



TESIS - RC5401

**PENGARUH TEBAL LAPISAN GEOPOLIMER PADA  
BETON NORMAL TERHADAP LAJU KOROSI BAJA  
TULANGAN**

**SYAHIDAH FANI NASTITI**  
**03111750020009**

**DOSEN PEMIMBING**  
**Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.**

**Departemen Teknik Sipil**  
**Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**2020**

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*



**TESIS - RC5401**

**PENGARUH TEBAL LAPISAN GEOPOLIMER PADA  
BETON NORMAL TERHADAP LAJU KOROSI BAJA  
TULANGAN**

**SYAHIDAH FANI NASTITI  
03111750020009**

**DOSEN PEMIMBING  
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.**

**Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020**

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Syahidah Fani Nastiti**

**NRP: 03111750020009**

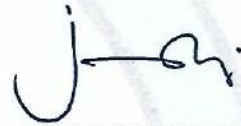
Tanggal ujian : 8 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

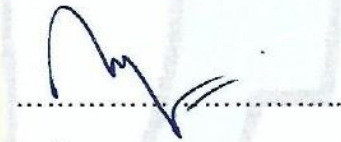
1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT.  
NIP: 19740112 200501 2 001



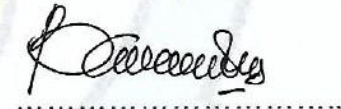
---

**Penguji:**

1. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.  
NIP: 19630605 198903 1 004
2. Bambang Piscesa, ST., MT., Ph.D  
NIP: 19840318 200812 1 002



---



---

Kepala Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan



**Umboro Lasminto, ST., M.Sc.**  
NIP: 19721202 199802 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

**Tesis yang berjudul: “Pengaruh Tebal Lapisan Geopolimer pada Beton Normal terhadap Laju Korosi Baja Tulangan”** ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulisan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiaris di dalam naskah tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2020



**Syahidah Fani Nastiti**

**NRP: 03111750020009**

# **PENGARUH TEBAL LAPISAN GEOPOLIMER PADA BETON NORMAL TERHADAP LAJU KOROSI BAJA TULANGAN**

Nama Mahasiswa : Syahidah Fani Nastiti  
NRP : 03111750020009  
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

*Durability* beton di lingkungan air laut sangat diperhatikan karena konsentrasi senyawa kimia yang terkandung dapat merusak struktur beton, terutama di area *tidal zone*. Diperlukan material pelapis yang tahan terhadap serangan senyawa kimia, sehingga struktur beton dapat terlindungi. Geopolimer merupakan inovasi penggunaan material baru seperti *fly ash* sebagai pengganti semen. Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan, ketahanan geopolimer lebih baik dalam melindungi beton bertulang di lingkungan yang agresif. Dalam penelitian ini geopolimer berbahan dasar *fly ash* berfungsi sebagai pelapis beton normal di lingkungan air laut. Digunakan perbandingan *fly ash* dan alkali aktivator 65:35. Alkali aktivator berasal dari campuran  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  12M dengan perbandingan 2,5:1. Benda uji dengan variasi tebal 2,5 cm, 4 cm, dan 6 cm, sehingga ukuran benda uji lolipop kubus adalah 15x15x15 cm, 18x18x18 cm, dan 22x22x22 cm. Benda uji lolipop kubus digunakan untuk pengukuran laju korosi tulangan baja dengan teknik percepatan korosi yaitu *Accelerated Corrosion Test*. Benda uji silinder digunakan untuk uji penetrasi ion klorida, kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah, porositas, dan pH dengan ukuran 10x20 cm. *Curing* benda uji dilakukan di air laut (*seawater*) dan sebagai kontrol dengan *moist curing*. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kuat tekan beton OPC terlapisi mortar dengan ketebalan 4 cm mencapai kuat tekan tertinggi setelah direndam selama 90 hari di lingkungan air laut. Kandungan klorida bebas yang ada pada beton OPC terlapisi mortar geopolimer memiliki kapasitas pengikatan klorida lebih baik dibanding material lain. Laju korosi beton OPC yang terlapisi mortar geopolimer 4 cm lebih rendah dibandingkan dengan ketebalan lapisan lainnya. Rekomendasi untuk ketebalan lapisan optimal mortar geopolimer pada beton bertulang di lingkungan air laut yang cocok diterapkan adalah 4 cm.

**Kata kunci** : *fly ash*, penetrasi ion klorida, laju korosi, air laut, geopolimer

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*



# THE INFLUENCE OF GEOPOLYMER LAYER ON CORROSION RATE OF REINFORCED STEEL NORMAL CONCRETE

Name : Syahidah Fani Nastiti

NRP : 03111750020009

Consultation Lecturer : Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

## ABSTRACT

Durability of concrete in *seawater* environment is very important because aggressive ions from of *seawater* to the concrete structure, especially in the tidal zone area. Coating material is required to protect the structure from chemical attacks. This study presents the utilization of geopolymer as a non-portland material. Previous studies found that geopolymer had good resistance from aggressive environments. In this study, geopolymer was used as a layer on marine structure. Geopolymer was created from *fly ash* and alkali activator with a ratio of 65:35. Alkali activator was a mixture of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and  $\text{NaOH}$  12M with a ratio of 2.5:1. The 10x10x10 cm Lollipop cube was covered by geopolymer mortar with thickness variation of 2,5 cm, 4 cm, and 6 cm. These shapes were used in Accelerated Corrosion Test to measure the corrosion rate on steel reinforcement. The 10x20 cm Cylindrical specimens were used for mechanical and chemical test. Specimens were cured by using *moist* method as a control and sinking in *seawater*. This study showed that the compressive strength of concrete coated with 4 cm thickness of geopolymer mortar reaches the highest compressive strength after being placed for 90 days in the *seawater*. The free chloride binding capacity in coated concretes with geopolymer mortars has good performance than the other material. Corrosion rate on the lollipop cube covered with 4 cm thickness of geopolymer mortar has the lowest rate. It is recommended to use 4 cm thick of geopolymer layer on marine structure.

**Keywords** : *fly ash*, penetration of chloride ions, corrosion rate, *seawater*, geopolymer,

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan atas kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya kepada penyusun sehingga dapat menyelesaikan Tesis dengan baik dan lancar. Tesis dengan judul “Pengaruh Tebal Lapisan Geopolimer Pada Beton Normal Terhadap Laju Korosi Baja Tulangan” ini disusun untuk menyelesaikan mengambil Tesis pada program Pascasarjana. Untuk itu penyusun menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri yang telah membimbing dan memberikan solusi dalam penyusunan Tesis.
2. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D. dan Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D. atas kesediannya menjadi penguji serta saran dan bimbingannya dalam penyelesaian Tesis.
3. Keluarga tercinta, Musthofa Najib, Endang Winarni, dan Mochammad Surya Budi Utomo. Adik-adikku tersayang Sajidah Fani Pangesti, Shafiyah Fani Widyanti, Nurjannah dan Nurhasanah serta seluruh keluarga yang selalu memberikan dukungan moral dan do'a bagi penyusun.
4. Teman-teman yang telah memberikan semangat, dukungan, dan bantuan pada penyusun dalam penyelesaian Tesis.
5. Pihak-pihak yang telah memberikan kemudahan pada proses pengumpulan data dalam pelaksanaan penelitian.

Penyusun menyadari bahwa dalam Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun. Akhir kata semoga Tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan bermanfaat dalam perkembangan ilmu teknik sipil bidang struktur.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>Halaman Judul .....</b>	<b>i</b>
<b>Lembar Pengesahan.....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstrak.....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vii</b>
<b>Kata Pengantar .....</b>	<b>ix</b>
<b>Daftar Isi .....</b>	<b>xi</b>
<b>Daftar Gambar .....</b>	<b>xv</b>
<b>Daftar Tabel.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Batasan Masalah .....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Penetrasi Klorida pada Beton.....	7
2.2 Korosi pada Tulangan Baja akibat Penetrasi Klorida .....	8
2.3 Geopolimer sebagai Material Pelapis .....	12
2.4 Ketebalan Lapisan.....	14
2.5 Parameter Prediksi Masa Layan.....	16
2.6 Laju Korosi Tulangan Baja.....	17
2.7 Penelitian-penelitian Sebelumnya.....	20
2.7.1 (Zhang et al., 2012) .....	20
2.7.2 (Tittarelli et al., 2018) .....	22
2.7.3 (Halim, 2017) .....	26
2.7.4 (Tarmidzi, 2017) .....	27
2.7.5 (Febryan, 2018).....	27
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>29</b>
3.1 Umum .....	29
3.2 Studi Literatur .....	30
3.3 Persiapan Material .....	31
3.3.1 <i>Fly ash</i> .....	31
3.3.2 Semen.....	32
3.3.3 Agregat Kasar dan Agregat Halus.....	32
3.3.4 Alkali Aktivator .....	33

3.3.5	Sikagrout 215.....	35
3.3.6	Air Suling .....	35
3.3.7	Baja Tulangan.....	35
3.3.8	<i>Epoxy Resin</i> .....	36
3.4	Pengujian Material .....	39
3.4.1	Agregat Kasar .....	39
3.4.2	Agregat Halus .....	41
3.5	<i>Mix Design Patching Repair</i> .....	42
3.5.1	<i>Mix Design Mortar Geopolimer</i> .....	42
3.6	Pembuatan Benda Uji.....	44
3.6.1	Persiapan Cetakan dan Rencana Benda Uji.....	44
3.6.2	Kebutuhan Benda Uji .....	48
3.6.3	Prosedur Pembuatan Mortar Geopolimer .....	49
3.7	Skema <i>Curing</i> Benda Uji .....	52
3.8	Rencana Jadwal Pembuatan dan Pengujian.....	54
3.9	Pengujian Beton .....	55
3.9.1	Pengujian Kuat Tekan .....	55
3.9.2	Pengujian Kuat Tarik Belah .....	56
3.9.3	Pengujian Modulus Elastisitas.....	56
3.9.4	Pengujian Tarik Langsung.....	56
3.9.5	Tes Porositas.....	57
3.9.6	Derajat Keasaman.....	58
3.9.7	Penetrasi dan Koefisien Semu Difusi Klorida.....	59
3.9.8	<i>Corrosion Rate</i> dengan <i>Mass Loss Method</i> .....	61
3.9.9	Analisa Hasil .....	63
3.9.10	Kesimpulan.....	63
<b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA .....</b>		<b>65</b>
4.1	Umum.....	65
4.2	Material .....	65
4.3	Data Hasil Karakteristik Material.....	65
4.3.1	<i>Fly ash</i> .....	66
4.3.2	Sikagrout 215M .....	68
4.3.3	Air Laut .....	69
4.3.4	Ordinary Portland Cement (OPC) .....	69
4.3.5	Agregat Kasar .....	70
4.3.6	Agregat Halus .....	73
4.4	Data dan Hasil Pengujian Spesimen.....	76
4.4.1	Mix Design Beton OPC.....	76
4.4.2	Mix Design Pelapis.....	77
4.4.3	Visualisasi Spesimen .....	78

4.4.4	Analisa Kuat Tekan .....	81
4.4.5	Analisa Tarik Belah .....	92
4.4.6	Analisa Modulus Elastisitas .....	97
4.4.7	Analisa Penetrasi Klorida dan Koefisien Difusi Klorida .....	100
4.4.8	Analisa Penetrasi Sulfat .....	113
4.4.9	Analisa XRD ( <i>X-Ray Diffraction</i> ).....	117
4.4.10	Analisa Derajat Kesamaan (pH).....	121
4.4.11	Analisa Porositas .....	125
4.4.12	Analisa Laju Korosi dengan Mass Loss Method .....	133
<b>BAB 5 PENUTUP.....</b>		<b>141</b>
3.1	Kesimpulan .....	141
3.2	Saran .....	141
Daftar Pustaka .....		xxiii
Lampiran .....		xxxii

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2 - 1	Klorida Total dan Klorida Bebas pada beton di lingkungan air laut (Zuquan et al., 2018) .....	8
Gambar 2 - 2	Proses kimia perkaratan pada tulangan baja (Broomfield, 2007) .	9
Gambar 2 - 3	Korosi tulangan baja setelah 1 tahun pemaparan di splash zone (Liu et al., 2016).....	10
Gambar 2 - 4	Korosi tulangan baja pada beton yang direndam pada larutan klorida (Aguirre-Guerrero et al., 2016).....	10
Gambar 2 - 5	<i>Initiation and Propagation Period</i> (Hájková et al., 2018).....	11
Gambar 2 - 6	Skema pecahnya lapisan pasif tulangan baja akibat klorida (Broomfield, 2007).....	12
Gambar 2 - 7	(a) Konfigurasi tetrahedral sialate (b) Rantai Kimia poly(sialate) (Davidovits, 1991) .....	13
Gambar 2 - 8	Proses polimerisasi (Jeyasehar et al., 2013).....	13
Gambar 2 - 9	Total arus korosi pada spesimen dengan ketebalan 25 mm dan 45 mm (Lopez-Calvo et al., 2018) .....	15
Gambar 2 - 10	<i>Chloride profiles</i> dengan variasi campuran beton di <i>tidal zone</i> (Abd El Fattah et al., 2018) .....	17
Gambar 2 - 11	Ilustrasi sederhana Accelerated Corrosion Test dengan metode Elektrokimia (Aguirre-Guerrero et al., 2016) .....	18
Gambar 2 - 12	Kurva intensitas arus listrik dan waktu (Aguirre-Guerrero et al., 2016) .....	18
Gambar 2 - 13	<i>Initial dan Final icorr</i> beton (a) spesimen OPC (b) spesimen MK (c) spesimen SF (Aguirre-Guerrero et al., 2016) .....	19
Gambar 2 - 14	Perubahan Ecorr, korosi yang terjadi pada lingkungan klorida (Aguirre-Guerrero et al., 2016) .....	20
Gambar 2 - 15	Lapisan <i>coating</i> geopolimer yang terlepas dari accropodes (Zhang et al., 2012).....	21
Gambar 2 - 16	Hasil XRD geopolimer SIII pada umur 28 dan 180 hari (Zhang et al., 2012).....	22
Gambar 2 - 17	Porositas Total dari mortar OPC dan geopolimer berbahan dasar <i>fly ash</i> dan metakaolin (Tittarelli et al., 2018) .....	23
Gambar 2 - 18	Konsentrasi klorida bebas pada (a) mortar OPC dan (b) geopolimer berbahan dasar <i>fly ash</i> (NaOH) yang direndam dalam larutan NaCl 3.5% (Tittarelli et al., 2018).....	24
Gambar 2 - 19	Konsentrasi klorida bebas pada (a) mortar geopolimer berbahan dasar <i>fly ash</i> (KOH) dan (b) metakaolin (KOH) yang direndam dalam larutan NaCl 3.5% (Tittarelli et al., 2018).....	25
Gambar 2 - 20	Grafik nilai kuat tekan beton OPC dan geopolimer (Halim et al., 2017) .....	26

Gambar 3 - 1	Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3 - 2	Lanjutan Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3 - 3	<i>Fly ash</i> Suralaya Silo 1-4 .....	32
Gambar 3 - 4	Agregat Kasar .....	32
Gambar 3 - 5	Agregat Halus .....	33
Gambar 3 - 6	NaOH flakes .....	34
Gambar 3 - 7	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....	35
Gambar 3 - 8	Baja tulangan polos .....	36
Gambar 3 - 9	Sikagard 63N Component A .....	38
Gambar 3 - 10	Sikagard 63N Component B.....	38
Gambar 3 - 11	Sikadur 732.....	39
Gambar 3 - 12	Skema komposisi mortar geopolimer .....	43
Gambar 3 - 13	Rencana benda uji silinder dengan variasi tebal selimut.....	44
Gambar 3 - 14	Rasio L/D dengan faktor koreksi kekuatan (ASTM C42-03).....	45
Gambar 3 - 15	Benda Uji Silinder yang di coating dengan Epoxy resin.....	46
Gambar 3 - 16	Rencana benda uji lolipop kubus untuk <i>Accelerated Corrosion Test</i> .....	47
Gambar 3 - 17	Beton OPC dalam cetakan .....	51
Gambar 3 - 18	Mortar geopolimer .....	51
Gambar 3 - 19	Proses pencetakan mortar geopolimer pada beton OPC.....	52
Gambar 3 - 20	Benda uji dibungkus dengan waring .....	53
Gambar 3 - 21	Waring diikat dengan tali tampar .....	53
Gambar 3 - 22	Bagan (tempat meletakkan benda uji) .....	54
Gambar 3 - 23	Benda uji diikatkan pada tiap sisi bagan .....	54
Gambar 3 - 24	Ilustrasi model pengujian modulus elastisitas .....	57
Gambar 3 - 25	Titik pengambilan sampel untuk uji penetrasi ion klorida, porositas dan pH .....	57
Gambar 3 - 26	Analisis Regresi Sampel.....	60
Gambar 3 - 27	Tampak samping <i>Accelerated Corrossion Test</i> .....	62
Gambar 3 - 28	Tampak atas <i>Accelerated Corrossion Test</i> .....	62
Gambar 4 - 1	Grafik hasil analisa XRD <i>fly ash</i> .....	67
Gambar 4 - 2	Grafik hasil analisa XRD OPC.....	70
Gambar 4 - 3	Grafik gradasi agregat halus gradasi 2 .....	76
Gambar 4 - 4	Tipe silinder sebelum di rendam (a) G-2.5, (b) G-4, (c) G-6, dan (d) S-2.5 .....	79
Gambar 4 - 5	Spesimen silinder yang di <i>coating</i> sebelum dan setelah di rendam di seawater curing.....	79
Gambar 4 - 6	Tampak atas lapisan geopolimer dan Sikagrout 215M selama 30- 60 hari ( <i>seawater curing</i> ) .....	80
Gambar 4 - 7	Tampak atas lapisan geopolimer dan Sikagrout 215M selama 90 hari ( <i>seawater curing</i> ) sebelum dan sesudah dibersihkan.....	81

Gambar 4 - 8	Pengujian kuat tekan beton OPC umur 30 hari.....	82
Gambar 4 - 9	Pengujian kuat tekan mortar geopolimer umur 30 hari.....	83
Gambar 4 - 10	Pengujian kuat tekan Sikagrout 215M umur 30 hari .....	84
Gambar 4 - 11	Grafik perbandingan kuat tekan 4 tipe silinder dengan <i>seawater curing</i> .....	88
Gambar 4 - 12	Grafik perbandingan kuat tekan 4 tipe silinder dengan <i>moist curing</i> .....	88
Gambar 4 - 13	Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tekan 4 tipe silinder umur 90 hari ( <i>seawater curing</i> ) .....	90
Gambar 4 - 14	Spesimen silinder setelah pengujian kuat tekan.....	91
Gambar 4 - 15	Mekanisme keruntuhan spesimen setelah pengujian kuat tekan. 92	
Gambar 4 - 16	Pengujian kuat tarik belah beton OPC .....	93
Gambar 4 - 17	Pengujian kuat tarik belah spesimen silinder dengan <i>seawater curing</i> .....	94
Gambar 4 - 18	Grafik perbandingan kuat tarik belah 4 tipe silinder dengan <i>seawater curing</i> .....	95
Gambar 4 - 19	Spesimen silinder setelah pengujian kuat tarik belah .....	96
Gambar 4 - 20	Mekanisme keruntuhan spesimen setelah pengujian kuat tarik belah .....	97
Gambar 4 - 21	Perbandingan modulus elastisitas 4 tipe spesimen <i>initial</i> (0 hari) .....	98
Gambar 4 - 22	Perbandingan modulus elastisitas 4 tipe spesimen dengan seawater curing (90 hari).....	99
Gambar 4 - 23	Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-2.5 .....	100
Gambar 4 - 24	Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-4 .....	101
Gambar 4 - 25	Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-6 .....	101
Gambar 4 - 26	Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe S-2.5.....	102
Gambar 4 - 27	Perkembangan konsentrasi klorida bebas pada OPC tiap tipe spesimen.....	103
Gambar 4 - 28	Konsentrasi klorida pada tipe G-2.5 vs kedalaman.....	104
Gambar 4 - 29	Konsentrasi klorida pada tipe G-4 vs kedalaman.....	104
Gambar 4 - 30	Konsentrasi klorida pada tipe G-6 vs kedalaman.....	105
Gambar 4 - 31	Konsentrasi klorida pada tipe S-2.5 vs kedalaman .....	105
Gambar 4 - 32	Konsentrasi klorida tiap kedalaman umur 90 hari .....	106
Gambar 4 - 33	Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-2.5 .....	107
Gambar 4 - 34	Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-4 .....	107
Gambar 4 - 35	Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-6 .....	108
Gambar 4 - 36	Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe S-2.5 .....	108
Gambar 4 - 37	Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-2.5 .....	111

