spons, hidroid, karang, polikaeta, teritip, kerang, bryozoa, teripang dan asidia. Kingdom *plantae* yang termasuk *macrofouling* adalah makroalga termasuk di dalamnya *green algae*, *red alga*, dan *brown alga*.



(a) Zona Pasang Surut

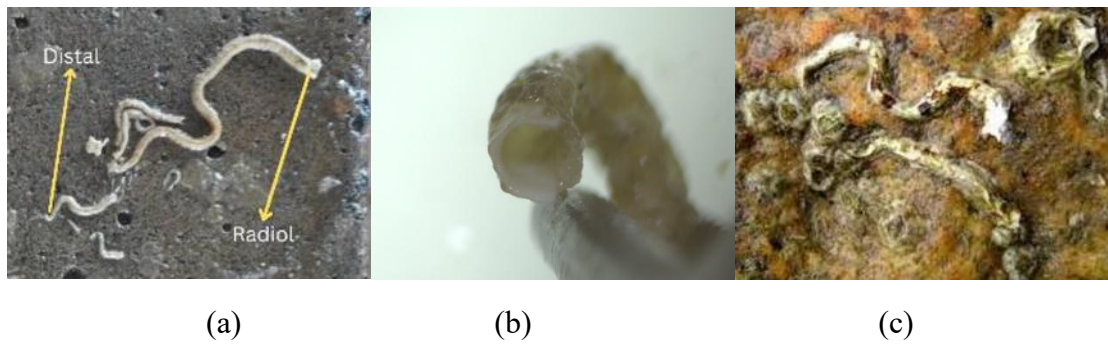


(b) Zona Terendam Beton Konvensional



(c) Zona Terendam Beton Konvensional yang Dilapisi Mortar Geopolimer

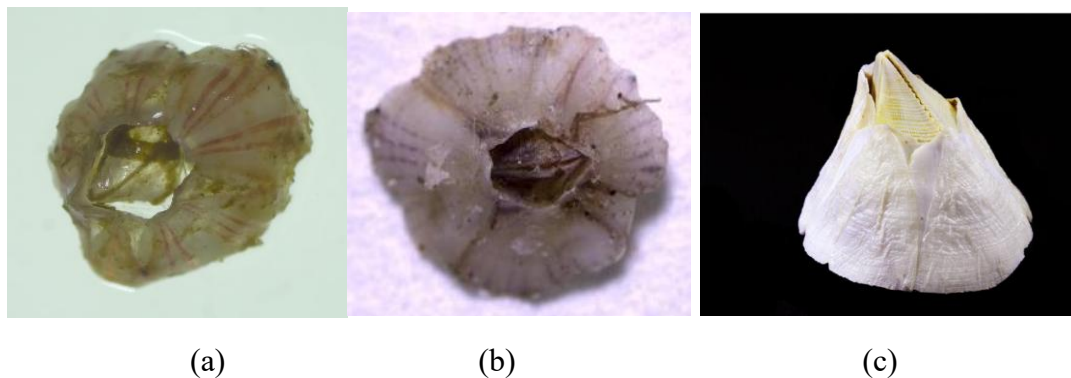
Gambar 6.3. *Biofouling* yang Menempel Pada Beton Konvensional di hari ke 357 Pemantauan



Gambar 6.4. *Spirobranchus sp.* (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi
(Riley & Susie, 2005)

Kingdom : *Animalia*
Phylum : *Annelida*
Class : *Polychaeta*
Order : *Sabellida*
Family : *Serpulidae*
Genus : *Spirobranchus*

Spirobranchus sp. atau yang juga disebut cacing tabung memiliki warna cangkang putih dengan tekstur permukaan halus seperti terlihat pada Gambar 6.4. *Spirobranchus sp.* tidak pernah meninggalkan tabungnya. Proses respirasi dan ekskresi pada cacing ini terjadi dengan menggunakan pergerakan silia. Proses respirasi terjadi melalui permukaan tubuh dan mahkota cabang. Habitatnya di zona neritik hingga kedalaman 70meter dan menempel di batu, cangkang, batu karang, batuan dasar, dan karapas (Riley & Susie, 2005). Karena mekanisme hidup yang menempel pada permukaan substrat dan tidak berpindah, cacing tabung atau *Spirobranchus sp.* termasuk biota penempel/*biofouling*.



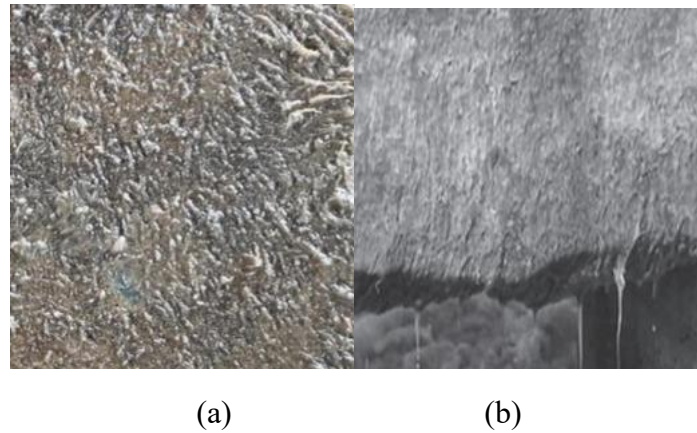
Gambar 6.5. *Amphibalanus sp.* (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi
(Jaberimanesh et al., 2019)

Kingdom : *Animalia*
Phylum : *Arthropoda*
Class : *Thecostraca*
Order : *Balanomorpha*
Family : *Balanidae*
Genus : *Amphibalanus*

Pada substrat beton genus *Amphibalanus sp.* yang ditemukan memiliki cangkang berbentuk kerucut dengan susunan dinding cangkang simetris dan permukaan relatif halus. Warna cangkang umumnya putih keabu-abuan dengan garis-garis vertikal berwarna ungu hingga merah muda yang memanjang dari bagian dasar menuju puncak kerucut. Pada bagian dasar *Amphibalanus sp.* terdapat lempeng basal (*basal plate*) yang berfungsi sebagai tempat utama perlekatan pada substrat. Bagian ini menghasilkan semen biologis (*barnacle cement*) yang membuat teritip dapat menempel sangat kuat dan tidak mudah terlepas dari permukaan tempat hidupnya (Petersen et al., 2020). Pada proses makan, *Amphibalanus* termasuk organisme *filter feeder* yang memperoleh makanan berupa plankton dan detritus dengan cara menjulurkan cirri (kaki halus) ke luar cangkang saat terendam air. Saat kondisi air surut atau terganggu, operculum akan menutup rapat untuk melindungi tubuh dari kekeringan dan gangguan predator (Raine et al., 2020).

Siklus hidup *Amphibalanus sp* terbagi menjadi fase larva dan fase dewasa. Pada fase larva, bersifat planktonis dan hidup melayang mengikuti arus perairan. Fase larva tersebut terbagi menjadi dua tahap, yaitu larva *nauplii* dan larva *cyprid*. Larva *nauplii* aktif berenang dan memperoleh makanan dari fitoplankton serta partikel organik di perairan sambil mengalami beberapa kali pergantian kulit (*molting*). Selanjutnya larva berubah menjadi fase *cyprid*, larva tidak lagi aktif makan dan mulai mencari permukaan substrat yang sesuai. Larva kemudian menggunakan antenula untuk mengenali permukaan substrat dan mengeluarkan zat perekat alami *cement gland* sehingga dapat menempel secara permanen. Setelah berhasil melekat, larva mengalami metamorfosis dan berkembang menjadi individu dewasa dengan membentuk cangkang kapur yang keras pada permukaan substrat (Xu & Wang, 2025). Organisme ini juga memiliki ketahanan yang cukup tinggi terhadap perubahan lingkungan seperti suhu, salinitas, dan arus, sehingga dapat hidup di berbagai kondisi perairan. Selain itu, Balanus bersifat hermafrodit dengan pembuahan

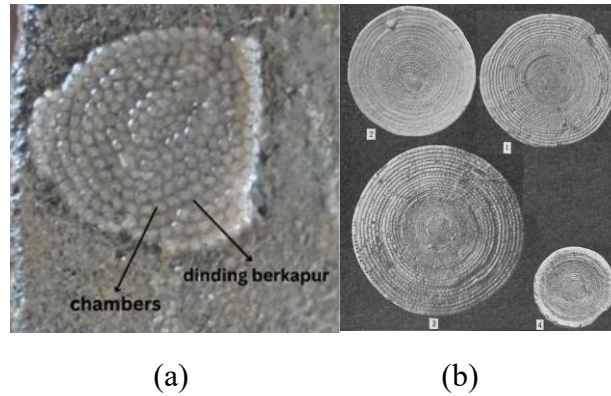
internal, dan setiap individu dapat menghasilkan sekitar 1.000 hingga 10.000 telur, sehingga menyebabkan penyebarannya sangat luas di laut (Ha et al., 2021).



Gambar 6.6. *Chaetomorpha sp.* (a) Gambar Pengamatan (b) Gambar Referensi
(Jayakumar & Saravanane, 2009)

Kingdom : Plantae
Phylum : Chlorophyta
Class : Ulvophyceae
Order : Cladophorales
Family : Cladophoraceae
Genus : *Chaetomorpha*

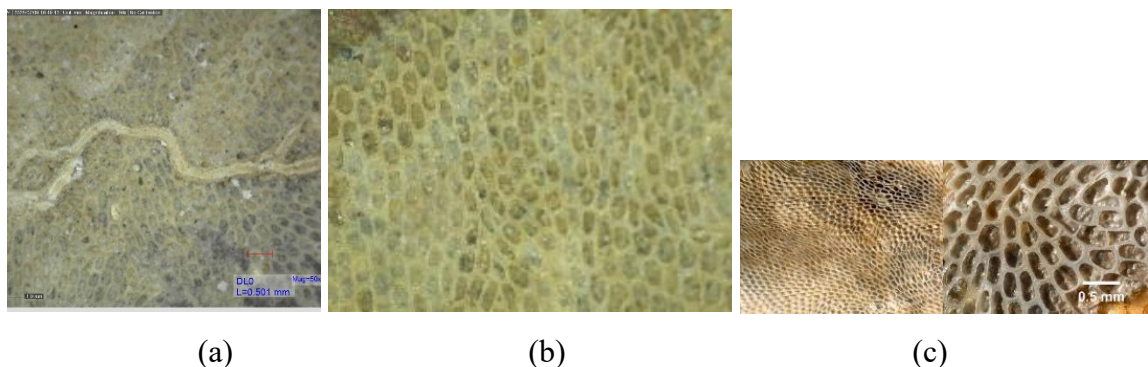
Chaetomorpha sp. merupakan spesies yang berada dalam jenis makroalga hijau (Chlorophyta). Ciri khas genus *Chaetomorpha* adalah memiliki struktur filamen berbentuk benang tanpa percabangan dengan warna hijau tua hingga hijau kecoklatan. Makroalga ini tidak memiliki akar sejati namun dapat menempel pada substrat keras seperti beton maupun batu yang ada di laut (Jayakumar & Saravanane, 2009). *Chaetomorpha sp.* biasanya ditemukan di zona litoral, yang meliputi zona supralitoral, litoral, dan infralitoral. Daerah-daerah ini dicirikan oleh kedekatannya dengan pantai dan dipengaruhi oleh pergerakan pasang surut. Spesies ini merupakan bagian dari kelompok pantropis, yang mengindikasikan penyebarannya yang luas di wilayah tropis dan subtropis. Rumput laut ini tumbuh subur di zona pesisir, terutama di daerah tropis dan subtropics dan berkontribusi terhadap keanekaragaman ekologi habitat pesisir. Spesies ini dapat ditemukan di berbagai lingkungan pesisir yang memiliki kondisi perairan kaya nutrisi. Makroalga ini dapat tumbuh sepanjang tahun terutama pada perairan dengan suhu dan kelembaban tinggi.



Gambar 6.7. *Chaetomorpha* sp. (a) Gambar Pengamatan (b) Gambar Referensi (WoRMS/World Register of Marine Species)

Kingdom : Chromista
 Phylum : Foraminifera
 Class : Tubothalamea
 Order : Miliolida
 Family : Soritidae
 Genus : Sorites

Sorites sp. merupakan foraminifera berbentuk cakram, memiliki dinding samping berkapur yang tipis dan dinding tebal di antara dua bilik seperti terlihat pada Gambar 6.7. Dinding samping yang tipis memungkinkan warna kecoklatan sitoplasma terlihat. *Sorites* sp. dapat hidup di zona neritik dengan kedalaman cenderung dangkal dengan kedalaman mencapai 200m dan masih dapat ditembus oleh sinar matahari (zona eufotik). Sedangkan zona oseanik merupakan kawasan air laut dalam yang kedalamannya lebih dari 200 meter dan tidak dapat ditembus sinar matahari (zona disfotik) (Nurhasanah et al., 2015).



Gambar 6.8. *Amphibalanus* sp. (a) dan (b) Gambar Pengamatan (c) Gambar Referensi (Motz G (2026))

Kingdom : *Animalia*
Phylum : *Bryozoa*
Class : *Gymnolaemata*
Order : *Cheilostomata*
Family : *Electridae*
Genus : *Einhornia*

Pada Gambar 6.8 ditemukan makrofouling lain yang merupakan salah satu jenis *Bryozoa* yaitu *Einhornia sp.* *Einhornia* merupakan organisme yang membentuk koloni dan menempel secara permanen pada permukaan benda padat di lingkungan laut, seperti batu, kerang, kayu, dan struktur buatan seperti beton laut dan pelampung.. Umumnya ditemukan pada perairan laut dangkal dan sedang yang tumbuh di permukaan substrat keras, termasuk permukaan beton, kerang, dan batu. Spesies ini tidak berasal dari satu daerah spesifik (bukan spesies endemik), melainkan merupakan bagian dari komunitas bentik laut yang sudah dikenal sejak abad ke-18 dan pertama kali dideskripsikan oleh Pallas pada tahun 1766 yang kemudian terdaftar dalam WoRMS (*World Register of Marine Species*). *Einhornia* adalah *bryozoa* laut yang berasal dari perairan laut dangkal beriklim sedang dan subtropis, dengan penyebaran luas global dari Samudra Atlantik, Laut Tengah, hingga sebagian wilayah Indo-Pasifik. Spesies ini mudah beradaptasi dan sering muncul di permukaan beton laut, menjadikannya penting dalam studi makrofouling dan pelapukan beton maritim (Evseeva et al., 2022). Karena spesies ini yang mudah beradaptasi tersebut menyebabkan *Einhornia* dapat tumbuh hingga di perairan Surabaya. Hal ini juga bisa terjadi karena spesies tersebut terbawa dari distribusi kapal asing yang masuk ke Indonesia



Gambar 6.9. *Biofouling* diduga anemon laut

Kingdom : *Animalia*
Phylum : *Cnidaria*
Class : *Anthozoa*
Order : *Actiniaria*

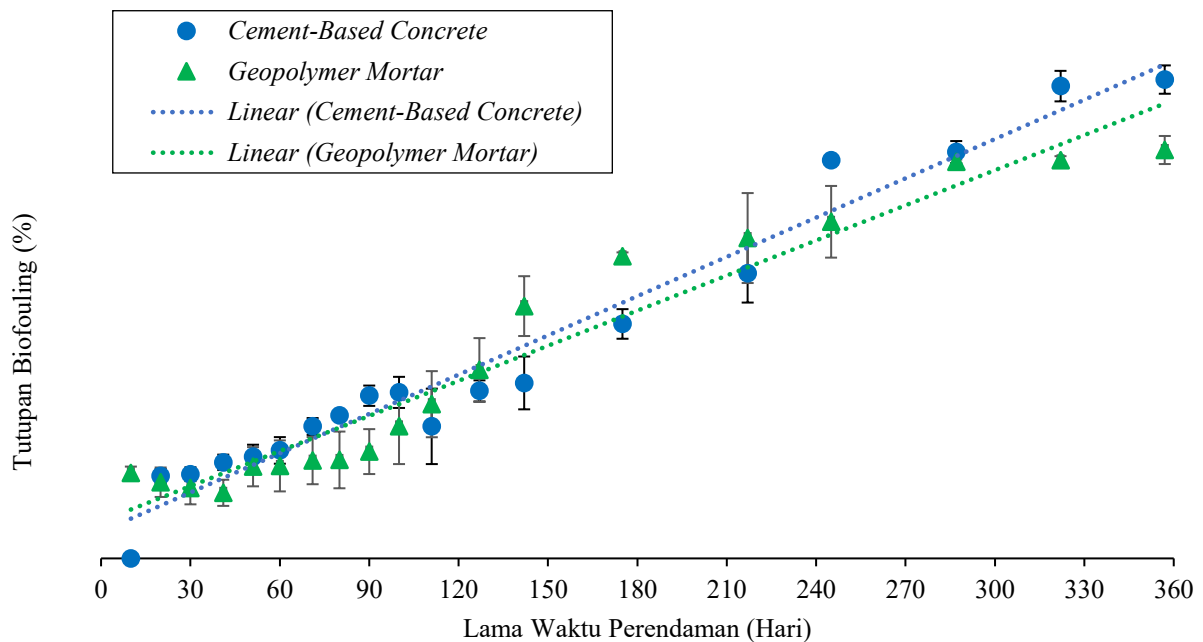
Biofouling yang belum diketahui pasti jenisnya juga tampak pada beton di zona terendam. Biota tersebut tidak memiliki cangkang dan lunak dengan membentuk radial yang menyerupai organisme sesil kecil seperti anemon laut (*Ordo Actiniaria*). Organisme ini memiliki tubuh silindris dan tembus cahaya yang melekat secara permanen pada substrat, dengan cakram oral yang jelas dikelilingi oleh tentakel radial pendek. *Biofouling* ini muncul dan tidak bertahan terus menerus selama periode pengamatan, hal ini kemungkinan karena kondisi perairan yang tidak mendukung pertumbuhannya.

b. Persentase Tutupan *Biofouling*

Pengamatan *biofouling* selanjutnya dilakukan dengan melihat persentase tutupan pada permukaan beton. Hasil pengolahan gambar pada *imageJ* mendapatkan hasil sebagaimana terlihat pada Gambar 6.10 yang menunjukkan perkembangan persentase tutupan permukaan *biofouling* pada beton berbasis semen dan mortar geopolimer selama 357 hari perendaman di laut. Hasil menunjukkan bahwa mortar geopolimer yang digunakan sebagai lapisan memperlambat laju kolonisasi. Laju pertumbuhan *biofouling* dikuantifikasi menggunakan kemiringan regresi linier dari data eksperimental pada kondisi paparan zona terendam. Persentase tutupan *biofouling* pada mortar geopolimer 5,95% lebih rendah daripada beton berbasis semen. Bukti juga mendukung bahwa tingkat pertumbuhan sekitar 7,93% lebih lambat dibandingkan dengan beton berbasis semen. Persentase tutupan *biofouling* memiliki mekanisme yang berbeda pada kedua jenis substrat.

Pada awal paparan, beton konvensional berbasis semen memiliki tutupan yang lebih rendah dibandingkan dengan mortar geopolimer. Pengkondisian permukaan hingga pembentukan biofilm berkaitan dengan nilai pH, sebagaimana dijelaskan dalam mekanisme pada Tabel 2.1. Mortar geopolimer memiliki nilai lebih rendah (11,9) dibandingkan beton semen (12,2) sehingga lebih mendukung kolonisasi mikroba. Namun, *biofouling* terus berkembang pada kedua material tersebut dengan faktor lain yang lebih menentukan. Mortar geopolimer menunjukkan permukaan yang lebih halus, sebagaimana

terlihat pada hasil pengujian AFM pada Gambar 5.14, dibandingkan beton berbasis semen. Ceruk-ceruk yang banyak terdapat pada beton semen menyediakan area perlekatan bagi pertumbuhan organisme sehingga menghasilkan persentase tutupan *biofouling* yang lebih tinggi pada akhir periode pengamatan. Tren yang diamati selaras dengan konsep biorespektivitas, di mana kekasaran permukaan, porositas, dan komposisi kimia mempengaruhi kolonisasi biologis. Hayek et al. (2021) dan Veeger et al. (2021) menekankan bahwa permukaan yang lebih kasar meningkatkan biorespektivitas, menciptakan kondisi yang menguntungkan bagi mikroorganisme dan organisme makrofouling untuk membentuk koloni. Hal ini menunjukkan bahwa di luar manfaat ketahanan kimianya, morfologi permukaan mortar geopolimer berkontribusi langsung pada kinerja ketahanan *biofouling*, menjadikannya strategi perlindungan berkelanjutan untuk struktur beton yang terpapar lingkungan laut.



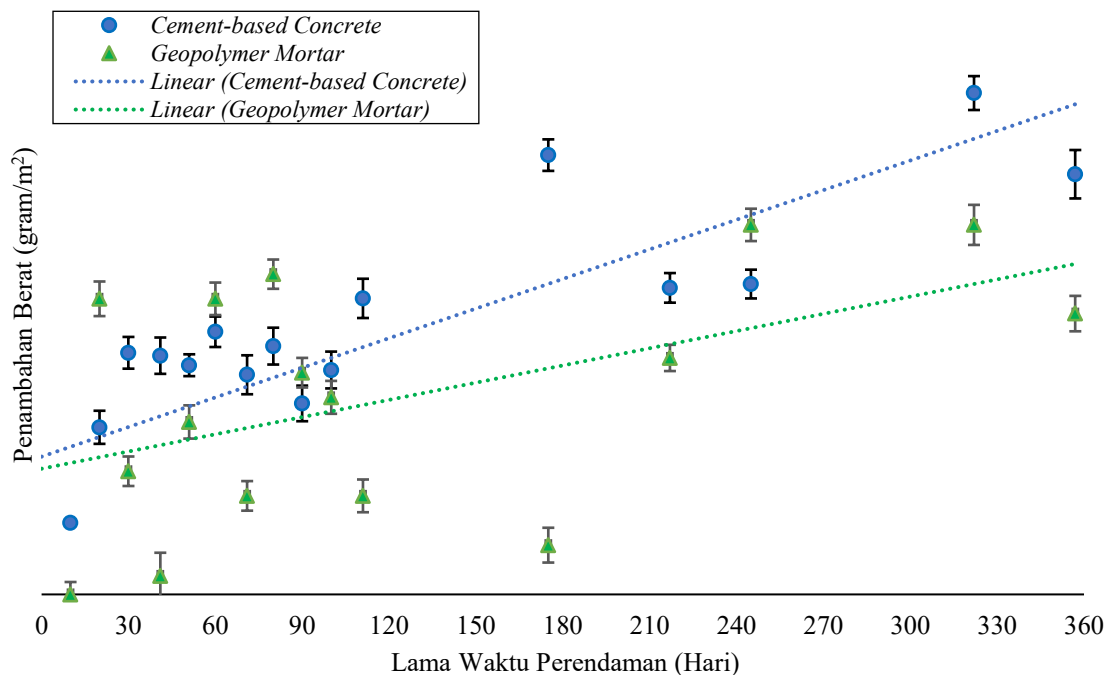
Gambar 6.10. Prosentase Tutupan *Biofouling* pada Variasi Beton di Zona terendam

c. Berat Biomassa *Biofouling*

Faktor lain yang juga digunakan untuk menilai pertumbuhan *biofouling* pada beton adalah biomassa yang dipantau secara rutin. Gambar 6.11 menunjukkan perubahan berat total spesimen beton akibat pertumbuhan *biofouling* selama masa pemantauan 357 hari pada Variasi C dan Variasi M. Penambahan berat pada beton konvensional mengikuti tren persamaan $y = 5.1045x + 712.37$. Pada variasi M terlihat peningkatan yang sangat rendah yaitu $y = 2.9663x + 650.04$. Sepanjang periode perendaman, beton konvensional

berbasis semen menunjukkan biomassa *biofouling* yang lebih tinggi dibandingkan mortar geopolimer. Dengan menggunakan persamaan regresi linier ini, perkiraan laju akumulasi biomassa *biofouling* adalah sekitar 2,575 kg/m²/tahun untuk beton berbasis semen dan 1,733 kg/m²/tahun untuk mortar geopolimer. Secara keseluruhan, mortar geopolimer menunjukkan peningkatan berat yang lebih rendah akibat *biofouling*, yaitu sekitar 26,12% dibandingkan dengan beton berbasis semen. Selain itu, penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa cangkang teritip dengan kadar kalsium berkontribusi secara signifikan terhadap berat struktur laut, dengan kepadatan cangkang berkisar antara 1,050 hingga 1,325 kg/m³ (Miller & Macleod, 2016). Hasil ini sejalan dengan sifat kekasaran permukaan substrat. Permukaan mortar geopolimer yang lebih halus membatasi area adhesi dan menghambat pembentukan biofilm awal, sehingga mengurangi akumulasi biomassa *biofouling* pada tahap selanjutnya.

Meskipun persentaseutupan *biofouling* dan penambahan berat mengikuti tren keseluruhan yang serupa, hubungan antara persentaseutupan dan akumulasi biomassa tidak sepenuhnya linier. *Biofouling* tahap awal dapat meningkatkan persentaseutupan namun tanpa meningkatkan berat, sedangkan kolonisasi tahap selanjutnya oleh organisme berkapur seperti teritip berkontribusi terhadap peningkatan biomassa. Oleh karena itu, persentaseutupan *biofouling* yang secara konsisten lebih rendah pada mortar geopolimer (Gambar 6.9) tercermin dalam penurunan laju akumulasi biomassa (Gambar 6.10), terutama pada periode perendaman yang lebih lama.



BAB 7

KUAT TEKAN BETON KONVENSIONAL DAN YANG DILAPISI MORTAR GEOPOLIMER

7.1 Pengujian Tekan

Variasi sampel yang dilakukan uji mekanis yaitu pengujian kuat tekan mencakup beton konvensional dengan substitusi *fly ash* 20% (C), beton yang dilapisi mortar geopolymer tanpa *slag* (M) dan dengan *slag* (MS), serta perlakuan lingkungan dengan/tanpa biota penempel (*expose/cover*) yang dipaparkan di lingkungan laut hingga 342 hari perendaman dengan umur benda uji 370 hari. Secara umum, seluruh benda uji mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 28 hari hingga 178 hari, kemudian relatif stabil hingga akhir periode pengamatan.

Pola keruntuhan yang ditunjukkan pada Gambar 7.1 didominasi oleh retak memanjang yang sejajar dengan arah pembebanan, yang berkembang dari bagian tengah menuju ujung spesimen. Menurut Neville & Brooks (2010), pola retakan secara vertikal merupakan karakteristik keruntuhan tekan normal (*compressive splitting failure*) yang menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada benda uji relatif merata. Mayoritas benda uji tidak ditemukannya retakan diagonal maupun pemisahan lapisan mortar secara menyeluruh. Kondisi ini menunjukkan bahwa ikatan antara mortar geopolimer dan beton konvensional masih terjaga dengan baik setelah 370 hari paparan laut, sehingga transfer tegangan antara kedua material dapat berlangsung secara efektif. Dengan demikian, pola keruntuhan yang terbentuk mengindikasikan distribusi beban yang cukup seragam serta kualitas lekatan antarmuka yang baik pada kedua kondisi paparan, baik *cover* maupun *expose*.

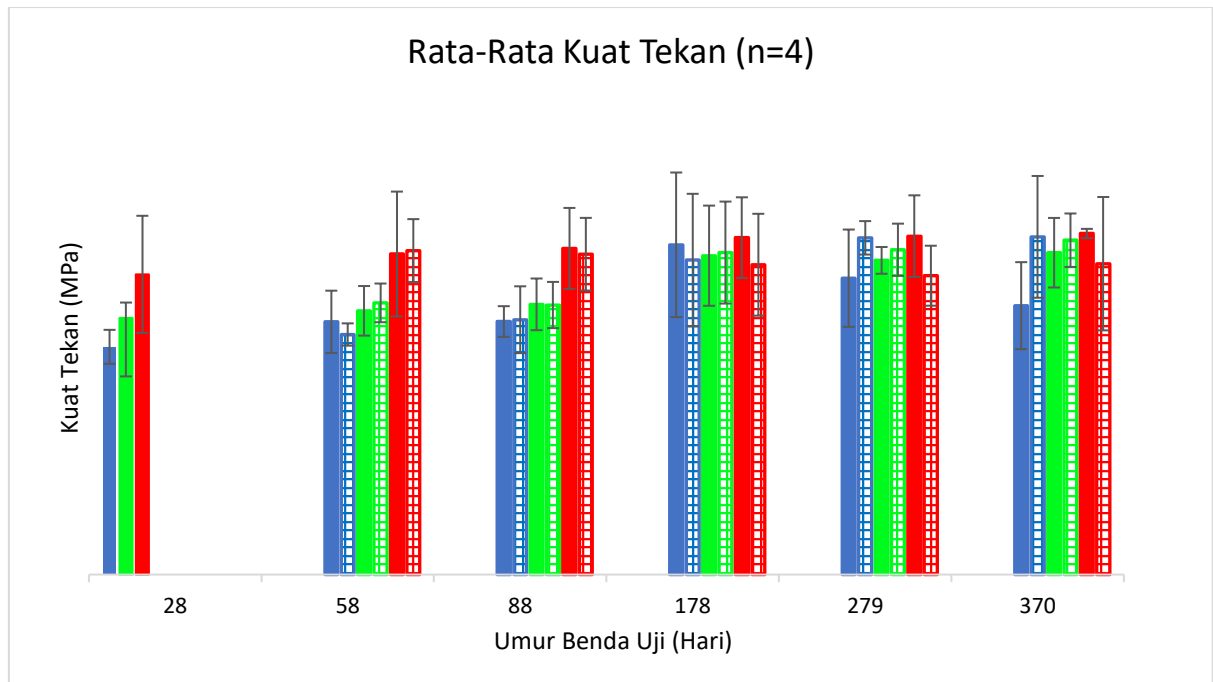
Hasil pengujian pada umur 28 hari, nilai kuat tekan tertinggi diperoleh oleh geopolimer dengan *slag* (MS) sebesar $42,16 \pm 4,32$ MPa, diikuti oleh geopolimer tanpa *slag* (M) sebesar $38,95 \pm 1,12$ MPa, dan beton semen (C) sebesar $36,81 \pm 1,12$ MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *slag* memberikan kontribusi terhadap percepatan pembentukan matriks pengikat sehingga menghasilkan kuat tekan awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran lainnya. Seiring bertambahnya umur paparan, kuat tekan seluruh material meningkat. Pada umur 58 dan 88 hari, kelompok MS tetap menunjukkan performa terbaik dengan kuat tekan antara 43 – 44 MPa, sedangkan M berada pada kisaran

40 MPa dan C sekitar 38–39 MPa. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi pada beton semen dan proses polimerisasi pada geopolimer masih berlangsung selama periode awal paparan laut.