Gambar 4 - 38	Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-4.....	111
Gambar 4 - 39	Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-6.....	112
Gambar 4 - 40	Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe s-2.5.....	112
Gambar 4 - 41	Kandungan sulfat tipe G-2.5 ( <i>seawater curing</i> ).....	114
Gambar 4 - 42	Kandungan sulfat tipe G-4 ( <i>seawater curing</i> ).....	114
Gambar 4 - 43	Kandungan sulfat tipe G-6 ( <i>seawater curing</i> ).....	115
Gambar 4 - 44	Kandungan sulfat tipe S-2.5 ( <i>seawater curing</i> ).....	115
Gambar 4 - 45	Perbandingan kandungan sulfat yang pada spesimen umur 90 hari ( <i>seawater curing</i> ).....	116
Gambar 4 - 46	Grafik hasil analisa XRD mortar geopolimer (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	117
Gambar 4 - 47	Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-2.5 (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	118
Gambar 4 - 48	Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-4 (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	118
Gambar 4 - 49	Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-6 (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	119
Gambar 4 - 50	Grafik hasil analisa XRD Sikagrout 215M (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	120
Gambar 4 - 51	Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe S-2.5 (90 hari <i>seawater curing</i> ).....	120
Gambar 4 - 52	Hasil pengujian pH tipe G-2.5.....	122
Gambar 4 - 53	Hasil pengujian pH tipe G-4.....	123
Gambar 4 - 54	Hasil pengujian pH tipe G-6.....	124
Gambar 4 - 55	Hasil pengujian pH tipe S-2.5.....	125
Gambar 4 - 56	Porositas Geopolimer tipe G-2.5.....	127
Gambar 4 - 57	Porositas Geopolimer tipe G-4.....	127
Gambar 4 - 58	Porositas Geopolimer tipe G-6.....	128
Gambar 4 - 59	Porositas Sikagrout 215M tipe S-2.5.....	128
Gambar 4 - 60	Porositas OPC tipe G-2.5.....	129
Gambar 4 - 61	Porositas OPC tipe G-4.....	129
Gambar 4 - 62	Porositas OPC tipe G-6.....	130
Gambar 4 - 63	Porositas OPC tipe S-2.5.....	130
Gambar 4 - 64	Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dengan kuat tekan spesimen yang direndam di lingkungan air laut.....	131
Gambar 4 - 65	Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dan beton OPC dengan klorida bebas pada spesimen G-2.5.....	132

Gambar 4 - 66	Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dan beton OPC dengan kadar sulfat pada spesimen G-2.5.....	132
Gambar 4 - 67	Instalasi rangkaian listrik untuk percepatan korosi.....	133
Gambar 4 - 68	Perbandingan arus mengalir pada 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%) .....	135
Gambar 4 - 69	Perbandingan Laju Korosi pada 4 tipe spesimen kubus .....	136
Gambar 4 - 70	Visualisasi retak pada 4 tipe spesimen.....	137
Gambar 4 - 71	Perbandingan berat yang hilang pada 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%) .....	138
Gambar 4 - 72	Visualisasi tulangan karat setelah dilepas dari kubus .....	138
Gambar 4 - 73	Visualisasi tulangan karat sebelum dan setelah dibersihkan karatnya.....	140

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2 - 1	Data Analisa Air Laut Pantai Kenjeran, Surabaya .....	7
Tabel 2 - 2	Kriteria kadar klorida (CCR) pada beton.....	10
Tabel 3 - 1	Spesifikasi tulangan baja polos diameter 16 (PT Bhirawa Steel)....	36
Tabel 3 - 2	Ukuran Lubang Ayakan.....	41
Tabel 3 - 3	Prosentase komposisi mortar geopolimer .....	42
Tabel 3 - 4	Kebutuhan komposisi mortar geopolimer per meter kubik .....	43
Tabel 3 - 5	Kebutuhan material mortar geopolimer .....	43
Tabel 3 - 6	Penamaan benda uji berdasarkan material.....	48
Tabel 3 - 7	Tipe benda uji sesuai variasi tebal selimut .....	48
Tabel 3 - 8	Kebutuhan benda uji silinder .....	48
Tabel 3 - 9	Kebutuhan benda uji lolipop kubus .....	49
Tabel 3 - 10	Jadwal pembuatan dan pengujian benda uji lolipop kubus.....	54
Tabel 3 - 11	Jadwal pembuatan dan pengujian benda uji silinder .....	55
Tabel 4 - 1	Hasil Analisa XRF Fly ash PLTU Suralaya silo 1-4 .....	66
Tabel 4 - 2	Hasil Analisa Klorida Fly ash PLTU Suralaya silo 1-4.....	66
Tabel 4 - 3	Hasil Analisa Berat Jenis Fly ash PLTU Suralaya silo 1-4 .....	67
Tabel 4 - 4	Hasil Analisa XRF Sikagrout 215M produksi PT. Sika Indonesia..	68
Tabel 4 - 5	Hasil Analisa Klorida Sikagrout 215M produksi PT. Sika Indonesia .....	68
Tabel 4 - 6	Hasil Analisa Klorida Air Selat Madura.....	69
Tabel 4 - 7	Hasil Analisa Berat Jenis OPC .....	69
Tabel 4 - 8	Berat Jenis Batu Pecah.....	71
Tabel 4 - 9	Berat Volume Batu Pecah.....	71
Tabel 4 - 10	Kelembapan Batu Pecah .....	71
Tabel 4 - 11	Air Resapan pada Batu Pecah .....	72
Tabel 4 - 12	Kebersihan Batu Pecah terhadap Lumpur .....	72
Tabel 4 - 13	Keausan Batu Pecah.....	73
Tabel 4 - 14	Berat Jenis Pasir .....	73
Tabel 4 - 15	Berat Volume Pasir .....	74
Tabel 4 - 16	Kelembapan Pasir .....	74
Tabel 4 - 17	Kadar Air Resapan pada Pasir .....	74
Tabel 4 - 18	Kebersihan Pasir terhadap Lumpur.....	75
Tabel 4 - 19	Hasil analisa saringan pada Pasir.....	75
Tabel 4 - 20	Mix Design beton OPC.....	77
Tabel 4 - 21	Komposisi campuran beton OPC.....	77
Tabel 4 - 22	Hasil uji kuat tekan beton OPC.....	82
Tabel 4 - 23	Nilai kuat tekan dihitung dengan Faktor Koreksi (ASTM C42-03)	83
Tabel 4 - 24	Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer .....	83
Tabel 4 - 25	Hasil uji kuat tekan Sikagrout 215M .....	84

Tabel 4 - 26 Hasil uji kuat tekan silinder umur sebelum direndam.....	85
Tabel 4 - 27 Kontribusi mortar pelapis terhadap kuat tekan beton OPC.....	85
Tabel 4 - 28 Hasil uji kuat tekan silinder dengan seawater curing.....	86
Tabel 4 - 29 Hasil uji kuat tekan silinder dengan moist curing.....	87
Tabel 4 - 30 Persentase Penurunan/Kenaikan Kuat Tekan 4 tipe silinder.....	89
Tabel 4 - 31 Hasil uji kuat tarik belah silinder OPC.....	93
Tabel 4 - 32 Hasil uji kuat tarik belah 4 tipe silinder dengan seawater curing.....	94
Tabel 4 - 33 Hasil uji modulus elastisitas silinder beton.....	98
Tabel 4 - 34 Hasil Koefisien Difusi Klorida dengan Fick's Second Law.....	109
Tabel 4 - 35 Hasil Koefisien Difusi Klorida dengan Fick's Second Law (lanjutan) .....	110
Tabel 4 - 36 Hasil pengukuran Koefisien Difusi dengan Fick's Second Law....	113
Tabel 4 - 37 Hasil pengujian porositas.....	126
Tabel 4 - 38 Pengamatan arus 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%).....	134
Tabel 4 - 39 Hasil laju korosi 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%).....	136
Tabel 4 - 40 Rekap berat yang hilang 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%).....	137



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Ketahanan (*durability*) beton sangat berperan penting terhadap kinerja beton selama masa layan (*service life*) yang direncanakan. Beton dikatakan memiliki ketahanan yang baik (*durable*) jika dalam masa layannya, beton tidak mengalami kerusakan. Beton yang *durable* akan melindungi tulangan baja dari korosi, sehingga mengurangi potensi beton yang rusak akibat serangan kimia (Albitar et al., 2017; Otieno et al., 2016).

Mekanisme kerusakan struktur beton di lingkungan air laut diawali dengan penetrasi klorida. Klorida berperan dalam *depassivation* lapisan pasif permukaan tulangan baja, yang menyebabkan inisiasi korosi mulai terjadi. Penetrasi klorida pada struktur beton bertulang dipengaruhi dari variasi suhu, siklus basah-kering (*wet-dry cycle*), akibat gelombang air laut, dan perubahan kondisi lainnya. Tingkat penetrasi klorida menjadi parameter yang penting pada struktur beton bertulang yang berada di lingkungan air laut (Verma et al., 2013; Otieno et al., 2016; Hájková et al., 2018).

Beberapa penelitian (Costa dan Appleton, 1999; Otieno et al., 2016); Abd El Fattah et al., 2018) menyatakan bahwa penetrasi klorida pada beton sangat bergantung pada tipe komposisi campuran beton dan tempat pemaparan benda uji. Pada lingkungan *tidal zone*, konsentrasi senyawa kimia agresif lebih tinggi daripada lingkungan *atmospheric zone*. Tingkat penetrasi klorida di *tidal zone* jauh lebih tinggi dibandingkan pada *atmospheric zone*, sehingga tingkat *durability* pada kedua jenis zona ini sangat berbeda.

Konstruksi beton di lingkungan air laut tidak bisa disamakan ketahanannya dengan di lingkungan normal. Ketahanan beton di lingkungan air laut lebih rendah sehingga beton dapat mengalami kerusakan lebih awal sebelum masa layan yang direncanakan berakhir (Otieno et al., 2016). Dibutuhkan proteksi tambahan pada beton untuk mencegah atau meminimalisir kerusakan berupa korosi lebih lanjut. Salah satu metode proteksi/*repair* beton yang dapat digunakan adalah *Surface Applied Protection*. Metode proteksi ini dengan cara pelapisan pada beton untuk

memberikan perlindungan kepada beton. Melapisi permukaan beton tersebut dengan ketebalan pelapisan yang relatif, menggunakan material-material yang sesuai dengan tujuan pelapisan tersebut. Pelapisan sangat efisien untuk mengontrol korosi tulangan baja. Selain itu, pelapisan dapat memperpanjang masa layan (*service life*) struktur beton yang terpapar lingkungan laut terutama pada *tidal zone* dengan menghambat intrusi ion korosif (Emmons, 1994; ACI Committee 357, 1997; Zhang et al., 2010; Zhang et al., 2012).

Material proteksi tambahan pada struktur beton harus memiliki *durability* lebih tinggi dibandingkan beton OPC (*Ordinary Portland Cement*). Hasil beberapa penelitian menyatakan bahwa *durability* geopolimer lebih unggul dan mampu memberikan perlindungan pada lingkungan yang lebih agresif (senyawa kimia), seperti direndam pada asam sulfat, magnesium sulfat, asam nitrat dan lain sebagainya (Zhang et al., 2010; Ken et al., 2015; Albitar et al., 2017; Aguirre-Guerrero et al., 2016).

Geopolimer merupakan polimer mineral hasil dari proses geokimia atau geosintesis yang diperkenalkan oleh Joseph Davidovits pada tahun 1975. Geopolimer adalah material baru yang dapat digunakan sebagai pelapis, perekat, pengikat untuk komposit serat dan lainnya. Pengaplikasian geopolimer ini diteliti dalam berbagai disiplin ilmu dan industri serta jenis teknologi proses rekayasa. Geopolimer sangat berpotensi dalam berbagai macam pengaplikasian termasuk salah satunya yaitu komposit untuk perbaikan dan penguatan infrastuktur. Tarmidzi (2016) menyatakan bahwa penggunaan repair mortar geopolimer dengan serat PVA pada balok OPC memberikan daktilitas yang tinggi dibandingkan dengan material repair lain. Selain itu, geopolimer menunjukkan hasil yang sangat baik dan cocok diaplikasikan sebagai proteksi menahan serangan kimia sulfat maupun klorida (Davidovits, 2008; Otieno et al., 2016); Aguirre-Guerrero et al., 2017); Sturm et al., 2018; Tittarelli et al., 2018).

Bahan dasar geopolimer harus memiliki kandungan Si dan Al (pozzolan) untuk dilibatkan dalam proses geopolimerisasi. Dalam proses geopolimerisasi, reaksi kimia antara *alumino-silicate oxide* dengan *alkali polysilicate* akan menghasilkan ikatan polimerik Si-O-Al. Ikatan polimerik aluminosilikat lebih stabil dan tidak mengalami perubahan saat terpapar di udara ataupun terendam di

air laut. Pozzolan yang digunakan sebagai bahan pengikat antara lain *fly ash*, slag, abu sekam padi, silika fume dan metakaolin (Davidovits, 1991; Zhang et al., 2010).

Sumber material geopolimer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash*. *Fly ash* merupakan hasil pembakaran batubara yang memiliki ukuran butiran yang sangat halus. Jenis *fly ash* yang digunakan sebagai bahan pengikat beton adalah *fly ash* kelas F karena mengandung pozzolan yang lebih tinggi (>70%) daripada *fly ash* kelas C yang mengandung pozzolan 50-70% (ASTM C 618).

*Fly ash* memiliki kapasitas pengikatan lebih baik dibandingkan material lain seperti semen dan silika fume. Pada kedalaman beton dengan konsentrasi klorida yang lebih tinggi, kapasitas pengikatan yang terjadi juga lebih tinggi. Geopolimer mampu mengurangi konsentrasi klorida di dekat baja tulangan dan tingkat korosi menjadi lebih rendah (Abd El Fattah et al., 2018). Dalam penelitian Kwasny et al. (2018) mortar geopolimer lebih stabil terhadap serangan sulfat selama 52 minggu perendaman di larutan sulfat. Perubahan panjang ukuran dan massa mortar geopolimer yang terjadi sangat kecil dibandingkan mortar semen selama pertukaran antara ion di mortar dan larutan sulfat.

Ada beberapa hal yang mempengaruhi kinerja geopolimer, yaitu komposisi campuran, komposisi alkali aktivator, karakteristik fisik dan kimia *fly ash* (Nurwidayati et al., 2016; Antoni et al., 2016). Perbedaan konsentrasi NaOH berpengaruh pada kadar OH<sup>-</sup>, yang keberadaannya sangat penting dalam reaksi kristalisasi *fly ash*. Semakin sedikit kadar OH<sup>-</sup>, ion Al<sup>3+</sup> dan Si<sup>4+</sup> pada *fly ash* akan sulit untuk bereaksi dan proses kristalisasi tidak optimal (Subekti et al., 2008). Konsentrasi NaOH pada geopolimer mempengaruhi kemampuan ikat klorida. Konsentrasi NaOH yang lebih tinggi (16-18M) pada geopolimer membuat klorida bebas dan total klorida pada beton menurun serta meningkatkan *durability* beton. Korosi tulangan yang terjadi pada geopolimer juga menurun seiring meningkatnya konsentrasi NaOH (Chindaprasirt and Chalee, 2014). Pada perendaman beton geopolimer di pesisir Pantai Kenjeran, konsentrasi NaOH 12M menunjukkan ketahanan terhadap penetrasi klorida yang lebih baik dibandingkan 10M (Febryan, 2018). Pada penelitian Wijaya dan Ekaputri (2017) menyimpulkan bahwa rasio Si/Al yang terkandung pada *fly ash* mempengaruhi kuat tekan geopolimer. Rasio Si/Al antara 1.875 hingga 2.078 menghasilkan kuat tekan yang optimal yaitu antara

44.39 MPa hingga 50.30 MPa. Selain itu, kehalusan partikel *fly ash* yang digunakan juga mempengaruhi kuat tekan. Semakin halus partikel *fly ash*, kuat tekan geopolimer makin tinggi.

Selain komposisi material proteksi yang digunakan, ketebalan selimut beton merupakan faktor yang mempengaruhi *durability* beton bertulang. Selimut beton berperan melindungi tulangan baja dari kontak langsung dengan serangan fisik maupun kimia yang berpotensi menurunkan kinerja beton bertulang. Selimut beton yang makin tebal dan rendahnya permeabilitas beton mampu mengurangi kehilangan massa tulangan baja (Ali et al., 2015). Hasil penelitian Zhang et al. (2012) menyatakan bahwa geopolimer sebagai produk *coating* direkomendasikan dengan ketebalan lapisan >5 mm, terutama di *tidal zone* yang memiliki kelembapan yang tinggi. Berdasarkan ACI 357R-84 tebal nominal selimut beton bertulang untuk bangunan *offshore* yang direkomendasikan adalah 2 in (50 mm). Sedangkan menurut SNI 2847-2013, persyaratan tebal selimut beton yang kontak langsung dengan tanah atau cuaca adalah 40-50 mm. Halim et al. (2017) melakukan penelitian beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan beton OPC (*Ordinary Portland Cement*) yang direndam di lingkungan air garam. Dibandingkan beton OPC, laju korosi beton geopolimer lebih kecil. Variasi tebal selimut beton yaitu 4, 6, dan 8 cm pada beton geopolimer mempengaruhi laju korosi tulangan baja. Semakin tebal selimut beton beton, laju korosi yang terjadi semakin lambat.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tarmidzi (2016) menggunakan mortar geopolimer sebagai bahan *repair* yang diaplikasikan pada balok bertulang. Pada penelitian ini diharapkan mortar geopolimer diaplikasikan sebagai material proteksi beton bertulang yang resisten di lingkungan air laut. Penelitian ini diusulkan untuk mendapatkan pengaruh tebal lapisan geopolimer terhadap laju korosi baja tulangan dan ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida. Perendaman benda uji dilakukan di lingkungan air laut Kenjeran. Metode percepatan korosi tulangan baja menggunakan *Accelerated Corrosion test*.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, rumusan masalah yang diajukan dalam penelitian adalah:

1. Bagaimana perubahan kuat tekan dan porositas di lingkungan air laut?
2. Berapa laju korosi baja tulangan beton OPC yang dilapisi mortar geopolimer?
3. Bagaimana pengaruh tebal pelapisan beton OPC menggunakan mortar geopolimer terhadap ketahanan penetrasi ion klorida?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang diajukan, tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui perubahan nilai kuat tekan dan porositas yang terjadi pada beton OPC serta mortar geopolimer di lingkungan air laut.
2. Untuk menentukan laju korosi baja tulangan beton OPC dilapisi mortar geopolimer yang direndam di NaCl 5%.
3. Untuk mengetahui pengaruh tebal lapisan mortar geopolimer pada beton OPC terhadap ketahanan penetrasi ion klorida.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan diperoleh manfaat sebagai berikut:

1. Penggunaan *fly ash* dapat mengurangi ketergantungan penggunaan semen yang menghasilkan CO<sub>2</sub>.
2. Pemanfaatan limbah *fly ash* pada mortar geopolimer sebagai bahan perbaikan yang aplikatif dan ekonomis.
3. Penelitian ini sebagai bahan referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

## 1.5. Batasan Masalah

1. *Fly ash* kelas F berasal dari PLTU Suralaya silo 1-4, Banten.

2. Tulangan baja yang digunakan dari PT. Bhirawa Steel
3.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang digunakan dari PT. Kasmaji Inti Utama
4. Produk *grouting* sebagai pembanding menggunakan Sikagrout 215M produksi PT. Sika Indonesia
5. *Epoxy* resin yang digunakan menggunakan Sikagard 63N dari PT. Sika Indonesia
6. Perendaman dengan *seawater curing* dilakukan di pesisir Selat Madura dari bulan April-Juli 2019 .

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Penetrasi Klorida pada Beton

Air laut mengandung banyak senyawa kimia, baik berupa kation maupun anion. Senyawa-senyawa kimia yang agresif di dalam air laut akan bereaksi dengan beton. Dari beberapa senyawa kimia tersebut, klorida menjadi senyawa kimia dengan persentase paling tinggi dibandingkan senyawa kimia lain (**Tabel 2 - 1**). Konsentrasi kandungan klorida yang tinggi pada air laut sangat berpotensi untuk merusak struktur beton (Li et al., 2018).

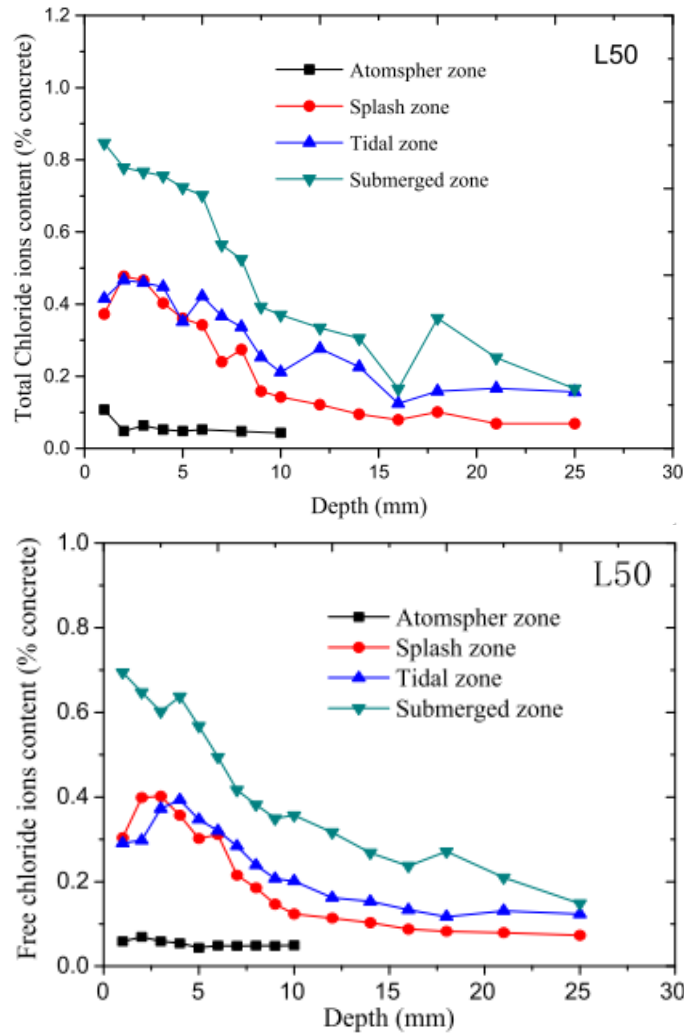
**Tabel 2 - 1 Data Analisa Air Laut Pantai Kenjeran, Surabaya**

Kation	Konsentrasi (mg/L)	Anion	Konsentrasi (mg/L)
Kalium	324,88	Klorida	14055,00
Natrium	8475,00	Sulfat	1437,20
Kalsium	353,14	Bikarbonat	72,32
Magnesium	998,86	Karbonat	10,20
Besi	0,90	Fluorida	2,58
Amonium	2,14		
Aluminium	2,90		
Tembaga	2,52		
Seng	1,26		

Sumber: Halim, 2016

Konsentrasi klorida air laut berbeda di masing-masing zona pemaparan (*exposure*). Beberapa penelitian (Zuquan et al., 2018; Abd El Fattah et al., 2018) membagi zona pemaparan air laut antara lain *atmospheric*, *splash*, *tidal*, dan *submerged*. Diantara empat zona tersebut, *tidal* dan *submerged zone* merupakan zona yang potensi penetrasi klorida pada beton paling tinggi. Konsentrasi klorida total dan bebas tiap tempat pemaparan ditunjukkan **Gambar 2 - 1**. Tingkat penetrasi klorida yang tinggi pada beton di *tidal zone* terjadi karena variasi siklus *wet-dry* selama waktu pasang surut dan cuaca yang lebih panas, sehingga mampu meningkatkan konsentrasi dan penetrasi klorida. Sedangkan pada *atmospheric*

zone, tingkat konsentrasi dan penetrasi klorida jauh lebih rendah. (Abd El Fattah et al., 2018)



**Gambar 2 - 1 Klorida Total dan Klorida Bebas pada beton di lingkungan air laut (Zuquan et al., 2018)**

## 2.2. Korosi Tulangan Baja Akibat Penetrasi Klorida

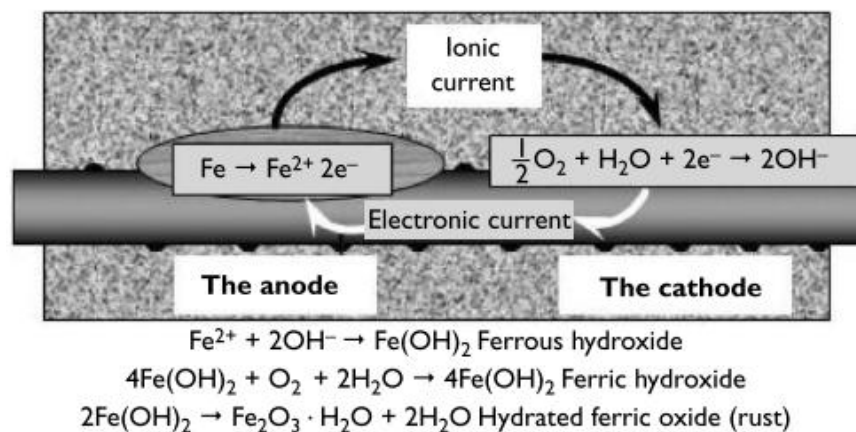
Salah satu penyebab kerusakan yang mempengaruhi *durability* struktur beton adalah korosi tulangan baja (Sirivivatnanon et al., 1999; Cement Concrete & Agregates Australia, 2009). Proses kimia terbentuknya karat (*rust*) pada tulangan baja (korosi) ditunjukkan pada **Gambar 2 - 2**. Reaksi di anoda yang terjadi adalah besi melepaskan elektron (2.1). Kemudian elektron tersebut berpindah menuju



katoda dan bereaksi dengan air dengan adanya oksigen (2.2). Pada katoda elektron juga bisa beraksi dengan air tanpa hadirnya oksigen (2.3).



Ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang dihasilkan di anoda bersama ion  $\text{OH}^-$  dari hasil reaksi di katoda akan membentuk *ferrous hydroxide*. Selanjutnya *Ferrous hydroxide* akan menjadi *ferric hydroxide*, kemudian terbentuk karat atau *hydrated ferric oxide*. (Broomfield, 2007; Lu et al., 2018)



**Gambar 2 - 2 Proses kimia perkaratan pada tulangan baja (Broomfield, 2007)**

Di lingkungan air laut, penyebab korosi utama adalah penetrasi klorida dalam beton. Kandungan kimia pada air laut paling tinggi adalah klorida. Penetrasi klorida dengan konsentrasi yang tinggi dapat menyebabkan *depassivation* baja dan meningkatnya risiko korosi tulangan baja (Sirivivatnanon et al., 1999; Cement Concrete & Agregates Australia, 2009). Risiko terjadinya korosi menurut Broomfield (2007), dapat dilihat dari kadar klorida kritis ( $C_{CR}$ ) pada beton yang ditampilkan pada **Tabel 2 - 2**. Secara visual korosi tulangan baja yang terbentuk

setelah terpapar di *splash zone* dan di rendam dalam larutan NaCl ditampilkan pada **Gambar 2 - 3** dan **Gambar 2 - 4**.

**Tabel 2 - 2 Kriteria kadar klorida ( $C_{CR}$ ) pada beton**

% klorida dari berat sampel (beton)	Resiko korosi
<0.03	Dapat diabaikan
0.03 – 0.06	Rendah
0.06 – 0.14	Sedang
>0.14	Tinggi

Sumber : (Broomfield, 2007)



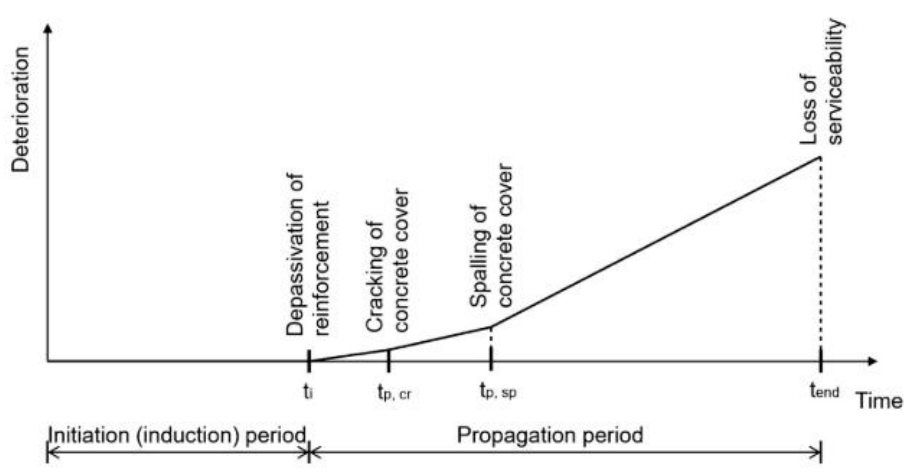
**Gambar 2 - 3 Korosi tulangan baja setelah 1 tahun pemaparan di splash zone (Liu et al., 2016)**



**Gambar 2 - 4 Korosi tulangan baja pada beton yang direndam pada larutan klorida (Aguirre-Guerrero et al., 2016)**

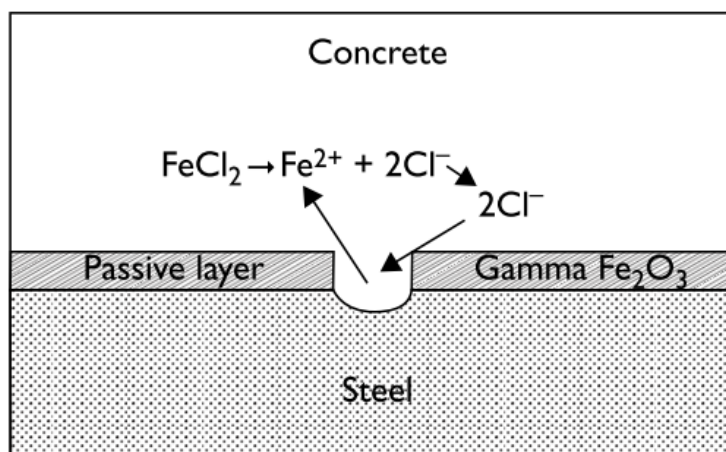
Setelah serangan kimia senyawa klorida pada beton di lingkungan air laut, mekanisme kerusakan beton akan mulai berjalan. Hájková et al. (2018) mengilustrasikan pada **Error! Reference source not found. Gambar 2 - 5** mekanisme kerusakan yang terjadi pada beton struktural. *Initiation period* dipengaruhi oleh konsentrasi kritis klorida dan selimut beton. *Diffusivity* beton bergantung pada tipe semen dan porositas beton. Setelah *initiation period* terlewati maka beton mengalami *propagation period* (penyebaran). Pada fase ini akan terjadi:

1. *depassivation* dari tulangan. Pada tahap ini *deterioration* mulai terjadi.
2. *cracking* (retak) pada selimut beton
3. *spalling* (runtuh) selimut beton
4. Kehilangan masa layan



**Gambar 2 - 5 Initiation and Propagation Period (Hájková et al., 2018)**

Pada mekanisme kerusakan beton bertulang selama tahap inisiasi, klorida berperan sebagai katalis terhadap korosi. Klorida tidak berperan langsung dalam prosesnya tetapi membantu memecah lapisan pasif oksida pada baja (*depassivated*) dan memungkinkan proses korosi untuk berjalan cepat. Skema pecahnya lapisan pasif pada baja akibat klorida ditunjukkan pada **Gambar 2 - 6** (Broomfield, 2007).

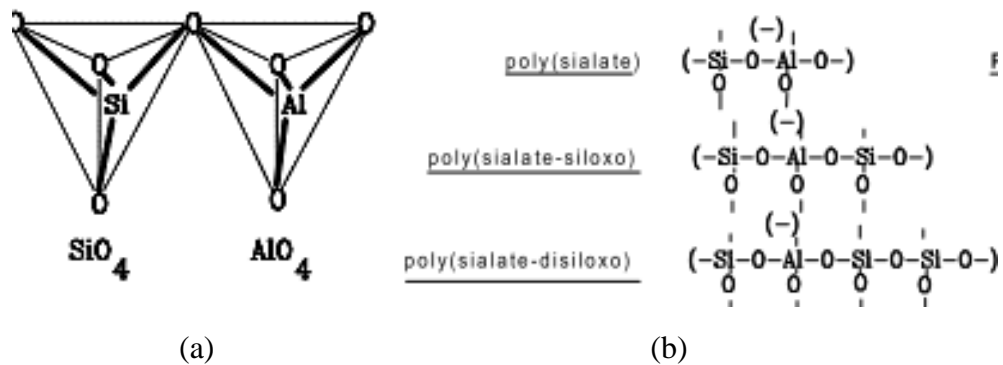


**Gambar 2 - 6 Skema pecahnya lapisan pasif tulangan baja akibat klorida (Broomfield, 2007)**

Ion klorida akan bereaksi dengan Fe pada *passive layer* tulangan baja membentuk klorida zat besi terlarut. Zat klorida besi terlarut akan berdifusi pada selimut beton dan meninggalkan permukaan tulangan baja yang terekspos terhadap kelembapan dan oksigen yang kemudian membentuk karat. Korosi terus berlangsung selama tahap penyebaran (*propagation stage*). Dan laju korosi akan dikontrol dengan adanya oksigen dan kelembapan (Ali et al., 2015). Selain itu, kuat tekan beton mempengaruhi probabilitas korosi yang terjadi. Kuat tekan rendah akan meningkatkan probabilitas korosi (Verma et al., 2013)

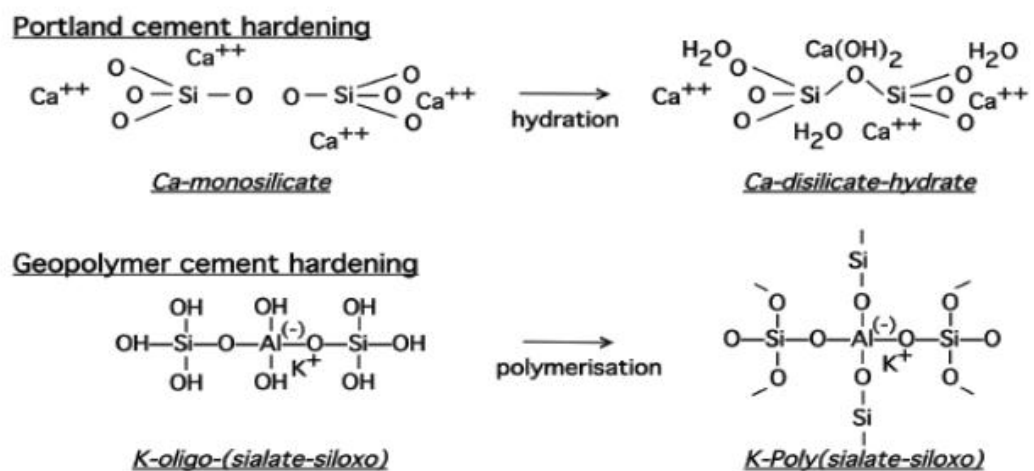
### **2.3. Geopolimer sebagai Material Pelapis**

Geopolimer merupakan polimer mineral hasil dari proses *geochemistry* atau *geosynthesis* yang berkembang dari bentuk mineral sebelumnya acak (*amorphous*) menjadi lebih tersusun (*semi-crystalline*) dengan bentuk material 3D *silico-aluminate* (Davidovits, 2011). Bentuk ikatan *poly(sialate)* dianjurkan untuk material geopolimer yang mengandung silico-alumino seperti pada **Gambar 2 - 7**. Rangkaian *sialate (silicon-oxo-aluminate)* terdiri atas tetrahedral  $\text{SiO}_4$  dan  $\text{AlO}_4$  yang saling terhubung dengan berbagi oksigen. *Poly(sialates)* adalah rantai polimer dari  $\text{Si}^{4+}$  dan  $\text{Al}^{4+}$  dalam koordinasi IV-fold dengan oksigen dan menyusun menjadi *semi-crystalline* dari *amorphous* (Davidovits, 1991).



**Gambar 2 - 7 (a) Konfigurasi tetrahedral sialate (b) Rantai Kimia poly(sialate) (Davidovits, 1991)**

Pada proses polimerisasi, air tidak bisa masuk dalam reaksi kimia pembentukan geopolimer dan akan hilang selama *curing* terjadi. Sehingga air tidak termasuk dalam struktur rantai kimia geopolimer. Berbanding terbalik pada proses hidrasi yang terjadi saat semen dicampur dengan air. Dalam reaksi kimia yang terjadi menghasilkan produk hidrasi utama *calcium silicate hydrate* dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . **Gambar 2 - 8** menampilkan proses kimia keduanya, perbedaan yang terjadi sangat signifikan pada sifat mekanik dan kimia keduanya. Geopolimer lebih tahan terhadap panas, masuknya air, dan jenis serangan kimia lain (Jeyasehar et al., 2013).



**Gambar 2 - 8 Proses polimerisasi (Jeyasehar et al., 2013)**

Beberapa penelitian (Halim, 2017; Albitar et al., 2017; Guyana et al., 2015), beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* memiliki daya serap dan absorpsi air yang tinggi saat direndam dalam larutan  $H_2SO_4$  (asam sulfat). *Deterioration* (kerusakan) pada geopolimer dengan persentase kehilangan berat lebih kecil. Kehilangan kuat tekan dan penyusutan geopolimer lebih sedikit dibandingkan beton OPC ketika direndam dalam larutan sulfat maupun klorida.

Ada beberapa hal yang mempengaruhi kinerja geopolimer, yaitu komposisi campuran, komposisi alkali aktivator, karakteristik fisik dan kimia *fly ash* (Nurwidayati et al., 2016; Antoni et al., 2016).

*Fly ash* sebagai bahan dasar geopolimer memiliki kapasitas pengikatan lebih baik dibandingkan material lain. Dengan konsentrasi klorida yang lebih tinggi, kapasitas pengikatan yang terjadi juga lebih tinggi. Sehingga mampu mengurangi konsentrasi klorida di dekat baja tulangan dan tingkat korosi menjadi lebih rendah (Abd El Fattah et al., 2018).

Konsentrasi NaOH akan berpengaruh pada kadar  $OH^-$  yang keberadaannya sangat penting dalam reaksi kristalisasi *fly ash*. Kadar  $OH^-$  yang sedikit menyebabkan tidak optimal reaksi ion  $Al^{3+}$  dan  $Si^{4+}$  pada *fly ash* (Subekti et al., 2008). Pada perendaman beton geopolimer di pesisir Pantai Kenjeran, konsentrasi NaOH yang lebih tinggi menunjukkan ketahanan terhadap penetrasi klorida yang lebih baik (Febryan, 2018).

#### **2.4. Ketebalan Lapisan**

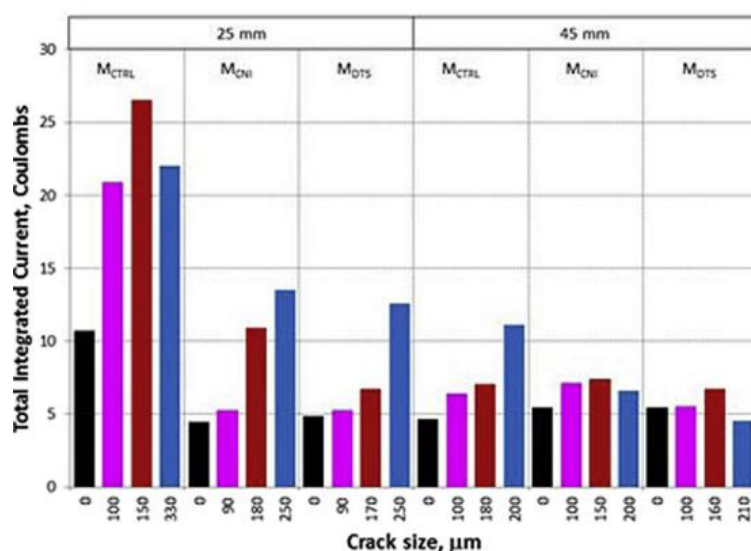
Beton memberikan perlindungan fisik dan kimia pada baja tulangan. Beton yang memiliki sifat alkali, akan inheren dengan lapisan pasifisasi pada permukaan tulangan baja. Sehingga beton dapat melindungi tulangan baja dari resiko terjadi korosi (Cement Concrete & Agregates Australia, 2009).

Permukaan beton dengan permeabilitas rendah akan melindungi tulangan baja. Perlindungan tulangan baja oleh beton selama reaksi pertukaran dengan senyawa kimia yang ada di dalam air laut akan menghasilkan  $Mg(OH)_2$  dan  $CaCO_3$  (Kwasny et al., 2018).

Ketika jumlah klorida dalam beton mencapai lapisan permukaan tulangan baja dan menembus lapisan pasif maka risiko korosi terjadi semakin tinggi.

Ketahanan beton berkurang dan mempengaruhi laju korosi tulangan baja. (Sirivivatnanon et al., 1999; Cement Concrete & Agregates Australia, 2009).

Ketebalan lapisan pada beton dapat memperpanjang masa pakai struktur beton yang terpapar lingkungan laut. Pemberian lapisan pada beton mampu menghambat intrusi ion korosif pada tulangan baja (Zhang et al., 2010). Ketebalan lapisan beton menjadi faktor penting yang mempengaruhi laju korosi baja tulangan pada beton. Laju korosi akan semakin lambat seiring menebalnya lapisan pada beton (Halim, 2017; Otieno et al., 2016).



**Gambar 2 - 9 Total arus korosi pada spesimen dengan ketebalan 25 mm dan 45 mm (Lopez-Calvo et al., 2018)**

Pada penelitian Halim (2017), beton OPC dengan ketebalan 4, 6, dan 8 cm menunjukkan ketebalan selimut pada beton sangat berpengaruh terhadap laju korosi tulangan baja. Penelitian Lopez-Calvo et al. (2018) ketebalan spesimen yang digunakan adalah 25 mm dan 45 mm. Spesimen beton dengan ketebalan 45 mm, sangat efektif memperlambat laju korosi yang terjadi meskipun dengan lebar retak 200  $\mu\text{m}$ . Sedangkan untuk spesimen beton dengan ketebalan 25 mm laju korosi lebih tinggi, dengan lebar retak 90  $\mu\text{m}$  (**Gambar 2 - 9**).

Hasil pengamatan Zhang et al. (2012), ketebalan lapisan geopolimer merupakan faktor yang memiliki dampak signifikan pada integritas lapisan geopolimer. Pengaruh ketebalan ini dapat dilihat dari perbandingan pada ketebalan 3 mm dan 5 mm yang mengalami siklus pasang-surut yang sama. Lapisan ketebalan

5 mm memiliki retakan yang lebih sedikit dan integritas lapisan yang baik dibandingkan pada lapisan ketebalan 3 mm.

## 2.5. Parameter Prediksi Masa Layan (Service Life)

Parameter yang dibutuhkan untuk memprediksi masa layan selama tahap inisiasi antara lain koefisien difusi klorida ( $D$ ), konsentrasi klorida permukaan ( $C_s$ ), nilai konsentrasi kritis klorida ( $C_{CR}$ ), waktu ( $t$ ), dan ketebalan/kedalaman ( $m$ ) (Hardianti et al., 2017).