Pada umur 178 hari, kuat tekan maksimum tercapai pada hampir seluruh variasi. Nilai kuat tekan beton semen *expose* (Ce) mencapai sekitar 44 MPa, sedangkan geopolimer tanpa *slag* dan geopolimer dengan *slag* berada pada kisaran 43–45 MPa. Pada umur 279 dan 370 hari, kuat tekan cenderung stabil dengan fluktuasi kecil. Geopolimer dengan *slag* tetap mempertahankan kuat tekan tertinggi, yaitu sekitar 45 MPa, sedangkan geopolimer tanpa *slag* berada pada kisaran 44 MPa dan beton semen sekitar 42–45 MPa. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa ketiga material memiliki ketahanan yang baik terhadap paparan laut jangka panjang. Hasil uji kuat tekan untuk seluruh variasi ditunjukkan pada Gambar 7.2.



Gambar 7.1 Pengujian Tekan Beton pada umur 370 hari (342 hari perendaman)



Gambar 7.2 Kuat Tekan Rata-rata Variasi Sampel Silinder (n=4)

7.2 Pengaruh Mortar Geopolimer dan *Biofouling* Terhadap Kuat Tekan

Pada Gambar 7.2 hasil pengujian tekan dapat dianalisis terkait penambahan *slag* pada mortar geopolimer. Geopolimer dengan *slag* (MS) secara konsisten menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan geopolimer tanpa *slag* (M) pada seluruh umur pengamatan. Fenomena ini berkaitan dengan peran *slag* sebagai sumber kalsium (Ca) yang sangat reaktif dalam sistem geopolimer. Pada geopolimer berbasis *fly ash* tanpa *slag*, produk utama reaksi geopolimerisasi adalah gel N-A-S-H (Sodium Alumino Silicate Hydrate) (Castillo et al., 2022). Ketika *slag* ditambahkan, kandungan CaO yang tinggi terlaui oleh larutan alkali dan membentuk gel C-A-S-H (Calcium Alumino Silicate Hydrate) atau C-(N)-A-S-H, yang terbentuk bersamaan dengan gel N-A-S-H (Parand et al., 2024). Keberadaan jenis gel tersebut menghasilkan struktur matriks yang lebih padat dengan mengurangi volume pori sebagaimana hasil pengujian porositas yang menunjukkan mortar geopolimer dengan *slag* lebih rendah 10% dibandingkan dengan mortar geopolimer tanpa *slag*. Hal ini menandakan *slag* memperbaiki ikatan antarpartikel sehingga meningkatkan kemampuan material menahan beban tekan. Selain itu, ion kalsium dari *slag* mempercepat proses pelarutan dan presipitasi produk reaksi sehingga perkembangan kekuatan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan geopolimer yang hanya mengandalkan *fly ash*. Peningkatan kadar *slag* pada geopolimer meningkatkan kuat tekan

karena terbentuknya jumlah gel pengikat yang lebih besar dan mikrostruktur yang lebih padat (Kina et al., 2025).

Kaitannya dengan pengaruh *biofouling* terhadap kuat tekan, pada tahap awal paparan laut, permukaan benda uji mulai mengalami kolonisasi oleh mikroorganisme seperti bakteri, diatom, dan alga mikroskopik yang membentuk biofilm (*microfouling*) kemudian berangsur muncul makrofouling. Pada Gambar 7.2 terlihat bahwa perbedaan kuat tekan antara benda uji *expose* dan *cover* pada umur 28–88 hari masih sangat kecil, meskipun variasi *expose* menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa *biofouling* yang baru menutup permukaan beton kurang dari 10% (Gambar 6.3) belum cukup untuk memberikan dampak signifikan terhadap interaksi antara material dan lingkungan laut.

Pada umur sekitar 178 hari, *biofouling* telah berkembang menjadi komunitas yang lebih kompleks, terdiri atas organisme makrofouling seperti *Spirobranchus Sp* dan *Einhornia Sp.* yang menutup permukaan antara 15 – 25%. Pada periode ini, hampir seluruh variasi menunjukkan kuat tekan maksimum atau mendekati maksimum. Namun beberapa sampel *expose* memiliki nilai yang setara atau sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan *cover*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa keberadaan biota penempel belum menyebabkan biodeteriorasi pada material. Lapisan *biofouling* berperan sebagai lapisan pelindung yang mendukung proses pematangan matriks beton maupun geopolimer (Chlayon et al., 2018).

Setelah sekitar satu tahun paparan, *biofouling* telah memasuki fase makrofouling yang lebih stabil dengan penutupan permukaan yang lebih luas (40% pada beton semen dan 34% yang dilapisi mortar geopolimer). Pada kondisi ini variasi *expose* menunjukkan kuat tekan lebih rendah menandakan terdapat mekanisme biodeteriorasi. *Biofouling* memicu aktivitas biologis dan metabolisme mikroorganisme yang dapat menghasilkan senyawa asam atau menyebabkan perubahan mikrostruktur permukaan material (Perdanawati et al., 2025).

Temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian yang menyatakan bahwa pengaruh *biofouling* terhadap beton laut sangat bergantung pada durasi paparan, jenis organisme, dan karakteristik substrat. Pada periode awal hingga menengah, *biofouling* dapat berperan sebagai lapisan pelindung (Chlayon et al., 2018, 2020), sedangkan dampak negatifnya umumnya lebih terlihat pada periode paparan yang jauh lebih panjang ketika aktivitas biologis dan akumulasi produk metabolisme mulai mempengaruhi mikrostruktur material (Hayek et al., 2021; Margapuram, 2025; Perdanawati et al., 2025).

Secara keseluruhan, peningkatan kuat tekan pada geopolimer dengan *slag* terutama disebabkan oleh pembentukan gel C-A-S-H/C-(N)-A-S-H tambahan yang menghasilkan mikrostruktur lebih rapat dan kuat dibandingkan geopolimer tanpa *slag*. Sementara itu, keberadaan *biofouling* selama satu tahun paparan laut tidak menunjukkan pengaruh negatif yang signifikan terhadap kuat tekan. Sebaliknya, lapisan biota penempel kemungkinan memberikan efek perlindungan terhadap permukaan material sehingga proses degradasi akibat lingkungan laut dapat ditekan. Efek ini terlihat lebih jelas pada material geopolimer, khususnya geopolimer dengan *slag* yang memiliki matriks lebih padat dan permeabilitas lebih rendah dibandingkan beton semen konvensional.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 8

KADAR KLORIDA, SULFAT, DAN KARBONASI PADA BETON KONVENSIONAL DAN MORTAR GEOPOLIMER

8.1 Kandungan Klorida, Kapasitas Pengikatan Klorida, dan Difusi Klorida

Kapasitas pengikatan klorida (*chloride binding capacity*) dari seluruh variasi setelah 40, 189, dan 350 hari perendaman disajikan pada Tabel 8.1. Secara umum, seluruh material menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengikat ion klorida, dengan nilai kapasitas pengikatan berkisar antara 41,99% hingga 69,09%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar ion klorida yang masuk ke dalam material dapat diikat dalam matriks sehingga mengurangi jumlah klorida bebas yang berpotensi menyebabkan korosi.

Pada umur 40 hari, kapasitas pengikatan klorida beton berbasis semen relatif seragam, yaitu sebesar $57,68 \pm 21,47\%$ untuk variasi *cover* (Cc) dan $56,60 \pm 13,01\%$ untuk variasi *expose* (Ce). Pada variasi mortar geopolimer tanpa *slag*, nilai kapasitas pengikatan mencapai $58,82 \pm 4,56\%$ pada Mc dan meningkat menjadi $66,13 \pm 7,77\%$ pada Me. Sementara itu, mortar geopolimer dengan *slag* menunjukkan nilai $58,34 \pm 20,73\%$ pada MSc dan $42,35 \pm 17,48\%$ pada MSe. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tahap awal paparan, seluruh material mulai mengikat klorida dengan cukup baik.

Pada umur 189 hari, perilaku pengikatan klorida mulai menunjukkan perbedaan yang lebih jelas. Variasi mortar geopolimer tanpa *slag* mengalami peningkatan kapasitas pengikatan yang signifikan, terutama pada Mc yang meningkat menjadi $69,09 \pm 9,21\%$, sedangkan Me mempertahankan nilai yang relatif tinggi sebesar $58,48 \pm 7,67\%$. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa proses geopolimerisasi yang masih berlangsung menghasilkan struktur aluminosilikat yang lebih matang dan menyediakan lebih banyak lokasi pengikatan klorida. Pada mortar geopolimer dengan *slag*, kapasitas pengikatan juga meningkat dari 58,34% menjadi $64,54 \pm 8,38\%$ pada MSc dan dari 42,35% menjadi $47,74 \pm 10,36\%$ pada MSe. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan *slag* turut berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan imobilisasi klorida melalui pembentukan gel C-(N)-A-S-H dan N-A-S-H yang lebih padat. Sebaliknya, beton berbasis semen menunjukkan kecenderungan penurunan kapasitas pengikatan klorida seiring bertambahnya waktu. Nilai kapasitas pengikatan pada Cc menurun dari 57,68% menjadi $52,79 \pm 28,67\%$, sedangkan pada Ce menurun dari 56,60% menjadi $47,96 \pm 23,44\%$. Penurunan ini diduga berkaitan dengan proses pelindian (*leaching*) serta perubahan produk hidrasi semen akibat paparan lingkungan laut yang berlangsung terus-menerus.

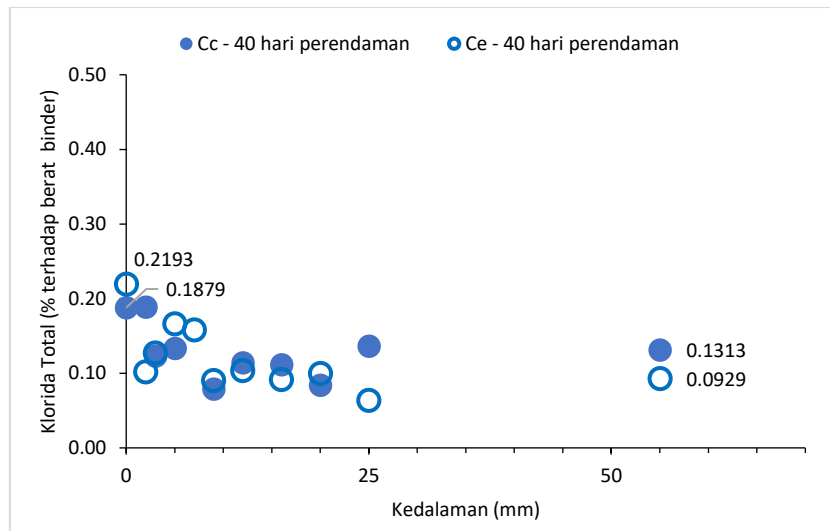
Pada umur 350 hari, data yang tersedia menunjukkan bahwa kapasitas pengikatan klorida beton berbasis semen terus mengalami penurunan menjadi $47,93 \pm 16,46\%$ pada Cc dan $41,99 \pm 19,82\%$ pada Ce. Sebaliknya, mortar geopolimer dengan *slag* menunjukkan perilaku yang berbeda. Variasi MSc memiliki kapasitas pengikatan sebesar $52,39 \pm 9,05\%$, sedangkan MSe meningkat hingga $60,32 \pm 8,44\%$. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem geopolimer, khususnya geopolimer dengan *slag yang* terpapar langsung lingkungan laut, memiliki kemampuan mempertahankan bahkan meningkatkan kapasitas pengikatan klorida dalam jangka panjang.

Pada beton berbasis semen, keberadaan *biofouling* cenderung berkontribusi menurunkan kapasitas pengikatan klorida dibandingkan sampel *cover*. Keberadaan *biofouling* diduga berkontribusi terhadap penurunan kapasitas pengikatan klorida pada beton semen melalui perubahan kondisi permukaan dan kestabilan produk hidrasi semen. Pada sampel yang terpapar *biofouling*, Terjadi perubahan lingkungan pada permukaan akibat aktivitas biota yang memungkinkan berpengaruh terhadap kestabilan produk hidrasi dan mengurangi jumlah situs pengikatan klorida yang aktif.

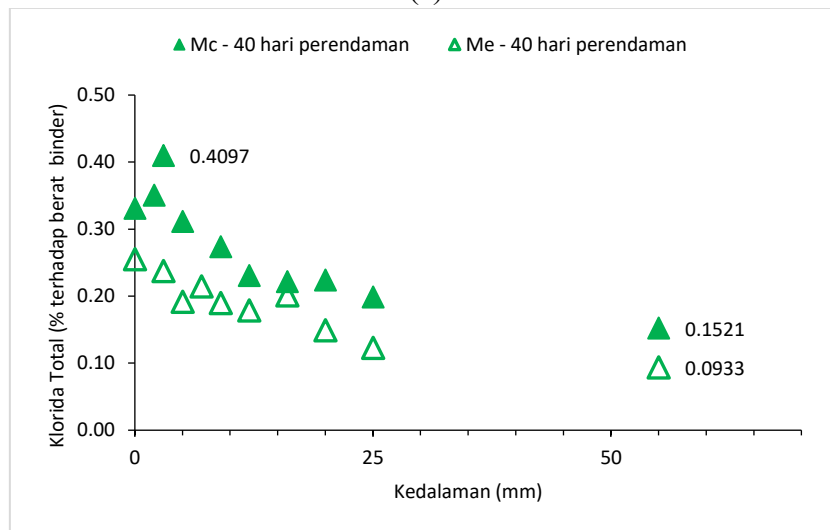
Secara keseluruhan, material geopolimer menunjukkan kapasitas pengikatan klorida jangka panjang yang lebih baik dibandingkan beton berbasis semen. Kemampuan ini berkaitan dengan keberadaan fase aluminosilikat dalam matriks geopolimer yang menyediakan lokasi adsorpsi dan pengikatan ion klorida melalui mekanisme fisik maupun kimia pada struktur gel N-A-S-H dan C-(N)-A-S-H. Selain itu, pengaruh *biofouling* terhadap kapasitas pengikatan klorida tidak menunjukkan kecenderungan yang seragam pada seluruh variasi. Namun pada geopolimer dengan *slag*, kondisi *expose* justru menghasilkan kapasitas pengikatan yang lebih tinggi pada umur 350 hari dibandingkan kondisi *cover*. Temuan ini menunjukkan bahwa interaksi antara *biofouling*, lingkungan laut, dan mikrostruktur material berlangsung secara kompleks dan kemungkinan dipengaruhi oleh perubahan karakteristik pori, proses retensi ion, serta perkembangan mikrostruktur material selama masa paparan.

Tabel 8.1 Kapasitas Pengikatan Klorida (*Chloride Binding Capacity*)

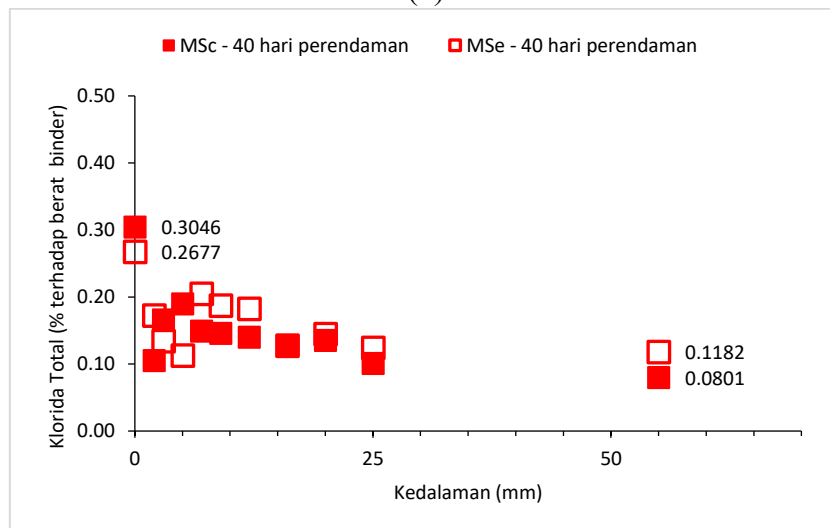
Variasi	Kapasitas Pengikatan Klorida/ <i>Chloride Binding Capacity</i> (%)		
	40 hari	189 hari	350 hari
Cc	57,68 ± 21,47	52,79 ± 28,67	47,93 ± 16,46
Ce	56,60 ± 13,01	47,96 ± 23,44	41,99 ± 19,82
Mc	58,82 ± 4,56	69,09 ± 9,21	-
Me	66,13 ± 7,77	58,48 ± 7,67	-
MSc	58,34 ± 20,73	64,54 ± 8,38	52,39 ± 9,05
MSe	42,35 ± 17,48	47,74 ± 10,36	60,32 ± 8,44



(a)

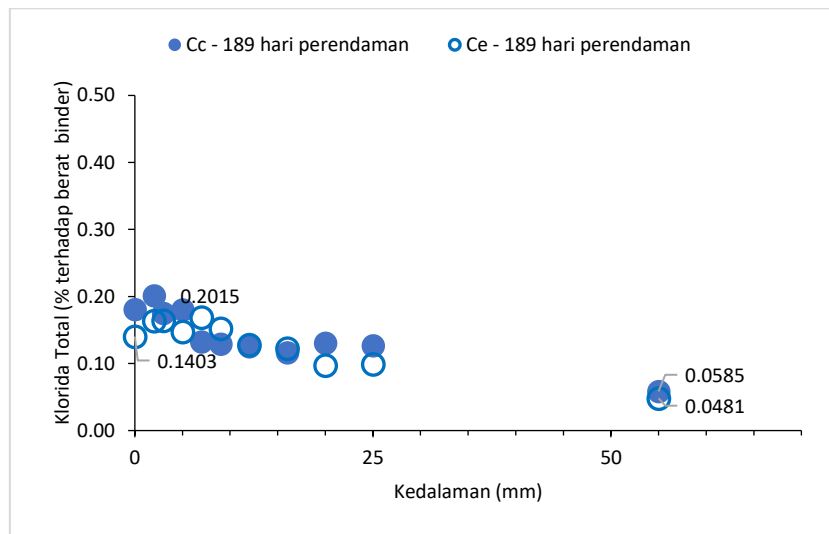


(b)

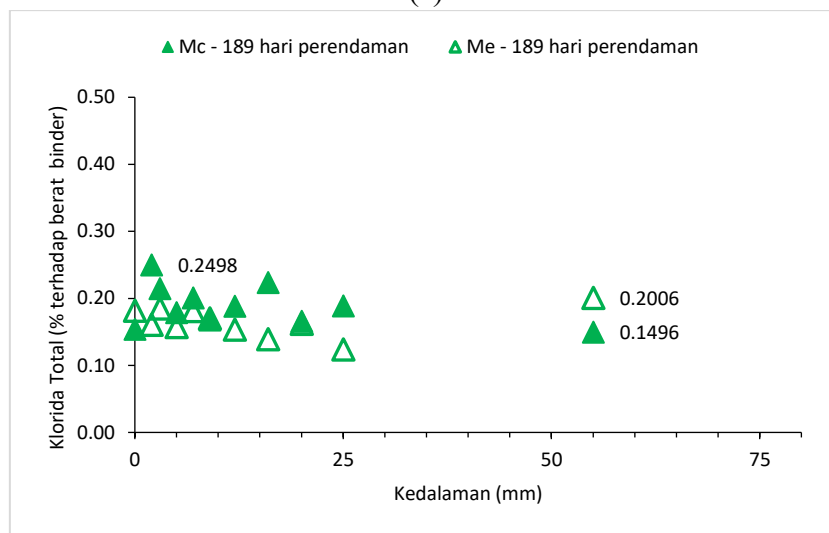


(c)

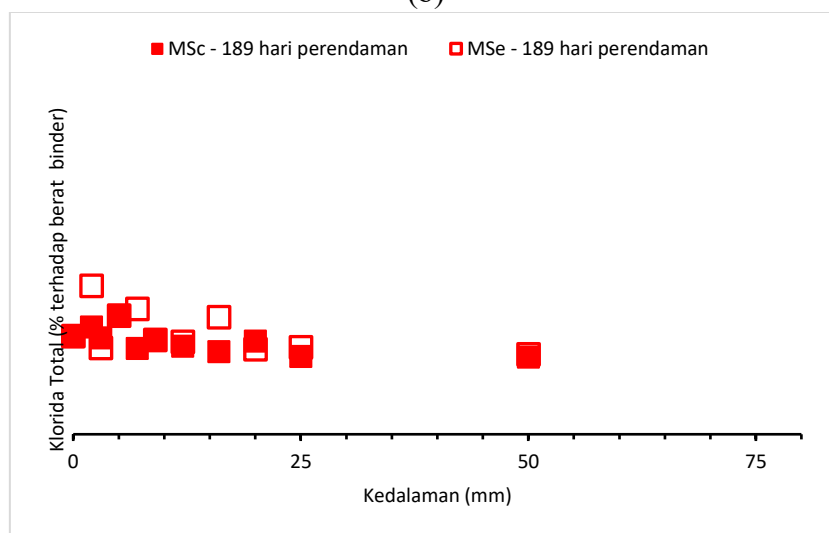
Gambar 8.1 Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Tanpa *Slag* (c) Mortar Geopolimer Dengan *Slag* pada 40 Hari Perendaman



(a)

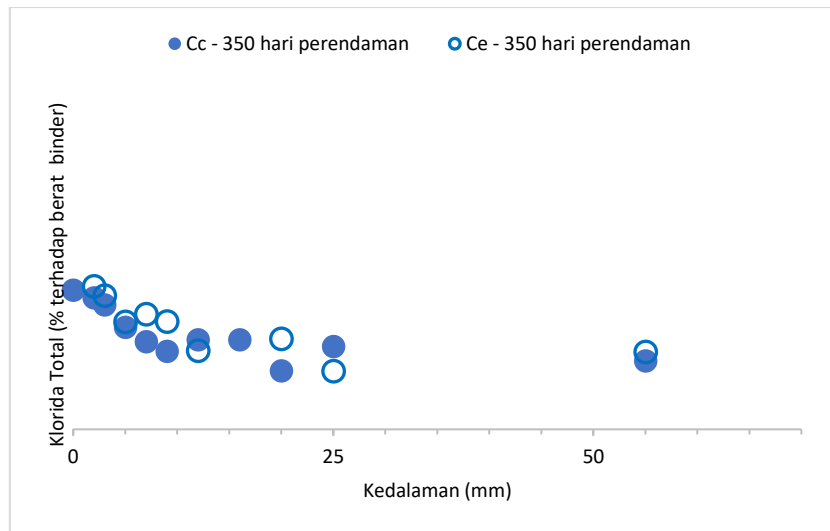


(b)

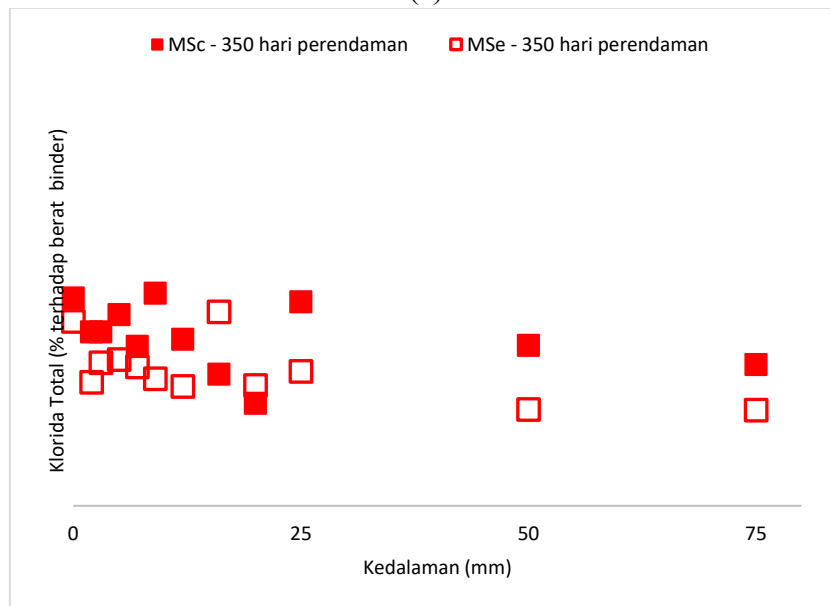


(c)

Gambar 8.2 Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Tanpa *Slag* (c) Mortar Geopolimer Dengan *Slag* pada 189 Hari Perendaman



(a)



(b)

Gambar 8.3 Klorida Total pada Beton Klorida Total pada (a) Beton Konvensional dan yang dilapisi (b) Mortar Geopolimer Dengan *Slag* pada 350 Hari Perendaman

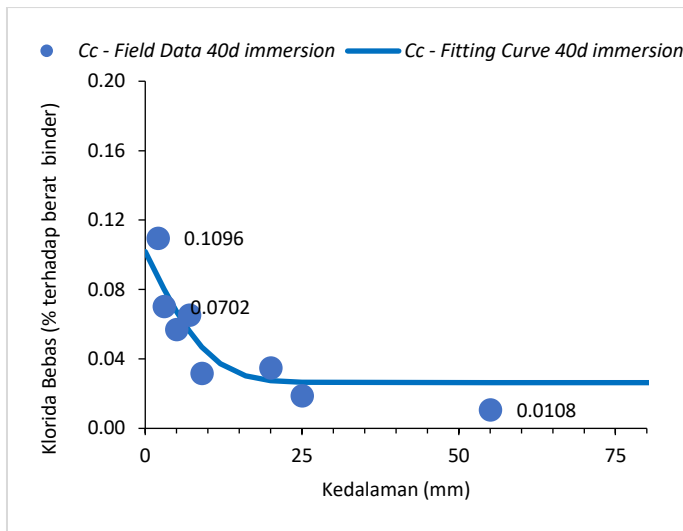
Klorida bebas merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi durabilitas pada beton. Gambar 8.4 dan Gambar 8.5 menunjukkan profil penetrasi klorida bebas pada beton berbasis semen untuk kondisi *cover* (Cc) dan *expose* (Ce) selama 40, 189, dan 350 hari perendaman di lingkungan laut. Hasil menunjukkan bahwa seluruh variasi memperlihatkan pola yang sama, yaitu konsentrasi klorida tertinggi berada pada lapisan permukaan dan menurun secara eksponensial seiring bertambahnya kedalaman. Pola ini mengindikasikan bahwa transport klorida ke dalam beton dikendalikan oleh mekanisme

difusi, di mana konsentrasi ion tertinggi terdapat pada zona yang berhubungan langsung dengan air laut dan semakin berkurang menuju bagian dalam beton.

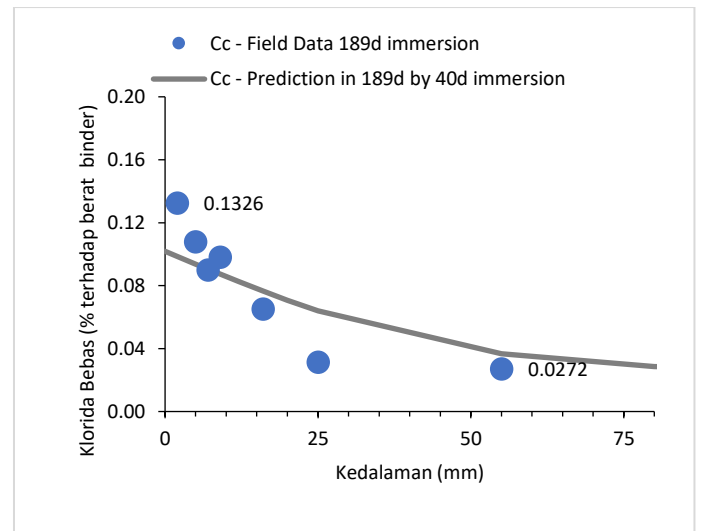
Pada umur 40 hari, kandungan klorida bebas pada permukaan variasi *cover* (Cc) mencapai sekitar 0,1096% berat binder dan menurun tajam hingga sekitar 0,0108% pada kedalaman 55 mm. Pada variasi *expose* (Ce), kandungan klorida bebas permukaan sedikit lebih tinggi yaitu sekitar 0,1101%, namun menurun hingga 0,0222% pada kedalaman 55 mm. Pada tahap ini, ion klorida yang masuk ke dalam beton masih didominasi oleh proses difusi awal, sehingga sebagian besar klorida masih terkonsentrasi pada lapisan dekat permukaan. Profil yang curam menunjukkan bahwa beton masih memiliki kemampuan yang baik dalam menghambat penetrasi klorida ke bagian dalam.

Setelah 189 hari perendaman, terjadi peningkatan kandungan klorida pada seluruh kedalaman. Pada variasi Cc, konsentrasi klorida bebas permukaan meningkat menjadi 0,1326%, sedangkan pada Ce meningkat menjadi 0,1094%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses akumulasi klorida masih berlangsung selama periode perendaman. Selain meningkatnya konsentrasi permukaan, profil distribusi klorida juga menjadi lebih landai dibandingkan umur 40 hari, yang menandakan bahwa klorida telah berdifusi lebih jauh ke dalam beton. Namun demikian, konsentrasi klorida pada kedalaman 55 mm masih relatif rendah, yaitu sekitar 0,0272–0,0275%, sehingga penetrasi klorida belum mencapai tingkat yang berpotensi menimbulkan korosi pada bagian dalam material.