Difusi merupakan salah satu mekanisme transport ion klorida yang umum digunakan pada skala eksperimen. Ada lebih dari satu mekanisme transport yang terlibat saat klorida masuk dalam beton selain difusi. Mekanisme transport yang dominan tergantung pada *exposure zone* pada lingkungan. Untuk struktur beton di *tidal zone*, mekanisme transport utama/dominan adalah difusi. (Cement Concrete & Agregates Australia, 2009) Proses difusi klorida merupakan perpindahan ion klorida pada air dari konsentrasi yang tinggi menuju konsentrasi rendah. Secara teoritis difusi dijelaskan pada *Fick's Second Law*.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

Penyelesaian analisis dari *Fick's Second Law* dituliskan dalam persamaan

$$C_x = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.5)$$

dimana,

$C_x$  = konsentrasi klorida pada kedalaman  $x$  (%)

$x$  = jarak dari permukaan terekspos (m)

$C_s$  = konsentrasi klorida pada permukaan (%)

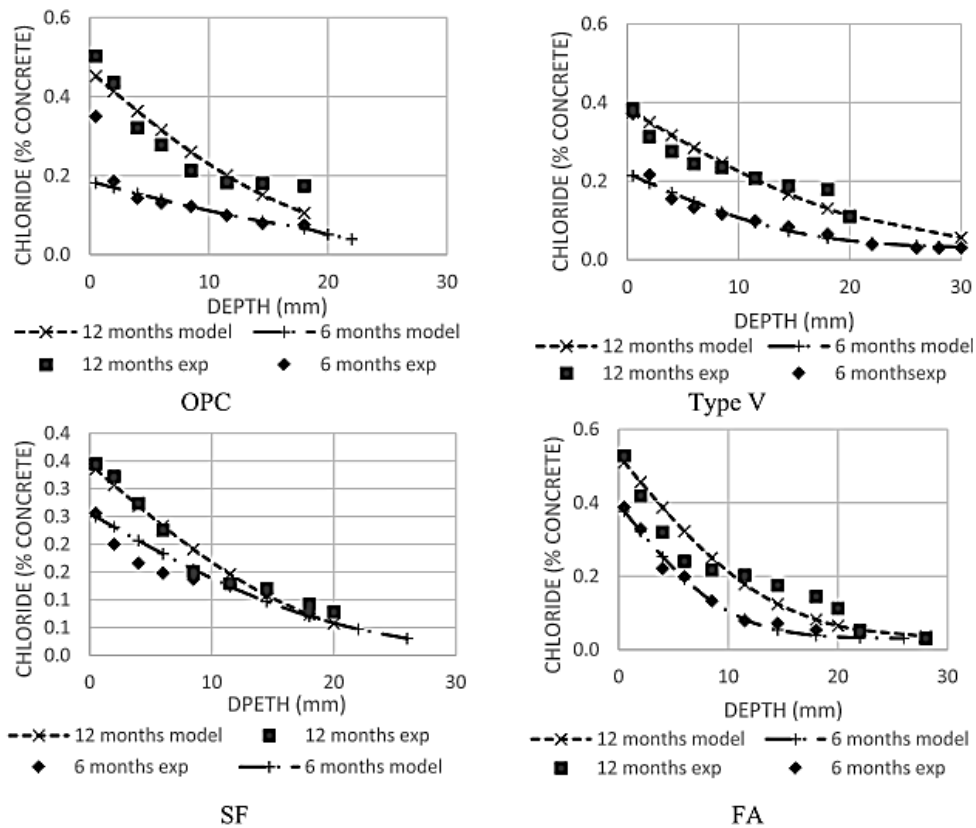
$D$  = koefisien difusi klorida, ( $m^2/s$ )

$t$  = waktu terkespos (s)

$\operatorname{erf}$  = *error function*

Dari persamaan *Fick's Second Law* dan *chloride profiling* (**Gambar 2 - 10**) akan didapatkan koefisien difusi klorida. Profil klorida memberikan informasi nyata penetrasi klorida pada beton yang penting sebagai parameter prediksi masa layan struktur beton (Luping, 2003).



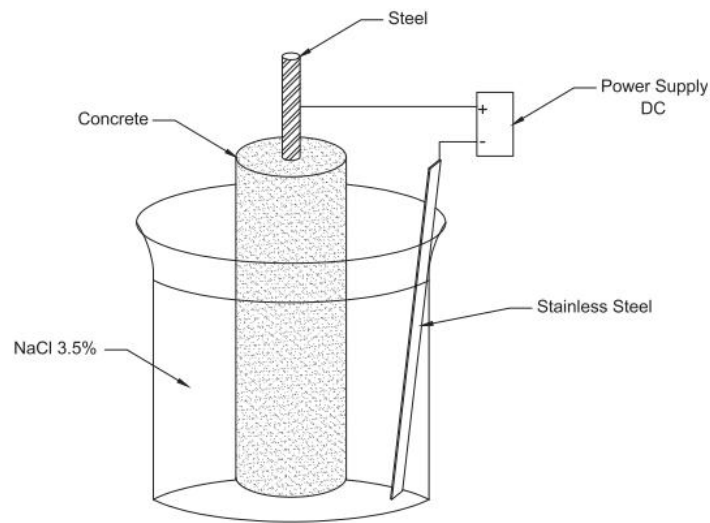


**Gambar 2 - 10 Chloride profiles dengan variasi campuran beton di tidal zone (Abd El Fattah et al., 2018)**

## 2.6. Laju Korosi Tulangan Baja

Induksi klorida pada beton bertulang merupakan faktor utama yang mempengaruhi terjadinya korosi pada tulangan baja. Untuk mengukur laju korosi yang terjadi dengan waktu singkat dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan teknik percepatan korosi (*Accelerated Corrosion Test*) (Halim, 2017).

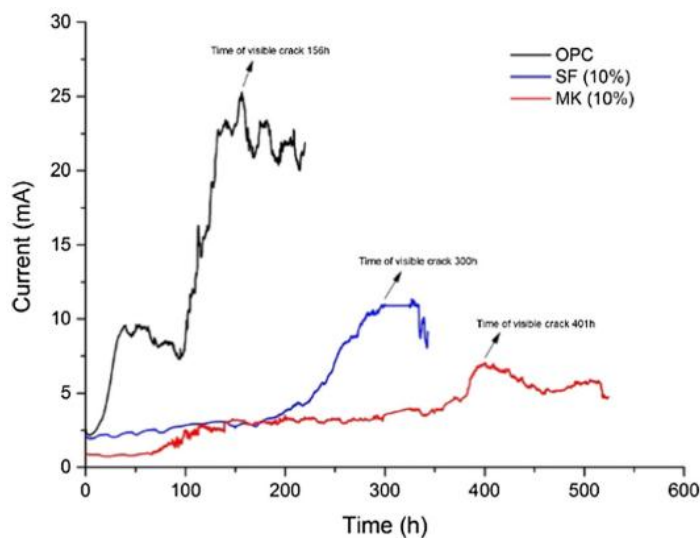
Metode percepatan korosi yang dapat digunakan dalam skala laboratorium adalah elektrokimia (*Electrochemical*). Secara sederhana metode percepatan korosi diilustrasikan pada **Gambar 2 - 11**. Metode ini menggunakan arus listrik dan larutan NaCl sebagai media rendaman. Pemberian arus listrik untuk menginisiasi dan mempercepat induksi klorida ke dalam beton benda uji. Induksi klorida akan berlangsung selama pengamatan visual timbul retak beton 0.4 mm (Halim, 2017).



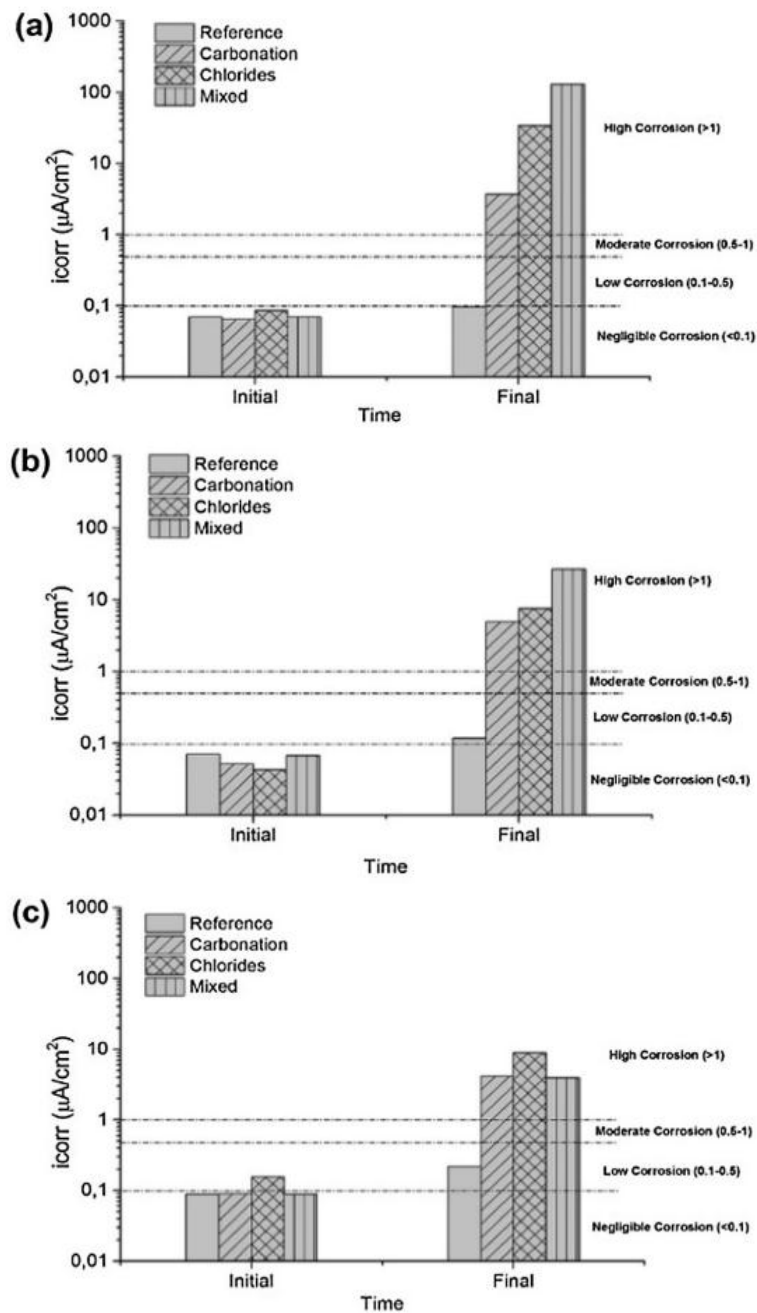
**Gambar 2 - 11** Ilustrasi sederhana *Accelerated Corrosion Test* dengan metode Elektrokimia (Aguirre-Guerrero et al., 2016)

Pada penelitian Aguirre-Guerrero et al. (2016) variasi material beton berpengaruh pada laju korosi tulangan baja. Variasi material yang digunakan antara lain, OPC, silika fume (SF), dan metakaolin (MK). Hasil pengukuran laju korosi pada

**Gambar 2 - 12.** Laju korosi beton OPC lebih tinggi dibandingkan dengan material lain. Retak yang terlihat pada beton OPC terjadi pada waktu 156 jam, sedangkan untuk material SF dan MK terjadi retak jauh lebih lama.



**Gambar 2 - 12** Kurva intensitas arus listrik dan waktu (Aguirre-Guerrero et al., 2016)

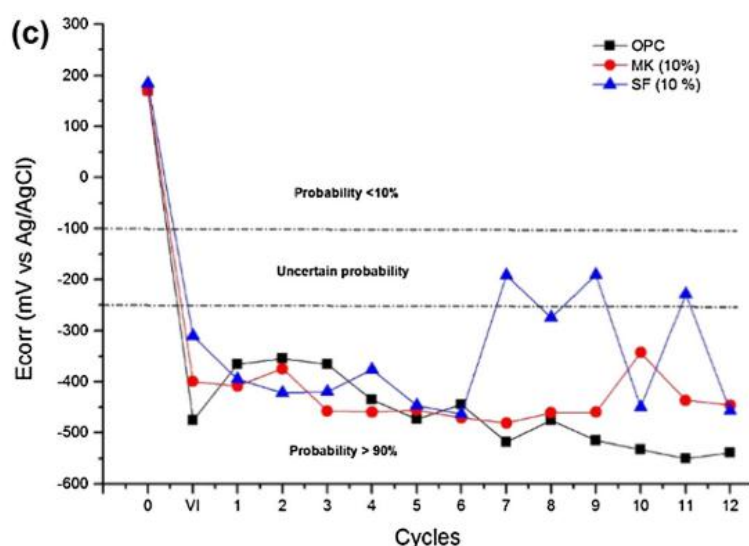


**Gambar 2 - 13** Initial dan Final  $i_{corr}$  beton (a) spesimen OPC (b) spesimen MK (c) spesimen SF (Aguirre-Guerrero et al., 2016)

Dari **Gambar 2 - 13**, berdasarkan nilai  $i_{corr}$  akhir benda uji dari spesimen OPC, SF, dan MK yang direndam di larutan agresif, termasuk pada tingkat korosi paling tinggi. Dapat dilihat senyawa karbon, klorida, maupun campuran kedua

senyawa digunakan sebagai media rendaman sangat mempengaruhi tingkat korosi yang terjadi.

Setelah menggunakan teknik percepatan korosi dengan menginduksi klorida, pengamatan probabilitas terjadinya korosi kisaran 90% ditunjukkan pada **Gambar 2 - 14**. Hasil pengamatan pada semua variasi material beton yaitu OPC, campuran SF, dan campuran MK menunjukkan bahwa korosi aktif selama waktu uji. Tidak ada perubahan besar pada semua spesimen selama siklus 1-6. Namun mulai dari siklus 7, campuran MK dan SF memiliki nilai potensial positif yang lebih besar dibandingkan dengan OPC (Aguirre-Guerrero et al., 2016).



**Gambar 2 - 14** Perubahan E<sub>corr</sub>, korosi yang terjadi pada lingkungan klorida (Aguirre-Guerrero et al., 2016)

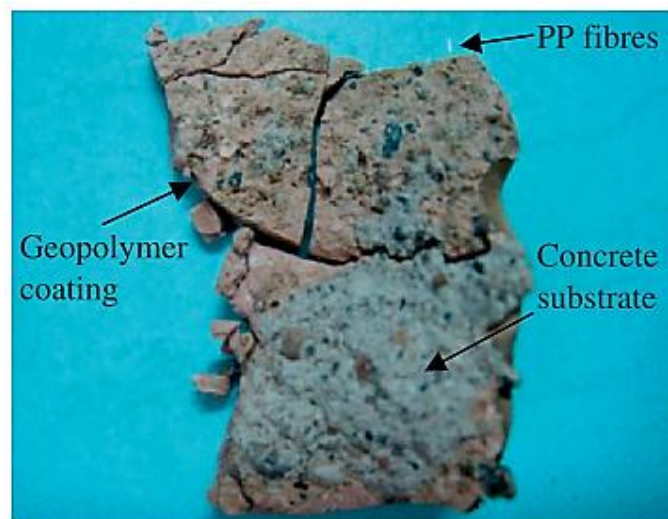
## 2.7. Penelitian-penelitian sebelumnya

### 2.7.1. (Zhang et al., 2012)

Pozzolan yang digunakan sebagai bahan dasar *coating* geopolimer dalam penelitian Zhang et al (2012) adalah Metakaolin. *Coating* diaplikasikan pada *accropodes* (pemecah gelombang). Lingkungan pemaparan adalah *tidal zone* dengan 3 posisi tempat *coating* yaitu,

1. SI (daerah kering/tidak terkena gelombang air laut secara langsung). Tebal *coating* 3 mm.
2. SII (daerah yang terkena gelombang air laut langsung tetapi tertutupi pemecah gelombang/dibalik pemecah gelombang). Tebal *coating* 3 mm
3. SIII (daerah yang terkena gelombang air laut langsung). Tebal *coating* 5 mm.

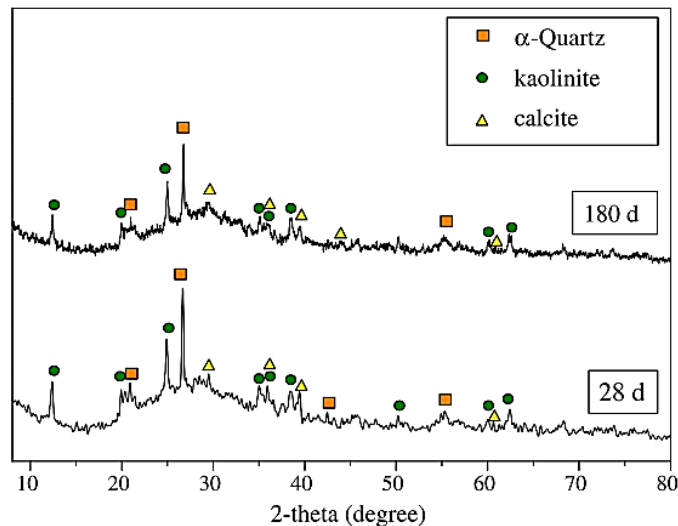
*Setting time coating* geopolimer terjadi selama 4-6 jam. Hasil pengamatan saat *coating* geopolimer dilepas dari beton accropodes ditampilkan pada **Gambar 2 - 15** Terdapat sisa lapisan beton yang terkelupas saat *coating* geopolimer di daerah SIII dipaksa untuk dilepas. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan *coating* geopolimer melekat kuat pada beton lama (*accropodes*) dan mampu menahan gelombang air laut.



**Gambar 2 - 15 Lapisan coating geopolimer yang terlepas dari accropodes (Zhang et al., 2012)**

Pada geopolimer, sangat sedikit terbentuk calcite silicate hydrates (C-S-H). Hasil XRD pada **Gambar 2 - 16** menunjukkan bahwa terdapat kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) dalam jumlah yang sedikit dan tidak ditemukannya sulfat selama 180 hari pada *coating* geopolimer. Lapisan geopolimer yang

kompak dan sedikitnya C-S-H, memberikan pengaruh pada lambatnya penetrasi ion dan karbonasi yang terjadi.



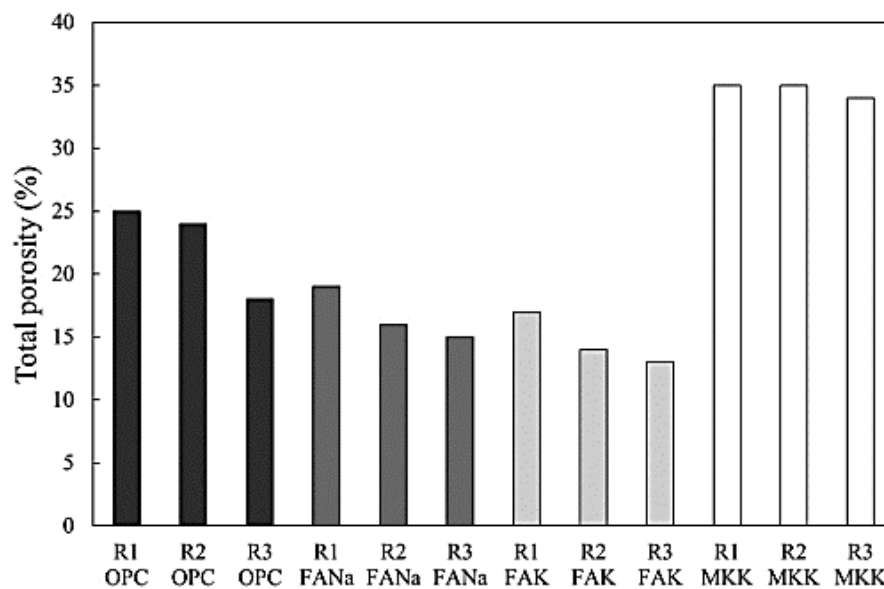
**Gambar 2 - 16 Hasil XRD geopolimer SIII pada umur 28 dan 180 hari  
(Zhang et al., 2012)**

Kelembapan atmosfer dan ketebalan lapisan geopolimer merupakan faktor yang memiliki dampak signifikan pada integritas lapisan geopolimer. Retak yang muncul pada SI lebih lebar dibandingkan pada SII, dimana tebal lapisan keduanya 3 mm. Kontak langsung dengan air laut secara berkala mampu mengurangi penyusutan pada lapisan *coating*. Pengaruh ketebalan ini dapat dilihat dari perbandingan pada tipe SII dan SIII yang mengalami siklus pasang-surut yang sama. Lapisan SIII dengan ketebalan 5 mm memiliki retakan yang lebih sedikit dan integritas lapisan yang baik dibandingkan pada lapisan SII dengan ketebalan 3 mm.