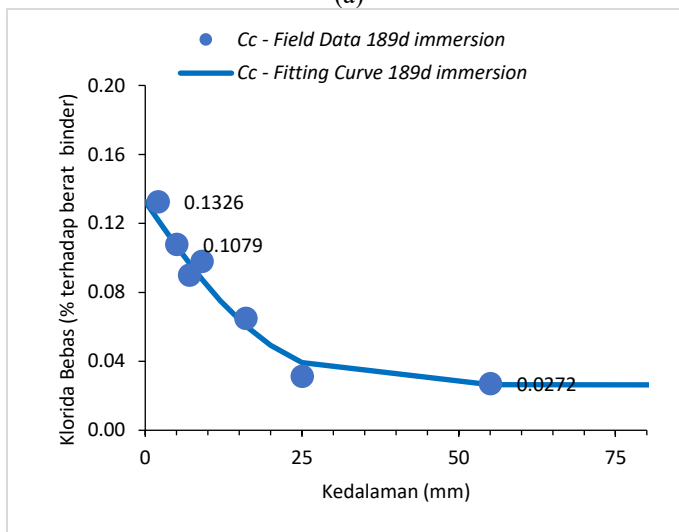
Pada umur 350 hari, akumulasi klorida menjadi lebih besar. Variasi Cc menunjukkan kandungan klorida bebas permukaan sebesar 0,1496%, sedangkan pada Ce mencapai 0,1530%. Nilai ini mendekati ambang batas inisiasi korosi pada kisaran 0,15% berat binder. Peningkatan tersebut terjadi pada lapisan dekat permukaan, sedangkan pada kedalaman 55 mm kandungan klorida masih berada pada kisaran 0,0220–0,0263%. Profil distribusi yang semakin landai menunjukkan bahwa proses difusi berlangsung secara bertahap, dengan sebagian besar ion klorida masih tertahan pada zona dekat permukaan dan belum terdistribusi secara merata ke seluruh penampang beton.



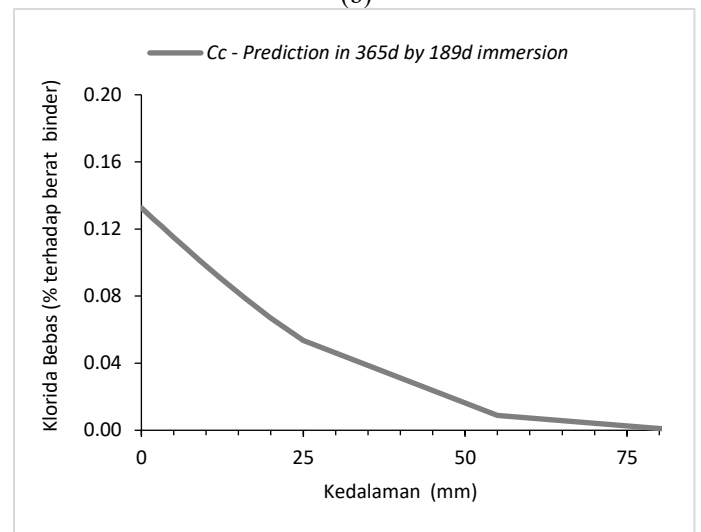
(a)



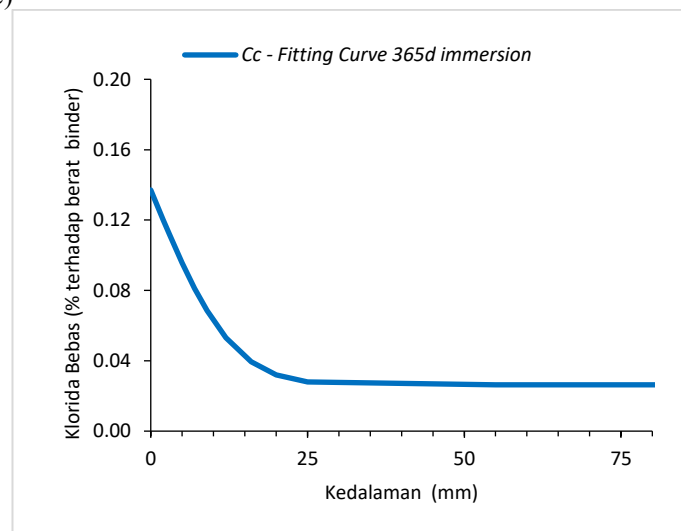
(b)



(c)

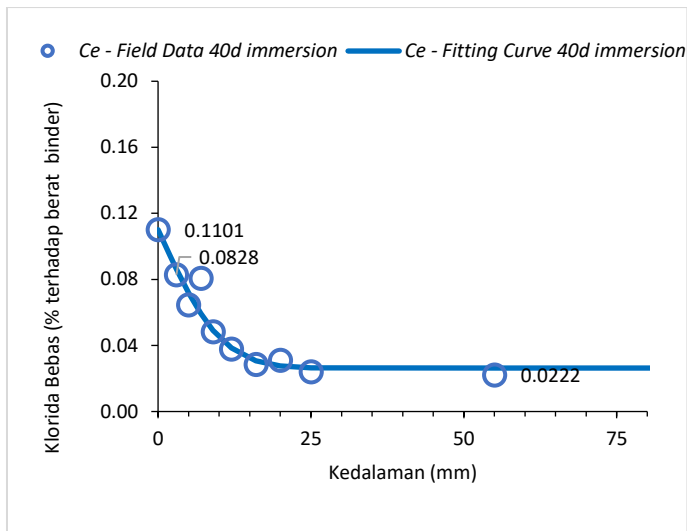


(d)

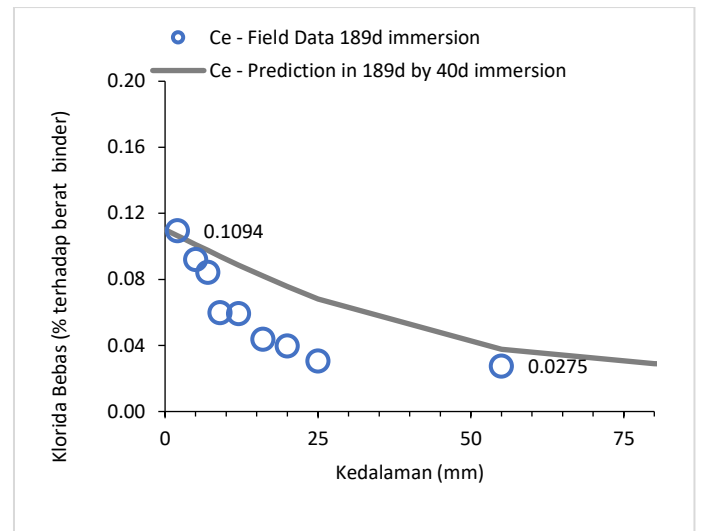


(e)

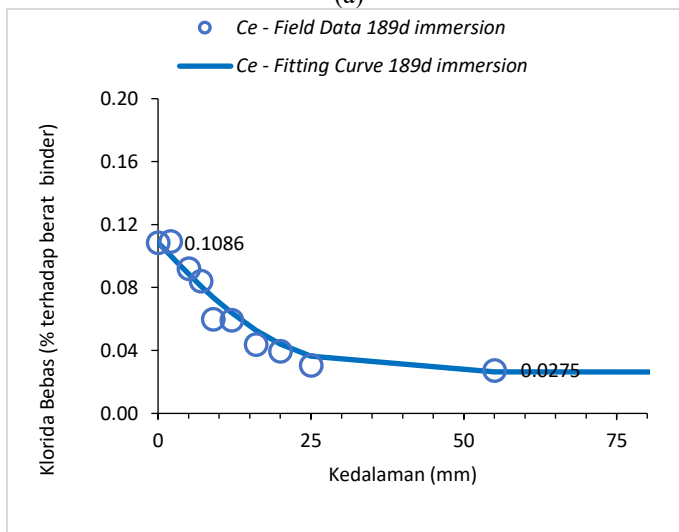
Gambar 8.4 Penetrasi Klorida pada Beton Konvensional Variasi *Cover* (Tidak Ada Biota)



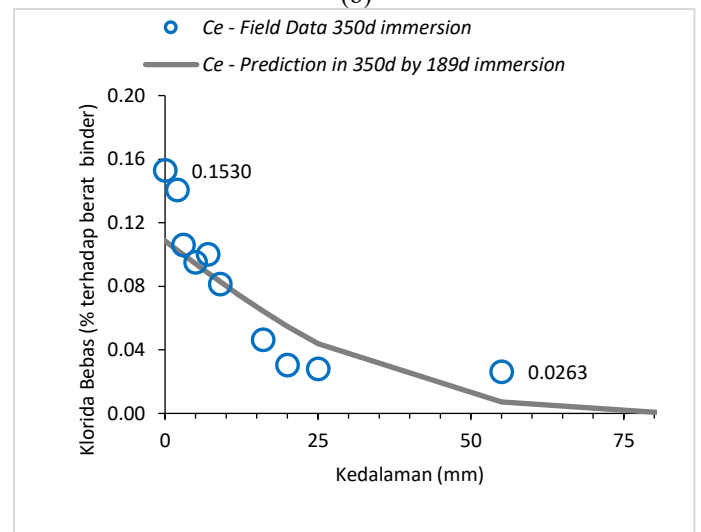
(a)



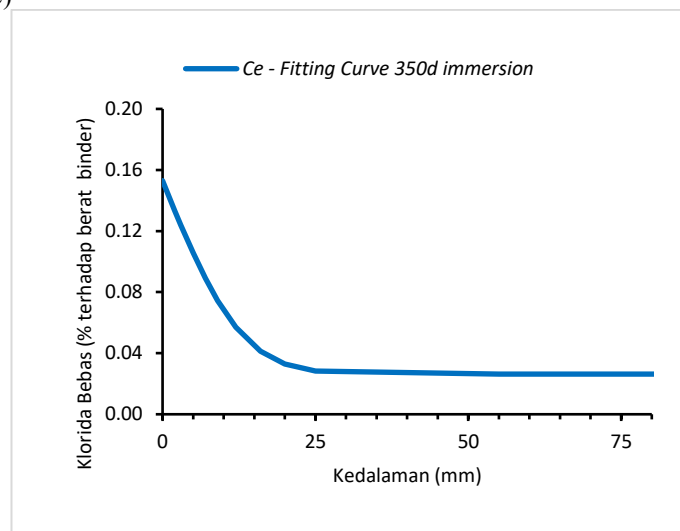
(b)



(c)



(d)



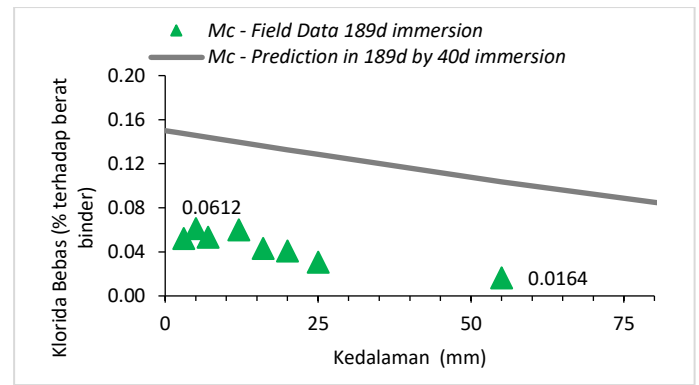
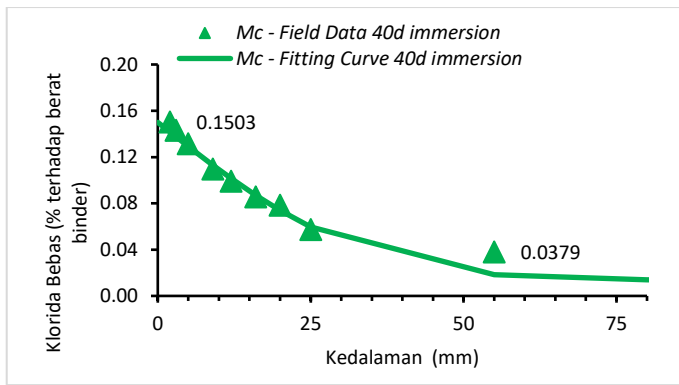
(e)

Gambar 8.5 Penetrasi Klorida pada Beton Konvensional Variasi *Expose* (Ada Biota)

Penetrasi klorida pada beton konvensional yang dilapisi mortar geopolimer tanpa *slag* ditunjukkan pada Gambar 8.6. Profil distribusi klorida bebas pada sistem beton konvensional yang dilapisi mortar geopolimer tanpa *slag* untuk kondisi *cover* (Mc) dan *expose* (Me) setelah 40 dan 189 hari perendaman di lingkungan laut. Secara umum, seluruh variasi memperlihatkan pola yang sama, yaitu konsentrasi klorida tertinggi berada pada lapisan permukaan mortar geopolimer dan menurun secara bertahap seiring bertambahnya kedalaman.

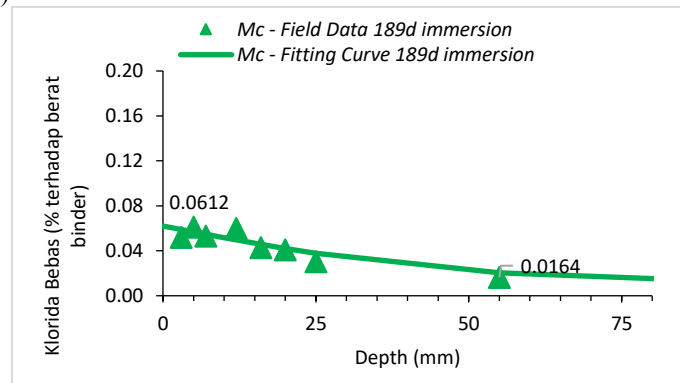
Pada umur 40 hari, variasi *cover* (Mc) menunjukkan kandungan klorida bebas permukaan sebesar 0,1503% berat binder, kemudian menurun secara signifikan hingga mencapai 0,0379% pada kedalaman sekitar 55 mm. Pada kondisi *expose* (Me), kandungan klorida bebas permukaan pada umur 40 hari hanya sebesar 0,0833%, atau sekitar 44,6% lebih rendah dibandingkan Mc. Pada kedalaman 55 mm, nilai klorida bebas juga lebih rendah yaitu sekitar 0,0164%. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan beton berbasis semen pada umur yang sama, yang menunjukkan bahwa mortar geopolimer tanpa *slag* memiliki kemampuan menyerap atau mengakumulasi klorida lebih besar pada tahap awal paparan. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pengujian porositas yang menunjukkan bahwa geopolimer tanpa *slag* memiliki total porositas tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Struktur pori yang lebih terbuka memungkinkan ion klorida lebih mudah memasuki lapisan mortar geopolimer dan terakumulasi pada zona dekat permukaan.

Setelah 189 hari perendaman, secara umum klorida bebas membentuk pola yang berbeda antara Mc dan Me. Pada variasi Mc, kandungan klorida bebas permukaan menurun secara signifikan dari 0,1503% menjadi 0,0612%, sedangkan pada kedalaman 55 mm turun menjadi 0,0164%. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian ion klorida yang sebelumnya berada dalam bentuk bebas telah mengalami proses pengikatan (*chloride binding*) oleh matriks geopolimer. Temuan ini konsisten dengan hasil kapasitas pengikatan klorida yang meningkat dari 58,82% pada umur 40 hari menjadi 69,09% pada umur 189 hari, yang mengindikasikan bahwa proses geopolimerisasi masih berlangsung dan menghasilkan lebih banyak situs pengikatan klorida pada struktur gel N-A-S-H. Pada variasi *expose* (Me), kandungan klorida bebas permukaan pada umur 189 hari sebesar 0,0750%, sedikit lebih tinggi dibandingkan Mc. Namun demikian, pada kedalaman 55 mm nilainya sekitar 0,0413%. Klorida bebas pada mortar geopolimer tanpa *slag* dengan adanya *biofouling* tidak dapat menghambat penetrasi klorida ke dalam beton inti yang ditandai dengan kadar klorida bebas yang lebih tinggi dari klorida inisial beton semen. Sehingga dilakukan upaya perlindungan selanjutnya menggunakan mortar geopolimer dengan *slag*.



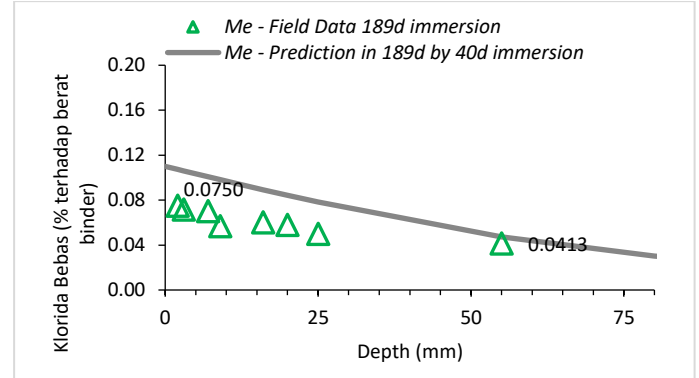
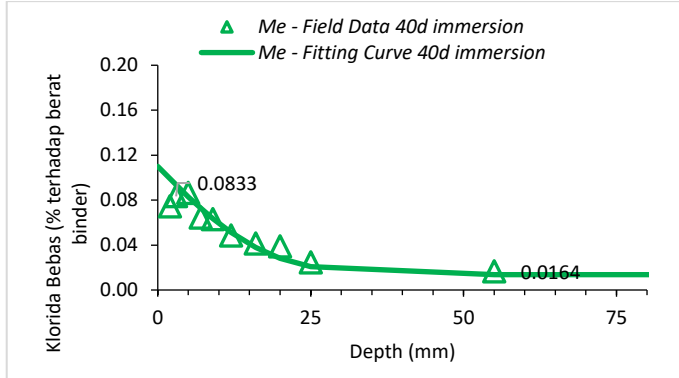
(a)

(b)



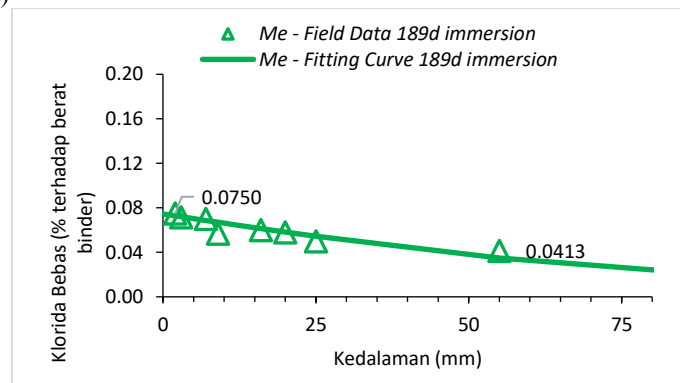
(c)

Gambar 8.6 Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Tanpa *Slag* Variasi *Cover* (Tidak Ada Biota)



(a)

(b)



(c)

Gambar 8.7 Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Tanpa *Slag* Variasi Variasi *Expose* (Ada Biota)

Profil penetrasi klorida bebas pada sistem beton konvensional yang dilapisi mortar geopolimer dengan *slag* untuk kondisi *cover* (MSc) dan *expose* (MSe) selama 40, 189, dan 350 hari perendaman di lingkungan laut ditunjukkan pada Gambar 8.8 dan Gambar 8.9. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan pola distribusi yang serupa dengan variasi geopolimer tanpa *slag*, yaitu konsentrasi klorida tertinggi berada pada lapisan permukaan dan menurun seiring bertambahnya kedalaman. Namun demikian, keberadaan *slag* menghasilkan perilaku transport klorida yang berbeda, terutama pada umur paparan yang lebih panjang.

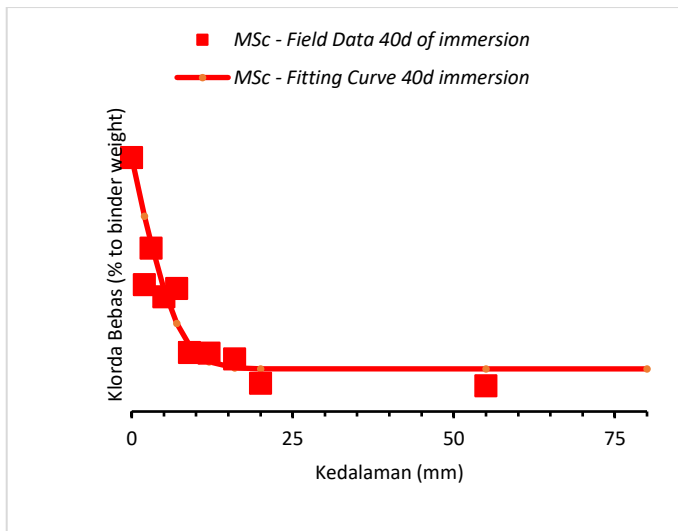
Pada umur 40 hari, variasi MSc menunjukkan kandungan klorida bebas sebesar 0,1614% berat binder pada lapisan permukaan dan menurun hingga 0,0164% pada kedalaman 55 mm. Nilai ini merupakan salah satu yang tertinggi di antara seluruh variasi yang diuji. Tingginya kandungan klorida pada tahap awal menunjukkan bahwa ion klorida relatif mudah masuk ke lapisan mortar geopolimer selama periode awal paparan. Pada variasi MSe, kandungan klorida bebas permukaan pada umur 40 hari hanya sebesar 0,1211%, atau sekitar 25% lebih rendah dibandingkan MSc. Pada kedalaman 55 mm, nilai klorida bebas juga relatif rendah yaitu sekitar 0,0164%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa keberadaan *biofouling* telah memberikan pengaruh *surface barrier* sehingga mengurangi jumlah klorida yang dapat mencapai permukaan mortar geopolimer.

Setelah 189 hari perendaman, kandungan klorida bebas pada variasi MSc menurun drastis menjadi sekitar 0,0504% pada permukaan dan 0,0271% pada kedalaman 55 mm. Penurunan yang cukup signifikan ini menunjukkan bahwa sebagian besar klorida yang masuk ke dalam matriks telah mengalami proses pengikatan (*chloride binding*). Fenomena ini sejalan dengan peningkatan kapasitas pengikatan klorida dari 58,34% pada umur 40 hari menjadi 64,54% pada umur 189 hari, yang menunjukkan bahwa perkembangan mikrostruktur geopolimer masih berlangsung dan menghasilkan lebih banyak lokasi pengikatan ion klorida. Pada variasi MSe, kandungan klorida bebas permukaan pada umur 189 hari sebesar 0,0946%, lebih tinggi dibandingkan MSc. Namun demikian, nilai ini masih lebih rendah dibandingkan kondisi awal 40 hari. Pada kedalaman 55 mm, kandungan klorida bebas mencapai sekitar 0,0285%. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi akumulasi klorida pada lapisan permukaan, sebagian besar ion masih tertahan pada lapisan pelapis dan belum berdifusi secara signifikan menuju beton inti.

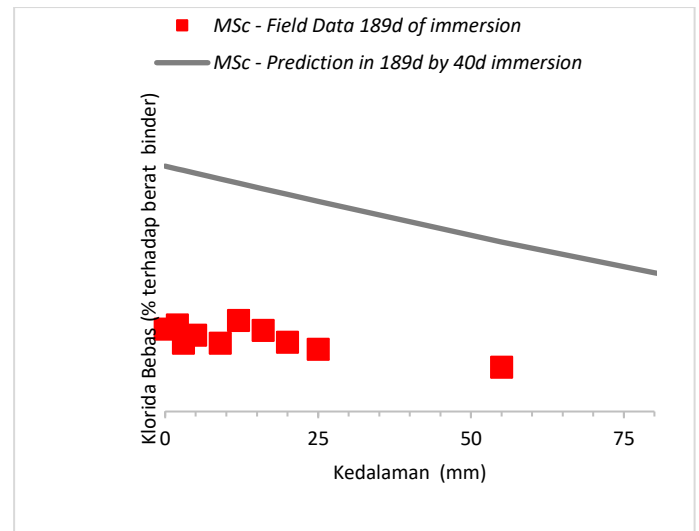
Pada umur 350 hari, perbedaan antara variasi *cover* dan *expose* menjadi lebih jelas. Variasi MSc menunjukkan peningkatan kembali kandungan klorida bebas pada permukaan hingga 0,1305%, sedangkan pada kedalaman 55 mm tetap rendah yaitu sekitar

0,0286%. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa akumulasi klorida pada lapisan luar terus berlangsung selama paparan jangka panjang. Namun demikian, sebagian besar klorida masih tertahan pada zona dekat permukaan sehingga tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada bagian dalam material hingga beton inti. Sebaliknya, variasi MSe menunjukkan kandungan klorida bebas permukaan yang lebih rendah yaitu sekitar 0,0899%, dengan nilai pada kedalaman 55 mm hanya 0,0128%. Dibandingkan MSc, kandungan klorida bebas pada MSe berkurang sekitar 31% pada permukaan dan sekitar 55% pada kedalaman terdalam. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan *biofouling* memberikan pengaruh yang semakin nyata pada umur paparan yang panjang.

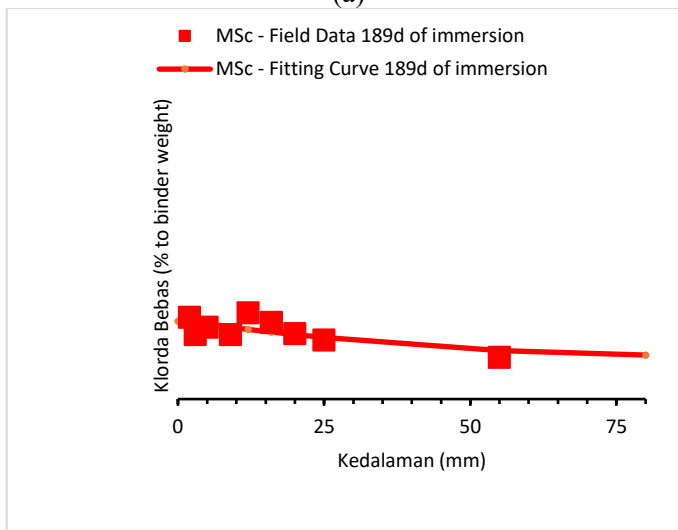
Perbaikan performa mortar geopolimer yang dilakukan dengan menambah *slag* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap mekanisme penetrasi dan pengikatan klorida. *Slag* mengandung kalsium reaktif yang berpartisipasi dalam pembentukan gel C-(N)-A-S-H selain gel N-A-S-H yang umumnya terbentuk pada geopolimer berbasis *fly ash*. Kehadiran kedua gel tersebut menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat dan meningkatkan kemampuan matriks untuk mengimobilisasi ion klorida. Hal ini terlihat dari kapasitas pengikatan klorida (*chloride binding capacity*) pada variasi MSc yang meningkat dari 58,34% pada umur 40 hari menjadi 64,54% pada umur 189 hari. Meskipun pada umur 350 hari nilai tersebut menurun menjadi 52,39%, kemampuan pengikatan klorida masih lebih baik dibandingkan beton berbasis semen. Struktur gel yang lebih kompleks dan padat menyebabkan sebagian ion klorida tidak lagi berada dalam bentuk bebas, tetapi terikat di dalam matriks material melalui mekanisme adsorpsi fisik maupun interaksi kimia. Temuan ini sejalan dengan penelitian Ismail et al. (2013) yang menyatakan bahwa geopolimer yang mengandung *slag* memiliki kemampuan mengikat klorida yang lebih baik karena terbentuknya gel C-(A)-S-H dan C-(N)-A-S-H yang meningkatkan kapasitas retensi ion serta memperhalus pori.



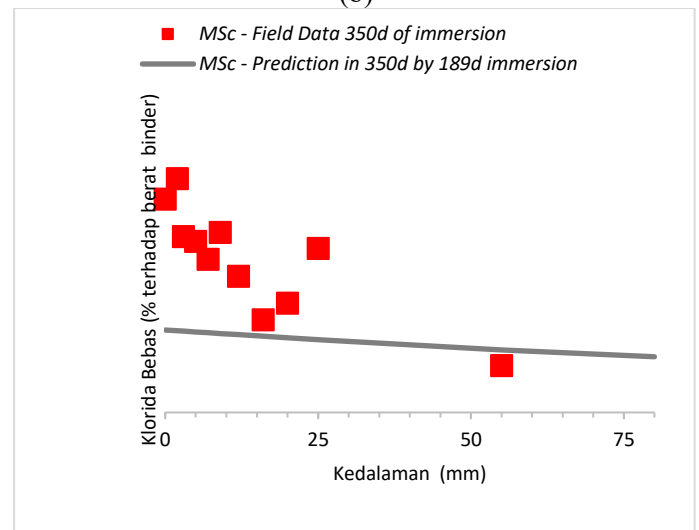
(a)



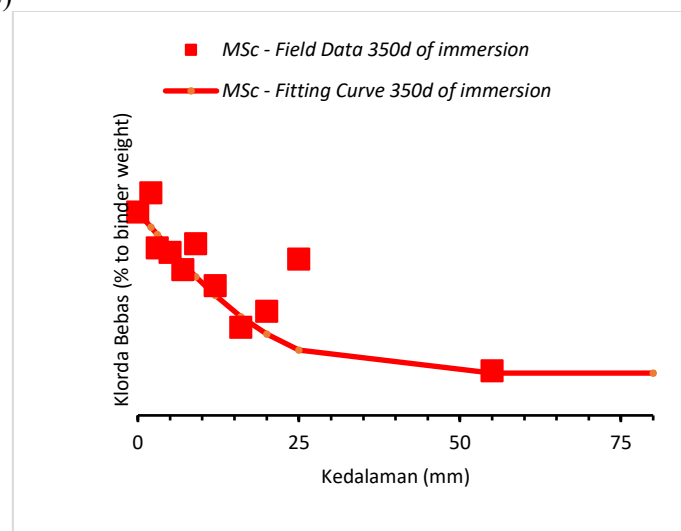
(b)



(c)

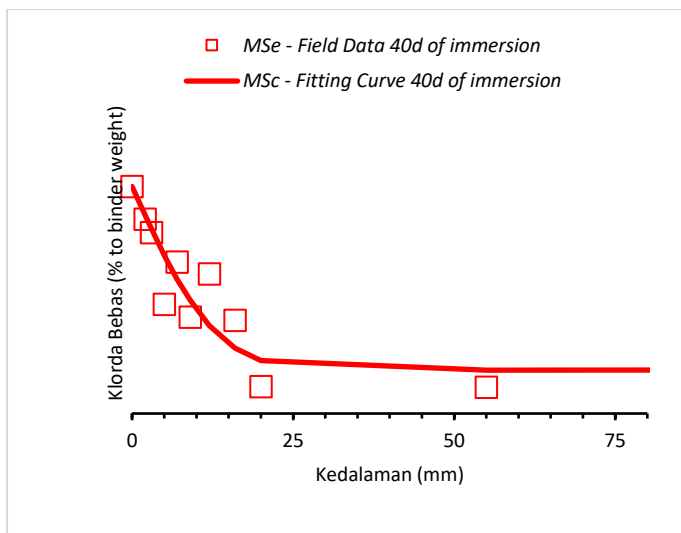


(d)

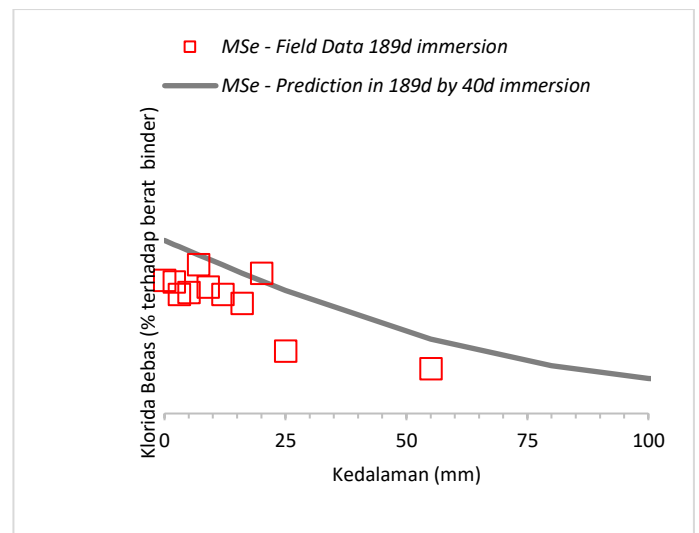


(e)

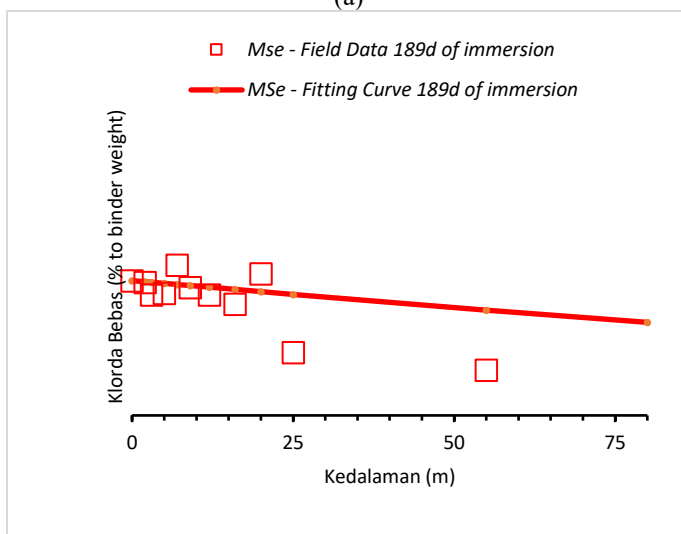
Gambar 8.8 Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Dengan *Slag* Variasi *Cover* (Tidak Ada Biota)



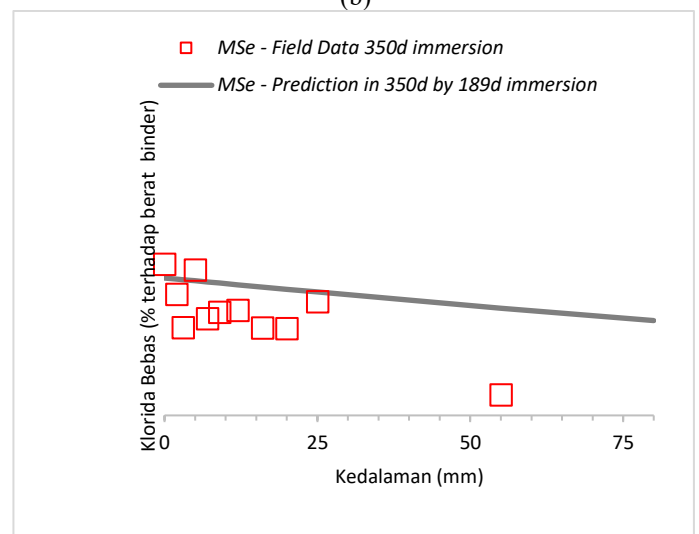
(a)



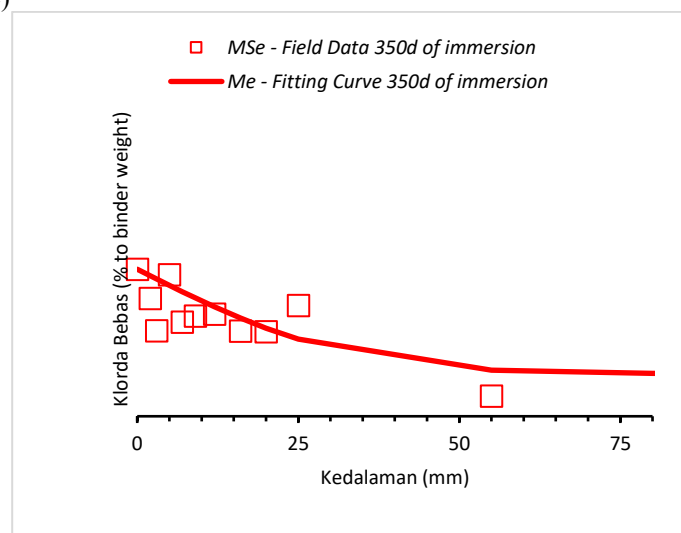
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 8.9 Penetrasi Klorida pada Mortar Geopolimer Dengan *Slag* Variasi Variasi *Expose* (Ada Biota)

8.2 Pengaruh Lapisan Mortar Geopolimer terhadap Penetrasi Klorida

Dibandingkan beton berbasis semen tanpa dilapisi geopolimer, sistem yang dilapisi mortar geopolimer menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mengendalikan distribusi klorida di dalam material. Meskipun kandungan klorida total pada lapisan mortar geopolimer relatif lebih tinggi, sebagian besar klorida tersebut terakumulasi pada lapisan pelapis dan tidak seluruhnya berdifusi menuju beton inti. Dengan kata lain, mortar geopolimer berpotensi berfungsi sebagai lapisan pelindung (*protective barrier layer*) yang menerima paparan langsung dari lingkungan laut dan menahan sebagian besar ion klorida pada zona pelapis.

Peran ini didukung oleh peningkatan kapasitas pengikatan klorida pada geopolimer tanpa *slag* yang mencapai 69,09% pada umur 189 hari, jauh lebih tinggi dibandingkan beton berbasis semen pada umur yang sama (52,79% untuk Cc dan 47,96% untuk Ce). Tingginya kapasitas pengikatan tersebut menunjukkan bahwa matriks geopolimer mampu mengimobilisasi sebagian besar ion klorida yang masuk ke dalam sistem, sehingga mengurangi jumlah klorida bebas yang berpotensi menyebabkan korosi pada beton di bawahnya.

Perilaku yang berbeda ditunjukkan oleh mortar geopolimer yang mengandung *slag*. Dibandingkan geopolimer tanpa *slag*, penambahan *slag* menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat akibat terbentuknya gel C-(N)-A-S-H dan C-A-S-H selain gel N-A-S-H yang merupakan produk utama geopolimerisasi. Kehadiran fase-fase tersebut meningkatkan densifikasi matriks, memperhalus jaringan pori, serta menyediakan lebih banyak situs adsorpsi dan pengikatan ion klorida. Hal ini tercermin dari kapasitas pengikatan klorida pada variasi MSc yang meningkat dari 58,34% pada umur 40 hari menjadi 64,54% pada umur 189 hari. Meskipun nilai tersebut menurun menjadi 52,39% pada umur 350 hari, kapasitas pengikatannya masih lebih tinggi dibandingkan beton konvensional expose (Ce) yang hanya mencapai 41,99%. Selain itu, pada kondisi exposed (MSe), kapasitas pengikatan klorida justru meningkat secara bertahap dari 42,35% pada umur 40 hari, menjadi 47,74% pada umur 189 hari, dan mencapai 60,32% pada umur 350 hari. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi dan reaksi hidrasi *slag* masih berlangsung selama masa paparan laut, menghasilkan pembentukan gel tambahan yang mampu mengimobilisasi ion klorida secara lebih efektif.

Hasil profil penetrasi klorida juga mendukung mekanisme tersebut. Pada umur 350 hari, variasi MSc menunjukkan kandungan klorida bebas permukaan sebesar 0,1305%, sedangkan MSe hanya 0,0899%. Pada kedalaman 55 mm, kandungan klorida bebas pada

MSc sebesar 0,0286%, sementara MSe hanya 0,0128%. Penurunan klorida bebas sebesar sekitar 55% pada kedalaman terdalam menunjukkan bahwa kombinasi *slag* dan *biofouling* mampu meningkatkan retensi ion klorida pada lapisan luar mortar sehingga mengurangi jumlah klorida yang berdifusi menuju beton inti. Dengan demikian, mortar geopolimer yang mengandung *slag* tidak hanya berfungsi sebagai lapisan penghalang fisik (*physical barrier*), tetapi juga sebagai lapisan aktif yang mampu mengikat dan mengimobilisasi ion klorida secara lebih efektif dibandingkan geopolimer tanpa *slag* maupun beton konvensional. Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa penambahan *slag* meningkatkan pembentukan gel C-(N)-A-S-H yang menghasilkan mikrostruktur lebih rapat dan menurunkan konektivitas pori (Kina et al., 2025). Hal ini berpotensi meningkatkan kapasitas pengikatan klorida sebagaimana hasil penelitian Ismail et al. (2013) yang melaporkan bahwa geopolimer *fly ash* dengan *slag* memiliki kapasitas pengikatan klorida yang lebih tinggi dibandingkan geopolimer berbasis *fly ash* murni karena adanya interaksi klorida dengan fase kaya kalsium. Parand et al. (2024) menunjukkan bahwa keberadaan *slag* meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion agresif melalui perbaikan mikrostruktur dan pembentukan gel hibrid N-A-S-H atau C-A-S-H.

Mortar geopolimer tanpa *slag* memiliki kapasitas pengikatan klorida tertinggi pada umur menengah (69,09% pada 189 hari), tetapi mortar geopolimer dengan *slag* menunjukkan kinerja paling stabil dan paling efektif dalam menurunkan klorida bebas pada umur panjang (350 hari), terutama pada kondisi *exposed* yang ditumbuhi *biofouling*.

8.3 Pengaruh *Biofouling* Terhadap Kadar Klorida Beton

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan *biofouling* memberikan pengaruh yang berbeda terhadap mekanisme penetrasi klorida pada beton konvensional, beton yang dilapisi mortar geopolimer tanpa *slag*, dan beton yang dilapisi mortar geopolimer dengan *slag*. Pengaruh tersebut berkembang seiring bertambahnya umur perendaman dan berkaitan erat dengan proses kolonisasi organisme laut, perkembangan *biofilm*, perubahan mikrostruktur material, serta kemampuan material dalam mengikat ion klorida.

Pada awal perendaman yaitu 40 hari, *biofouling* yang terbentuk kemungkinan masih terdapat lapisan *biofilm* tipis yang tersusun atas bakteri, diatom, dan mikroorganisme pionir. Pada fase ini, pengaruh *biofouling* terhadap penetrasi klorida mulai terlihat terutama pada mortar geopolimer. Pada beton konvensional, perbedaan kandungan klorida bebas antara variasi cover (Cc) dan expose (Ce) masih relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan *biofilm* yang terbentuk belum cukup berkembang untuk

memberikan hambatan yang signifikan terhadap difusi ion klorida. Kondisi ini menunjukkan bahwa biofilm pada fase *microfouling* yang mulai berkembang pada permukaan material telah berfungsi sebagai lapisan penghalang awal (*initial biological barrier*) sehingga mengurangi kontak langsung antara air laut dan permukaan mortar geopolimer. Pada tahap ini, mekanisme perlindungan masih didominasi oleh efek fisik berupa penutupan sebagian pori permukaan oleh biofilm dan produk ekstraseluler mikroorganisme (*extracellular polymeric substances* atau EPS). Biofilm tersusun atas sel mikroorganisme yang terperangkap dalam matriks *extracellular polymeric substances* (EPS) yang kaya akan polisakarida, protein, gugus hidroksil, dan gugus karboksilat (Y. Wang et al., 2022). Struktur EPS ini dapat menutup sebagian pori permukaan dan meningkatkan resistensi terhadap perpindahan massa sehingga mengurangi laju difusi ion agresif air laut masuk ke dalam substrat/material (Paramalingam et al., 2025).

Pada 189 hari perendaman, penempelan *biofouling* berkembang menjadi lebih kompleks dengan terbentuknya biofilm yang lebih tebal dan mulai diikuti oleh kolonisasi organisme makrofouling seperti teritip, cacing tabung, dan moluska kecil. Pada beton konvensional, kandungan klorida bebas permukaan Ce sedikit lebih rendah dibandingkan prediksi difusi tanpa *biofouling*, meskipun perbedaannya tidak terlalu besar. Hal ini menunjukkan bahwa *biofouling* mulai memberikan efek penghambatan masuknya ion pada lapisan permukaan, tetapi pengaruhnya masih terbatas karena beton semen memiliki kapasitas pengikatan klorida yang lebih rendah dan pori yang relatif lebih terkoneksi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sebagian ion klorida terakumulasi pada lapisan luar yang ditutupi *biofouling*. Pada tahap ini, mekanisme yang terjadi tidak lagi hanya berupa hambatan fisik, tetapi juga melibatkan proses retensi ion oleh biofilm. Lapisan EPS yang kaya gugus karboksilat, hidroksil, dan polisakarida bermuatan mampu menangkap ion-ion terlarut pada permukaan substrat. Hal ini mengakibatkan klorida lebih lama berada di permukaan sehingga memperlambat migrasi klorida menuju bagian dalam material (Gao & Tang, 2018). Selain itu, pada mortar geopolimer, proses geopolimerisasi lanjutan masih berlangsung sehingga sebagian klorida yang masuk dapat diikat oleh gel N-A-S-H maupun C-(N)-A-S-H yang terus berkembang (Ismail et al., 2013) (X. Wan et al., 2023).

Pada perendaman yang lebih panjang yaitu 350 hari, pertumbuhan *biofouling* telah mencapai kondisi yang relatif stabil dan membentuk lapisan biologis yang lebih tebal serta lebih kompleks. Hasil ini menunjukkan bahwa *biofouling* tidak secara signifikan mengurangi akumulasi klorida pada permukaan beton, tetapi mampu membatasi peningkatan penetrasi menuju bagian dalam. Pada mortar geopolimer tanpa *slag*, pengaruh

biofouling menjadi lebih jelas melalui peningkatan kapasitas pengikatan klorida dan penurunan laju difusi yang telah diamati pada umur sebelumnya. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi antara *biofouling* dan mikrostruktur geopolimer yang mengandung *slag* menghasilkan mekanisme perlindungan yang paling efektif. *Slag* berkontribusi terhadap pembentukan gel C-(N)-A-S-H yang memperhalus struktur pori dan meningkatkan kemampuan pengikatan ion, sedangkan *biofouling* membentuk lapisan biologis yang memperlambat difusi klorida dari lingkungan laut menuju matriks material. Dengan demikian, klorida lebih banyak tertahan dan diimobilisasi pada lapisan luar dibandingkan berdifusi menuju beton inti.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan *biofouling* tidak meningkatkan penetrasi klorida ke bagian dalam material, melainkan cenderung memodifikasi mekanisme transport dan retensi ion klorida pada permukaan. Pada tahap awal, *biofouling* berfungsi sebagai penghalang fisik yang mengurangi kontak langsung antara air laut dan material. Pada tahap menengah, biofilm dan organisme penempel mulai berperan sebagai lapisan retensi ion yang memperlambat migrasi klorida. Pada tahap jangka panjang, *biofouling* berkembang menjadi *biological diffusion barrier* yang bekerja bersama mikrostruktur material untuk menghambat penetrasi klorida. Efek ini paling nyata pada sistem beton yang dilapisi mortar geopolimer dengan *slag*, yang menunjukkan kandungan klorida bebas terdalam paling rendah dan kapasitas pengikatan klorida tertinggi setelah 350 hari perendaman. Temuan ini menunjukkan bahwa *biofouling* tidak selalu bersifat merugikan bagi durabilitas material, tetapi dalam kondisi tertentu dapat berfungsi sebagai lapisan pelindung alami yang membantu mengurangi penetrasi ion klorida pada lingkungan laut.

Tabel 8.2 menunjukkan nilai koefisien difusi klorida semu (*apparent chloride diffusion coefficient*, D_a) dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) hasil pemodelan penetrasi klorida pada seluruh variasi material. Secara umum, nilai D_a menggambarkan kemampuan ion klorida untuk bermigrasi ke dalam material, sedangkan nilai RMSE menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil prediksi model dengan data lapangan. Semakin kecil nilai RMSE, semakin baik kemampuan model dalam merepresentasikan profil penetrasi klorida aktual. Sebaliknya, peningkatan RMSE ketika model umur awal digunakan untuk memprediksi umur yang lebih panjang menunjukkan bahwa karakteristik difusi klorida berubah seiring perkembangan mikrostruktur material maupun aktivitas *biofouling* selama perendaman.

Nilai RMSE yang rendah pada pemodelan terhadap data umur yang sama menunjukkan bahwa model difusi yang digunakan mampu menggambarkan distribusi klorida dengan baik. Namun, peningkatan RMSE ketika parameter difusi dari umur sebelumnya digunakan untuk memprediksi kondisi pada umur yang lebih panjang menunjukkan bahwa koefisien difusi klorida bukan merupakan parameter yang konstan terhadap waktu. Perubahan mikrostruktur akibat hidrasi lanjutan pada beton semen, geopolimerisasi lanjutan pada mortar geopolimer, pembentukan gel C-(N)-A-S-H pada sistem yang mengandung *slag*, serta perkembangan *biofouling* pada permukaan material menyebabkan mekanisme transport klorida terus berubah selama masa perendaman. Oleh karena itu, penggunaan parameter difusi umur awal untuk memprediksi perilaku jangka panjang berpotensi menghasilkan ketidakpastian yang lebih besar, sebagaimana tercermin dari peningkatan nilai RMSE pada seluruh variasi material.

Tabel 8.2 Koefisien Difusi

Variasi	40 hari			189 hari			350 hari	
	(Da) $\times 10^{-10}$ m^2/s	RMSE dengan data lapangan 40hari perendaman	RMSE dengan data lapangan 189hari perendaman	(Da) $\times 10^{-10}$ m^2/s	RMSE dengan data lapangan 189hari perendaman	RMSE dengan data lapangan 350hari perendaman	(Da) $\times 10^{-10}$ m^2/s	RMSE dengan data lapangan 350hari perendaman
Cc	8,00	0,010472	0,019848	3,50	0,007064	0,009081	1,20	0,008193
Ce	8,00	0,008330	0,026992	3,50	0,006748	0,045799	1,20	0,006412
Mc	28,0	0.007329	0.090189	9,5	0.005421	-	-	-
Me	15,0	0.005826	0.032048	15,0	0.004089	-	-	-
MSc	5,5	0,012420	0,071164	9,0	0,005136	0,049631	2,00	0,007623
MSe	10,0	0,019009	0,041366	30,0	0,007349	0,018423	3,00	0,008320

8.3 Kandungan Sulfat Pada Beton

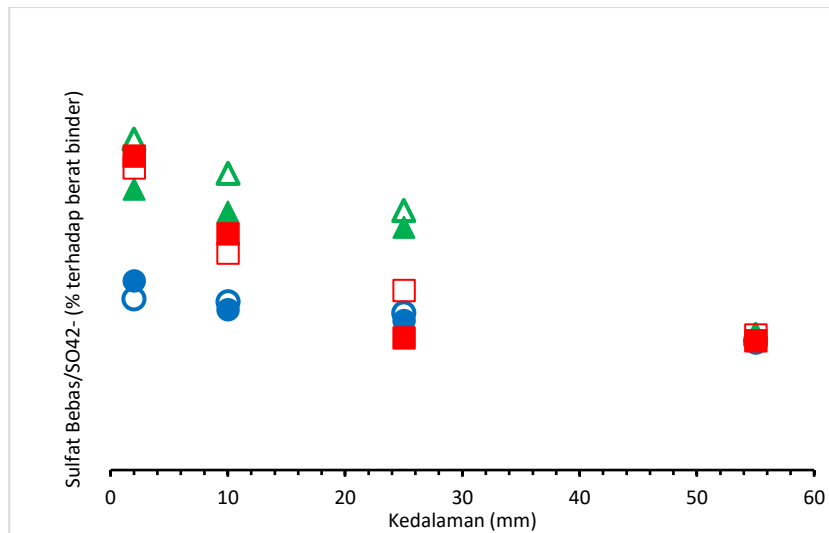
Profil sulfat bebas pada beton konvensional (C), beton yang dilapisi mortar geopolimer tanpa *slag* (M), dan beton yang dilapisi mortar geopolimer dengan *slag* (MS) pada umur perendaman 40 hari, 189 hari, dan 350 hari disajikan pada Gambar 8.11. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan pola yang serupa, yaitu kandungan sulfat tertinggi berada pada lapisan permukaan dan menurun seiring bertambahnya kedalaman. Pola ini menunjukkan bahwa ion sulfat dari lingkungan laut mengalami difusi dari permukaan menuju bagian dalam material, namun sebagian besar masih terakumulasi pada zona dekat permukaan.

Pada umur 40 hari, kandungan sulfat bebas tertinggi ditemukan pada mortar geopolimer tanpa *slag* (M) berat binder pada permukaan. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan mortar geopolimer dengan *slag* (MS) serta beton konvensional (C). Tingginya kandungan sulfat bebas pada geopolimer menunjukkan bahwa ion sulfat yang masuk ke dalam material masih berada dalam bentuk bebas dan belum banyak mengalami pengikatan kimia. Kondisi ini berbeda dengan beton semen, di mana sebagian ion sulfat dapat bereaksi dengan fase aluminat dan kalsium untuk membentuk etringit dan gipsum sehingga mengurangi jumlah sulfat bebas yang terukur. Menurut Qu et al. (2021) sistem semen Portland memiliki kemampuan mengikat sulfat melalui pembentukan produk hidrasi sekunder sehingga konsentrasi sulfat bebas yang terdeteksi menjadi lebih rendah.

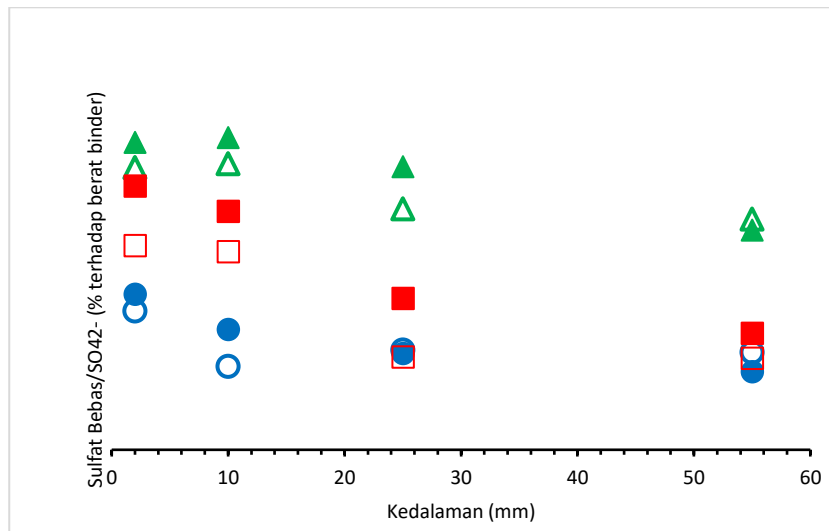
Setelah 189 hari perendaman, terjadi peningkatan akumulasi sulfat pada seluruh variasi. Variasi mortar geopolimer tanpa *slag* (M) masih menunjukkan kandungan sulfat tertinggi dengan nilai permukaan, sedangkan geopolimer dengan *slag* (MS). Beton konvensional tetap menunjukkan kandungan sulfat bebas yang lebih rendah dibandingkan kedua variasi geopolimer. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian sulfat berhasil berdifusi lebih jauh ke dalam lapisan geopolimer dibandingkan beton semen. Fenomena tersebut berkaitan dengan karakteristik matriks geopolimer yang didominasi gel N-A-S-H. Berbeda dengan beton semen yang mengikat sulfat melalui pembentukan etringit dan gipsum, geopolimer cenderung mempertahankan sulfat dalam bentuk bebas atau terimobilisasi secara fisik dalam pori dan struktur gel aluminosilikat.

Pada umur 350 hari pengamatan dilakukan pada beton konvensional dan yang dilapisi mortar geopolimer dengan *slag*. Kandungan sulfat bebas pada mortar geopolimer dengan *slag* (MS) meningkat pada lapisan permukaan, lebih tinggi dibandingkan seluruh variasi lainnya. Sebaliknya, pada kedalaman 55 mm kandungan sulfat turun. Hasil ini

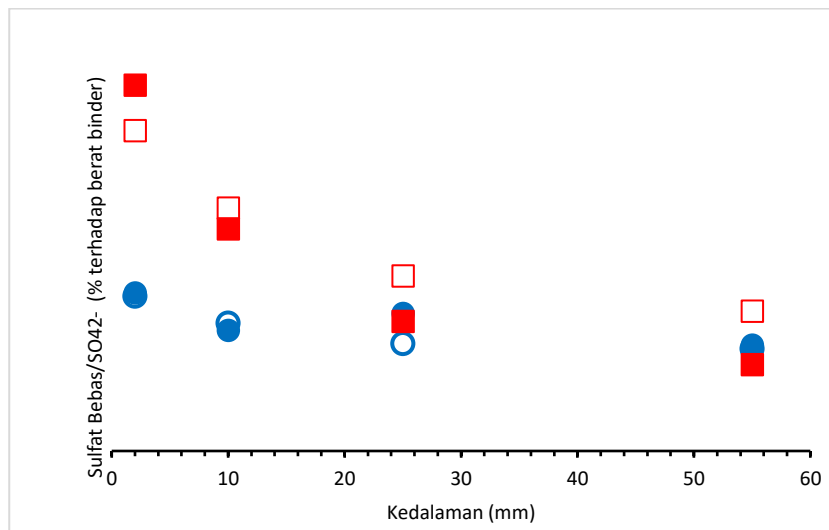
menunjukkan bahwa penambahan *slag* menyebabkan sulfat cenderung lebih banyak tertahan pada lapisan luar mortar geopolimer dibandingkan berdifusi menuju bagian dalam. Keberadaan *slag* menghasilkan pembentukan gel C-(N)-A-S-H yang lebih rapat sehingga meningkatkan tortuositas jalur difusi dan mengurangi mobilitas ion sulfat. Fenomena tersebut dikarenakan penambahan *slag* dapat memperhalus struktur pori geopolimer dan meningkatkan resistensi terhadap penetrasi ion agresif.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8.10 Penetrasi Sulfat pada Variasi Beton pada Perendaman (a) 40 hari, (b) 189 hari, (c) 350 hari

8.4 Pengaruh Mortar Geopolimer dan *Biofouling* Terhadap Kadar Sulfat Beton

Secara umum, lapisan mortar geopolimer menyebabkan kandungan sulfat bebas yang terukur lebih tinggi dibandingkan beton konvensional pada seluruh umur pengamatan. Hasil ini dapat diinterpretasikan bahwa mortar geopolimer memiliki penetrasi sulfat yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Namun demikian, kondisi tersebut tidak secara langsung menunjukkan ketahanan sulfat yang lebih rendah. Pada beton semen, sebagian ion sulfat yang masuk akan bereaksi dengan fase aluminat dan kalsium membentuk gypsum maupun ettringite, sehingga jumlah sulfat bebas yang terdeteksi menjadi lebih rendah. Sebaliknya, pada mortar geopolimer yang didominasi oleh gel N-A-S-H dan memiliki kandungan kalsium yang lebih rendah, sulfat cenderung tetap berada dalam bentuk bebas atau terimobilisasi secara fisik di dalam matriks tanpa mengalami reaksi kimia yang signifikan. Oleh karena itu, kandungan sulfat bebas yang lebih tinggi pada geopolimer lebih mencerminkan perbedaan mekanisme interaksi sulfat dibandingkan peningkatan tingkat kerusakan material.

Selain itu, mortar geopolimer berfungsi sebagai lapisan pelindung (*protective sacrificial layer*) yang menerima paparan langsung dari lingkungan laut. Sulfat yang masuk terlebih dahulu terakumulasi pada lapisan mortar sehingga mengurangi kemungkinan penetrasi langsung ke beton inti. Dengan kata lain, lapisan geopolimer bertindak sebagai zona penyangga yang mengorbankan dirinya untuk melindungi substrat beton di bawahnya.

Pengaruh penambahan *slag* terlihat cukup jelas pada umur 189 hari. Hal ini menunjukkan bahwa *slag* mampu memperbaiki mikrostruktur mortar geopolimer melalui pembentukan gel C-(N)-A-S-H yang lebih rapat sehingga jalur difusi ion sulfat menjadi lebih panjang dan lebih sulit ditembus. Oleh karena itu, mortar geopolimer dengan *slag* menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam membatasi penetrasi sulfat ke bagian dalam material dibandingkan geopolimer tanpa *slag*.