### 2.7.2. (Tittarelli et al., 2018)

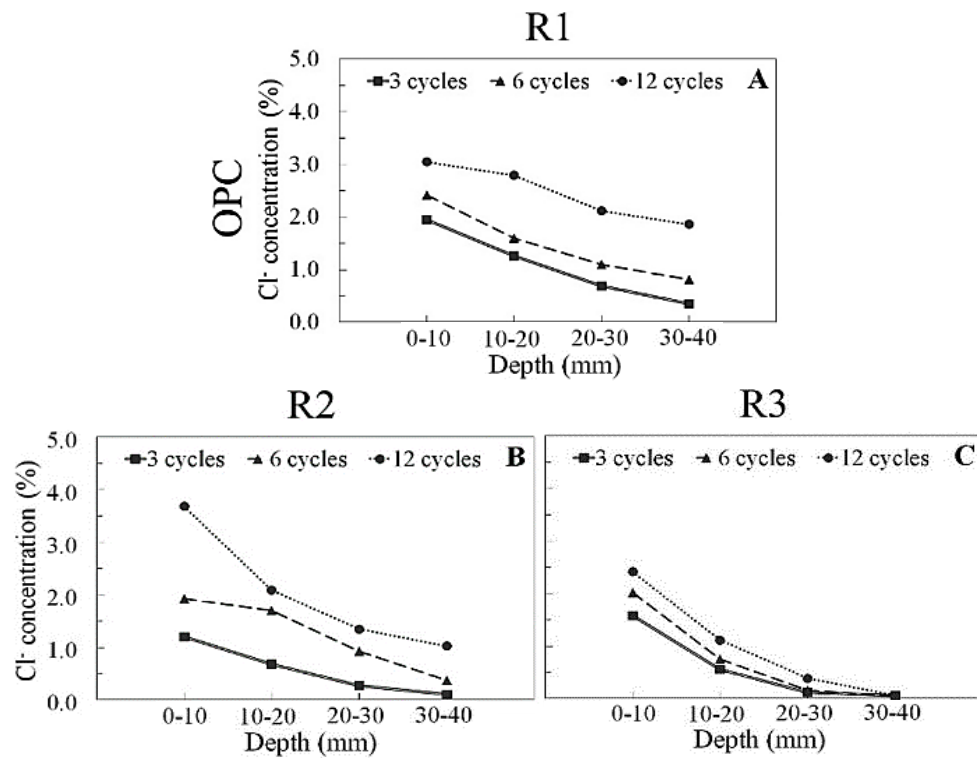
Penelitian ini membandingkan material bahan dasar mortar berupa OPC, metakaolin, dan *fly ash* kelas F. Variasi kuat tekan mortar, yaitu R1 ( $\geq 10$  MPa), R2 ( $\geq 15$  MPa), dan R3 ( $\geq 25$  MPa). Dari hasil penelitian, porositas total pada mortar *fly ash* paling kecil sebesar 13-19% dibandingkan dengan lainnya. Pada mortar OPC, porositas total sebesar

12.5-25%. Sementara itu, mortar metakaolin memiliki porositas paling tinggi yaitu 34-35%. **Gambar 2 - 17** menunjukkan perbandingan porositas total mortar. Pada geopolimer berbahan dasar metakaolin membutuhkan air yang lebih banyak selama proses pencampuran. Hal ini dipengaruhi karena bentuk partikel dan *specific surface area* (luas permukaan) yang lebih tinggi dibandingkan *fly ash*. Sehingga air dalam pencampuran metakaolin lebih banyak menguap dan menjadikan mortar metakaolin lebih berpori.

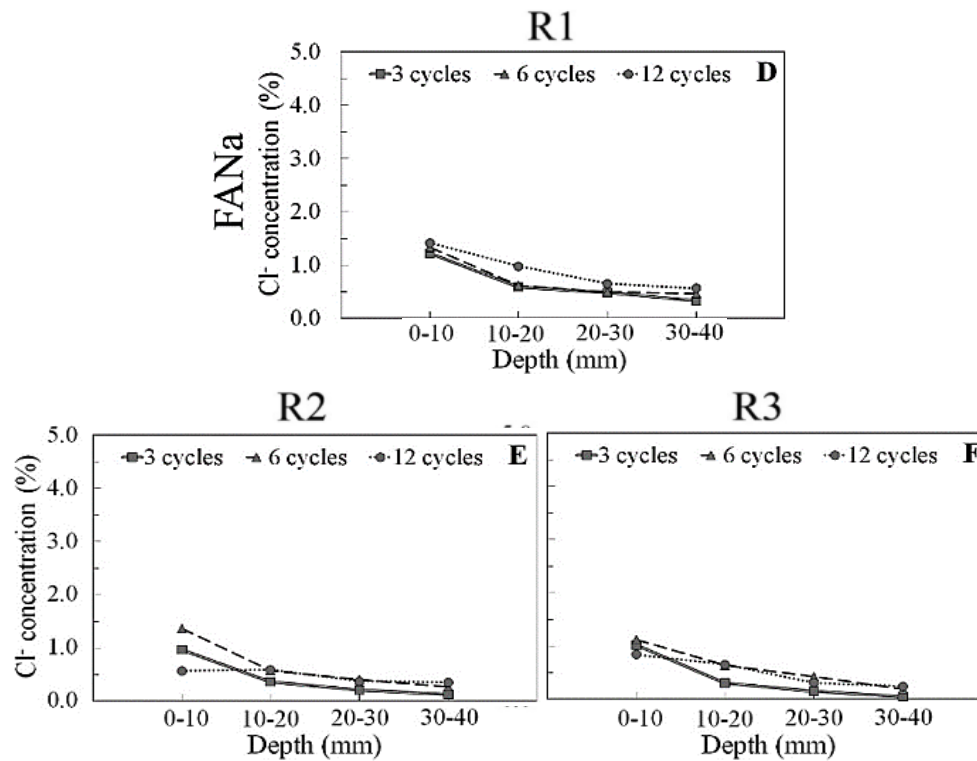


**Gambar 2 - 17** Porositas Total dari mortar OPC dan geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan metakaolin (Tittarelli et al., 2018)

Dari ketiga variasi mortar, mortar *fly ash* paling tahan terhadap penetrasi ion klorida pada kedalaman 10-20 mm selimut beton. Konsentrasi klorida bebas pada mortar *fly ash* sekitar 50% dan 70% lebih rendah dari mortar OPC dan metakaolin. Grafik konsentrasi klorida bebas pada mortar ditampilkan pada **Gambar 2 - 18** dan **Gambar 2 - 19**. Konsentrasi klorida makin menurun ketika kuat tekan mortar meningkat. Selain itu, makin kecil porositas mortar maka makin tinggi resistensi mortar dari penetrasi klorida. Konsentrasi klorida bebas pada mortar sangat mempengaruhi



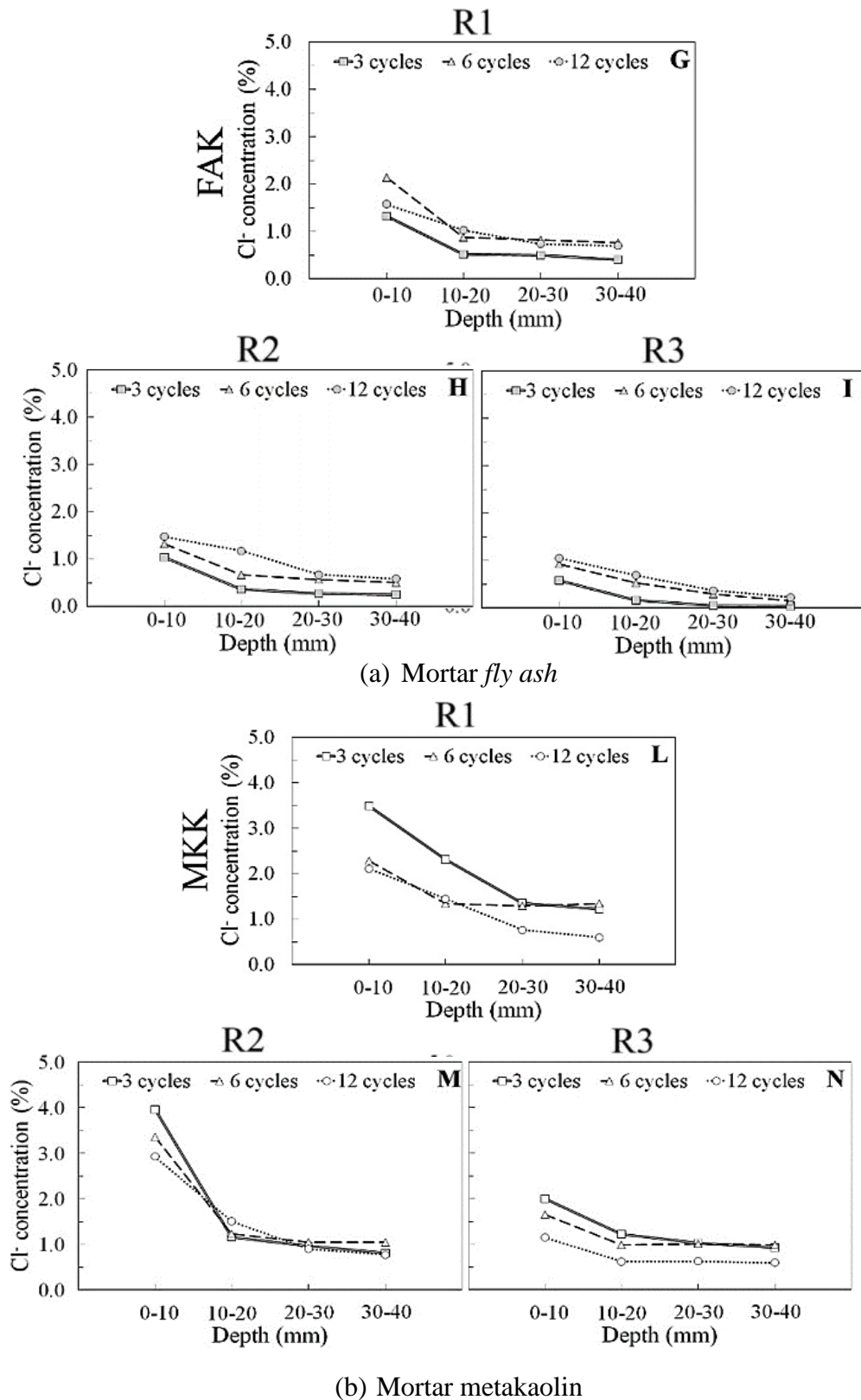
(a) Mortar OPC



(b) Mortar fly ash

**Gambar 2 - 18** Konsentrasi klorida bebas pada (a) mortar OPC dan (b) geopolimer berbahan dasar fly ash (NaOH) yang direndam dalam larutan NaCl 3.5% (Tittarelli et al., 2018)



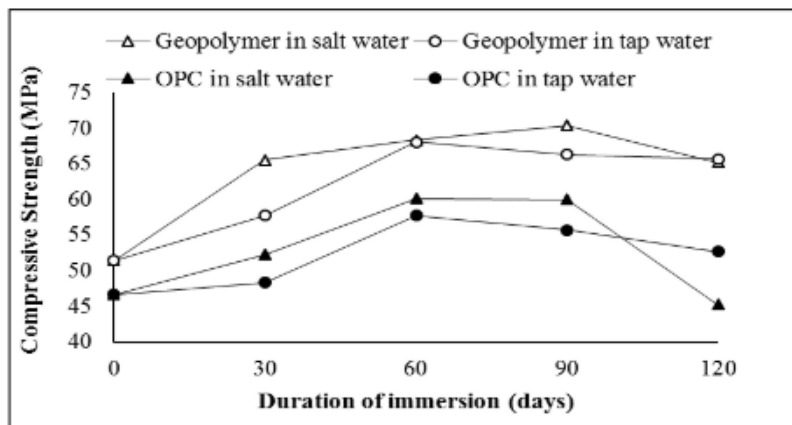


**Gambar 2 - 19** Konsentrasi klorida bebas pada (a) mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* (KOH) dan (b) metakaolin (KOH) yang direndam dalam larutan NaCl 3.5% (Tittarelli et al., 2018)

### 2.7.3. (Halim, 2017)

Penelitian Halim (2017) membandingkan beton OPC dan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* kelas F dengan ketebalan selimut beton 4, 6, dan 8 cm. Untuk membandingkan ketahanan beton terhadap penetrasi klorida, benda uji direndam pada larutan NaCl 3.5% hingga umur beton 120 hari. Kemudian diambil sampel bongkahan beton dengan kedalaman tertentu untuk menentukan konsentrasi klorida pada beton. Dari data tersebut dapat ditentukan probabilitas korosi yang terjadi. Selain itu, metode percepatan korosi dilakukan dalam penelitian ini guna mengetahui laju korosi yang terjadi pada beton OPC maupun beton geopolimer direndam dalam larutan NaCl 5% dengan variasi tebal selimut.

Kuat tekan beton geopolimer yang direndam pada air garam ataupun air biasa lebih tinggi dibandingkan beton OPC. Nilai kuat beton OPC yang direndam pada air garam mengalami penurunan dibandingkan direndam pada air biasa selama 120 hari. Sedangkan nilai kuat tekan beton geopolimer untuk kedua metode perendaman pada umur 120 hari tidak terlalu jauh penurunannya. Persentase penurunan kuat tekan geopolimer sebesar 0.9%. Sedangkan persentase penurunan kuat tekan beton OPC jauh lebih besar yaitu 24.64%. Grafik kuat tekan dengan waktu perendaman dapat dilihat pada **Gambar 2 - 20**.



**Gambar 2 - 20** Grafik nilai kuat tekan beton OPC dan geopolimer (Halim et al., 2017)

Beton geopolimer mengalami penurunan kuat tekan namun tidak terlalu jauh dibandingkan dengan beton OPC. Hal ini dikarenakan kalsium oksida pada *fly ash* bereaksi dengan NaCl membentuk kalsium silikat klorida ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2$ ). Meskipun tidak banyak kandungan kalsium pada *fly ash*, kalsium mudah untuk bereaksi dengan senyawa lain.

Ketebalan selimut beton mempengaruhi laju korosi. Laju korosi akan semakin lambat seiring menebalnya selimut beton. Pengukuran arus pada beton geopolimer lebih kecil dibandingkan beton OPC. Hal ini membuktikan bahwa beton geopolimer lebih resistan. Laju korosi yang terjadi pada beton geopolimer lebih kecil dibandingkan pada beton OPC. Untuk tebal selimut 6 dan 8 cm, beton OPC maupun geopolimer memiliki laju korosi yang dikategorikan *poor* sesuai dengan ASTM G1-90 Reapp. 99. Sedangkan tebal selimut 4 cm dikategorikan *unacceptable*.

#### **2.7.4. (Tarmidzi, 2017)**

Tarmidzi (2017) melakukan penelitian balok bertulang dengan menggunakan variasi 3 tipe *patching repair* yaitu mortar geopolimer, mortar geopolimer + serat PVA dan sikamonotop 613IND. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur dari balok bertulang yang diberikan *patching repair* meningkat dari balok kontrol (tanpa *patching repair*). Nilai daktilitas juga meningkat yaitu 12.55 untuk balok dengan bahan repair mortar geopolimer + serat PVA, 3.58 untuk balok dengan bahan repair sikamonotop 613IND, sedangkan untuk balok kontrol nilai daktilitas yang dihasilkan sebesar 1.41. Penggunaan mortar geopolimer sebagai *patching repair* pada balok beton bertulang memberikan hasil yang baik dalam perbaikan beton bertulang.

#### **2.7.5. (Febryan, 2018)**

Pada penelitian ini benda uji beton geopolimer dan beton OPC direndam langsung dalam lingkungan air laut. Konsentrasi NaOH beton

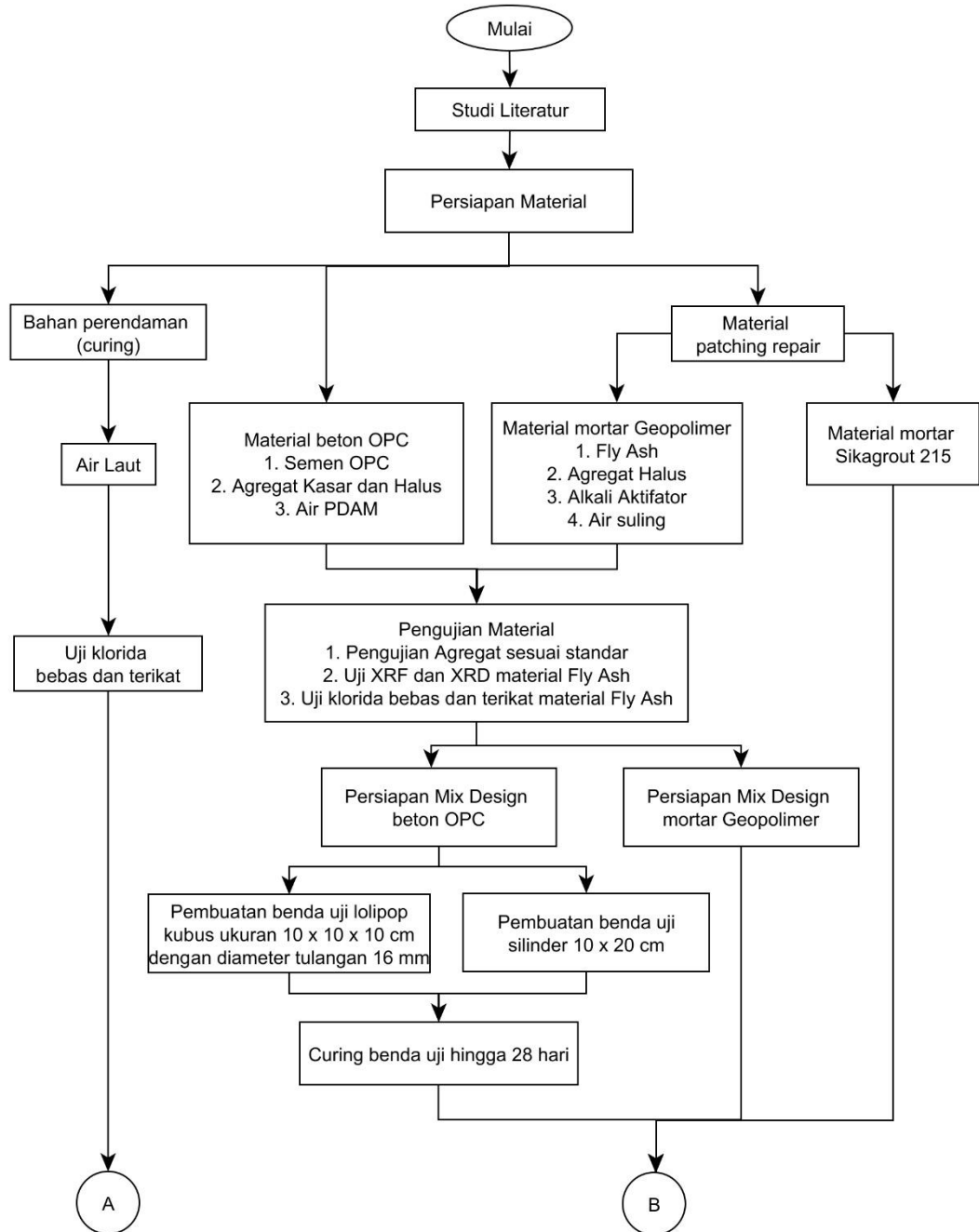
geopolimer dengan variasi 10M dan 12M. Pelarutan NaOH *flakes* menggunakan 2 jenis air, yaitu air suling dan air laut. Perendaman benda uji dilakukan ketika umur beton 1 hari dan 28 hari dengan metode *moist curing* dan *seawater curing*. Lokasi untuk *seawater curing* berada di pesisir Pantai Kenjeran, Surabaya.

Perlakuan *moist curing* selama 28 hari sebelum di rendam dalam air laut memberikan hasil yang lebih baik. Beton geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dengan pori yang lebih kecil. Persentase klorida yang terikat pada beton geopolimer sebesar 0.444% untuk NaOH 12M. Pada perendaman beton geopolimer di pesisir Pantai Kenjeran, konsentrasi NaOH 12M menunjukkan ketahanan terhadap penetrasi klorida yang lebih baik dibandingkan 10M.