Berbeda dengan hasil penetrasi klorida, keberadaan *biofouling* pada penelitian ini cenderung meningkatkan kandungan sulfat bebas pada lapisan permukaan material. Pada umur 40 hari, variasi exposed (Ce, Me, dan MSe) menunjukkan kandungan sulfat bebas yang tidak konsisten kenaikan atau penurunan nya dibandingkan variasi cover pada kedalaman yang sama. Pola serupa juga terlihat pada variasi dengan *slag*, di mana MSe menunjukkan kandungan sulfat yang sedikit lebih tinggi dibandingkan MSc.

Fenomena ini menunjukkan bahwa *biofouling* tidak berfungsi sebagai penghalang sulfat seperti yang terjadi pada klorida. Sebaliknya, biofilm dan organisme penempel cenderung menyebabkan akumulasi sulfat pada zona permukaan. Lapisan biofilm memiliki struktur EPS (*Extracellular Polymeric Substances*) yang mampu menahan ion-ion terlarut dari air laut. Akibatnya, ion sulfat tertahan lebih lama pada permukaan material dan meningkatkan konsentrasi sulfat lokal di sekitar lapisan biofilm.

Selain itu, aktivitas metabolik mikroorganisme dalam biofilm dapat mengubah kondisi kimia mikro pada permukaan material. Biofilm mampu menciptakan lingkungan dengan gradien pH dan konsentrasi ion yang berbeda dibandingkan air laut di sekitarnya. Kondisi tersebut dapat memperlambat proses presipitasi atau pengikatan sulfat sehingga fraksi sulfat bebas yang terukur menjadi lebih tinggi. Oleh karena itu, peningkatan kandungan sulfat bebas pada variasi *exposed* tidak selalu menunjukkan peningkatan tingkat serangan sulfat, melainkan lebih menunjukkan perubahan mekanisme retensi dan distribusi sulfat pada lapisan permukaan.

Pada umur 350 hari, efek *biofouling* masih terlihat pada variasi geopolimer dengan *slag*. Namun demikian, nilai tersebut masih jauh lebih rendah dibandingkan penetrasi sulfat yang telah dicapai geopolimer tanpa *slag* pada umur 189 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun *biofouling* meningkatkan akumulasi sulfat pada lapisan luar material, keberadaan *slag* tetap menjadi faktor dominan yang mengendalikan penetrasi sulfat ke bagian dalam.

Secara keseluruhan, lapisan mortar geopolimer meningkatkan retensi sulfat pada zona permukaan dan berfungsi sebagai lapisan pelindung yang mengurangi paparan langsung beton inti terhadap ion sulfat. Kandungan sulfat bebas yang lebih tinggi pada mortar geopolimer dibandingkan beton konvensional lebih berkaitan dengan rendahnya kemampuan geopolimer untuk mengikat sulfat melalui reaksi kimia, bukan karena ketahanan sulfat yang lebih rendah. Penambahan *slag* terbukti memperbaiki kinerja mortar geopolimer dengan menurunkan penetrasi sulfat hingga sekitar 50% pada kedalaman 55 mm dibandingkan geopolimer tanpa *slag*.

Sementara itu, *biofouling* cenderung meningkatkan akumulasi sulfat bebas pada lapisan permukaan melalui mekanisme retensi ion oleh biofilm dan EPS. Namun, peningkatan tersebut tidak diikuti oleh peningkatan penetrasi sulfat yang signifikan ke bagian dalam material. Dengan demikian, *biofouling* lebih berperan dalam mengubah distribusi dan retensi sulfat pada zona permukaan daripada mempercepat serangan sulfat terhadap beton. Kombinasi antara mortar geopolimer yang mengandung *slag* dan

biofouling menghasilkan sistem yang mampu menahan sulfat pada lapisan luar sehingga penetrasi menuju inti beton menjadi lebih terbatas.

8.5 Karbonasi Pada Beton

Pengukuran karbonasi (% dari berat pengikat) dijelaskan dalam dua parameter, yaitu karbonat (CO_3^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-). Karbonasi merupakan proses masuknya gas karbon dioksida (CO_2) dari lingkungan ke dalam pori-pori material sementisius yang kemudian bereaksi dengan senyawa alkali atau kalsium hidroksida membentuk karbonat, terutama kalsium karbonat (CaCO_3). Pada beton berbasis semen, reaksi karbonasi umumnya ditandai dengan konsumsi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan penurunan pH pori beton dari kondisi sangat basa ($\text{pH} > 12,5$) menjadi lebih rendah. Penurunan alkalinitas ini berpotensi menghilangkan lapisan pasif tulangan sehingga meningkatkan risiko korosi apabila karbonasi telah mencapai kedalaman tulangan.

Berdasarkan hasil pengujian, kandungan karbonat, bikarbonat, maupun total karbonasi pada seluruh variasi menunjukkan pola yang relatif konsisten, yaitu nilai tertinggi berada pada lapisan permukaan (2 mm) dan menurun seiring bertambahnya kedalaman hingga 55 mm. Pola ini sesuai dengan prinsip bahwa karbonasi dan presipitasi karbonat terutama terjadi di zona yang terpapar langsung ke udara dan CO_2 , serta air laut (Nayak et al., 2022). Selain itu, seluruh variasi menunjukkan peningkatan kandungan karbonat dan bikarbonat dari umur 40 hari ke 189 hari dan 350 hari. Hal ini menunjukkan bahwa karbonasi merupakan proses yang bersifat progresif dan terus berlangsung selama masa paparan. Karbonasi merupakan proses difusi CO_2 dari lingkungan ke dalam sistem pori beton yang menyebabkan terbentuknya karbonat dan penurunan alkalinitas material (Neville & Brooks, 2010). Kedalaman karbonasi meningkat secara progresif terhadap waktu paparan.

Pada umur 40 hari, proses karbonasi dimulai dengan interaksi awal antara CO_2 terlarut dalam air laut dengan material penyusun beton dan mortar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sejak tahap awal, lapisan mortar geopolimer lebih mudah mengalami karbonasi dibandingkan beton konvensional. Kondisi ini berkaitan dengan porositas geopolimer yang relatif lebih tinggi serta rendahnya kandungan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang berfungsi sebagai penyangga alkalinitas. Akibatnya, CO_2 yang masuk ke dalam pori material lebih cepat bereaksi dengan ion alkali dan komponen aluminosilikat yang tersedia.

Pada umur 189 hari, perbedaan karakteristik antara beton konvensional dan mortar geopolimer menjadi lebih jelas. Total karbonasi meningkat secara signifikan pada seluruh

variasi. Pada tahap ini karbonasi tidak lagi hanya terjadi pada permukaan, tetapi mulai berkembang menuju lapisan yang lebih dalam. Akumulasi karbonat dan bikarbonat yang lebih tinggi menunjukkan bahwa CO₂ telah berdifusi lebih jauh ke dalam sistem pori. Hasil kadar karbonasi menunjukkan bahwa lapisan mortar geopolimer mulai menunjukkan berfungsi sebagai *carbon capture* yaitu menerima reaksi karbonasi terlebih dahulu. Dengan demikian, sebagian besar karbonasi masih terjadi pada lapisan pelapis dan belum langsung mencapai beton inti. Pada umur ini juga mulai terlihat pengaruh densifikasi mikrostruktur akibat geopolimerisasi lanjutan. Struktur yang semakin matang menyebabkan laju peningkatan karbonasi tidak setinggi tahap awal, meskipun akumulasi produk karbonasi terus bertambah.

Pada umur 350 hari, karbonasi telah berkembang menjadi proses jangka panjang yang relatif stabil. Pada sistem geopolimer, variasi exposed (Me) masih menunjukkan total karbonasi yang lebih tinggi dibandingkan variasi cover (Mc) pada hampir seluruh kedalaman pengujian. Pada tahap ini terlihat bahwa karbonasi tidak hanya dipengaruhi oleh porositas awal material, tetapi juga oleh perubahan mikrostruktur selama perendaman. Pada mortar geopolimer, sebagian pori telah mengalami penyempurnaan akibat reaksi geopolimerisasi lanjutan, namun akumulasi karbonat yang telah terbentuk selama periode sebelumnya tetap menyebabkan nilai total karbonasi lebih tinggi dibandingkan umur-umur sebelumnya. Dengan kata lain, pada umur 350 hari terjadi kondisi dimana proses karbonasi masih berlangsung tetapi laju penetrasinya mulai melambat karena sebagian pori telah terisi oleh produk karbonasi. Pada umur 350 hari mortar geopolimer berperan sebagai *carbon capture* dengan menghambat karbonasi pada lapisan mortar.

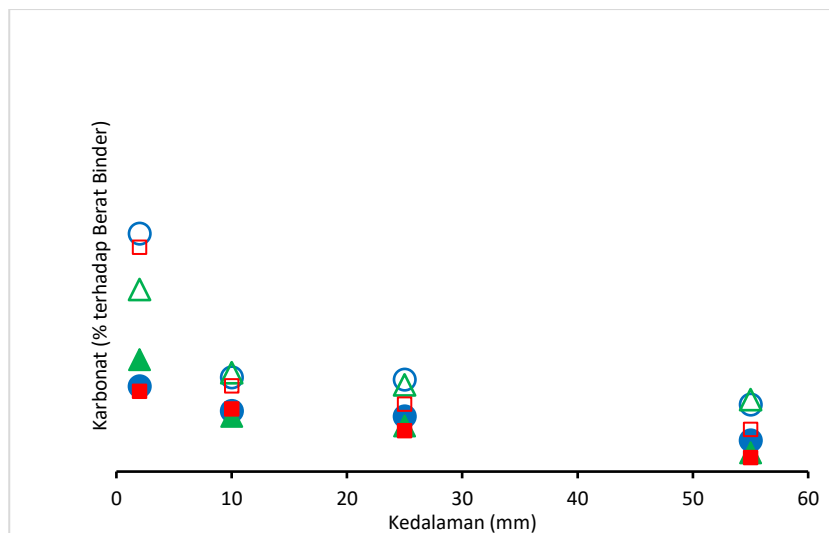
Reaksi karbonasi yang ditandai dengan bereaksinya Ca(OH)₂ yang dapat menurunkan pH pori beton selanjutnya dilakukan pengujian indikator fenolftalein. Uji fenolftalein digunakan untuk mengidentifikasi daerah yang masih bersifat alkalis dan daerah yang telah mengalami karbonasi. Larutan fenolftalein akan memberikan warna merah muda hingga ungu pada material dengan pH di atas sekitar 9, sedangkan bagian yang telah mengalami karbonasi dan mengalami penurunan pH akan tampak tidak berwarna atau berwarna pucat. Oleh karena itu, semakin luas daerah yang tidak berwarna, semakin dalam proses karbonasi yang telah terjadi.

Pada Gambar 8.16 terlihat bahwa seluruh spesimen masih menunjukkan dominasi warna merah muda hingga ungu pada sebagian besar penampang, yang mengindikasikan bahwa inti material masih berada pada kondisi alkalis dan belum mengalami karbonasi

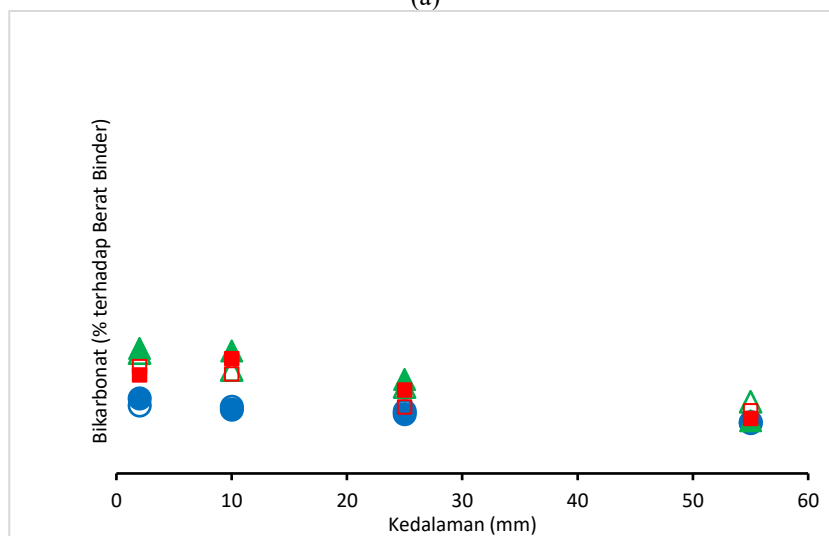
secara menyeluruh. Namun demikian, terdapat perbedaan intensitas warna dan ketebalan zona karbonasi antar variasi yang sejalan dengan hasil pengukuran kandungan karbonat. Pada variasi Cc dan Ce, warna merah muda tampak relatif merata hingga mendekati seluruh penampang. Kondisi ini menunjukkan bahwa alkalinitas beton masih terjaga dengan baik akibat keberadaan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen yang berfungsi sebagai cadangan alkalinitas (*alkaline reserve*). Meskipun hasil pengujian total karbonasi menunjukkan peningkatan dari umur 40 hari hingga 350 hari, karbonasi yang terjadi masih terbatas pada lapisan luar sehingga belum menyebabkan penurunan pH yang signifikan pada bagian dalam material.

Pada variasi mortar geopolimer, distribusi warna merah muda terlihat lebih tipis dibandingkan beton konvensional. Bagian dekat permukaan menunjukkan warna yang lebih pudar sehingga mengindikasikan terjadinya penurunan alkalinitas yang lebih besar akibat karbonasi. Hasil ini sejalan dengan data karbonasi yang menunjukkan bahwa kandungan karbonat dan total karbonasi pada mortar geopolimer lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Fenomena tersebut berkaitan dengan karakteristik geopolimer yang memiliki kandungan Ca(OH)_2 jauh lebih rendah dibandingkan beton semen. Akibatnya, kemampuan material untuk mempertahankan pH tinggi ketika terpapar CO_2 menjadi lebih terbatas. Menurut Khan et al. (2016), geopolimer berbasis *fly ash* memiliki cadangan alkalinitas yang lebih rendah sehingga lebih rentan mengalami penurunan pH akibat karbonasi dibandingkan beton Portland.

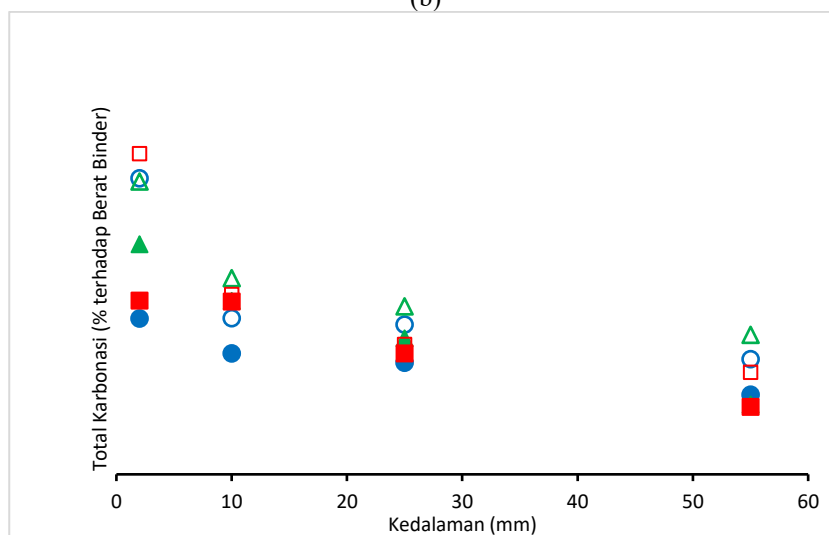
Hasil uji fenolftalein menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan data karbonat, bikarbonat, dan total karbonasi. Variasi yang memiliki kandungan karbonasi lebih tinggi cenderung menunjukkan zona perubahan warna yang lebih luas dan warna merah muda yang lebih pudar. Sebaliknya, variasi dengan kandungan karbonasi yang lebih rendah masih mempertahankan warna merah muda yang lebih intens pada sebagian besar penampang. Secara keseluruhan, pengamatan visual melalui uji fenolftalein mengonfirmasi bahwa karbonasi pada penelitian ini berkembang dari permukaan menuju bagian dalam material, serta menunjukkan bahwa mortar geopolimer mengalami karbonasi yang lebih besar dibandingkan beton konvensional.



(a)

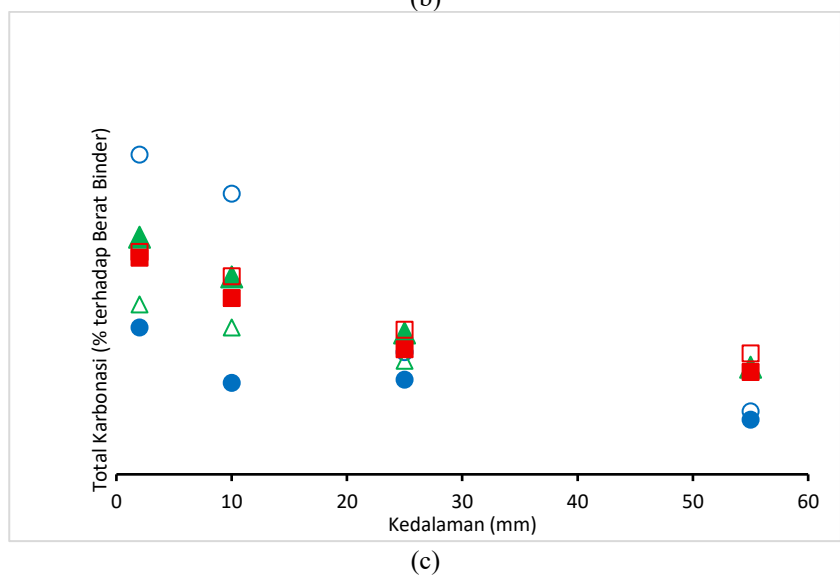
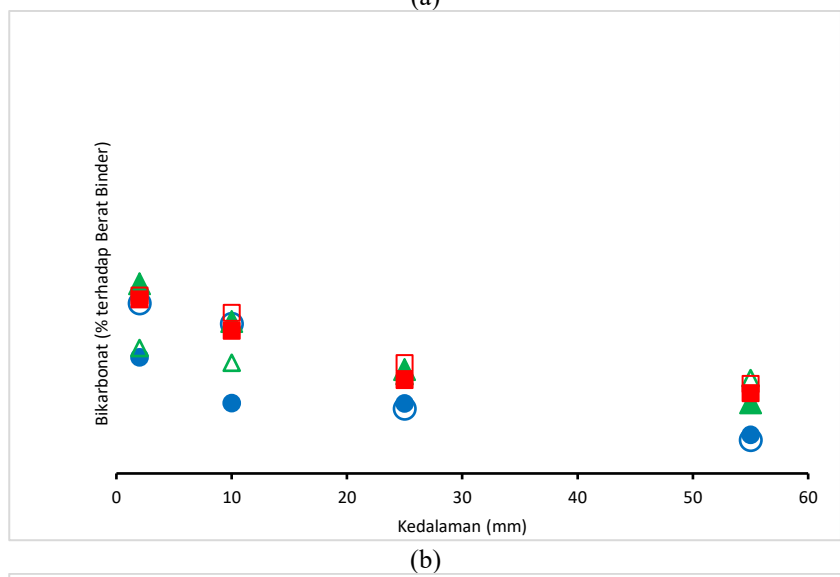
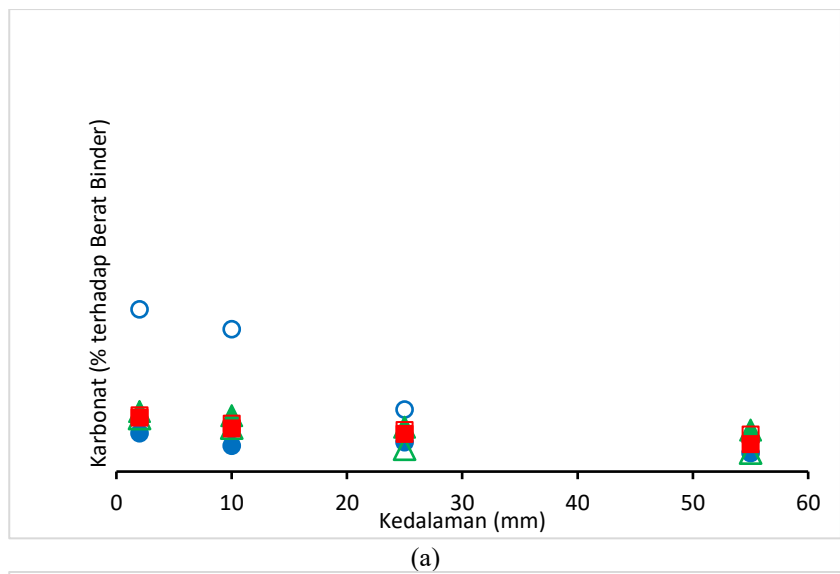


(b)

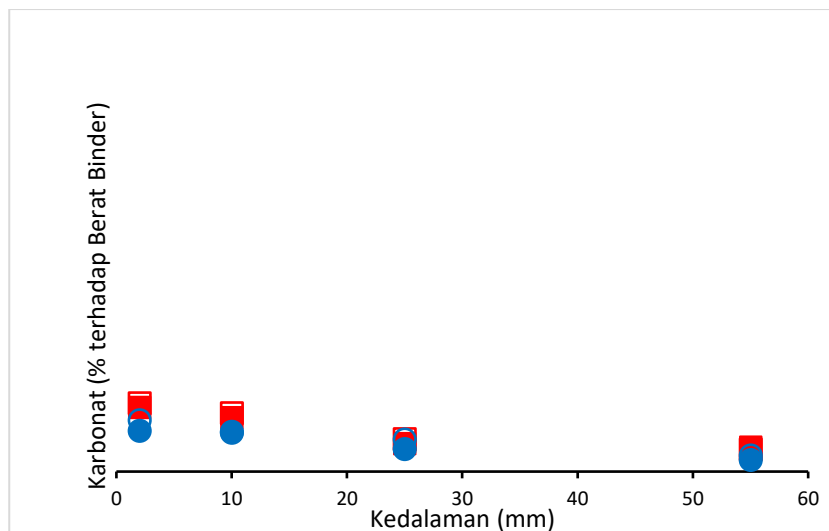


(c)

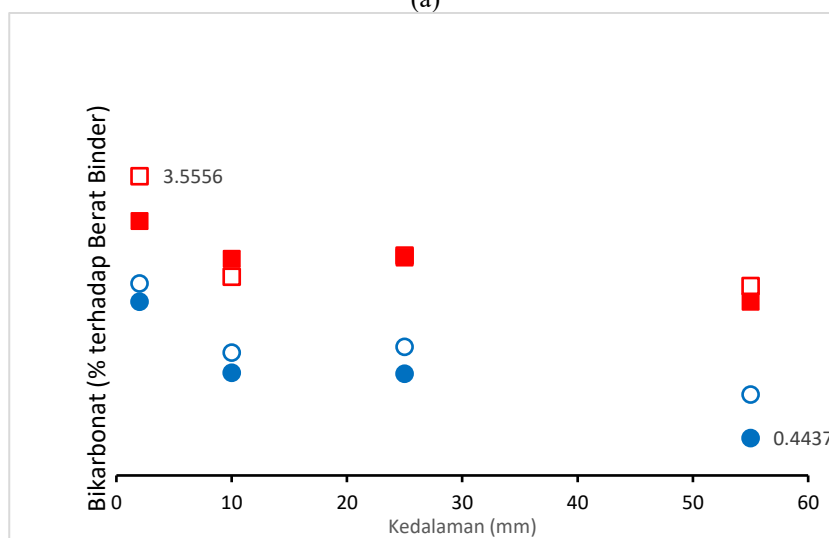
Gambar 8.11 Karbonasi pada 40 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a)
Total Karbonasi



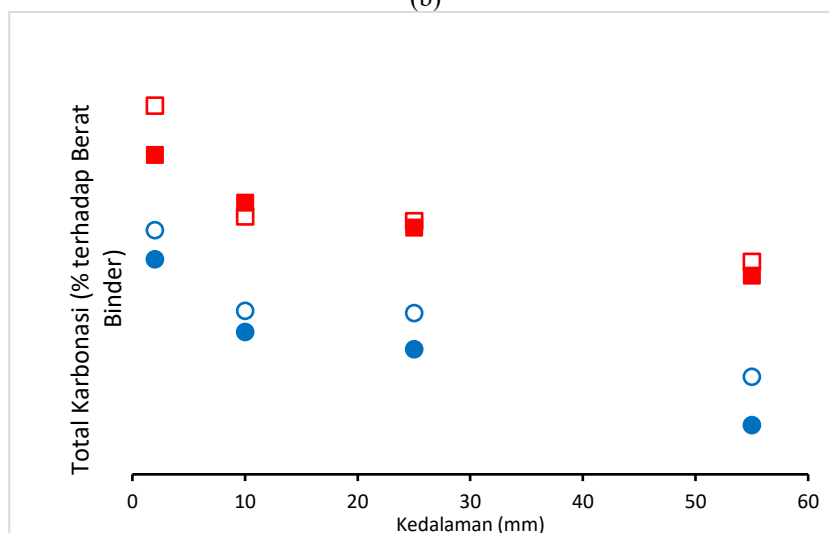
Gambar 8.12 Karbonasi pada 189 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a)
Total Karbonasi



(a)

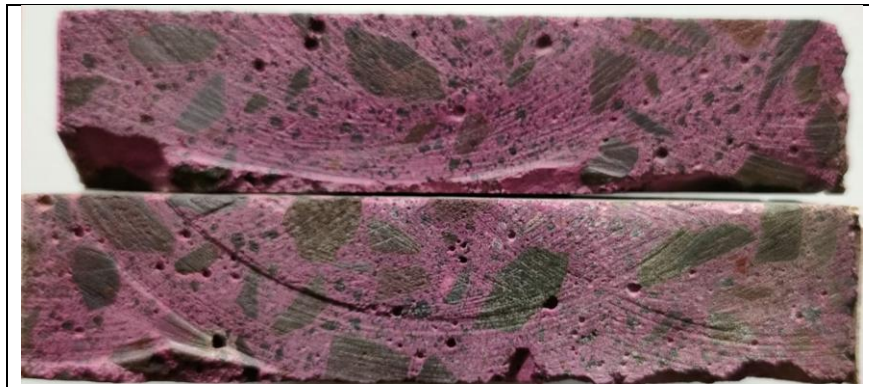


(b)



(c)

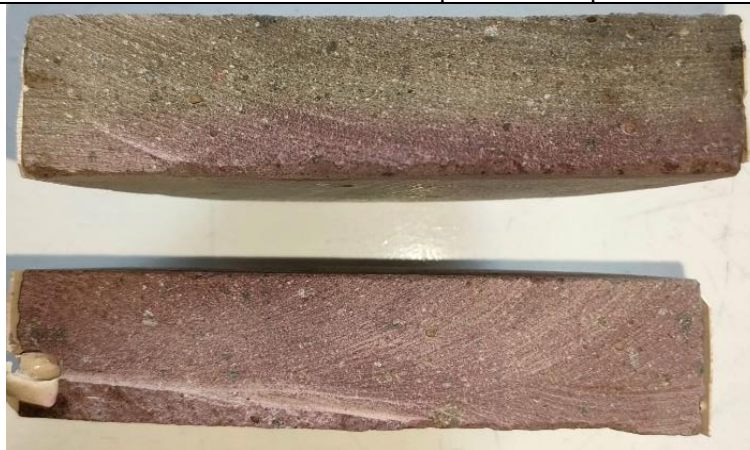
Gambar 8.13 Karbonasi pada 350 hari perendaman (a) Karbonat (a) Bikarbonat (a)
Total Karbonasi



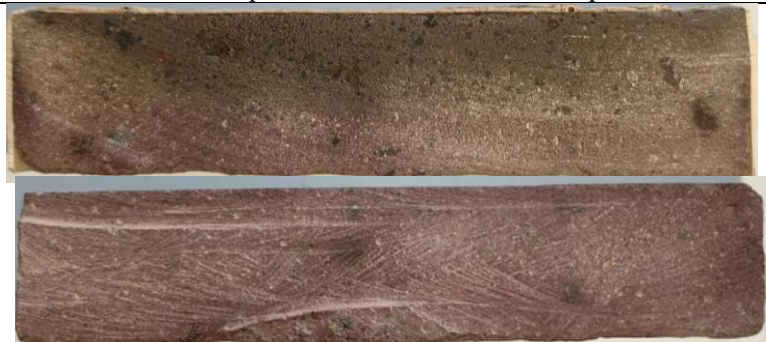
Cc – Beton Konvensional Variasi Cover 350 hari perendaman



Ce – Beton Konvensional Variasi Expose 350 hari perendaman



Mc – Mortar Geopolimer Variasi Cover 350 hari perendaman



Me – Mortar Geopolimer Variasi Expose 350 hari perendaman

Gambar 8.14 Pengujian Karbonasi dengan Indikator Fenofalein

8.6 Pengaruh Mortar Geopolimer dan *Biofouling* pada Karbonasi Beton

Dibandingkan dengan beton semen (C), mortar geopolimer tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, kecuali kadar karbonat yang lebih rendah pada lapisan permukaan. Perbedaan yang jelas muncul antara sampel yang tidak terpapar biota (Cc dan Mc) dan sampel yang terpapar biota yang menempel (Ce dan Me), di mana keberadaan *biofouling* secara signifikan meningkatkan kadar karbonat di permukaan. Sampel yang terpapar (Ce dan MSe) menunjukkan tingkat karbonasi 15–30% lebih tinggi daripada sampel penutup pada kedalaman 2–10 mm. Hal ini konsisten dengan mekanisme biomineralisasi mikroorganisme yang melekat seperti bakteri dan mikroalga, yang melalui fotosintesis dan respirasi, mengubah keseimbangan karbonat-bikarbonat, meningkatkan pH lokal, dan memicu pengendapan CaCO_3 (Fernández et al., 2015; Metzler et al., 2020). Biofilm juga bertindak sebagai matriks organik, menyediakan situs nukleasi untuk pertumbuhan kristal karbonat dan menghasilkan lapisan karbonat yang lebih tebal pada sampel yang terpapar. Fenomena ini menegaskan bahwa mekanisme karbonasi pada geopolimer tidak hanya bergantung pada difusi CO_2 , seperti pada beton berbasis semen, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme laut yang mendorong pengendapan CaCO_3 pada permukaan material (De Muynck et al., 2009).

Pada perendaman selama 40 hari, konsentrasi bikarbonat (HCO_3^-) relatif rendah, berkisar antara 0,07–0,16% berdasarkan berat pengikat, dan menurun secara bertahap seiring bertambahnya kedalaman dari permukaan yang terpapar. Nilai tertinggi secara konsisten diamati di dekat permukaan (0–5 mm), menunjukkan bahwa pembentukan bikarbonat sangat dipengaruhi oleh kondisi paparan eksternal, khususnya CO_2 terlarut dan interaksi air laut. Pada lapisan yang lebih dalam, yaitu 25–50 mm, kandungan bikarbonat menurun secara signifikan, mencerminkan penetrasi yang terbatas ke dalam matriks bagian dalam. Pada perendaman selama 189 hari, peningkatan substansial kandungan bikarbonat diamati di semua spesimen, mencapai nilai sekitar 1,0–2,2% di dekat permukaan. Hal ini menunjukkan karbonasi progresif dan interaksi antara spesies CO_2 terlarut dan fase alkali di dalam matriks beton seiring waktu. Gradien tetap terlihat jelas, dengan konsentrasi yang lebih tinggi di dekat permukaan dan nilai yang menurun ke arah interior, yang menegaskan bahwa pembentukan bikarbonat terutama merupakan proses yang didorong oleh permukaan dan diatur oleh difusi. Kandungan bikarbonat di seluruh variasi menunjukkan penurunan bertahap seiring bertambahnya kedalaman. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan bikarbonat sangat dipengaruhi oleh kondisi paparan

eksternal seperti CO_2 terlarut dari air laut. Spesimen mortar geopolimer umumnya menunjukkan kandungan bikarbonat yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton berbasis semen pada usia awal dan akhir.

BAB 9

MEKANISME DURABILITAS BETON

9.1 Sinergi Degradasi Akibat Ion Agresif Dengan Pengaruh Adanya *Biofouling*

Ketika beton berbasis semen maupun mortar geopolimer pertama kali terpapar lingkungan laut, material tidak langsung mengalami penetrasi klorida, sulfat, dan karbonasi secara bersamaan dengan intensitas yang sama. Urutan interaksi yang terjadi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ion dalam air laut, ukuran ion, reaktivitas kimia material, serta perkembangan *biofouling* pada permukaan. Air laut pada perairan jembatan Suramadu terdiri dari klorida bebas 15200 mg/L, Sulfat bebas 1299,81 mg/L, magnesium 111,354 mg/L dan Bikarbonat 138 mg/L. Dari seluruh ion tersebut, klorida merupakan ion dengan konsentrasi tertinggi dan mobilitas tertinggi sehingga secara teoritis menjadi ion pertama yang berdifusi ke dalam sistem pori material. Namun demikian, efek durabilitas yang teramati pada material tidak selalu mengikuti urutan masuknya ion, melainkan ditentukan oleh reaksi yang terjadi setelah ion tersebut mencapai matriks material. Selain itu, perubahan mikrostruktur material salah satunya adalah kepadatan material yang dinyatakan dengan pengujian porositas sangat berpengaruh terhadap mekanisme difusi ion agresif.

Hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa perubahan mikrostruktur material selama perendaman di lingkungan laut berlangsung secara dinamis dan berkorelasi erat dengan mekanisme transport ion agresif yang diamati pada pengujian penetrasi klorida, sulfat, dan karbonasi. Pada umur 28 hari sebelum perendaman, beton konvensional memiliki porositas total sebesar 25,85%, lebih rendah dibandingkan mortar geopolimer dengan *slag* sebesar 28,92%. Namun demikian, mortar geopolimer juga memiliki proporsi pori terbuka yang lebih besar (24,73%) dibandingkan beton konvensional (19,10%). Kondisi ini menjelaskan mengapa pada tahap awal perendaman mortar geopolimer menunjukkan kandungan klorida total dan koefisien difusi yang lebih tinggi. Jalur transport ion masih didominasi oleh pori kapiler yang saling terhubung karena proses geopolimerisasi belum berlangsung sempurna. Menurut Provis dan van Deventer (2014), material geopolimer mengalami penyempurnaan mikrostruktur secara bertahap melalui pembentukan gel aluminosilikat yang terus berkembang selama proses curing maupun paparan jangka panjang, sehingga karakteristik pori pada umur awal belum mencerminkan kondisi akhir material.

Setelah 189 hari perendaman, terjadi perubahan karakteristik pori yang berbeda antara beton konvensional dan mortar geopolimer. Pada beton konvensional, porositas total menurun menjadi 23,15% (Cc) dan 22,33% (Ce). Penurunan ini mengindikasikan bahwa sebagian pori

mengalami penyumbatan oleh produk hidrasi lanjutan, pembentukan kalsium karbonat (CaCO_3) akibat karbonasi, maupun presipitasi produk reaksi sulfat seperti gypsum dan ettringite. Fenomena tersebut sesuai dengan mekanisme yang dijelaskan oleh Yi et al. (2020), yaitu bahwa pada tahap awal paparan laut, pembentukan produk reaksi dapat mengurangi konektivitas pori (*pore blocking effect*) sehingga permeabilitas material menurun sementara. Kondisi ini sejalan dengan hasil pengujian koefisien difusi klorida yang menunjukkan penurunan nilai difusi pada beton konvensional dari $8,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ menjadi $3,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

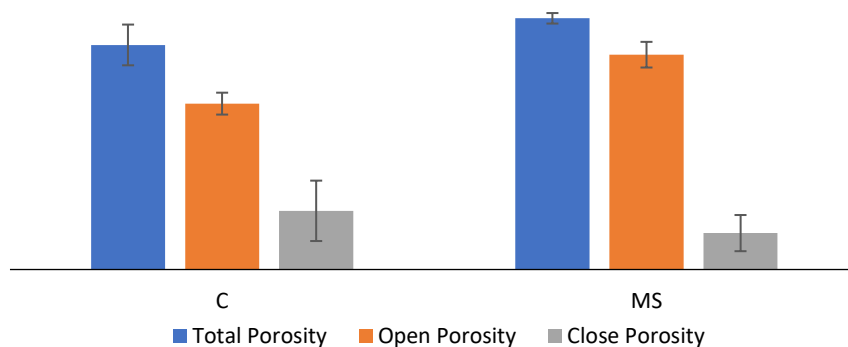
Pada umur 189 hari, porositas total meningkat menjadi 36,08% pada MSc dan 33,36% pada MSe. Meskipun demikian, kedua variasi tersebut justru menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi klorida dan sulfat dibandingkan mortar geopolimer tanpa *slag*. Pada umur 350 hari, porositas total MSe bahkan meningkat hingga 43,86%, tetapi peningkatan tersebut diikuti oleh kenaikan pori tertutup menjadi sekitar 21,83%, sedangkan proporsi pori terbuka menurun menjadi 22,03%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan porositas lebih banyak disebabkan oleh terbentuknya pori-pori tertutup atau *gel pores* yang tidak saling terhubung. Menurut Bernal et al. (2012) serta Ismail et al. (2014), penambahan *slag* menghasilkan pembentukan gel hibrida C-(N)-A-S-H yang memperhalus mikrostruktur dan meningkatkan jumlah pori gel berukuran nanometer. Pori-pori tersebut terukur sebagai bagian dari porositas total, namun tidak berfungsi sebagai jalur utama difusi ion agresif sehingga permeabilitas efektif material tetap rendah. Oleh karena itu, peningkatan porositas total pada mortar geopolimer dengan *slag* tidak bertentangan dengan rendahnya koefisien difusi klorida, rendahnya penetrasi sulfat, maupun meningkatnya kuat tekan yang diperoleh pada penelitian ini.

Pada beton konvensional, kondisi yang berbeda mulai terlihat setelah 350 hari perendaman. Porositas total meningkat kembali menjadi 27,58% (Cc) dan 27,40% (Ce), disertai dengan peningkatan pori tertutup. Peningkatan porositas tersebut berkaitan dengan berlangsungnya proses degradasi mikrostruktur akibat interaksi antara penetrasi klorida, reaksi sulfat, karbonasi, dan pelindian $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sun et al. (2022) menjelaskan bahwa serangan gabungan (*coupled chloride-sulfate attack*) menyebabkan perubahan bertahap pada struktur pasta semen. Pada tahap awal, pembentukan gypsum dan ettringite dapat mengisi sebagian pori sehingga permeabilitas menurun, namun akumulasi produk reaksi tersebut selanjutnya menimbulkan tegangan internal yang menghasilkan mikroretak. Mikroretak inilah yang meningkatkan konektivitas pori sehingga mempermudah penetrasi ion klorida dan karbon dioksida ke bagian dalam material. Mekanisme tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, di

mana peningkatan porositas pada umur 350 hari diikuti oleh penurunan kapasitas pengikatan klorida serta peningkatan kadar karbonasi.

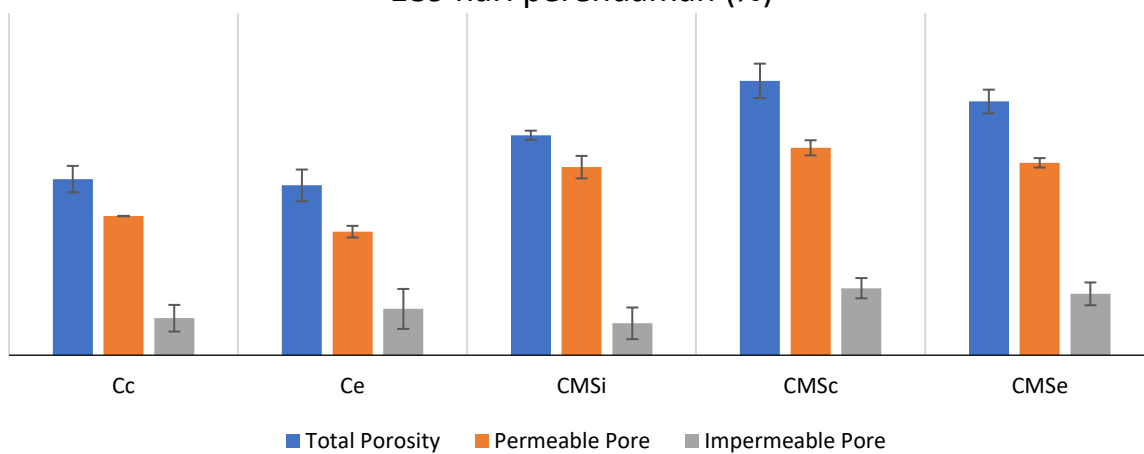
Keberadaan *biofouling* tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap nilai porositas total baik pada beton konvensional maupun mortar geopolimer, tetapi mempengaruhi mekanisme transport ion pada permukaan material. Variasi exposed (Ce dan MSe) memiliki nilai porositas yang hampir sama dengan variasi cover, namun menunjukkan kandungan klorida bebas yang lebih rendah, kadar sulfat permukaan yang lebih tinggi, serta karbonasi yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa *biofouling* lebih berperan sebagai lapisan antarmuka (*surface interface layer*) yang mengubah kondisi difusi dan reaksi kimia pada permukaan daripada mengubah mikrostruktur internal material. Dengan demikian, hasil pengujian porositas pada penelitian ini mendukung hasil pengujian penetrasi ion agresif dan menunjukkan bahwa durabilitas material di lingkungan laut tidak hanya dikendalikan oleh besarnya porositas total, tetapi lebih dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori, konektivitas pori, tortuositas jalur difusi, serta perkembangan mikrostruktur selama masa paparan. Temuan ini sejalan dengan konsep transport ion pada material sementisius yang dikemukakan oleh Sun et al. (2022), Yi et al. (2020), Provis dan van Deventer (2014), serta Bernal et al. (2012), yang menyatakan bahwa mikrostruktur pori merupakan faktor utama yang mengontrol ketahanan material terhadap lingkungan laut agresif.

Umur 28 hari - sebelum perendaman (%)



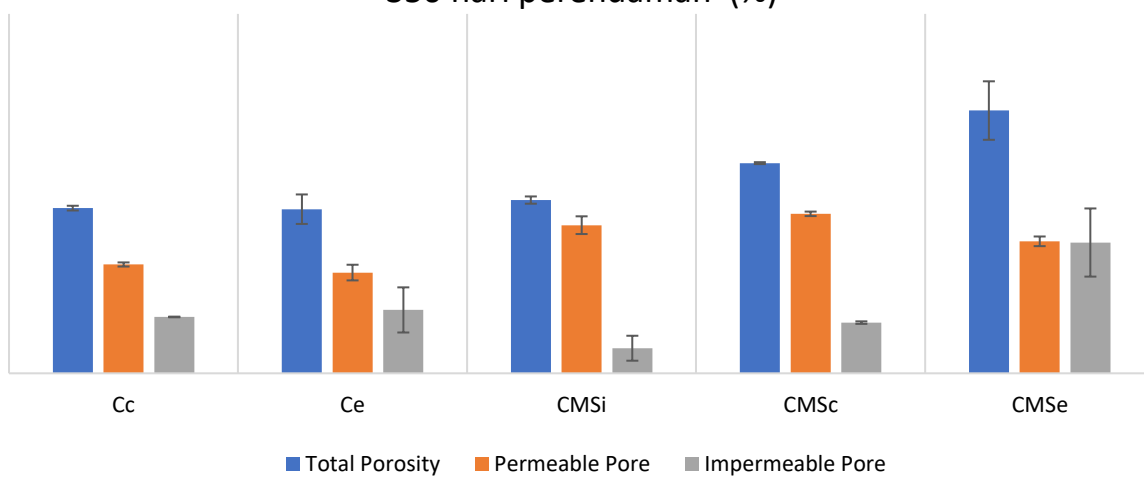
(a)

189 hari perendaman (%)



(b)

350 hari perendaman (%)



(c)

Gambar 9.1 Porositas Beton Selama Perendaman

Mengacu pada model degradasi beton laut yang dijelaskan oleh Sun et al. (2022) dan Yi et al. (2020), kerusakan beton di lingkungan laut tidak terjadi akibat satu jenis ion secara terpisah, melainkan akibat interaksi simultan antara transport ion klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}), karbonasi, pelindian (*leaching*), dan perubahan mikrostruktur pasta semen. Oleh karena itu, mekanisme durabilitas beton konvensional merupakan suatu proses berurutan yang berkembang seiring waktu paparan. Ketika beton pertama kali terpapar air laut, pori-pori kapiler menjadi jalur utama masuknya larutan laut. Air laut membawa berbagai ion agresif, terutama Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ , dan HCO_3^- . Karena ukuran ion klorida relatif kecil dan koefisien difusinya tinggi, ion ini menjadi spesies yang paling cepat bermigrasi ke dalam beton. Pada tahap awal, klorida belum langsung menyebabkan kerusakan, tetapi mulai terakumulasi dalam pori dan sebagian terikat oleh produk hidrasi semen.

Setelah memasuki beton, sebagian klorida tidak berada dalam bentuk bebas tetapi diikat oleh fase hidrat semen, terutama C-S-H dan fase aluminat (AFm). Reaksi yang terjadi adalah proses pembentukan Friedel's salt yaitu hasil dari reaksi antara ion klorida dan fase aluminat terhidrasi. Proses ini dapat mengurangi jumlah klorida bebas yang dikhawatirkan dapat mencapai tulangan. Tahap ini sejalan dengan nilai kapasitas pengikatan klorida beton konvensional masih cukup tinggi pada umur 40 hari (57,68%) dan 189 hari (52,79%). Hal ini menandakan klorida yang masuk masih dapat diimobilisasi oleh matriks semen.

Setelah paparan berlangsung lebih lama, ion sulfat selanjutnya berinteraksi dengan produk hidrasi semen. Sulfat bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ membentuk gypsum dan kemudian bereaksi dengan fase aluminat menghasilkan ettringite sekunder. Pembentukan kedua produk tersebut menyebabkan peningkatan volume padatan dalam pori sehingga memicu tegangan internal, ekspansi, dan pembentukan retak mikro (Qu et al., 2021). Pada tahap awal produk gypsum dan ettringite mengisi pori sehingga dapat menurunkan permeabilitas beton. Akumulasi yang berlangsung terus menerus, tekanan kristalisasi dan penambahan volume akan menghasilkan retakan yang justru mempercepat penetrasi ion berikutnya (Yi et al., 2020). Hasil penetrasi sulfat yang menunjukkan kadar sulfat bebas beton konvensional relatif rendah dibandingkan geopolimer mengindikasikan sebagian sulfat telah berubah membentuk gypsum dan ettringite.

Tahap selanjutnya adalah air laut yang melarutkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari pasta semen melalui proses *leaching* dan ion magnesium yang bereaksi dengan C-S-H menyebabkan dekalsifikasi gel sehingga kestabilan kimia matriks semen mulai tidak stabil. Hal ini menyebabkan porositas meningkat, konektivitas antar pori bertambah sehingga kemampuan mengikat klorida menurun dan difusi ion menjadi lebih mudah. Hal ini sesuai dengan data penelitian menunjukkan

kapasitas pengikatan klorida beton konvensional turun dari 57,68% (40 hari) menjadi 47,93% (350 hari). Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian lokasi pengikatan klorida telah hilang atau berubah akibat degradasi produk hidrasi semen.

Tahap selanjutnya adalah proses karbonasi, CO_2 dari lingkungan mulai berdifusi ke dalam beton. Karbonasi terutama terjadi melalui reaksi antara CO_2 dan Ca(OH)_2 yang menghasilkan CaCO_3 . Pada tahap awal, pembentukan CaCO_3 dapat memperhalus pori dan sedikit mengurangi permeabilitas. Namun karbonasi juga mengonsumsi cadangan alkalinitas beton sehingga pH pori menurun secara bertahap. Hasil karbonasi menunjukkan peningkatan yang signifikan dari 40 hari menuju 189 dan 350 hari. Uji fenolftalein juga memperlihatkan bahwa zona karbonasi berkembang dari permukaan menuju bagian dalam beton. Karbonasi menjadi sangat penting karena penurunan pH akan mengurangi kestabilan Friedel's salt dan menurunkan kemampuan beton untuk mempertahankan klorida dalam bentuk terikat. Dengan demikian karbonasi secara tidak langsung meningkatkan risiko korosi tulangan walaupun tidak secara langsung menambah jumlah klorida yang masuk.

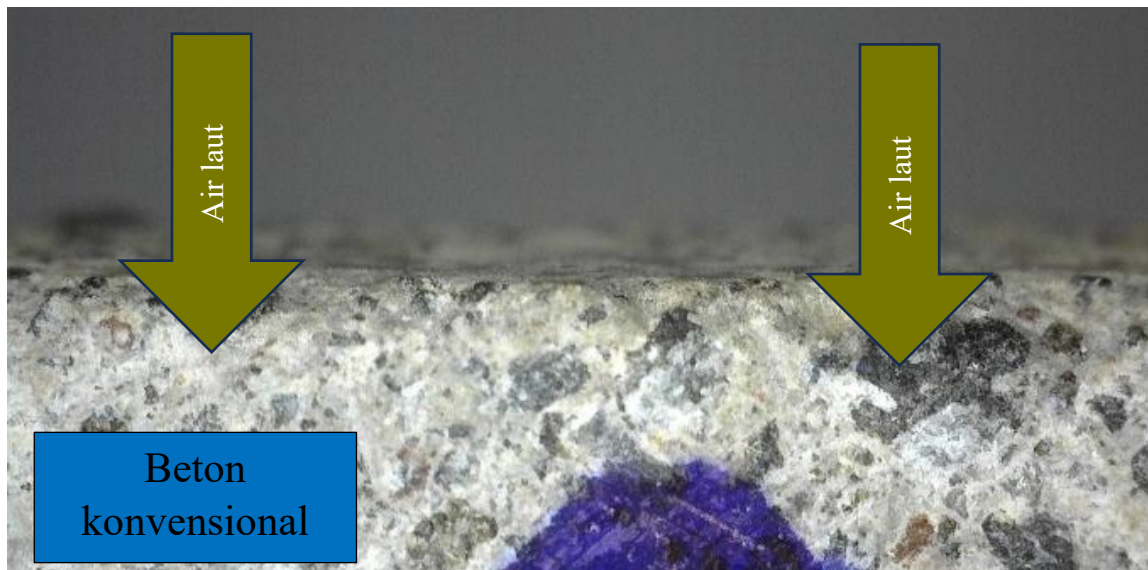
Menurut Sun et al. (2022), kondisi yang paling realistis di lingkungan laut adalah *coupled chloride-sulfate attack*, bukan serangan ion tunggal. Dalam kondisi ini klorida masuk terlebih dahulu dan terikat sebagian oleh fase hidrat. Dilanjutkan dengan sulfat masuk kemudian bereaksi dengan produk hidrasi membentuk gypsum serta ettringite. Hasil reaksi sulfat mengubah struktur pori sehingga mempengaruhi kapasitas pengikatan klorida. Pada tahap selanjutnya karbonasi yang mengurangi alkalinitas dan mempercepat pelepasan klorida terikat. Ekspansi sulfat yang menambah produk volume menyebabkan retak mikro sehingga meningkatkan transport klorida dan CO_2 . Dapat disimpulkan bahwa seluruh mekanisme tersebut bekerja secara sinergis mempercepat degradasi beton. Urutan ini sejalan dengan data penelitian yang menunjukkan kandungan klorida bebas masih relatif rendah pada awal perendaman, kapasitas pengikatan klorida menurun pada umur lanjut, kandungan sulfat bebas tetap rendah karena dikonsumsi dalam reaksi sulfat, dan karbonasi meningkat secara progresif hingga umur 350 hari. Seluruh hasil tersebut konsisten dengan model degradasi beton laut yang dijelaskan oleh Sun et al. (2022) dan Yi et al. (2020).

Mekanisme durabilitas beton konvensional yang terdapat *biofouling* memiliki perbedaan dengan adanya mekanisme pelapisan biofilm yang berdampak pada retensi/penghambatan ion agresif masuk ke dalam beton. Jika pada beton semen mekanisme utamanya adalah penetrasi klorida yang dilanjutkan dengan reaksi sulfat kemudian terjadi pelindian Ca(OH)_2 dan proses karbonasi sehingga menurunkan alkalinitas dan peningkatan risiko korosi. Namun pada beton

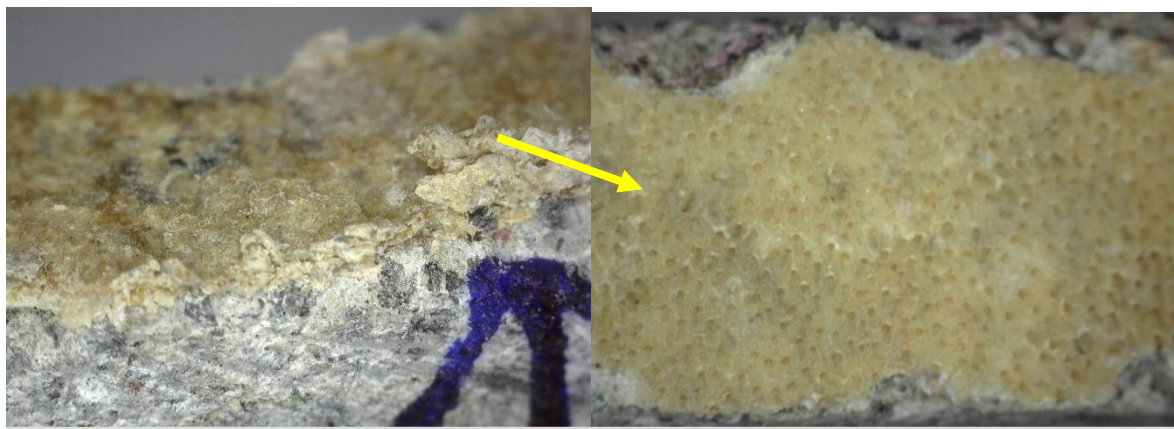
dengan *biofouling* (Ce), terdapat tambahan lapisan biologis yang memodifikasi transport ion dan reaksi kimia pada permukaan beton.

Pada awal penempelan *biofouling* yang membentuk EPS yang salah satunya terdapat lapisan licin yang berfungsi sebagai pelindung beton (*Biological Diffusion Barrier*). Adanya lapisan ini berpotensi menutupi pori permukaan beton sehingga meningkatkan jalur difusi dan menghindari kontak langsung beton dan air laut. EPS dari biofilm yang tidak merata melapisi seluruh bagian permukaan beton ini mengakibatkan ketidakmerataan kandungan sulfat pada permukaan maupun pada kedalaman beton. Sulfat yang ada tidak seluruhnya berdifusi ke dalam beton.

Dampak *biofouling* paling terlihat pada kadar karbonasi beton. *Biofouling* memberikan dampak kadar karbonasi beton lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak terdapat *biofouling*. Hal ini konsisten dengan mekanisme biomineralisasi mikroorganisme yang menempel seperti bakteri dan mikroalga, yang melalui fotosintesis dan respirasi, mengubah keseimbangan karbonat-bikarbonat, meningkatkan pH lokal, dan memicu pengendapan CaCO_3 (X. Sun et al., 2024). Hal ini terjadi hingga koloni makrofouling menempel sehingga memicu biomineralisasi lebih lanjut (Metzler et al., 2020). Kondisi permukaan beton konvensional setelah 350 hari perendaman ditunjukkan pada Gambar 9.1. Pada gambar tersebut terlihat variasi cover yang tidak terdapat biota menunjukkan air laut yang membawa ion agresif tidak mengalami modifikasi permukaan pada beton, namun pada kondisi ada *biofouling* air laut yang membawa ion agresif terhalang permukaan *biofouling*.



(a)



(b)

Gambar 9.2 Permukaan Beton Konvensional variasi (a) cover/tidak ada biota dan (b) Expose/Ada Biota

Berbeda dengan beton semen Portland yang durabilitasnya dikendalikan oleh stabilitas produk hidrasi C-S-H dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, durabilitas mortar geopolimer berbasis *fly ash* terutama ditentukan oleh kestabilan jaringan N-A-S-H (*sodium aluminosilicate hydrate*) yang membentuk struktur aluminosilikat tiga dimensi. Jaringan tersebut tersusun atas tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang saling berikatan melalui atom oksigen, sedangkan muatan negatif akibat substitusi Al diseimbangkan oleh ion Na^+ yang berada di dalam rongga struktur. Oleh karena itu, mekanisme degradasi geopolimer di lingkungan laut lebih dipengaruhi oleh perubahan struktur jaringan N-A-S-H dibandingkan pembentukan produk ekspansif sebagaimana terjadi pada beton semen (van Deventer et al., 2014). Temuan ini juga diperkuat oleh H. Wan et al. (2020) yang menjelaskan bahwa stabilitas jaringan N-A-S-H merupakan faktor utama yang mengontrol ketahanan geopolimer terhadap lingkungan agresif.

Ketika mortar geopolimer mulai terendam air laut, molekul air merupakan spesies pertama yang memasuki sistem pori. Air berdifusi melalui pori-pori kapiler kemudian berinteraksi dengan permukaan gel N-A-S-H yang kaya akan gugus silanol (Si-OH) dan aluminol (Al-OH). Interaksi tersebut menghasilkan *hydration layer*, yaitu lapisan molekul air yang terikat kuat pada permukaan gel melalui ikatan hidrogen. (Zhang, Yu; Li, Tao; Hou, Dongshuai; Zhang, Jinglin; Jiang, 2018) menunjukkan melalui simulasi *molecular dynamics* bahwa *hydration layer* memiliki densitas lebih tinggi dibandingkan air bebas sehingga difusivitas molekul air maupun ion di dekat permukaan gel menjadi lebih rendah. Dengan demikian, perpindahan ion agresif tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran pori, tetapi juga oleh interaksi molekuler antara air dan permukaan gel N-A-S-H.

Mekanisme tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan data pada umur 28 hari sebelum perendaman, mortar geopolimer memiliki porositas total (28,92%) dan pori terbuka (24,73%) yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Secara teoritis kondisi tersebut seharusnya meningkatkan transport ion. Namun hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah perendaman berlangsung, koefisien difusi klorida terus menurun dari $28,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pada umur 40 hari menjadi $9,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pada umur 189 hari. Hal ini menunjukkan bahwa transport ion tidak hanya dikendalikan oleh besarnya porositas total, tetapi juga oleh perkembangan mikrostruktur gel dan terbentuknya *hydration layer* yang meningkatkan tortuositas jalur difusi.

Setelah *hydration layer* terbentuk, ion klorida mulai berdifusi mengikuti gradien konsentrasi. Berbeda dengan beton semen yang mengikat klorida melalui pembentukan Friedel's salt pada fase AFm, mortar geopolimer hampir tidak memiliki fase tersebut sehingga mekanisme retensi klorida didominasi oleh adsorpsi fisik pada permukaan gel N-A-S-H. Atom oksigen non-bridging (NBO) dan gugus hidroksil pada permukaan gel berinteraksi dengan ion klorida sehingga memperpanjang lintasan difusi (*tortuous diffusion pathway*) dan menurunkan mobilitas ion.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi klorida bebas pada variasi Mc menurun tajam terhadap kedalaman, yaitu dari 0,1503% pada permukaan menjadi 0,0379% pada kedalaman 55 mm setelah 40 hari perendaman. Setelah 189 hari, konsentrasi permukaan bahkan turun menjadi 0,0612% dan hanya 0,0164% pada kedalaman 55 mm. Penurunan tersebut diikuti oleh meningkatnya *chloride binding capacity* dari 58,82% pada umur 40 hari menjadi 69,09% pada umur 189 hari. Walaupun mekanisme pengikatan pada geopolimer berbeda dengan beton semen, hasil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi dan penyempurnaan mikrostruktur selama geopolimerisasi lanjutan mampu mengurangi jumlah

klorida bebas yang berdifusi menuju bagian dalam mortar. Davidovits, (2013) dan Zerfu & Ekaputri, (2016) menyatakan bahwa proses polikondensasi pada geopolimer masih berlangsung selama masa paparan sehingga konektivitas pori semakin berkurang dan ketahanan terhadap transport ion meningkat.