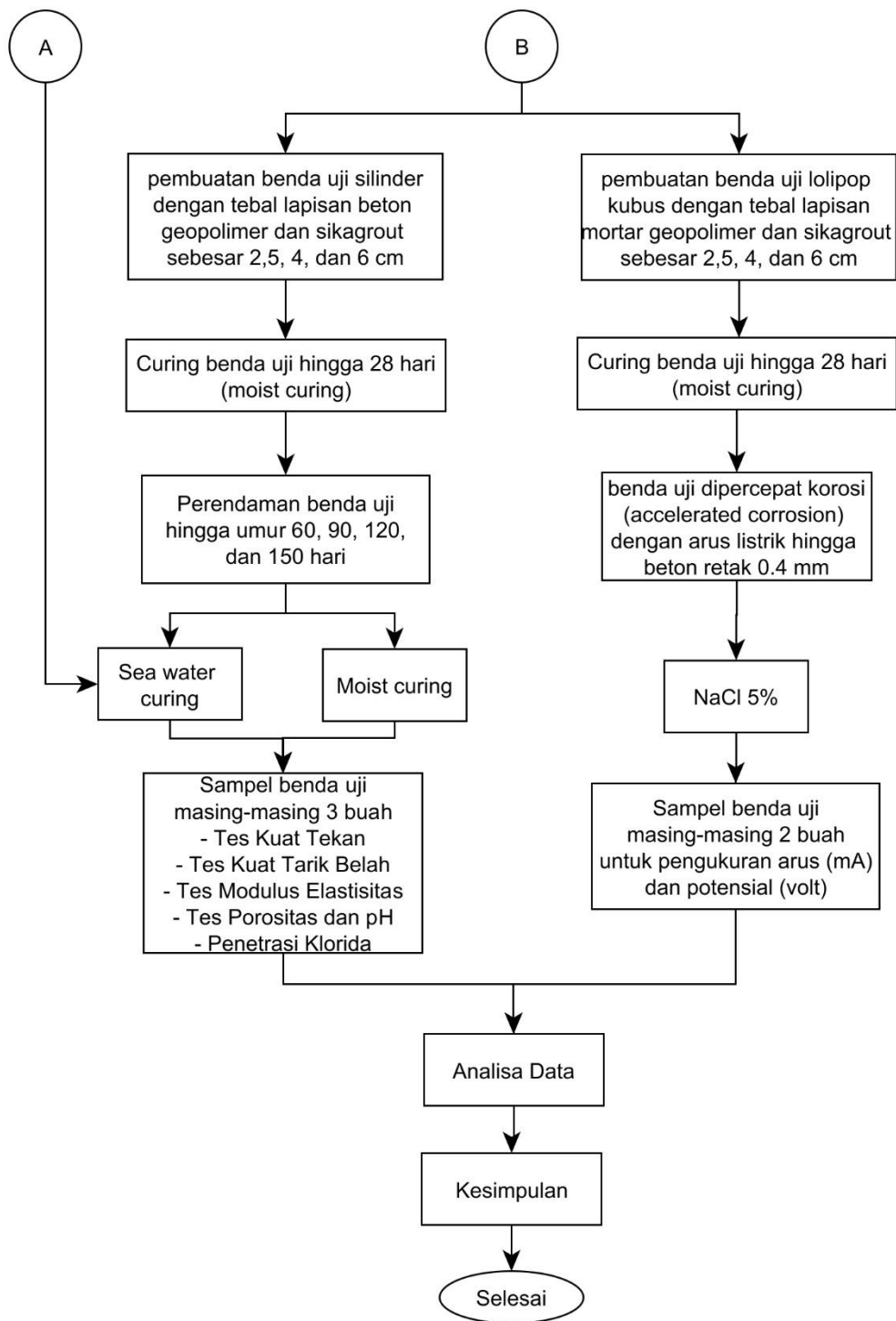
## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Umum

Pada bab ini akan dibahas rancangan penelitian berupa detail langkah kerja penelitian di laboratorium dan pengujian yang akan dikerjakan. Diagram alir penelitian seperti pada **Gambar 3 - 1** dan **Gambar 3 - 2**.



**Gambar 3 - 1 Diagram Alir Penelitian**



**Gambar 3 - 2 Lanjutan Diagram Alir Penelitian**

### 3.2. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur adalah upaya untuk mendapatkan pengetahuan dan pemahaman tentang penelitian yang akan dilakukan. Literatur yang dibaca

berupa jurnal, tesis/disertasi, prosiding, peraturan dan standar nasional maupun internasional serta penelitian-penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan penelitian ini. Sumber literatur yang didapatkan berasal dari *browsing* internet, buku, dan sumber lain yang didapatkan dari perpustakaan.

Literatur yang digunakan mencakup pembahasan tentang geopolimer terutama berbahan dasar *fly ash* dan ketahanan geopolimer terhadap penetrasi ion klorida di lingkungan air laut. Pembahasan tentang proses dan bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan geopolimer, serta mempelajari proses pengujian yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan beton OPC yang dilapisi geopolimer terhadap penetrasi ion klorida.

### **3.3. Persiapan Material**

Pada tahap ini seluruh material yang digunakan dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat fisik dan komposisi kimia material tersebut. Pengujian yang dilakukan berdasarkan standar ASTM. Adapun material-material yang digunakan yaitu:

1. *Fly ash*
2. Semen OPC
3. Agregat Kasar dan Agregat Halus
4. Alkali Aktivator: Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )
5. Sikagrout 215
6. Air suling
7. Baja Tulangan
8. *Epoxy Resin* (Sikagard 63N dan Sikadur 732)

#### **3.3.1. *Fly ash***

Pembuatan mortar geopolimer menggunakan *fly ash* sebagai bahan dasar. *Fly ash* yang digunakan merupakan *fly ash* kelas F berasal dari PT. Suralaya silo 1-4, Banten (**Gambar 3 - 3**).



**Gambar 3 - 3 Fly ash Suralaya Silo 1-4**

### **3.3.2. Semen**

Pembuatan beton OPC menggunakan semen tipe 1 (*ordinary portland cement*).

### **3.3.3. Agregat Kasar dan Agregat Halus**

Agregat kasar (**Gambar 3 - 4**) dan agregat halus (**Gambar 3 - 5**) yang dijual di pasaran digunakan dalam pembuatan beton OPC, *patching repair* (mortar geopolimer). Kedua material tersebut dilakukan pengujian sehingga memenuhi persyaratan material pembuatan beton dan mortar sesuai standar.



**Gambar 3 - 4 Agregat Kasar**





**Gambar 3 - 5 Agregat Halus**

#### **3.3.4. Alkali Aktivator**

Alkali aktivator yang digunakan merupakan campuran dari Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) yang didapatkan di toko bahan-bahan kimia.

##### **a. Sodium Hidroksida (NaOH)**

Sodium Hidroksida (NaOH) yang dijual secara bebas dengan sebutan Soda Api dalam bentuk padatan (*flakes*) (**Gambar 3 - 6**). Konsentrasi larutan NaOH yang digunakan adalah 12M.

Perhitungan yang digunakan untuk menghasilkan larutan NaOH:

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

dimana,

$n$  = jumlah mol zat terlarut (mol)

$V$  = volume larutan (liter)

$M$  = kemolaran larutan (mol/liter)

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

dimana,

Massa NaOH = berat NaOH yang dibutuhkan (gram)

$n$  mol = jumlah zat terlarut (mol)

$Mr$  = massa relative atom (gram/mol)

Berikut langkah-langkah membuat larutan NaOH 8M:

1. Untuk melarutkan padatan NaOH dalam 1 liter aquades

$$\begin{aligned}n &= V \times M \\&= 1 \text{ liter} \times 12 \text{ mol/liter} \\&= 12 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa NaOH} &= n \text{ mol} \times M_r \\&= 12 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} \\&= 480 \text{ gram}\end{aligned}$$

2. Menimbang padatan NaOH seberat 480 gram.
3. Memasukkan padatan NaOH seberat 480 gram kedalam labu ukur.
4. Memasukkan aquades dalam labu ukur berisi padatan NaOH hingga volumenya 1 liter (1000 cc).
5. Mengaduk hingga padatan NaOH terlarut seluruhnya.
6. Mendinginkan larutan NaOH hingga sesuai suhu ruangan sebelum digunakan untuk membuat alkali aktivator.



**Gambar 3 - 6 NaOH flakes**

b. Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) atau biasa disebut *waterglass* (**Gambar 3 - 7**) yang digunakan merupakan tipe BE-52. Komposisi kimia sodium silikat adalah

$\text{Na}_2\text{O}$  18,5%,  $\text{SiO}_2$  36,4%, dan  $\text{H}_2\text{O}$  45,1%. Bentuk sodium silikat berupa cairan kental dalam keadaan siap pakai berasal dari PT Kasmaji Inti Utama.



**Gambar 3 - 7  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$**

### **3.3.5. Sikagrout 215**

Sikagrout 215 yang digunakan sebagai bahan pembanding untuk *patching repair* (mortar geopolimer) merupakan produksi dari PT. Sika Indonesia. Sikagrout 215 dapat digunakan sebagai material *grouting* untuk struktur di laut karena sifatnya yang tidak korosif. Rekomendasi tebal lapisan menggunakan Sikagrout 215 adalah 20-100 mm, dengan *setting time* material 4-8 jam. Kuat tekan maksimum dicapai saat umur 28 hari adalah  $\pm 65$  MPa.

### **3.3.6. Air Suling**

Air suling yang digunakan berasal dari toko bahan-bahan kimia. Air suling digunakan dalam melarutkan  $\text{NaOH}$  flakes, untuk menghindari kontaminasi dengan mineral/senyawa lain.

### **3.3.7. Baja Tulangan**

Tulangan yang digunakan dalam penelitian ini berupa tulangan polos berdiameter 16 mm produksi dari PT. Bhirawa Steel. Spesifikasi tulangan

ditampilkan pada **Gambar 3 - 8**. Tulangan digunakan untuk benda uji lolipop kubus yang dibuat dalam penelitian ini.

**Tabel 3 - 1 Spesifikasi tulangan baja polos diameter 16 (PT Bhirawa Steel)**

Spesifikasi			Mechanical Properties					
Tipe produk	Size	Grade	Standard			Actual		
			YP	TS	EL	YP	TS	EL
Round	P.16	BJTP 24	24	39	20	33,89	46,14	32,10

Catatan:

YP = *Yield Peak* (Tegangan Leleh) (Kg/mm<sup>2</sup>)

TS = *Tensile Strength* (Tegangan Tarik) (Kg/mm<sup>2</sup>)

EL = *Elongation* (Deformasi) (%)



**Gambar 3 - 8 Baja tulangan polos**

### 3.3.8. Epoxy Resin

Epoxy resin menggunakan produk PT Sika Indonesia yaitu Sikagard 63N dan Sikadur 732.

- a. Sikagard 63N (**Gambar 3 - 9** dan **Gambar 3 - 10**) digunakan sebagai *protective coating* untuk beton dan baja tulangan. Karakteristik material memiliki ketahanan mekanis dan kimia yang baik. Prosedur pengaplikasian Sikagard 63N sebagai berikut:

- 1) Menyiapkan peralatan yang digunakan.

- Timbangan 25 kg
- Baskom

- Pengaduk
  - Kuas
  - Sarung tangan dan masker
  - Pan
  - Alas koran/karung/plastik
- 2) Menyiapkan bahan yang dibutuhkan.
    - Sikagard part A (resin)
    - Sikagard part B (*hardener*)
    - Tulangan/beton yang akan dilapisi (*coating*)
  - 3) Membersihkan permukaan beton atau tulangan baja sebelum dilapisi dengan *epoxy* resin. Permukaan harus rata, bersih, kering dan bebas dari semua kontaminan seperti debu, minyak, pelapis, dan lain sebagainya
  - 4) Menyiapkan semua bahan sesuai dengan komposisi campuran dengan perbandingan berat part A:B yaitu 83:17.
  - 5) Mengaduk campuran part A dan B dengan pengaduk selama kurang lebih 3 menit.
  - 6) Menyiapkan pan yang telah diberi alas sehingga *coating* tidak menetes langsung pada pan.
  - 7) Mengoleskan *epoxy* resin yang telah dicampur pada tulangan hingga batas garis yang ditentukan.
  - 8) Setelah tulangan selesai dilapisi, tulangan dibiarkan selama 24 jam dan terlindungi dari hujan, kondensasi, dan air.
  - 9) Pengaplikasian *epoxy* resin disarankan tidak lebih 15 menit setelah proses pengadukan. *Epoxy* resin sudah mulai mengeras setelah 30 menit sehingga sulit dilakukan pelapisan lagi pada tulangan.

Direkomendasikan *coating* sebanyak 2 (dua) lapis menyesuaikan kebutuhan. Perlakuan perendaman diatur supaya penetrasi ion klorida yang terjadi di daerah tertentu, sehingga daerah-daerah yang tidak diinginkan diberikan *epoxy* resin.

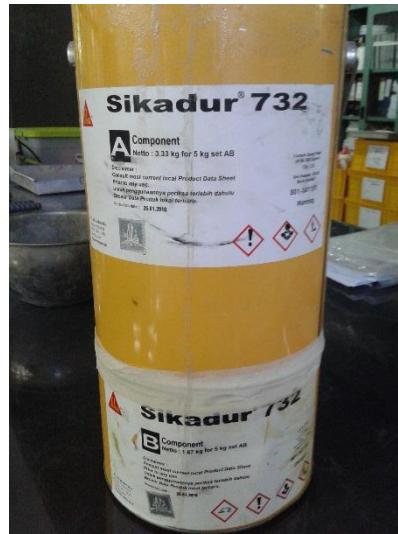


**Gambar 3 - 9 Sikagard 63N Component A**



**Gambar 3 - 10 Sikagard 63N Component B**

- b. Sikadur 732 (**Gambar 3 - 11**) digunakan sebagai *bonding agent* antara beton OPC dengan *patching repair*. Permukaan beton harus bersih sebelum diberikan sikadur 732. Dalam keadaan lapisan sikadur 732 yang masih lengket, beton segar bisa disatukan dengan beton lama.



**Gambar 3 - 11 Sikadur 732**

### 3.4. Pengujian Material

Pengujian material yang digunakan dalam penelitian dimaksudkan untuk memastikan material yang digunakan sesuai persyaratan material untuk pembuatan beton OPC dan mortar geopolimer.

#### 3.4.1. Agregat Kasar

- a. Percobaan Berat Jenis Batu Pecah (ASTM C 127-01)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai berat jenis batu pecah (SSD).

$$\text{Rumus : Berat Jenis batu pecah} = \frac{B}{B-C} \quad (3.3)$$

dimana,

B = berat batu pecah SSD di udara (kg)

C = berat batu pecah di air (kg)

- b. Percobaan Berat Volume Batu Pecah (ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai berat volume batu pecah.

$$\text{Rumus : Berat Jenis batu pecah} = \frac{G-T}{V} \quad (3.4)$$

dimana,

T = berat silinder (kg)

G = berat silinder + batu pecah (kg)

V = volume silinder (m<sup>3</sup>)

- c. Percobaan Kelembapan Batu Pecah (ASTM C 566-97 Reapp. 04)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai kelembapan batu pecah.

$$\text{Rumus : } p = \frac{W-D}{D} \times 100 \quad (3.5)$$

dimana,

p = kelembapan batu pecah (%)

W = berat batu pecah asli (gr)

D = berat batu pecah kering oven (gr)

- d. Percobaan Air Resapan pada Batu Pecah (ASTM C 127-01)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai kadar air resapan batu pecah.

$$\text{Rumus : } \text{Kadar air resapan, \%} = \frac{B-A}{A} \times 100\% \quad (3.6)$$

dimana,

B = berat batu pecah SSD (kg)

A = berat batu pecah kering oven (kg)

- e. Tes Kebersihan Batu Pecah Terhadap Lumpur (ASTM C 117-95)

Tujuan : Mengetahui berapa kadar lumpur batu pecah.

$$\text{Rumus : } A = \frac{B-C}{B} \times 100 \quad (3.7)$$

dimana,

A = Persentase kadar lumpur (%)

B = berat batu pecah kering (gr)

C = berat batu pecah bersih kering oven (gr)

- f. Tes Keausan Agregat Kasar (ASTM C 131-03)

Tujuan : Mengetahui persentase keausan batu pecah dengan mesin Los Angeles.

$$\text{Rumus : } \text{Keausan batu pecah} = \frac{W_1-W_2}{W_1} \times 100\% \quad (3.8)$$

dimana,

W<sub>1</sub> = berat batu pecah sebelum diabrasi (gr)

W<sub>2</sub> = berat batu pecah setelah diabrasi (gr)

- g. Analisa Saringan Batu Pecah (ASTM C 136-01)

Tujuan : Mengetahui distribusi ukuran butiran/gradasi batu pecah.



**Tabel 3 - 2 Ukuran Lubang Ayakan**

No.	3"	3/2"	3/4"	3/8"	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	Pan
Ukuran Saringan											
Ukuran Lubang (mm)	76,2	38,1	19,1	9,5	4,76	2,38	1,1	0,59	1,297	0,149	0

### 3.4.2. Agregat Halus

- a. Percobaan Berat Jenis Pasir (ASTM C 128-01)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai berat jenis pasir (SSD).

$$\text{Rumus : Berat Jenis pasir} = \frac{S}{B+S-C} \quad (3.9)$$

dimana,

S = berat pasir kondisi SSD (gr)

B = berat piknometer + air (gr)

C = berat piknometer + pasir + air (gr)

- b. Percobaan Berat Volume Pasir (ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai berat volume pasir.

Rumus : Rumus yang digunakan mengacu pada persamaan 3.4.

- c. Percobaan Kelembapan Pasir (ASTM C 566-97 Reapp. 04)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai kelembapan pasir.

Rumus : Rumus yang digunakan mengacu pada persamaan 3.5.

- d. Percobaan Air Resapan pada Pasir (ASTM C 128-01)

Tujuan : Mengetahui berapa nilai kadar air resapan pasir.

$$\text{Rumus : Kadar air resapan, \%} = \frac{S-A}{A} \times 100 \quad (3.10)$$

dimana,

S = berat pasir kondisi SSD (gr)

A = berat pasir kondisi kering oven (gr)

- h. Tes Kebersihan Pasir Terhadap Lumpur (ASTM C 117-03)

Tujuan : Mengetahui berapa kadar lumpur dalam pasir.

Rumus : Rumus yang digunakan mengacu pada persamaan 3.7.

- i. Tes Kebersihan Pasir Terhadap Bahan Organik (ASTM C 40-99)

Tujuan : Mengetahui kadar bahan organik dalam pasir.

Prosedur :

1. Botol bening diisi pasir sampai kurang lebih 130 ml.
  2. Tambahkan NaOH 3% sampai 200 ml dan tutup rapat dan kocok botol kurang lebih 10 menit.
  3. Diamkan selama 24 jam.
  4. Selanjutnya amati cairan di atas permukaan pasir yang ada dalam botol, bandingkan warnanya.
  5. Jika warnanya cairan dalam botol berisi cairan agregat lebih tua (coklat) warnanya dari pembanding, berarti dalam agregat berkadar bahan organik terlalu tinggi.
- e. Analisa Saringan Pasir (ASTM C 136-01)

Tujuan : Mengetahui distribusi ukuran butiran/gradasi pasir.

### 3.5. Mix design patching repair

#### 3.5.1. Mix design mortar Geopolimer

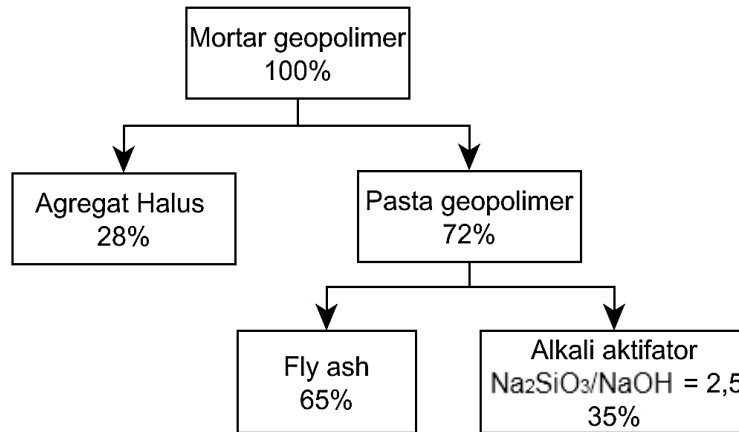
Komposisi campuran mortar geopolimer yang direncanakan mencapai target kuat tekan diatas 40 MPa, berdasarkan komposisi campuran pada penelitian Tarmidzi (2017). Dengan komposisi campuran yang ditampilkan dalam **Tabel 3 - 3** didapatkan kuat tekan mortar geopolimer sebesar 47.99 MPa.

**Tabel 3 - 3 Prosentase komposisi mortar geopolimer**

Material	% (berat)
<i>Fly ash</i>	46.8
NaOH 10 M	7.2
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	18
Agregat Halus	28

Perbandingan persen agregat halus dan pasta geopolimer sebesar 28% dan 72%. Untuk membuat pasta geopolimer, perbandingan *fly ash* dan alkali aktivator adalah 65:35. Alkali aktivator yang digunakan dengan perbandingan

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  12M sebesar 2,5. Skema komposisi mortar geopolimer digambarkan pada **Gambar 3 - 12**.



**Gambar 3 - 12 Skema komposisi mortar geopolimer**

Komposisi campuran geopolimer per meter kubik yang didapatkan berdasarkan mix design di atas ditunjukkan pada **Tabel 3 - 4**. Berat volume mortar geopolimer adalah  $2220 \text{ kg/cm}^3$  dan konsentrasi larutan NaOH yaitu 12M.

**Tabel 3 - 4 Kebutuhan komposisi mortar geopolimer per meter kubik**

Material	Berat (kg)
<i>Fly ash</i>	1039
NaOH 12 M	160
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	400
Agregat Halus	621

Kebutuhan material untuk mortar geopolimer yang didapatkan berdasarkan mix design di atas ditunjukkan pada **Tabel 3 - 5**

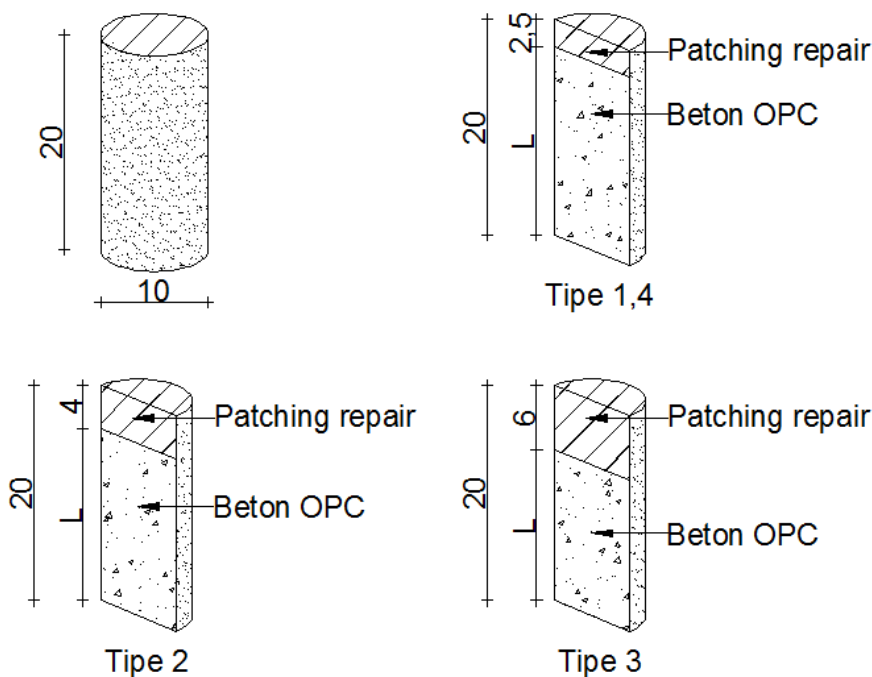
**Tabel 3 - 5 Kebutuhan material mortar geopolimer**

Material	Berat (kg)
<i>Fly ash</i>	123,21
NaOH 12 M	18,96
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	47,39
Agregat Halus	73,72

### 3.6. Pembuatan Benda Uji

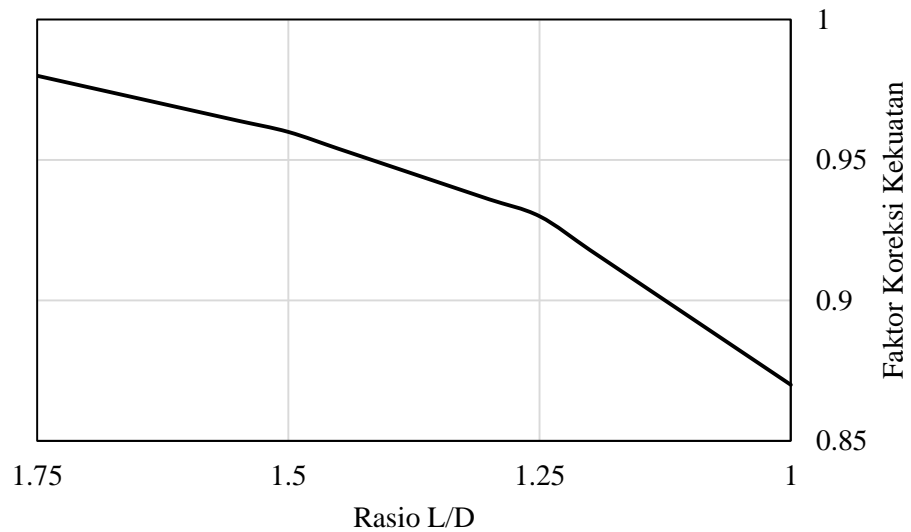
#### 3.6.1. Persiapan Cetakan dan Rencana Benda Uji

Benda uji yang direncanakan dalam penelitian ini berbentuk silinder dan lolipop kubus, sesuai dengan pengujian-pengujian yang akan dilakukan. Benda uji silinder diameter 10 cm tinggi 20 cm akan digunakan dalam penetrasi klorida dan sulfat, pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah, dan porositas beton, dapat dilihat pada **Gambar 3 - 13**.



**Gambar 3 - 13 Rencana benda uji silinder dengan variasi tebal selimut**

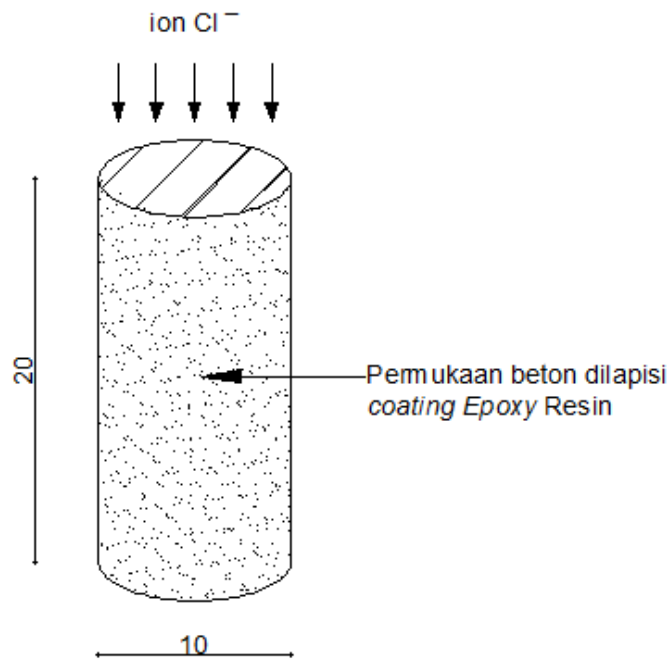
Ada 3 jenis ketebalan pelapisan yang akan diberikan pada beton OPC yaitu 2,5 cm, 4 cm dan 6 cm. Berdasarkan 3 jenis ketebalan, nilai rasio L/D dari tipe spesimen silinder 1 dan 4 adalah 1.75, sedangkan untuk tipe spesimen 2 dan 3 masing-masing adalah 1.6 dan 1.4. Sesuai dengan ASTM C42-03 dari rasio L/D akan didapatkan faktor koreksi kekuatan dari beton OPC yang dilapisi. **Gambar 3 - 14** menjadi acuan penentuan faktor koreksi kekuatan beton OPC.



**Gambar 3 - 14 Rasio L/D dengan faktor koreksi kekuatan (ASTM C42-03)**

Dari **Gambar 3 - 14** didapatkan faktor koreksi kekuatan beton OPC dari hasil interpolasi rasio L/D sebesar 1.75, 1.6 dan 1.4 berturut-turut adalah 0.98, 0.968, dan 0.948. Nilai faktor koreksi ini digunakan untuk menghitung kuat tekan sesungguhnya dari beton OPC yang terlapsi.

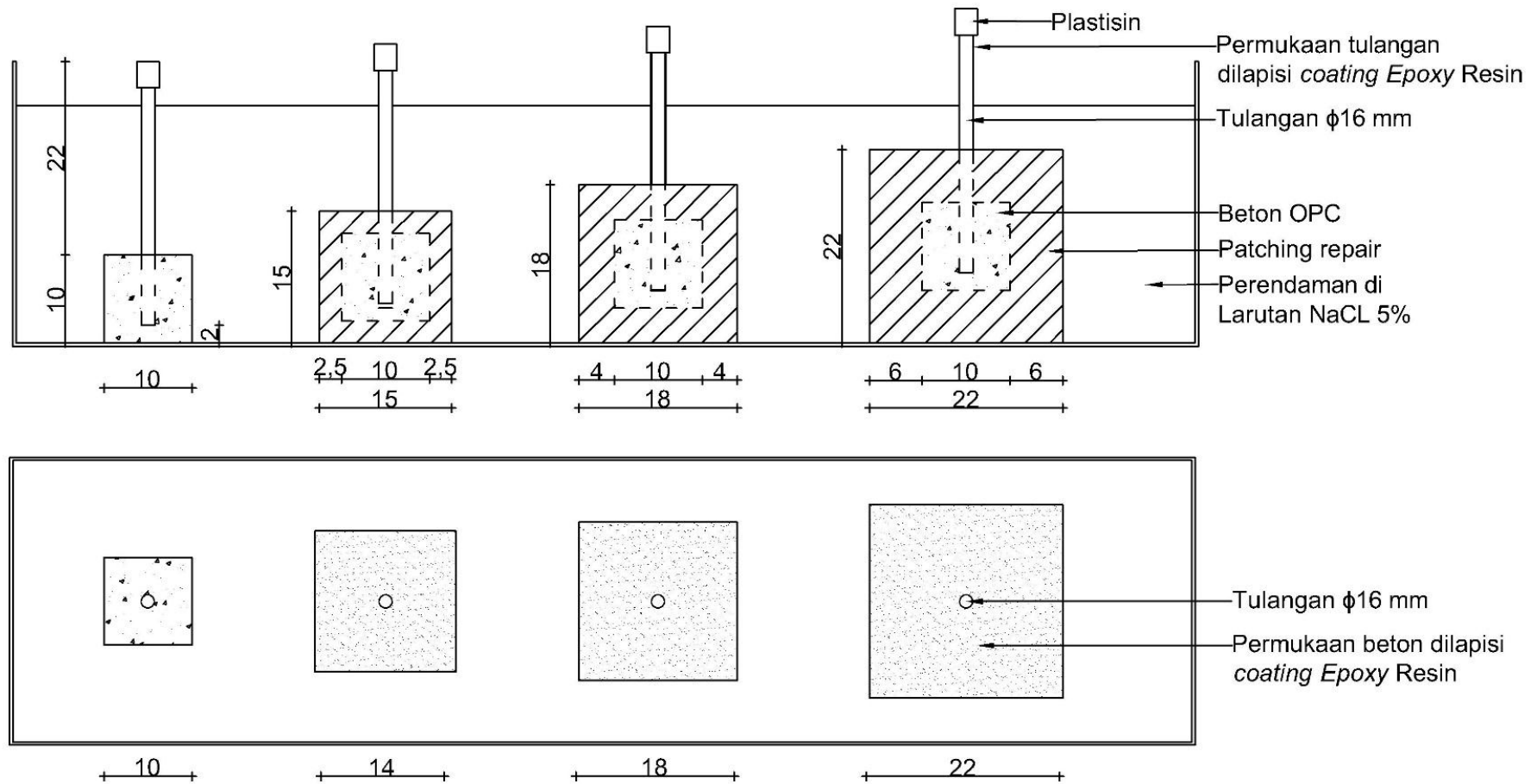
Benda uji silinder diberi *coating* dengan epoxy resin pada bagian selimut keliling dan alas bawah seperti pada **Gambar 3 - 15**. Pemberian *coating* dengan *epoxy* resin bertujuan melindungi bagian tersebut agar zat-zat kimia dapat diatur untuk masuk ke benda uji di daerah yang tidak terlindungi.



**Gambar 3 - 15 Benda Uji Silinder yang di coating dengan Epoxy resin**

Ukuran benda uji lolipop kubus berdasarkan tebal selimut untuk lapisan mortar geopolimer dan Sikagrout 215 pada beton OPC yang berukuran 10 x 10 x 10 cm. Tebal selimut yang direncanakan adalah 2,5 cm, 4 cm, dan 6 cm. Sehingga ukuran benda uji lolipop kubus dengan 3 ukuran yaitu 15 x 15 x 15 cm, 18 x 18 x 18 cm, dan 22 x 22 x 22 cm.

Benda uji lolipop kubus akan dilapisi dengan epoxy resin dibagian permukaan atas dan bawah beton dan tulangan diameter 16 mm sepanjang 22 cm. Benda uji lolipop kubus ini akan diberikan percepatan korosi dengan *Accelerated Corrosion Test* yang direndam pada larutan NaCl 5%. Benda uji lolipop kubus dapat dilihat pada **Gambar 3 - 16**.



**Gambar 3 - 16 Rencana benda uji lolipop kubus untuk *Accelerated Corrosion Test***

### 3.6.2. Kebutuhan benda uji

Penamaan benda uji silinder dan lolipop kubus berdasarkan jenis material patching repair, tebal selimut, dan umur perendaman beton (60, 90, dan 120 hari). Kode penamaan benda uji ditampilkan pada **Tabel 3 - 6** dan **Tabel 3 - 7**

**Tabel 3 - 6 Penamaan benda uji berdasarkan material**

Jenis	Material	Code
Beton	OPC	O
<i>Patching Repair</i>	Geopolimer	G
	Sikagrout	S

**Tabel 3 - 7 Tipe benda uji sesuai variasi tebal selimut**

Tipe	Jenis Material	Tebal Selimut (cm)
Tipe 1	G	2,5
Tipe 2	G	4
Tipe 3	G	6
Tipe 4	S	2,5

Untuk 4 tipe variasi benda uji, kebutuhan total benda uji silinder dan lolipop kubus ditampilkan pada **Tabel 3 - 8** **Error! Reference source not found.** dan **Tabel 3 - 9**

**Tabel 3 - 8 Kebutuhan benda uji silinder**

Tipe <i>Silinder</i>	Jenis <i>repair</i>	Pengujian		Total
		Kuat Tekan	Kuat Tarik Belah	
Tipe 1	G-2,5-60	3	2	5
Tipe 2	G-4-60	3	2	5
Tipe 3	G-6-60	3	2	5
Tipe 4	S-2,5-60	3	2	5
Total (1 umur)		12	8	20
Total (4 umur)		48	32	80



Dari **Tabel 3 - 8** didapatkan kebutuhan benda uji sebanyak 80 sampel untuk *seawater curing*. Dalam penelitian ini benda uji Tipe 1 dan 4 akan diberikan perlakuan *moist curing* sebagai benda uji kontrol. Sehingga total kebutuhan benda uji adalah 120 sampel.

**Tabel 3 - 9 Kebutuhan benda uji lolipop kubus**

Tipe <i>Lolipop Kubus</i>	Jenis repair	Pengujian	Total
		<i>Accelerated Corrosion</i>	
Tipe 1	GP-2.5	2	2
Tipe 2	GP-4	2	2
Tipe 3	GP-6	2	2
Tipe 4	SG-2.5	2	1
Total			7

Dari **Tabel 3 - 9** kebutuhan benda uji lolipop kubus sebanyak 7 sampel untuk Accelerated Corrosion Test yang direndam pada larutan NaCl 5%.

### 3.6.3. Prosedur Pembuatan Mortar Geopolimer

Pelaksanaan pencampuran mortar geopolimer berdasarkan komposisi yang telah direncanakan. Prosedur pencampuran mortar geopolimer sebagai berikut:

- a) Menyiapkan peralatan yang digunakan.
  - Timbangan 25 kg
  - Takaran air
  - Mixer Beton
  - Ember
  - Cetok besi
  - Alat perojok besi
  - Palu karet
  - Mesin getar
  - Pan persegi ukuran 50 x 50 cm
  - Plastik terpal

- Cetakan benda uji (silinder dan kubus)
- b) Menyiapkan bahan yang dibutuhkan.
- *Fly ash*
  - Pasir
    - Batu pecah
    - Air
    - Alkali Aktivator ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan NaOH 10M)
    - Oli
    - Beton OPC
    - Sikadur 732
- c) Menyiapkan semua bahan sesuai dengan komposisi campuran geopolimer.
- d) Menyiapkan larutan NaOH 10M yang didiamkan kurang lebih 24 jam.
- e) Menyiapkan cetakan yang telah diolesi oli sehingga benda uji beton tidak lengket ke cetakan dan mudah dibuka. Dan menyiapkan beton OPC yang sudah diolesi dengan Sikadur 732 untuk dilapisi beton geopolimer.
- f) Memasukkan sebagian pasir (dalam keadaan SSD) dan *fly ash* ke dalam mixer beton. Mencampurkan kedua material hingga rata dengan mengatur kecepatan 5-6 pada dial pengatur kecepatan.
- g) Memasukkan alkali aktivator ke dalam campuran hingga rata.
- h) Memasukkan pasir ke dalam campuran dan diaduk hingga campuran homogen.
- i) Setelah campuran mortar homogen maka campuran tersebut dituang dalam pan yang telah dilapisi plastik.
- j) Memasukkan campuran mortar dalam cetakan benda uji dan beton OPC yang telah diatur letaknya dalam cetakan yang telah disiapkan untuk dilapisi.

- k) Melepaskan cetakan setelah beton geopolimer mengeras 1 hari setelah pengecoran.
- l) Benda uji yang telah dilepas cetakannya dilakukan perawatan hingga umur beton geopolimer 28 hari dengan *moist curing*.



**Gambar 3 - 17 Beton OPC dalam cetakan**



**Gambar 3 - 18 Mortar geopolimer**



**Gambar 3 - 19 Proses pencetakan mortar geopolimer pada beton OPC**

### **3.7. Skema *Curing* Benda Uji**

Setelah cetakan benda uji beton OPC berbentuk silinder dan lolipop kubus yang telah dilapisi mortar geopolimer dan Sikagrout 215M dibuka, dilakukan perawatan *moist curing* hingga umur 28 hari. Kemudian benda uji di rendam dalam air laut (*seawater curing*) dan sebagian dilanjutkan dengan *moist curing* hingga umur benda uji 30 hari, 60 hari, 90 hari, 120 hari, dan 150 hari.

Dari hasil penelitian Febryan (2018) untuk benda uji beton geopolimer lebih baik dirawat pada *moist curing* selama 28 hari untuk menjaga NaOH dalam beton geopolimer. Untuk perendaman di air laut, ditempatkan pada lokasi pesisir Pantai Kenjeran, Surabaya.

Dalam penelitian ini dua kondisi *curing* yang digunakan untuk mengetahui kepekaan campuran, yaitu:

a. *Moist curing*

Benda uji dikondisikan pada lingkungan yang dijaga kelembapannya dengan *moist curing* yaitu menutup benda uji dengan karung goni yang telah dibasahi dengan air. Benda uji yang di beri perlakuan *moist curing* sebagai pembanding hasil uji terhadap benda uji yang direndam dengan *seawater curing*.

b. *Seawater curing*

Lokasi perendaman pada pesisir Pantai Kenjeran, Surabaya. Proses perendaman benda uji sesuai dengan penelitian Febryan (2018), yaitu:

1. Membungkus benda uji dengan waring.



**Gambar 3 - 20 Benda uji dibungkus dengan waring**

2. Mengikatkan dengan tali tampar.



**Gambar 3 - 21 Waring diikat dengan tali tampar**

3. Meletakkan benda uji dengan cara mengikatkan tali tampar ke bagan. Bagan adalah tempat penyimpanan peralatan nelayan yang dibangun dari tumpukan bambu. Jarak bagan sekitar 30 meter dari pesisir pantai.



**Gambar 3 - 22 Bagan (tempat meletakkan benda uji)**



**Gambar 3 - 23 Benda uji diikatkan pada tiap sisi bagan**

### 3.8. Jadwal pembuatan dan pengujian

Jadwal pembuatan dan pengujian untuk benda uji lolipop kubus dan silinder ditampilkan pada **Tabel 3 - 10** dan **Tabel 3 - 11**.

**Tabel 3 - 10 Jadwal pembuatan dan pengujian benda uji lolipop kubus**

Hari ke-	Proses pelaksanaan
0	Pengecoran beton OPC
1	Buka cetakan dan perawatan beton OPC dengan <i>moist curing</i>
28	Beton OPC diangin-anginkan dan pengecoran mortar geopolimer dan Sikagrout 215M untuk lapisan beton OPC
29	Buka cetakan benda uji
30	Perawatan benda uji dilakukan <i>moist curing</i>
60	Untuk umur geopolimer 30 hari dilakukan percepatan korosi dengan arus listrik. Benda uji sebagian direndam dalam larutan NaCl 5%

**Tabel 3 - 11 Jadwal pembuatan dan pengujian benda uji silinder**

Hari ke-	Proses pelaksanaan
0	Pengecoran beton OPC
1	Buka cetakan dan perawatan beton OPC direndam dalam air tawar
28	Beton OPC diangin-anginkan dan pengecoran mortar geopolimer dan Sikagrout 215M untuk lapisan beton OPC
29	Buka cetakan benda uji
30	Perawatan benda uji dilakukan <i>moist curing</i>
44	Coating benda uji
74	Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah, penetrasi ion klorida dan porositas untuk umur geopolimer 44 hari. Benda uji sebagian direndam dalam air laut, sebagian dilanjutkan dengan <i>moist curing</i>
104	Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, penetrasi ion klorida dan porositas untuk umur geopolimer 74 hari. Benda uji sebagian direndam dalam air laut, sebagian dilanjutkan dengan <i>moist curing</i>
134	Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, penetrasi ion klorida dan porositas untuk umur geopolimer 104 hari. Benda uji sebagian direndam dalam air laut, sebagian dilanjutkan dengan <i>moist curing</i>
164	Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, penetrasi ion klorida dan porositas untuk umur geopolimer 134 hari. Benda uji sebagian direndam dalam air laut, sebagian dilanjutkan dengan <i>moist curing</i>

### 3.9. Pengujian Beton

#### 3.9.1. Pengujian Kuat Tekan (ASTM C 39/C-39M-01)

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur perendaman geopolimer dan Sikagrout 215M 0 hari, 30 hari, 60 hari, dan 120 hari. Pengujian tiap tipe sebanyak 3 sampel, kemudian dihitung nilai rata-rata hasil pengujian.

Tujuan : Mengetahui nilai kuat tekan beton terhadap pembebanan

Rumus : 
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

dimana,

$\sigma$  = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum diberikan pada permukaan beton (N)

A = luas penampang beton (mm<sup>2</sup>)

### 3.9.2. Pengujian Kuat Tarik Belah (SNI 03-2491-2002)

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur geopolimer dan Sikagrout 215M 28 hari perendaman. Pengujian tiap tipe sebanyak 2 sampel, kemudian dihitung nilai rata-rata hasil pengujian.

Tujuan : Mengetahui nilai kuat tarik belah beton terhadap pembebanan

$$\text{Rumus : } F_{ct} = \frac{2P}{LD} \quad (3.12)$$

dimana,

$F_{ct}$  = kuat tarik belah beton (Mpa)

$P$  = beban uji maksimum dalam Newton (N)

$L$  = panjang benda uji dalam (mm)

$D$  = diameter benda uji dalam (mm)

### 3.9.3. Pengujian Modulus Elastisitas (ASTM C 469-02)

Pengujian modulus elastisitas bersamaan dengan pengujian kuat tekan (**Gambar 3 - 24**). Pengujian tiap tipe sebanyak 3 sampel, kemudian dihitung nilai rata-rata hasil pengujian.