Ion sulfat memasuki mortar geopolimer melalui mekanisme difusi yang sama, tetapi interaksi kimianya berbeda dibandingkan beton semen. Pada sistem berbasis *fly ash* dengan kandungan kalsium rendah, sulfat tidak memiliki cukup Ca^{2+} untuk membentuk gypsum maupun ettringite dalam jumlah signifikan sehingga mekanisme degradasi akibat ekspansi hampir tidak terjadi (Bernal et al., 2014). Sebaliknya, Zhang et al. menunjukkan bahwa ion Mg^{2+} dalam air laut berinteraksi kuat dengan atom oksigen pada permukaan gel N-A-S-H membentuk ikatan Mg–O. Ion Mg^{2+} tersebut kemudian menarik ion SO_4^{2-} sehingga membentuk pasangan ion Mg– SO_4 yang teradsorpsi di dekat permukaan gel. Mekanisme ini menyebabkan sebagian ion sulfat tertahan pada lapisan luar mortar sehingga laju penetrasinya ke bagian dalam menjadi lebih lambat.

Fenomena tersebut terlihat pada hasil penelitian ini. Kadar sulfat bebas pada mortar geopolimer memang lebih tinggi dibandingkan beton semen, yaitu sekitar 0,1710% pada permukaan setelah 40 hari dan 0,1678% setelah 189 hari. Akan tetapi, tingginya kadar sulfat bebas tersebut tidak diikuti oleh indikasi pembentukan produk ekspansif maupun penurunan kuat tekan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar sulfat berada dalam bentuk bebas atau teradsorpsi pada permukaan gel N-A-S-H, bukan bereaksi membentuk mineral sekunder sebagaimana terjadi pada beton semen. Setelah paparan berlangsung lebih lama, mekanisme degradasi bergeser dari dominasi transport ion menjadi degradasi kimia jaringan gel. Wan et al. (2020) menjelaskan bahwa ion Na^+ yang berfungsi sebagai penyeimbang muatan dalam jaringan N-A-S-H secara bertahap terlindi (*alkali leaching*) akibat kontak terus-menerus dengan air. Hilangnya ion Na^+ menyebabkan keseimbangan muatan terganggu sehingga terjadi pembengkakan struktur, hidrolisis ikatan Si–O–Al, peningkatan jumlah gugus Si–OH dan Al–OH, serta depolimerisasi jaringan aluminosilikat. Kerusakan dimulai dari permukaan dan berkembang menuju bagian dalam secara bertahap (*layer-by-layer degradation*).

Mekanisme tersebut sejalan dengan hasil pengujian porositas pada penelitian ini. Walaupun porositas total mortar geopolimer tidak mengalami perubahan yang sangat besar hingga umur 189 hari, proporsi pori mulai mengalami perubahan akibat degradasi bertahap jaringan gel. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa penetrasi sulfat semakin meningkat pada umur 189 hari sehingga pengujian variasi Mc tidak dilanjutkan hingga umur 350 hari. Dengan

demikian, peningkatan penetrasi sulfat pada umur lanjut lebih berkaitan dengan degradasi jaringan N-A-S-H akibat leaching daripada pembentukan gypsum maupun ettringite. Karbonasi merupakan mekanisme degradasi lanjutan yang terjadi setelah berlangsungnya leaching alkali. Berbeda dengan beton semen yang karbonasinya didominasi oleh reaksi CO_2 dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menghasilkan CaCO_3 , pada mortar geopolimer karbonasi terutama berkaitan dengan penurunan alkalinitas akibat hilangnya ion Na^+ dari jaringan N-A-S-H. Wan et al. (2020) menjelaskan bahwa leaching alkali dan karbonasi merupakan dua proses yang saling mempercepat. Leaching menurunkan stabilitas jaringan gel, sedangkan masuknya CO_2 mempercepat pembentukan karbonat alkali sehingga depolimerisasi jaringan berlangsung lebih cepat.

Pengujian karbonasi menunjukkan bahwa kadar karbonat meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman meskipun penetrasi klorida dan sulfat relatif masih dapat dikendalikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pada mortar geopolimer berbasis *fly ash*, karbonasi merupakan mekanisme degradasi jangka panjang yang lebih dominan dibandingkan pembentukan produk ekspansif akibat sulfat. Dengan demikian, mekanisme durabilitas mortar geopolimer tanpa *biofouling* secara urutan sebagai berikut yaitu air laut memasuki sistem pori sehingga terbentuk *hydration layer* pada permukaan gel N-A-S-H. Setelahnya terjadi difusi Cl^- dan SO_4^{2-} namun dapat diperlambat oleh interaksi dengan gugus Si-OH dan Al-OH . Sulfat sebagian teradsorpsi sebagai pasangan Mg-SO_4 pada permukaan gel sehingga transport ion menurun akibat meningkatnya tortuositas. Pada paparan yang lebih panjang memicu leaching Na^+ sehingga terjadi depolimerisasi jaringan N-A-S-H. depolimerisasi menyebabkan ion karbonat masuk sehingga menurunkan alkalinitas. Kemudian mikrostruktur secara bertahap mengalami degradasi.

Berbeda dengan variasi Mc yang hanya dipengaruhi oleh interaksi antara air laut dan mortar geopolimer, pada variasi Me proses degradasi berlangsung pada sistem yang lebih kompleks karena adanya kolonisasi biofilm dan organisme makrofouling pada permukaan mortar. Kehadiran *biofouling* membentuk suatu *biological interface layer* yang memisahkan air laut dengan permukaan mortar geopolimer. Lapisan biologis tersebut tersusun atas *extracellular polymeric substances* (EPS), mikroorganisme, serta organisme sessile yang mampu mengubah kondisi kimia maupun fisik di sekitar permukaan material. Dengan demikian, mekanisme durabilitas tidak lagi hanya dikendalikan oleh karakteristik gel N-A-S-H, tetapi juga oleh proses biologis yang berlangsung pada antarmuka biofilm-material (Flemming & Wingender, 2010).

Pada beberapa hari pertama setelah perendaman, permukaan mortar geopolimer mengalami adsorpsi protein dan senyawa organik terlarut (*conditioning film*), yang kemudian diikuti kolonisasi bakteri dan diatom sehingga membentuk biofilm primer. Selanjutnya biofilm berkembang menjadi lapisan EPS yang menutupi hampir seluruh permukaan mortar dan menjadi tempat melekatnya organisme makrofouling. Lapisan EPS mempunyai karakter hidrofilik dan mampu menyerap air dalam jumlah besar. Akibatnya air laut tidak lagi berkontak langsung dengan permukaan mortar, tetapi harus melewati matriks biofilm terlebih dahulu sebelum mencapai sistem pori mortar. Flemming dan Wingender (2010) menjelaskan bahwa EPS merupakan matriks polimer yang memiliki porositas tinggi tetapi difusivitas relatif rendah, sehingga dapat memperlambat perpindahan massa berbagai ion terlarut. Mekanisme tersebut sesuai dengan hasil pengamatan *biofouling* pada penelitian ini yang menunjukkan bahwa permukaan mortar geopolimer setelah perendaman telah tertutup oleh biofilm, barnacle, oyster, dan organisme sessile lainnya.

Setelah biofilm terbentuk, ion klorida tidak lagi berdifusi langsung menuju permukaan mortar sebagaimana pada variasi Mc. Ion klorida terlebih dahulu melewati lapisan EPS sehingga sebagian ion mengalami retensi sementara akibat proses adsorpsi maupun meningkatnya tortuositas jalur difusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *biofouling* mampu menurunkan penetrasi klorida bebas dibandingkan mortar tanpa *biofouling*. Pada umur 40 hari kadar klorida bebas di permukaan Me hanya sekitar 0,0833%, jauh lebih rendah dibandingkan Mc sebesar 0,1503%. Pada umur 189 hari kadar tersebut juga tetap lebih rendah, yaitu 0,0750% pada Me dibandingkan 0,0612% pada Mc, dengan distribusi konsentrasi yang lebih landai hingga kedalaman 55 mm. Selain itu, koefisien difusi Me pada umur 40 hari hanya sebesar $15 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, lebih kecil dibandingkan Mc ($28 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), menunjukkan bahwa keberadaan biofilm memperlambat transport ion klorida menuju bagian dalam mortar. Penurunan penetrasi ini bukan disebabkan oleh perubahan mikrostruktur mortar, karena hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa nilai porositas total antara Mc dan Me relatif tidak berbeda. Dengan demikian, hambatan transport ion lebih disebabkan oleh terbentuknya lapisan biologis pada permukaan material. Fenomena ini sejalan dengan penelitian Chlayon et al. (2020), yang melaporkan bahwa organisme sessile pada permukaan beton laut dapat bertindak sebagai *natural diffusion barrier* yang mengurangi migrasi ion klorida menuju substrat.

Pengaruh *biofouling* terhadap sulfat menunjukkan kecenderungan yang berbeda dibandingkan klorida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar sulfat bebas pada variasi Me justru lebih tinggi dibandingkan Mc, terutama pada lapisan dekat permukaan. Pada umur 40 hari konsentrasi sulfat permukaan mencapai sekitar 0,1710%, sedangkan setelah 189 hari masih

berada pada kisaran 0,1678%. Akan tetapi peningkatan kadar sulfat tersebut tidak diikuti oleh indikasi pembentukan gypsum maupun ettringite ataupun penurunan kuat tekan yang signifikan. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa biofilm tidak meningkatkan reaktivitas sulfat terhadap mortar geopolimer, melainkan meningkatkan retensi sulfat pada zona permukaan. EPS diketahui mengandung gugus karboksilat, hidroksil, dan fosfat yang bermuatan negatif sehingga mampu mengadsorpsi berbagai ion logam dan membentuk mikroreservoir ion pada permukaan biofilm (Flemming & Wingender, 2010). Akibatnya ion sulfat lebih banyak terakumulasi pada lapisan luar biofilm sebelum berdifusi ke dalam mortar. Di sisi lain, mekanisme yang dijelaskan Zhang et al. tetap berlangsung di dalam mortar, yaitu pembentukan pasangan ion $Mg-SO_4$ pada permukaan gel N-A-S-H sehingga sulfat yang berhasil mencapai permukaan mortar sebagian kembali tertahan melalui interaksi dengan jaringan aluminosilikat. Oleh karena itu, walaupun kadar sulfat permukaan lebih tinggi, penetrasi sulfat menuju bagian dalam tidak berkembang secepat yang diperkirakan berdasarkan konsentrasi permukaannya.

Keberadaan biofilm juga mempengaruhi proses leaching. Lapisan EPS mempertahankan kelembapan permukaan lebih lama sehingga kontak antara air laut dan mortar berlangsung terus-menerus. Kondisi tersebut memungkinkan difusi ion Na^+ keluar dari jaringan N-A-S-H tetap berlangsung, namun pada saat yang sama biofilm mengurangi fluktuasi kondisi lingkungan sehingga degradasi berlangsung lebih bertahap dibandingkan permukaan yang langsung terpapar air laut. Hal tersebut tercermin dari hasil pengujian porositas. Pada umur 189 hari nilai porositas total Me hanya sedikit berbeda dibandingkan Mc , sedangkan peningkatan porositas baru mulai terlihat setelah paparan lebih lama. Kondisi ini menunjukkan bahwa *biofouling* tidak secara langsung mempercepat kerusakan mikrostruktur, tetapi lebih memodifikasi mekanisme transport massa pada permukaan material.

Berbeda dengan klorida, hasil penelitian menunjukkan bahwa *biofouling* justru meningkatkan kadar karbonasi mortar geopolimer. Variasi *exposed* menghasilkan kandungan karbonat dan total karbonasi yang lebih tinggi dibandingkan variasi tanpa *biofouling*. Fenomena tersebut diduga berkaitan dengan aktivitas metabolisme mikroorganisme di dalam biofilm. Respirasi mikroorganisme menghasilkan CO_2 yang terakumulasi pada lapisan biofilm sehingga meningkatkan konsentrasi karbon anorganik terlarut di dekat permukaan mortar. Selain itu, biofilm mempertahankan kelembapan permukaan sehingga difusi CO_2 terlarut menuju sistem pori menjadi lebih stabil. Walaupun mekanisme ini masih memerlukan pembuktian lebih lanjut pada mortar geopolimer, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa biofilm menciptakan mikrolingkungan kimia (*microenvironment*) yang berbeda dibandingkan

permukaan tanpa *biofouling* (Flemming & Wingender, 2010). Akibatnya, karbonasi berkembang bersamaan dengan proses leaching alkali sehingga penurunan alkalinitas jaringan N-A-S-H terjadi lebih cepat dibandingkan variasi Mc.

Berdasarkan hasil penelitian ini dan didukung oleh literatur, mekanisme durabilitas mortar geopolimer dengan *biofouling* dapat dimulai dari kolonisasi biofilm yang kemudian membentuk lapisan EPS sebagai *biological interface layer*. Lapisan ini menghambat difusi Cl^- akibat meningkatnya tortuositas dan retensi pada biofilm. Bersamaan SO_4^{2-} terakumulasi pada lapisan biofilm dan sebagian teradsorpsi sebagai pasangan Mg-SO_4 pada permukaan gel N-A-S-H sehingga transport ion sulfat menuju bagian dalam mortar tetap rendah. Dalam jangka waktu yang lebih panjang, terjadi *leaching* Na^+ yang berlangsung secara bertahap. Degradasi juga disebabkan oleh metabolisme biofilm maupun *biofouling* yang meningkatkan akumulasi karbon anorganik di permukaan sehingga karbonasi lebih tinggi. Selanjutnya leaching menyebabkan depolimerisasi N-A-S-H menjadi mekanisme degradasi jangka panjang yang lebih dominan.



(a)

Permukaan Mortar Geopolimer variasi (a) cover/tidak ada biota dan (b) Expose/Ada Biota

9.2 Prediksi Umur Layan

Prediksi umur layan dilakukan menggunakan koefisien difusi klorida hasil pengujian umur 350 hari. Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa setelah satu tahun perendaman, mikrostruktur beton maupun mortar geopolimer telah mengalami proses hidrasi atau geopolimerisasi lanjutan sehingga koefisien difusi yang diperoleh lebih merepresentasikan kondisi jangka panjang dibandingkan hasil pengujian pada umur 40 dan 189 hari. Selain itu, kadar klorida bebas pada permukaan material telah berkembang mendekati kondisi lapangan dan mencapai konsentrasi yang lebih stabil sebagai *boundary condition* dalam penyelesaian Persamaan Fick. Oleh karena itu, penggunaan data umur 350 hari diharapkan memberikan estimasi umur layan yang lebih realistis dibandingkan penggunaan data umur awal.

Pada perhitungan prediksi umur layan menggunakan hukum Fick's second law diperlukan asumsi yang digunakan yaitu:

1. D_a (Koefisien Difusi) dan C_s (Klorida pada permukaan) yang digunakan adalah hasil perendaman 350 hari.
2. C_i adalah klorida inisial beton sebelum direndam.
3. Persyaratan yang harus dipenuhi adalah $C_s > C_{critis}$. SNI 03-2854-1992 menyatakan bahwa pada beton bertulang yang berhubungan dengan klorida, maksimum ion klorida (C_i terlarut) maksimal 0,15% terhadap masa semen sehingga $C_{critis} = 0,15\%$.

Pada tabel 9.3 terlihat bahwa beton konvensional dengan *biofouling* telah mencapai C_{critis} sehingga dapat dilanjutkan dengan perhitungan umur layan, namun selama satu tahun perendaman, kadar klorida bebas pada permukaan mortar geopolimer masih berada di bawah ambang inisiasi korosi (0,15% berat binder). Sehingga berdasarkan model difusi Fick belum terjadi kondisi batas yang memungkinkan kadar kritis tercapai pada kedalaman selimut beton. Prediksi umur layan berbasis Persamaan Fick hanya dapat dilakukan apabila konsentrasi klorida bebas pada permukaan (C_s) telah melampaui atau setidaknya mendekati kadar kritis yang digunakan sebagai kondisi batas. Pada mortar geopolimer, baik tanpa maupun dengan penambahan *slag*, kadar klorida bebas pada permukaan setelah 350 hari perendaman masih lebih rendah dibandingkan kadar kritis 0,15% berat binder. Oleh karena itu, penyelesaian Persamaan Fick tidak menghasilkan solusi yang merepresentasikan waktu inisiasi korosi. Kondisi ini menunjukkan bahwa selama satu tahun paparan, lapisan mortar geopolimer masih mampu mempertahankan konsentrasi klorida bebas di bawah ambang inisiasi korosi sehingga berpotensi memperpanjang umur layan beton dibandingkan beton konvensional.

Tabel 9.1 Klorida inisial dan klorida permukaan beton konvensional dan mortar geopolimer

Variasi	C_i	keterangan
Beton konvensional (C_c)	0,0267	< C_i , Tidak dapat dihitung
Beton konvensional (C_e)		> C_i , dapat dihitung
Mortar geopolimer dengan <i>slag</i> (MSc)	0,0137	< C_i , Tidak dapat dihitung
Mortar geopolimer dengan <i>slag</i> (MSe)		< C_i , Tidak dapat dihitung

Selanjutnya dari persyatan yang telah dipenuhi, lama kadar klorida mencapai C_{critis} (0,15%) menggunakan hukum fick's second law adalah,

$$C(x, t) = C_{critis}$$

Maka,

$$t = \frac{x^2}{4D_a \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{critis}}{C_s - C_i} \right) \right]^2}$$

$$t = \frac{0,05^2}{4 \cdot 1,2 \times 10^{-10} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{0,1530 - 0,15}{0,1530 - 0,0263} \right) \right]^2}$$

Prediksi umur layan beton konvensional hingga mencapai kadar kritis inisiasi korosi pada kedalaman 50 mm membutuhkan waktu selama 234,54 tahun. Hasil prediksi ini memiliki

sensitifitas yang tinggi tergantung dari nilai kedalaman selimut beton yang digunakan. Prediksi waktu layan semakin menurun jika asumsi selimut beton semakin tipis seperti ditunjukkan pada Tabel 9.4. Lamanya waktu layan beton yang diasumsikan dengan tercapainya klorida kritis mencapai besi di dalam selimut beton antara lain dikarenakan waktu perendaman 350 hari belum menunjukkan klorida di permukaan yang tinggi atau hampir sama dengan klorida kritis. Selain itu koefisien difusi yang kecil menunjukkan transport ion klorida membutuhkan waktu semakin lama untuk masuk ke dalam beton yang diakibatkan oleh penggunaan *fly ash* 20% pada campuran beton sehingga meningkatkan durabilitasnya. Waktu layan mortar geopolimer tidak dapat diprediksi karena selama 350 hari perendaman, kadar klorida bebas pada permukaan mortar geopolimer masih berada di bawah ambang inisiasi korosi (0,15% berat binder). Oleh karena itu, berdasarkan model difusi Fick, belum terjadi kondisi batas yang memungkinkan kadar kritis tercapai pada kedalaman selimut beton.

Tabel 9.2 Prediksi Umur Layan Beton Dengan Variasi Tebal Selimut Beton

Tebal selimut beton/X	Prediksi waktu layan (tahun)
20	37,52

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh *biofouling* terhadap durabilitas beton tidak dapat dinilai hanya berdasarkan kemampuannya dalam menghambat penetrasi ion agresif. Keberadaan biofilm dan organisme penempel memang membentuk suatu *biological surface layer* yang meningkatkan tortuositas jalur difusi sehingga mampu menghambat transport ion klorida menuju bagian dalam beton. Selain itu, matriks *extracellular polymeric substances* (EPS) yang dihasilkan oleh biofilm juga mampu mengadsorpsi dan mempertahankan ion sulfat pada lapisan permukaan, sehingga penetrasi sulfat ke dalam beton menjadi lebih lambat. Dari sudut pandang mekanisme transport ion, kondisi ini memberikan efek yang menguntungkan karena memperlambat difusi klorida dan sulfat yang merupakan penyebab utama korosi tulangan dan degradasi beton di lingkungan laut.

Namun demikian, manfaat tersebut tidak dapat dipandang sebagai peningkatan durabilitas secara menyeluruh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan *biofouling* secara bersamaan meningkatkan kadar karbonat pada lapisan permukaan beton maupun mortar geopolimer. Peningkatan karbonasi ini berkaitan dengan aktivitas metabolisme mikroorganisme di dalam biofilm yang menghasilkan CO₂ melalui respirasi, sementara mikroalga dan cyanobacteria mengubah keseimbangan sistem karbonat–bikarbonat di mikro-

lingkungan permukaan beton. Akumulasi CO_2 pada lapisan biofilm mempercepat pembentukan karbonat dan mempercepat perkembangan zona karbonasi dibandingkan permukaan yang tidak ditumbuhi *biofouling*. Dengan meningkatnya karbonasi, alkalinitas larutan pori secara bertahap menurun akibat konsumsi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada beton berbasis semen atau perubahan kesetimbangan alkali pada mortar geopolimer. Penurunan alkalinitas ini menyebabkan nilai pH beton berkurang sehingga lapisan pasif pada permukaan baja tulangan menjadi tidak stabil sehingga proses depasivasi dan inisiasi korosi dapat terjadi apabila klorida bebas telah mencapai kadar kritis. Dengan demikian, *biofouling* memberikan dua pengaruh yang saling bertolak belakang, yaitu menghambat transport ion klorida dan sulfat tetapi sekaligus mempercepat karbonasi lokal yang berpotensi menurunkan perlindungan alkalin terhadap tulangan.

Selain aspek kimia, keberadaan *biofouling* juga memberikan dampak terhadap struktur laut. Kolonisasi organisme secara terus-menerus menyebabkan peningkatan biomassa yang berkontribusi terhadap penambahan berat struktur, khususnya pada struktur dengan luas permukaan besar seperti tiang dermaga, fondasi jembatan, maupun struktur pelabuhan. Akumulasi biomassa tersebut tidak hanya meningkatkan beban mati, tetapi juga dapat meningkatkan gaya hidrodinamika akibat bertambahnya luas permukaan efektif yang menerima arus dan gelombang. Selain itu, lapisan *biofouling* berpotensi menjadi media kolonisasi bagi spesies invasif, sehingga menimbulkan risiko ekologis dan meningkatkan biaya inspeksi maupun pemeliharaan. Oleh karena itu, meskipun *biofouling* memiliki fungsi sebagai *biological interface layer* yang secara lokal mampu menghambat difusi ion agresif, keberadaannya tetap tidak diinginkan pada struktur laut karena konsekuensi mekanik, operasional, dan ekologis yang ditimbulkannya.

Berdasarkan hasil tersebut, tujuan utama sistem pelindung beton di lingkungan laut bukanlah memanfaatkan *biofouling* sebagai lapisan pelindung alami, melainkan mengendalikan kolonisasi *biofouling* sekaligus meningkatkan ketahanan material terhadap serangan ion agresif. Dalam penelitian ini, mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *slag* menunjukkan kemampuan tersebut. Permukaan mortar yang lebih halus, mikrostruktur yang lebih rapat, serta rendahnya kandungan kalsium menghasilkan *bioreceptivity* yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional, sehingga laju pertumbuhan *biofouling* dapat ditekan. Persentaseutupan *biofouling* menurun sebesar 5,95%, laju pertumbuhan *biofouling* berkurang sebesar 7,93%, dan penambahan biomassa mencapai 26,12% lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Dengan berkurangnya kolonisasi organisme penempel, kebutuhan pembersihan permukaan (*biofouling cleaning*) dapat dikurangi sehingga frekuensi *maintenance* menjadi

lebih rendah. Pada saat yang sama, mortar geopolimer tetap berfungsi sebagai *surface-applied protective barrier* yang menghambat penetrasi ion klorida dan sulfat serta mempertahankan kemampuan mekanik beton. Oleh karena itu, penggunaan mortar geopolimer tidak hanya meningkatkan durabilitas material, tetapi juga berpotensi menurunkan biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) struktur laut melalui pengurangan frekuensi pembersihan *biofouling*, perbaikan permukaan, dan rehabilitasi akibat degradasi lingkungan laut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 10

PENUTUP

10.1 Kesimpulan

Secara umum, penelitian ini menyelidiki potensi mortar geopolimer berbasis *fly ash* sebagai lapisan pelindung permukaan pada beton di lingkungan laut. Penelitian ini berkaitan dengan penggunaan *fly ash* halus, pertumbuhan *biofouling*, dan kinerja terhadap ion agresif seperti klorida, sulfat, dan karbonasi. Temuan menunjukkan bahwa beton konvensional dan yang dilapisi mortar geopolimer menunjukkan hasil yang berbeda dalam durabilitas jangka panjang. Berdasarkan hasil yang diperoleh, beberapa kesimpulan dapat ditarik antara lain:

1. Mortar geopolimer yang terbuat dari *fly ash* halus menunjukkan potensi untuk perlindungan beton permukaan di lingkungan laut. Penggunaan *fly ash* halus meningkatkan kemampuan kerja mortar segar. Hal ini dibuktikan dengan kekuatan tekannya yang melebihi 35 MPa dan kekuatan ikatannya dengan beton berbasis semen, yang tetap tidak rusak pada antarmuka dengan kekuatan geser 5-6 MPa. Selain itu, mortar geopolimer dengan *fly ash* halus menghasilkan permukaan yang halus, yang meningkatkan ketahanan terhadap *biofouling*.
2. Penggunaan mortar geopolimer sebagai lapisan pelindung secara efektif menghambat pertumbuhan *biofouling*. Jumlah koloni bakteri dalam mortar geopolimer lebih rendah daripada dalam mortar berbasis semen. Persentase tutupan *biofouling* pada beton yang dilapisi mortar geopolimer menurun sebesar 5,95%, dan laju pertumbuhannya 7,93% lebih rendah daripada beton berbasis semen setelah 360 hari perendaman. Lebih lanjut, peningkatan berat akibat *biofouling* 26,12% lebih rendah daripada beton konvensional. Kinerja ini berkaitan dengan perbedaan kekasaran permukaan antara beton semen dan mortar geopolimer. Kekasaran sampel mortar geopolimer 8,3% lebih rendah daripada sampel beton semen.
3. Dari aspek durabilitas, mortar geopolimer mampu berfungsi sebagai lapisan pelindung (*protective barrier*) terhadap penetrasi ion agresif. Pada umur 189 hari, koefisien difusi klorida mortar geopolimer dengan *slag* variasi cover (MSc) sebesar $9,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, lebih rendah dibandingkan mortar geopolimer tanpa *slag* (Mc) sebesar $9,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, meskipun masih lebih tinggi dibandingkan beton konvensional ($3,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Namun pada umur 350 hari, mortar geopolimer dengan *slag* menunjukkan penurunan koefisien difusi hingga $2,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, mendekati bahkan lebih baik dibandingkan

beton konvensional ($1,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Pelapis mortar geopolimer juga mampu menahan ion sulfat pada lapisan luar sehingga melindungi beton inti dari penetrasi sulfat, meskipun kadar sulfat bebas pada lapisan mortar lebih tinggi akibat rendahnya kandungan kalsium yang menyebabkan sulfat tetap berada dalam bentuk bebas dan tidak membentuk gypsum maupun ettringite. Di sisi lain, mortar geopolimer menunjukkan tingkat karbonasi yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional karena tidak memiliki cadangan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebagai penyangga alkalinitas. Dengan demikian, mekanisme durabilitas mortar geopolimer lebih dikendalikan oleh stabilitas jaringan gel N-A-S-H, sedangkan beton semen lebih dipengaruhi oleh pembentukan produk hidrasi dan reaksi ekspansif sulfat.

4. Keberadaan biota penempel (*biofouling*) tidak menurunkan kapasitas mekanik beton yang dilapisi mortar geopolimer. Pada umur 370 hari, kuat tekan variasi exposed (MSe) mencapai sekitar 43,0 MPa, sedikit lebih rendah dibandingkan variasi cover (MSc) sebesar 45,0 MPa, namun keduanya masih lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Pola keruntuhan menunjukkan bahwa mortar geopolimer tetap melekat pada beton substrat hingga terjadi keruntuhan tekan, mengindikasikan bahwa kolonisasi *biofouling* tidak menyebabkan degradasi antarmuka mortar–beton. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan mortar geopolimer memiliki stabilitas ikatan yang baik meskipun mengalami paparan organisme laut selama satu tahun.
5. Dari aspek transport ion, *biofouling* memodifikasi mekanisme difusi melalui pembentukan lapisan biologis (*biological interface layer*) yang terdiri atas biofilm dan organisme sessile. *Biofouling* juga meningkatkan retensi sulfat pada lapisan permukaan melalui adsorpsi oleh *extracellular polymeric substances* (EPS), sehingga kadar sulfat bebas pada permukaan exposed lebih tinggi dibandingkan cover, namun tanpa membentuk gypsum maupun ettringite. Sebaliknya, aktivitas metabolisme mikroorganisme meningkatkan akumulasi CO_2 pada mikro-lingkungan biofilm sehingga karbonasi pada variasi exposed lebih tinggi dibandingkan variasi cover. Dengan demikian, *biofouling* tidak mengubah mekanisme degradasi utama mortar geopolimer, tetapi mengubah mekanisme transport ion dengan menghambat penetrasi klorida, meningkatkan retensi sulfat pada permukaan, dan mempercepat karbonasi lokal.

10.2 Rekomendasi

Hasil penelitian ini dapat digunakan oleh Pemerintah sebagai pemilik dan pengelola infrastruktur pesisir untuk mulai mempertimbangkan penggunaan *surface applied protection* berbasis mortar geopolimer pada pembangunan maupun rehabilitasi infrastruktur laut seperti dermaga, pelabuhan, jembatan, pemecah gelombang (*breakwater*), dan tanggul pantai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar geopolimer menggunakan *fly ash* dan *slag* mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi klorida dan sulfat, menghambat pertumbuhan *biofouling*, serta berpotensi menurunkan kebutuhan pemeliharaan. Selain meningkatkan umur layan struktur, pemanfaatan *fly ash* dan *slag* juga mendukung kebijakan pembangunan ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah industri sebagai material konstruksi bernilai tambah. Selain itu material ini juga dapat digunakan sebagai material grouting/repair mortar untuk pekerjaan rehabilitasi struktur beton. Karakteristik mekanik serta lekatan yang baik dengan beton konvensional setelah satu tahun paparan laut menunjukkan bahwa mortar geopolimer tidak hanya berfungsi sebagai lapisan pelindung permukaan (*surface-applied protection*), tetapi juga memiliki kemampuan sebagai material pengisi (*grouting material*) maupun mortar perbaikan (*repair mortar*) pada retak, rongga (*void*), sambungan, maupun area beton yang mengalami kerusakan akibat lingkungan laut.

Selain itu *owner*/pemilik dan Operator Infrastruktur Laut seperti BUMN Pelabuhan, pengelola jembatan laut, PLTU, kilang minyak, terminal LNG, dan pengelola bangunan lepas pantai dapat juga memanfaatkan hasil penelitian ini. Pemilik aset dapat menerapkan mortar geopolimer sebagai *preventive maintenance coating* pada struktur beton yang berada di zona pasang surut maupun zona terendam. Penggunaan pelapis sejak tahap awal diharapkan mampu menurunkan laju penetrasi ion agresif, mengurangi kolonisasi *biofouling*, serta menekan frekuensi pembersihan organisme penempel. Dengan demikian, biaya operasi dan pemeliharaan (*operation and maintenance cost*) dapat ditekan, sementara umur layan struktur dapat diperpanjang.

Pembuatan mortar geopolimer yang direkomendasikan adalah menggunakan *fly ash* kelas F yang memiliki kandungan silika dan alumina yang memadai, Si/Al menjadi hal yang penting dalam tahapan geopolimerisasi. Dengan rasio Si/Al yang rendah, spesies Al akan cukup untuk menarik spesies Si sehingga membentuk ikatan kimia. Pada rasio Si/Al yang lebih kecil, polimerisasi akan terjadi lebih tinggi

sehingga area struktur geopolimer akan lebih luas. Hal ini berbanding terbalik jika rasio Si/Al lebih tinggi jumlah spesies Al akan lebih sedikit sehingga tidak cukup menarik spesies Si pada ikatan polimerisasi (X. Chen & Mondal, 2020). Dengan geopolimerisasi yang maksimal mekanisme durabilitas mortar geopolimer akan dicapai. Selain itu reaktifitas *fly ash* bergantung pada konsentrasi larutan NaOH. Dengan jumlah larutan NaOH yang lebih banyak akan menambah *dissolve* spesies Si dan Al pada bahan aluminosilikat sehingga polimerisasi dapat terjadi. Selain itu hasil penelitian menunjukkan *fly ash* halus meningkatkan reaktifitas dan meningkatkan kehalusan permukaan mortar hingga mengurangi cerukan tempat *biofouling* berkembang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aguirre-Guerrero, A. M., Robayo-Salazar, R. A., & de Gutiérrez, R. M. (2017). A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Applied Clay Science*, 135, 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.029>
- Al-Kautsar, W., Perdanawati, R. A., & Noverma. (2020). Laju penempelan macrofouling pada tiang pancang jembatan Suramadu. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*, 3(2), 211–221.
- American Concrete Institute. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19). In *American Concrete Institute*.
- American Society for Testing and Material. (1999). Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear C882-99. *ASTM International*, 1–3.
- American Society for Testing and Materials. (2012). Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete - C1152/C1152M-04. *ASTM International*, i, 8–11.
- Amini, I. N., & Ekaputri, J. J. (2023). The Effect of GGBFS and Additional Cement, Water, and Superplasticizer on the Mechanical Properties of Workable Geopolymer Concrete. In *Springer Proceedings in Physics* (Vol. 289). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9267-4_41
- Andrade, C. (2002). Concepts on the Chloride Diffusion Coefficient. In *Third RILEM workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete* (Issue September). <https://doi.org/10.1617/2912143578.001>
- ASTM, C. (2007). 1556, “Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion,” *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4.02. 04, 1–7.
- ASTM International. (1999). Standard for the Preparation of Substitute Ocean Water. *D 1141*, 98(Reapproved), 98–100.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847-2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Sni 2847-2019*, 8, 720.
- Bastidas-Arteaga, E., Sánchez-Silva, M., Chateauneuf, A., & Silva, M. R. (2008). Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete

- structures. *Structural Safety*, 30(2), 110–129.
<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.09.001>
- Becker, L. R., Ehrenberg, A., Feldrappe, V., Kröncke, I., & Bischof, K. (2020). The role of artificial material for benthic communities – Establishing different concrete materials as hard bottom environments. *Marine Environmental Research*, 161(June).
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105081>
- Bone, J. R., Stafford, R., Hall, A. E., & Herbert, R. J. H. (2022a). Biodeterioration and bioprotection of concrete assets in the coastal environment. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 175(February), 105507. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105507>
- Bone, J. R., Stafford, R., Hall, A. E., & Herbert, R. J. H. (2022b). The intrinsic primary bioreceptivity of concrete in the coastal environment – A review. *Developments in the Built Environment*, 10(April), 100078. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100078>
- BPS. (2023). Pelabuhan Perikanan. *E-Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia*, 6, 1–72.
https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=ubYSEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=konsesi+pelabuhan&ots=L3r5_V0VRm&sig=gm9VQqdVD3iqvNgjt0hczOqmT58
- Bressy, C., & Lejars, M. (2014). Marine fouling : An overview marine fouling. *Journal of Ocean Technology*, 9(4), 19–28.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Vesely, M., & Garrido, P. (2022). *State of the art of geopolymers : A review*. 108–124.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Vesely, M., Garrido, P., & Palma, S. (2021). *Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers : A Review*. 1–28.
- Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., & Wood, R. J. K. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3642–3652.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.129>
- Chen, W., Wu, M., & Liang, Y. (2024). Effect of SF and GGBS on Pore Structure and Transport Properties of Concrete. *Materials*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/ma17061365>
- Chen, X., & Mondal, P. (2020). Effects of NaOH amount on condensation mechanism to form aluminosilicate, case study of geopolymer gel synthesized via sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 96(3), 589–603. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05360-6>

- Cheng, H., Liu, T., Zou, D., & Zhou, A. (2021). Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions. *Construction and Building Materials*, 293, 123550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123550>
- Chindaprasirt, P., & Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.010>
- Chindaprasirt, P., & Rukzon, S. (2008). Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601–1606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.010>
- Chindaprasirt, Prinya. (2005). *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste*. 27, 425–428. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.003>
- Chlayon, T., Iwanami, M., & Chijiwa, N. (2018). Combined protective action of barnacles and biofilm on concrete surface in intertidal areas. *Construction and Building Materials*, 179, 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.223>
- Chlayon, T., Iwanami, M., & Chijiwa, N. (2020). Impacts from concrete microstructure and surface on the settlement of sessile organisms affecting chloride attack. *Construction and Building Materials*, 239, 117863. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117863>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Damayanti, R. (2018). Abu batubara dan pemanfaatannya: Tinjauan teknis karakteristik secara kimia dan toksikologinya. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 14(3), 213–231. <https://doi.org/10.30556/jtmb.vol14.no3.2018.966>
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131–149.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement a review. *Geopolymer Science and Technics*, 0, 1–11.
- De Muynck, W., Ramirez, A. M., De Belie, N., & Verstraete, W. (2009). Evaluation of

- strategies to prevent algal fouling on white architectural and cellular concrete. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(6), 679–689. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.04.007>
- Ekaputri, J. J., & Al Bari, M. S. (2020). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162.
- Ekaputri, J. J., Mutiara, I. S., Nurminarsih, S., Chanh, N. V., Maekawa, K., & Setiamarga, D. H. E. . (2017). The effect of steam curing on chloride penetration in geopolymer concrete. *MATEC Web of Conferences*, 138. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713801019>
- Ekaputri, J. J., & Triwulan. (2013). Sodium Sebagai Aktivator Flyash, Trass Dan Lumpur Lapindo Dalam Beton Geo. *Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 20(1), 10.
- Fernández, M. S., Arias, J. I., Neira-Carrillo, A., & Arias, J. L. (2015). Austromegabalanus psittacus barnacle shell structure and proteoglycan localization and functionality. *Journal of Structural Biology*, 191(3), 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2015.08.005>
- Fitridge, I., Dempster, T., Guenther, J., & de Nys, R. (2012). The impact and control of *biofouling* in marine aquaculture: A review. *Biofouling*, 28(7), 649–669. <https://doi.org/10.1080/08927014.2012.700478>
- Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Gao, S., & Tang, X. (2018). *Impact Mechanism of Marine Biofilm on Concrete Durability*. 64(1), 613–618. <https://doi.org/10.3303/CET1864103>
- Gaylarde, C., Ribas Silva, M., & Warscheid, T. (2003). Microbial impact on building materials: An overview. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(259), 342–352. <https://doi.org/10.1617/13867>
- Ghafoor, M. T., Fujiyama, C., & Maekawa, K. (2021). Mix Design Processing for Self Compacting Geopolymer Mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19, 1133–1147.
- Giannantonio, D. J., Kurth, J. C., Kurtis, K. E., & Sobecky, P. A. (2009). Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(3), 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.10.002>

- Giasuddin, H. M., Sanjayan, J. G., & Ranjith, P. G. (2013). Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions. *Fuel*, 107, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.035>
- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of the Total Environment*, 167(1–3), 215–220. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04582-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04582-L)
- Gupta, R., Tomar, A. S., Mishra, D., & Sanghi, S. K. (2021). Multifaceted geopolymer coating: Material development, characterization and study of long term anti-corrosive properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 317, 110995. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110995>
- Hakim, M. L., Nugroho, B., Nurrohman, M. N., Suastika, I. K., & Utama, I. K. A. P. (2019). Investigation of fuel consumption on an operating ship due to *biofouling* growth and quality of anti-fouling coating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 339(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/339/1/012037>
- Hardjito, D., Cheak, C. C., & Lee Ing, C. H. (2008). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based Geopolymer Mortar. *Modern Applied Science*, 2(4), 3–11. <https://doi.org/10.5539/mas.v2n4p3>
- Harilal, M., Anandkumar, B., Lahiri, B. B., George, R. P., Philip, J., & Albert, S. K. (2020). Enhanced biodeterioration and *biofouling* resistance of nanoparticles and inhibitor admixed fly ash based concrete in marine environments. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 155(August), 105088. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105088>
- Hayek, M., Salgues, M., Souche, J.-C., Cunge, E., Giraudel, C., & Paireau, O. (2021). *Influence of the Intrinsic Characteristics of Cementitious Materials on Biofouling in the Marine Environment*. <https://doi.org/10.3390/su13052625>
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2020). Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 258, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120606>
- Hickling, S., Matthews, J., & Murphy, J. (2022). The suitability of alkali activated slag as a substrate for sessile epibenthos in Reef Cubes®. *Ecological Engineering*, 174, 106471. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2021.106471>
- Ikumi, T., & Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete

- structures. A review. *Cement and Concrete Research*, 121(November 2018), 91–105.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.010>
- Imran, I. (2022). Sustainable concrete in a marine environment. *Garuda Infrastruktur Prima*.
- PP Nomor 109 Tahun 2020 Tentang Perubahan Ketiga Atas PP Nomor 3 Tahun 2016 Tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional, (2020).
- Isdianto, A., Luthfi, O. M., Thaeraniza, S. T., & Soegianto, A. (2020). *Biofouling* Colonization on Cubic Artificial Reefs in Pantai Damas, Trenggalek, Indonesia. *Ecology, Environment and Conservation*, 26(November), S84–S90.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., Hamdan, S., & Van Deventer, J. S. J. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48, 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106>
- Iswadi, A., Porter, J. S., & Bell, M. C. (2022). *Biofouling* Observation In Tropical Waters Of Indonesia For Marine Renewable Energy Sector. *2nd GEF-UNDP-IMO GloFouling R&D Forum and Exhibition on Biofouling Prevention and Management for Maritime Industries*.
- Jaberimanesh, Z., Oladi, M., Nasrolahi, A., & Ahmadzadeh, F. (2019). Presence of *Amphibalanus eburneus* (Crustacea, Cirripedia) in Gomishan Wetland: Molecular and morphological evidence of a new introduction to the southern Caspian Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100469. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.100469>
- Jamkar, S. S., Ghugal, Y. M., & Patankar, S. V. (2013). Effect of fly ash fineness on workability and compressive strength of geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, 87(4), 57–62.
- Jayakumar, S., & Saravanane, R. (2009). Biodeterioration of coastal concrete structures by macro algae - chaetomorpha antennina. *Materials Research*, 12(4), 465–472. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000400015>
- Jayakumar, S., & Saravanane, R. (2010). Detrimental effects on coastal concrete by *Ulva fasciata*. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 163(4), 239–246. <https://doi.org/10.1680/coma.900028>
- Jiang, C., Wang, A., Bao, X., Chen, Z., Ni, T., & Wang, Z. (2020). Protective geopolymer

- coatings containing multi-componential precursors: Preparation and basic properties characterization. *Materials*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/MA13163448>
- Kim, C.-G., Choi, Y. W., Joon, N. E., & Oh, S.-R. (2022). *A Study on the Bioreceptivity of Cement Composites for Living Concrete Panels*. 71(3), 581–589. <http://philstat.org.ph>
- Kina, C., Tanyildizi, H., & Acik, V. (2025). Hybrid portland cement-slag-based geopolymer mortar : Strength , microstructural and environmental assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 195(January), 106771. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106771>
- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II. *Fuel*, 86(3), 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>
- Kurth, J. C., Giannantonio, D. J., Allain, F., & Sobecky, P. A. (2007). Mitigating Biofilm Growth Through the Modification of Concrete Design and Practice. *International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials, October*, 195–202.
- L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Le Saout, G., Kulik, D., & Scrivener, K. (2015). Incorporation of aluminium in calcium-silicate-hydrates. *Cement and Concrete Research*, 75, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.007>
- Lashkari, S., Yazdipناه, F., Shahri, M., & Sarker, P. (2021). Mechanical and durability assessment of cement-based and alkali-activated coating mortars in an aggressive marine environment. *SN Applied Sciences*, 3(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04602-8>
- Lence, A. (2015). *Investigation of Best Practices for Maintenance of Concrete Bridge Railings*.
- Li, X., Li, S., Huang, X., Chen, Y., Cheng, J., & Zhan, A. (2021). Protein-mediated bioadhesion in marine organisms: A review. *Marine Environmental Research*, 170(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105409>
- Liang, C., Strickland, J., Ye, Z., Wu, W., Hu, B., & Rittschof, D. (2019). Biochemistry of Barnacle Adhesion: An Updated Review. *Frontiers in Marine Science*, 6(September), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00565>
- Lira, B. C. S., Dellosa, S. B. A., Toh, C. I. L., Quintero, A. P. A., Nidoy, A. L. S., Cerna, K. Dela, Yu, D. E. C., Janairo, J. I. B., & Promentilla, M. A. B. (2019). Coal fly ash-based

- geopolymer spheres coated with amoxicillin and nanosilver for potential antibacterial applications. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 19(1), 25–37. <https://doi.org/10.22146/ajche.50872>
- Liu, Z., Deng, D., & De Schutter, G. (2014). Does concrete suffer sulfate salt weathering? *Construction and Building Materials*, 66, 692–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.011>
- Lv, J., Cao, Z., & Hu, X. (2021). Effect of biological coating (*Crassostrea gigas*) on marine concrete: Enhanced durability and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 285, 122914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122914>
- Lv, J. F., Mao, J. Z., & Ba, H. J. (2015). Influence of *Crassostrea gigas* on the permeability and microstructure of the surface layer of concrete exposed to the tidal zone of the Yellow Sea. *Biofouling*, 31(1), 61–70. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.999235>
- Maduka, M., Schoefs, F., Thiagarajan, K., & Bates, A. (2023). Hydrodynamic effects of *biofouling*-induced surface roughness – Review and research gaps for shallow water offshore wind energy structures. *Ocean Engineering*, 272(January). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113798>
- Margapuram, D. (2025). *Biofouling* on cementitious materials : Durability challenges across different exposure zones in marine environments. *Academic Journal of Civil Engineering*, 43(1), 1020–1029. <https://doi.org/https://doi.org/10.26168/ajce.43.1.86>
- Maruzzo, D., Aldred, N., Clare, A. S., & Høeg, J. T. (2012). Metamorphosis in the cirripede Crustacean *Balanus amphitrite*. *PLoS ONE*, 7(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037408>
- McManus, R. S., Archibald, N., Comber, S., Knights, A. M., Thompson, R. C., & Firth, L. B. (2018). Partial replacement of cement for waste aggregates in concrete coastal and marine infrastructure: A foundation for ecological enhancement? *Ecological Engineering*, 120, 655–667. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.062>
- Medeiros, M. H. F., & Helene, P. (2009). Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1476–1484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.013>

- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2001). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. In *McGraw_Hill*.
- Melchers, R. E. (2020). Long-term durability of marine reinforced concrete structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040290>
- Metzler, R. A., O'Malley, J., Herrick, J., Christensen, B., Orihuela, B., Rittschof, D., & Dickinson, G. H. (2020). Amphibalanus amphitrite begins exoskeleton mineralization within 48 hours of metamorphosis: Barnacle exoskeleton mineralization. *Royal Society Open Science*, 7(9). <https://doi.org/10.1098/rsos.200725>
- Miller, R., & Macleod, A. (2016). *Marine Growth Mapping and Monitoring: Feasibility of Predictive Mapping of Marine Growth March. A report by SAMS Research Services Ltd to the Offshore Renewable Energy Catapult. March*, 69.
- Monteiro, P. (2015). *Durability of concrete: ability to resist weathering action, chemical attack, abrasion, or any process of deterioration*.
- Nastiti, S. F., Ekaputri, J. J., Sulton, M., Rahardjo, B., Rahma, D. Y., Handayani, A. F., & Wulandari, F. F. (2023). Corrosion Rate and Weight Loss of Geopolymer Mortar Coated Concrete Specimens with Different Thicknesses. *E3S Web of Conferences*, 445, 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344501025>
- Natanzi, A. S., Thompson, B. J., Brooks, P. R., Crowe, T. P., & McNally, C. (2021). Influence of concrete properties on the initial biological colonisation of marine artificial structures. *Ecological Engineering*, 159(November 2020), 106104. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106104>
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, 6(August), 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). Concrete Technology. In *PEARSON* (Vol. 2). <https://doi.org/10.6004/jnccn.2015.0201>
- Noeiaghaei, T., Mukherjee, A., Dhami, N., & Chae, S. R. (2017). Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies. *Construction and Building Materials*, 149(May), 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.144>
- NT BUILD 443: Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration. (1995). *Nordtest*

Method, 11.

- Nuraini, L., Prifiarni, S., Priyotomo, G., Sundjono, & Gunawan, H. (2017). Evaluation of anticorrosion and antifouling paint performance after exposure under seawater Surabaya-Madura (Suramadu) bridge. *AIP Conference Proceedings*, 1823(2017). <https://doi.org/10.1063/1.4978174>
- Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., Fauzi, A., Mohammed, B. S., & Almattarneh, H. M. (2016). Geopolymer concrete for structural use: Recent findings and limitations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012021>
- Nybakken, J. W. (1988). *Biologi Laut; Suatu Pendekatan Ekologis*.
- Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1062–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.176>
- Paramalingam, Y., Arjmandi, H., Harrison, F., Schiller, T., Noel, A., & Member, S. (2025). Anisotropic Diffusion Model of Communication in 2D Biofilm. *IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications*, 11(2), 176–185. <https://doi.org/10.1109/TMBMC.2025.3552991>
- Parand, R. T., M Ali, A., Azita, B., & Nargress, K. (2024). Compatibility Studies of N-A-S-H and C-A-S-H Gels in Alkali-Activated Geopolymer Mortar. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 43(10), 3737–3747.
- Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2022). Effect of hydrophobic surface-modified fine aggregates on efflorescence control in geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 126(August 2021), 104337. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104337>
- Pasupathy, K., Sanjayan, J., Rajeev, P., & Law, D. W. (2021). The effect of chloride ingress in reinforced geopolymer concrete exposed in the marine environment. *Journal of Building Engineering*, 39, 102281. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102281>
- Perdanawati, R. A., Risdanareni, P., Setiamarga, D. H. E., & Ekaputri, J. J. (2025). *The Effect of Biofouling on Cement based Concrete Substrate: Insights from Microfouling and Macrofouling Growth. 06001*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515706001>

- Prabhakar, A. K., Krishnan, P., Lee, S. S. C., Lim, C. S., Dixit, A., Mohan, B. C., Teoh, J. H., Pang, S. D., Tsang, D. C. W., Teo, S. L. M., & Wang, C. H. (2022). Sewage sludge ash-based mortar as construction material: Mechanical studies, macrofouling, and marine toxicity. *Science of The Total Environment*, 824, 153768. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153768>
- Pravallika, S. B., & Lakshmi, V. (2014). *a Study on Fly Ash Concrete in*. 3(5), 12395–12401.
- Priyotomo, G., Nuraini, L., Gunawan, H., Triwardono, J., Sundjono, S., & Prifiarni, S. (2021). A Preliminary field study of antifouling paint performance after short exposure in Mandara Bali, Indonesia. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 34(4), 976–986. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.24>
- Purwanto, Ekaputri, J. J., Nuroji, Indriyantho, B. R., Han, A., & Gan, B. S. (2022). Shear-bond behavior of self-compacting geopolymer concrete to conventional concrete. *Construction and Building Materials*, 321(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126167>
- PUSDATIN-KKP. (2018). Buku Pintar Kelautan dan Perikanan. In *Kkp* (p. 120). <http://sidatik.kkp.go.id/files/src/9b51341263445211c37f801ac8458a4c.pdf>
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W. Y., & Yu, T. (2021). Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 35(June 2020), 102074. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102074>
- Rahman, S. K., & Al-Ameri, R. (2022). Marine Geopolymer Concrete—A Hybrid Curable Self-Compacting Sustainable Concrete for Marine Applications. *Applied Sciences*, 12(6), 3116. <https://doi.org/10.3390/app12063116>
- Railkin, A. I. (2004). Marine *biofouling*; colonization process and defenses. In *CRC PRESS*.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., & Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134(x), 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>
- Risdanareni, P., Van den Heede, P., Wang, J., & De Belie, N. (2021). The durability of mortar containing alkali activated fly ash-based lightweight aggregate. *Materials*, 14(13).

<https://doi.org/10.3390/ma14133741>

- Rizaty, M. A. (2021). *Terdapat 2.439 Pelabuhan di Seluruh Indonesia pada 2020* | Databoks. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/10/27/terdapat-2439-pelabuhan-di-seluruh-indonesia-pada-2020>
- Rodrigues, M. P. M. C., Costa, M. R. N., Mendes, A. M., & Eusébio Marques, M. I. (2000). Effectiveness of surface coatings to protect reinforced concrete in marine environments. In *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* (Vol. 33).
- Rodrigues, M. P. M. C., Costa, M. R. N., Mendes, A. M., & Eusébio Marques, M. I. (2000). Effectiveness of surface coatings to protect reinforced concrete in marine environments. In *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* (Vol. 33, Issue 10, pp. 618–626). <https://doi.org/10.1007/bf02480601>
- Romimohtarto, Kasijan; Juwana, S. (2009). *BIOLOGI LAUT: Ilmu Pengetahuan Tentang Biota Laut*. Djambatan.
- Rondinella, A., Furlani, E., Dell'Antone, L., Marin, E., Boschetto, F., Sordetti, F., Lanzutti, A., Andreatta, F., Fedrizzi, L., & Maschio, S. (2022). Mechanical and antibacterial behavior of multilayered geopolymer coatings on Ti6Al4V alloys. *Journal of Materials Science*, 57(39), 18578–18588. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07767-8>
- Růžek, V., Novosád, J., & Buczkowska, K. E. (2023). Geopolymer Antimicrobial and Hydrophobic Modifications: A Review. *Ceramics*, 6(3), 1749–1764. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030107>
- Santhanam, M., & Otieno, M. (2016). Deterioration of concrete in the marine environment. *Marine Concrete Structures*, 1, 137–149. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100081-6.00005-2>
- Sidhu, J., & Kumar, P. (2023). Development of hydrophobicity in geopolymer composites- Progress and perspectives. *Construction and Building Materials*, 396(February), 132344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132344>
- Sikora, S., Gapys, E., Michalowski, B., Horbanowicz, T., & Hynowski, M. (2018). Geopolymer coating as a protection of concrete against chemical attack and corrosion. *E3S Web of Conferences*, 49, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900101>
- Simatupang, P. H. (2017). Characteristics of alkali activated material (geopolymer) in sulfuric

- acid solution. *AIP Conference Proceedings*, 1887. <https://doi.org/10.1063/1.5003511>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- SNI 03-2854-1992. (1992). Spesifikasi Kadar Ion Klorida dalam Beton. *Yayasan LPMB*, 12.
- Sonjaya, H. G. (2016). *Cat Antifouling Untuk Penanganan Kerusakan Struktur Jembatan Akibat Biota Penempel*.
- Subaer. (2004). Influence of aggregate on the microstructure of geopolymer. In *Curtin University of Technology*. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=VGwO5AcA AAAJ&cstart=100&pagesize=100&citation_for_view=VGwO5AcAAAAJ:KxtntwgDAa4C
- Subaer, Kusumawati, Y., Akhlus, S., Akifah, N., & Fansuri, H. (2019). Thermo-mechanical properties of an anti bacteria coating material based on a hybrid composite geopolymer-chitosan. *Ceramics - Silikat*, 63(2), 223–231. <https://doi.org/10.13168/cs.2019.0014>
- Sun, D., Cao, Z., Huang, C., Wu, K., De Schutter, G., & Zhang, L. (2022). Degradation of concrete in marine environment under coupled chloride and sulfate attack: A numerical and experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 17(June), e01218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01218>
- Sun, Q., Id, S. Z., Zhao, X., Song, Y., Ban, X., & Zhang, N. (2023). *Influence of different grinding degrees of fly ash on properties and reaction degrees of geopolymers*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282927>
- Sun, X., Wai, O. W. H., Xie, J., & Li, X. (2024). Biomineralization To Prevent Microbially Induced Corrosion on Concrete for Sustainable Marine Infrastructure. *Environmental Science and Technology*, 58(1), 522–533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04680>
- Ustabaş, İ., & Erdoğan, Ş. (2016). Performance of mortars incorporating fly ash, silica fume, blast furnace slag at different temperature in magnesium sulfate solution. *Turkish Journal of Materials*, 1(1), 1–14. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkjmater/issue/47924/606244>
- van Deventer, J. S. J., Nicolas, R. S., Ismail, I., Bernal, S. A., Brice, D. G., & Provis, J. L. (2014). Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for

- standardization. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2), 116–128.
<https://doi.org/10.1080/21650373.2014.979265>
- Veeger, M., Ottel , M., & Prieto, A. (2021). Making bioreceptive concrete: Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*, 44(January).
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102545>
- Wan, H., Yuan, L., & Zhang, Y. (2020). *Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study*. 7(March), 1–11.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00056>
- Wan, X., Cui, Y., & Jin, Z. (2023). *Chloride Transport and Related Influencing Factors of*.
- Wang, G. L., Ye, Z. M., & Wu, B. (2014). The Change of Stress on Marine Concrete Covered with Barnacles. *Applied Mechanics and Materials*, 584–586, 1031–1034.
<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.584-586.1031>
- Wang, Y., Zhang, R., Duan, J., Shi, X., Zhang, Y., Guan, F., Sand, W., & Hou, B. (2022). Extracellular Polymeric Substances and Biocorrosion/*Biofouling*: Recent Advances and Future Perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10).
<https://doi.org/10.3390/ijms23105566>
- Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A., & Zhang, K. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, 155, 1101–1111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.130>
- Xu, Z., & Ye, G. (2023). Understanding Chloride Diffusion Coefficient in Cementitious Materials. *Materials*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/ma16093464>
- Yang, J., Ding, Q., Zhang, G., Hou, D., Zhao, M., & Cao, J. (2022). Effect of sulfate attack on the composition and micro-mechanical properties of C-A-S-H gel in cement-slag paste: A combined study of nanoindentation and SEM-EDS. *Construction and Building Materials*, 345(July), 128275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128275>
- Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z., & Shi, C. (2020). A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 113(May), 103695.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>
- Yusof, N. H. R., Hamidi, R. M., Man, Z., Azizli, K. A., & Nuruddin, M. F. (2014).

- Development of Fly Ash Based Geopolymer as Erosion Mitigation Coating. *Applied Mechanics and Materials*, 699, 342–347.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.699.342>
- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *Materials Science Forum*, 841(March), 162–169.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.162>
- Zhang, Yu; Li, Tao; Hou, Dongshuai; Zhang, Jinglin; Jiang, J. (2018). Insights on the magnesium and sulfate ions adsorption on the surface of sodium alumino-silicate hydrate (NASH) gel: a molecular dynamics study. *Physical Chemistry Chemical Physics*.
<https://doi.org/10.1039/C8CP02469C>
- Zhang, Z., Yao, X., & Wang, H. (2012). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment. *Applied Clay Science*, 67–68, 57–60.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.05.008>
- Zhang, Z., Yao, X., & Zhu, H. (2010). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete I. Basic properties. *Applied Clay Science*, 49(1–2), 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.01.014>
- Zhong, W. L., Zhang, Y. H., Fan, L. F., & Li, P. F. (2022). Effect of PDMS content on waterproofing and mechanical properties of geopolymer composites. *Ceramics International*, 48(18), 26248–26257. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.306>
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253–267.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>
- Zuquan, J., Xia, Z., Tiejun, Z., & Jianqing, L. (2018). Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones. *Construction and Building Materials*, 177, 170–183.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.120>