Tujuan : Mengetahui nilai modulus elastisitas beton

$$\text{Rumus : } E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.13)$$

dimana,

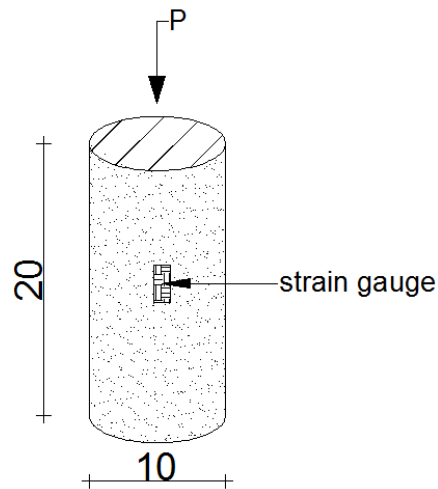
$E$  = modulus elastisitas (Mpa)

$S_2$  = tegangan pada 40% beban ultimate (N)

$S_1$  = tegangan pada regangan membujur,  $\varepsilon_1$ , 0.000050

$\varepsilon_2$  = regangan pada saat tegangan 40% dari beban ultimate (N)

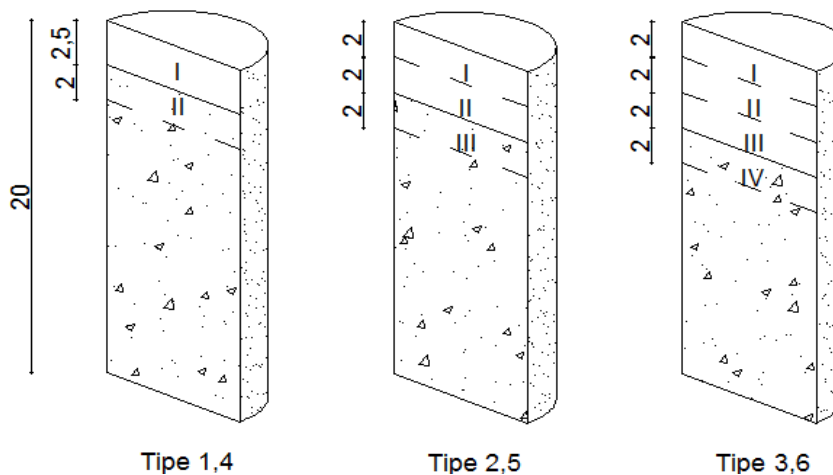




**Gambar 3 - 24 Ilustrasi model pengujian modulus elastisitas**

#### 3.9.4. Tes Porositas (AFNOR NF B 49104)

Porositas beton mempengaruhi kuat tekan beton. Beton yang memiliki pori terbuka tidak memiliki tekanan hidrostatis yang mampu menahan kuat tekan lebih baik daripada beton yang memiliki pori tertutup. Pori terbuka memiliki sifat permeable, yaitu dapat ditembus oleh air maupun udara. Sedangkan pori tertutup bersifat sebaliknya yaitu impermeable (tidak mudah ditembus air dan udara). Sifat pori terbuka yang permeable mengakibatkan beton mengalami keropos dan mudah retak sehingga mampu menurunkan kuat tekan beton. Pengambilan sampel uji porositas pada kedalaman yang telah ditunjukkan pada **Gambar 3 - 25**.



**Gambar 3 - 25 Titik pengambilan sampel untuk uji penetrasi ion klorida, porositas dan pH**

Tujuan : Mengetahui porositas terbuka dan tertutup

Rumus :

$$\text{Kepadatan absolut } (\rho) = \left[ \frac{m_o}{V_o} \right] \quad (3.14)$$

$$\text{Kepadatan visual } (\alpha) = \left[ \frac{M_o}{M_h - \mu} \right] \quad (3.15)$$

$$\text{Porositas total } (\pi_t) = 100 \times [1 - \alpha/\rho] \quad (3.16)$$

$$\text{Porositas terbuka } (\pi_o) = 100 \times \left[ \frac{M_h - M_o}{M_h - \mu} \right] \quad (3.17)$$

$$\text{Porositas tertutup } (\pi_f) = \pi_t - \pi_o \quad (3.18)$$

dimana,

$m_o$  = berat dalam keadaan halus

$V_o$  = volume dalam keadaan halus (volume air yang keluar)

$M_o$  = berat dalam keadaan kering oven

$M_h$  = berat dalam keadaan SSD

$\mu$  = berat saat ditimbang dalam air

$M_h - \mu$  = volume yang tampak

### 3.9.5. Derajat Keasaman (SNI 06-6989.11-2004)

Pengujian derajat keasaman (pH) beton dengan menggunakan pH meter. Prinsip pengukuran pH berdasarkan aktifitas ion hidrogen secara potensiometri/elektrometri dengan menggunakan alat pH meter. Benda uji untuk pengukuran derajat keasaman beton diambil dari bongkahan yang dihaluskan sesuai kedalaman pada **Gambar 3 - 25**.

Tujuan : Mengetahui derajat keasaman (pH) beton

Prosedur :

Menyiapkan bongkahan beton yang dihaluskan seberat 5 gram.

Menambahkan air suling 20 gram dan di aduk selama 5 menit. Diamkan selama 30 menit.

Menyiapkan alat pH meter, dimasukkan ke dalam wadah dan diaduk selama 10 detik kemudian dilakukan pembacaan.

### 3.9.6. Penetrasi dan Koefisien Semu Difusi Klorida (SNI 03-2854-1992 dan ASTM C 1556-03)

Pengujian penetrasi klorida dalam beton menggunakan bongkahan beton sesuai kedalaman pada **Gambar 3 - 25**. Penetrasi klorida yang diukur adalah banyaknya klorida bebas dan terikat pada sampel uji sebelum direndam dan setelah perendaman.

Tujuan : Mengetahui konsentrasi klorida bebas dan terikat pada beton

Rumus :

$$Cl_{terikat}^- = Cl_{terikat\ terukur}^- - Cl_{terikat\ awal}^- \quad (3.19)$$

$$Cl_{bebas}^- = Cl_{bebas\ terukur}^- - Cl_{bebas\ awal}^- \quad (3.20)$$

dimana,

$Cl_{terikat}^-$  = Jumlah klorin terikat (%)

$Cl_{terikat\ terukur}^-$  = Hasil pengujian klorin terikat (%)

$Cl_{terikat\ awal}^-$  = Kandungan awal klorin (%)

$Cl_{bebas}^-$  = Jumlah klorin bebas (%)

$Cl_{bebas\ terukur}^-$  = Hasil pengujian klorin bebas (%)

$Cl_{bebas\ awal}^-$  = Kandungan awal klorin (%)

Konsentrasi klorida total dan bebas yang diperoleh akan diplot dalam grafik profil konsentrasi klorida berdasarkan kedalaman (**Gambar 3 - 26**). Penyelesaian analisis dari *Fick's Second Law* dituliskan dalam persamaan:

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (3.21)$$

dimana,

$C_{(x,t)}$  = konsentrasi klorida pada kedalaman x dan waktu paparan t (%)

x = jarak dari permukaan terekspos (m)

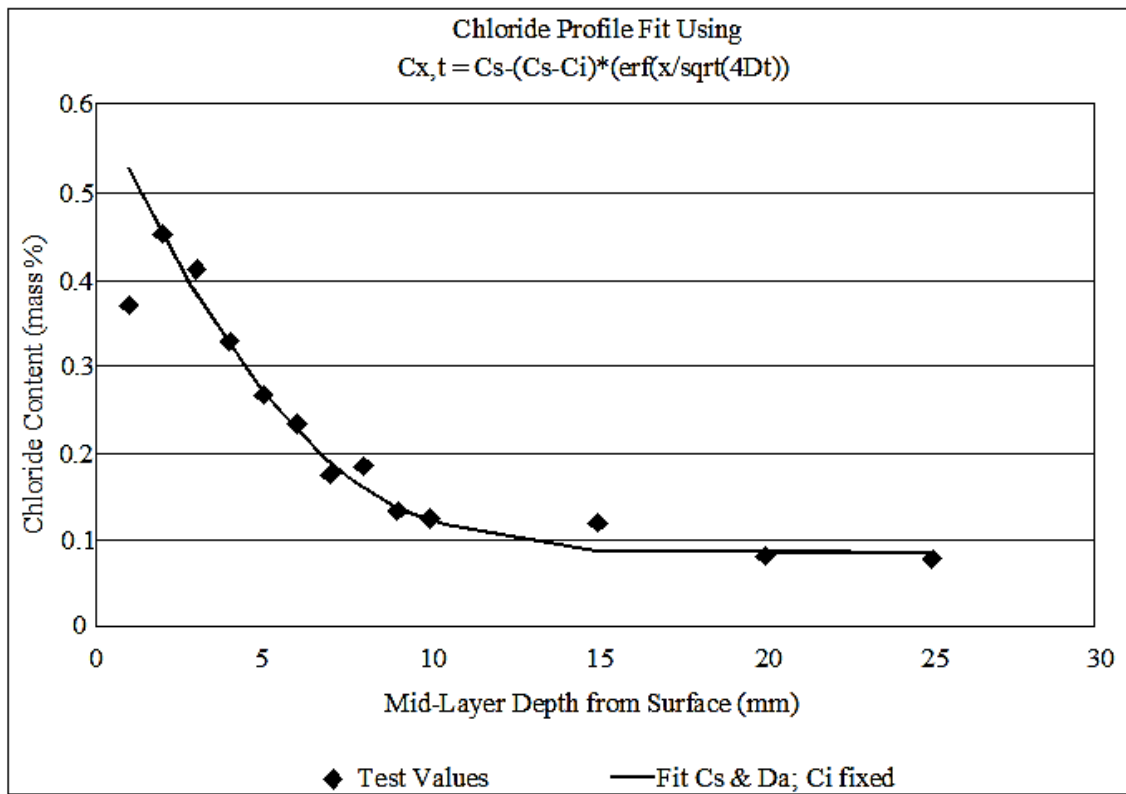
$C_s$  = konsentrasi klorida antara permukaan beton dengan lingkungan paparan (%)

$C_i$  = konsentrasi awal klorida pada beton sebelum direndam (%)

$D_a$  = koefisien difusi semu klorida, ( $m^2/s$ )

t = waktu terkespos/terendam (s)

erf = *error function*



Gambar 3 - 26 Analisis Regresi Sampel

### 3.9.7. Corrosion Rate dengan Mass Loss Method (ASTM G1-90 Reapp. 99)

Benda uji dipercepat korosi dengan menggunakan metode *Accelerated Corrosion Test*, dimana benda uji direndam pada larutan NaCl kemudian dialiri arus listrik tertentu untuk menginisiasi dan mempercepat korosi pada tulangan. Pengujian dilakukan sampai terjadi retak pada permukaan selimut beton dengan lebar 0.4 mm. Skema pengujian ditampilkan **Gambar 3 - 27** dan **Gambar 3 - 28**.

a) Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pengujian antara lain:

1. DC *Power supply*
2. *Current Regulator*
3. *Stainless Steel* (Katoda)
4. Bak perendaman
5. Benda uji kubus beton OPC/geopolimer dengan tulangan

b) Prosedur pelaksanaan pengujian kuat tekan beton ialah:

1. Menyiapkan larutan NaCl 5%
2. Merendam *stainless steel* (katoda) ke dalam larutan NaCl 5%.
3. Benda uji lolipop kubus direndam pada larutan NaCl 5%
4. Menempelkan kabel arus positif (+) pada ujung tulangan dan kabel arus negatif (-) pada *stainless steel*
5. Mengalurkan arus listrik melalui DC *power supply* dengan arus yang konstan.
6. *Accelerated corrosion test* dihentikan ketika retak terjadi dipermukaan selimut beton mencapai selimut beton. Lebar retak yang diamati hingga sebesar 0.4 mm.

Rumus : Untuk menghitung *corrosion rate* menggunakan persamaan:

$$L = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (3.21)$$

dimana,

L = *Corrosion Rate* (mm/yr).

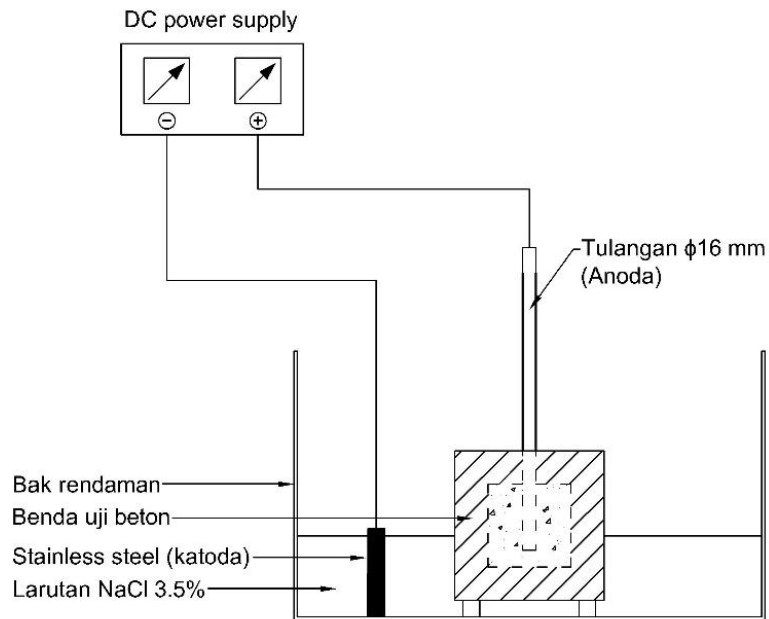
K = 8.76 x 10<sup>4</sup> mm/yr.

W = Berat tulangan yang hilang/mass loss (gram).

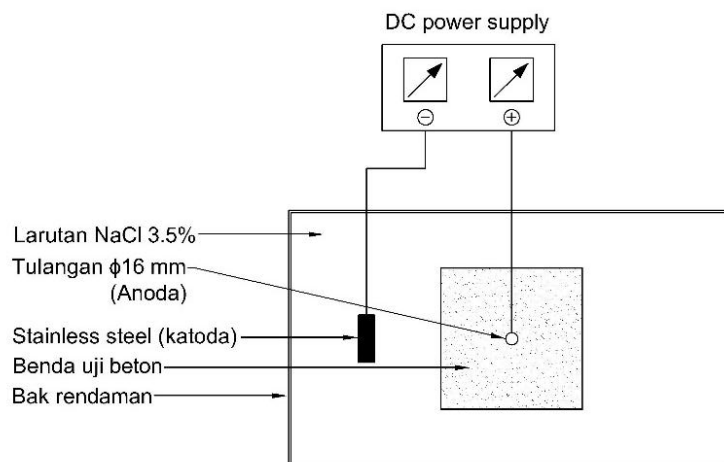
A = Luas permukaan tulangan (cm<sup>2</sup>).

T= Waktu pengamatan (jam)

D = *Density* tulangan (gr/cm<sup>3</sup>)



**Gambar 3 - 27 Tampak samping Accelerated Corrossion Test**



**Gambar 3 - 28 Tampak atas Accelerated Corrossion Test**

### **3.10. Analisa Hasil**

Data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dilakukan analisa data untuk melihat hubungan antara hasil pengujian satu sama lain.

### **3.11. Kesimpulan**

Dari analisa hubungan-hubungan hasil pengujian satu sama lain dapat ditarik kesimpulan penelitian tersebut.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **BAB 4**

### **HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA**

#### **4.1. Umum**

Bab ini menampilkan data-data dari seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan dan kemudian dilanjutkan dengan analisa-analisa sehingga dapat ditarik kesimpulan. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian karakteristik material (*fly ash*, Sikagrout 215M, *Ordinary Portland Cement*, semen, agregat kasar, dan agregat halus), pengujian benda uji silinder dan lolipop kubus. Benda uji silinder digunakan untuk pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas dan poisson's ratio, penetrasi ion klorida, porositas dan derajat keasaman (pH). Benda uji lolipop kubus digunakan untuk pengujian laju korosi baja tulangan. Benda uji direndam di air laut Selat Madura, Surabaya. Data-data dari hasil penelitian ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah analisa yang dilakukan.

#### **4.2. Material**

Material yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Fly ash*
2. *Ordinary Portland Cement* (OPC)
3. Natrium Hidroksida (NaOH)
4. Natrium Silikat
5. Aquades
6. Agregat Kasar
7. Agregat Halus
8. Sikagrout 215M

#### **4.3. Data Analisa Hasil Karakteristik Material**

Analisa karakteristik material dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia dari material yang digunakan.

### 4.3.1. Fly ash

#### a. Hasil Analisa X-Ray Fluorescence (XRF)

Material *fly ash* yang berasal dari PLTU Suralaya silo 1-4, dilakukan analisa kimia XRF (*X-Ray Fluorescence*). Data hasil analisa kimia XRF yang dilakukan di PT. Sucofindo ditampilkan pada **Tabel 4 - 1**.

**Tabel 4 - 1 Hasil Analisa XRF Fly ash PLTU Suralaya silo 1-4**

Paramater	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Hasil (% wt)	44,83	29,23	4,66	0,84	4,47	1,62	0,01	0,68	1,32	0,62	0,09	0,25	11,13

Berdasarkan data hasil analisa kimia *fly ash* pada tabel, diperoleh:

$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 78,72 \text{ \% wt } (>70\%) \text{ (kelas F)}$$

$$\text{SO}_3 = 0,62 \text{ \% wt } (<5\%) \text{ (Kelas F)}$$

$$\text{LOI} = 11,13 \text{ \% wt } (12\%)$$

Dari hasil diatas, dapat di simpulkan bahwa *fly ash* PLTU Suralaya silo 1-4 di kategorikan pada kelas F.

#### a. Hasil Pengujian kadar klorida bebas dan terikat

Pengujian kadar klorida bebas dan terikat pada material *fly ash* telah dilakukan pada penelitian Febryan (2018). Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 2**.

**Tabel 4 - 2 Hasil Analisa Klorida Fly ash PLTU Suralaya silo 1-4**

Material	Cl <sup>-</sup> Bebas (ppm)	Cl <sup>-</sup> Terikat (ppm)	Cl <sup>-</sup> Total (ppm)
<i>Fly ash</i>	10510	940	11450

Data hasil pengujian kadar klorida bebas dan terikat digunakan untuk perhitungan klorida bebas dan terikat pada benda uji.

b. Hasil Pengujian Berat Jenis *Fly ash*

Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM C 118-95. Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 3**.

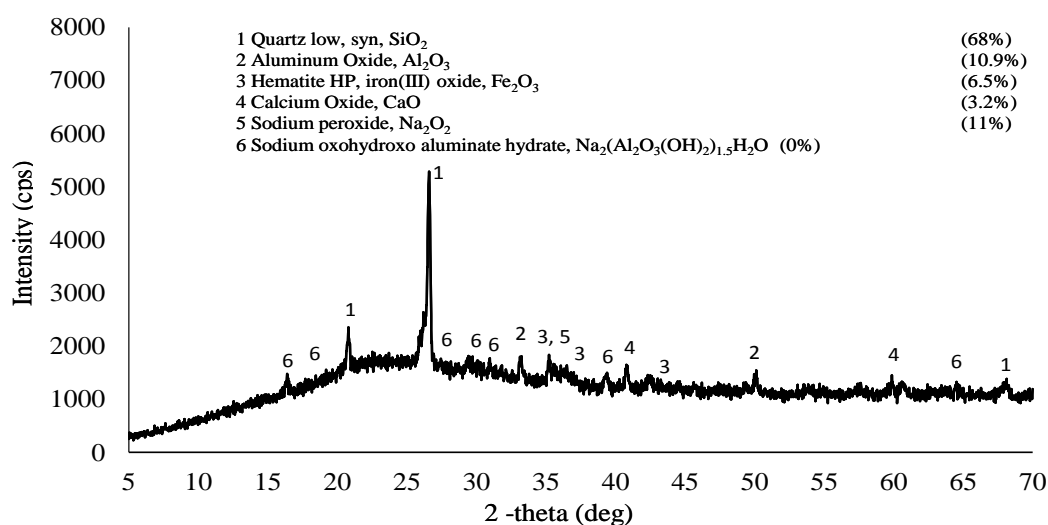
**Tabel 4 - 3 Hasil Analisa Berat Jenis *Fly ash* PLTU Suralaya silo 1-4**

	Percobaan		1
Likatelir	gr	A	149
Likatelir + Air	gr	B	646.5
Air	gr	B-A	497.5
Likatelir + <i>Fly ash</i>		C	399
<i>Fly ash</i>		C-A	250
Likatelir + <i>Fly ash</i> + Air		D	783.5
Air		D-C	384.5
Isi Sampel		(B-A)-(D-C)	113
Berat Jenis	gr/cm <sup>3</sup>	(C-A)/((B-A)-(D-C))	2.2

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis yang telah dilakukan, *fly ash* yang berasal dari PLTU Suralaya silo 1-4 memiliki berat jenis sebesar 2.2 gr/cm<sup>3</sup>.

c. Hasil Analisa *X-Ray Diffraction* (XRD)

Kandungan mineral yang terdapat pada *fly ash* PLTU Suralaya diketahui dari hasil analisa XRD yang dapat dilihat pada **Gambar 4 - 1**.



**Gambar 4 - 1 Grafik hasil analisa XRD *fly ash***

Dari **Gambar 4 - 1**, dapat disimpulkan bahwa mineral yang terkandung dalam *fly ash* antara lain Quartz low ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminium Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Calcium Oxide ( $\text{CaO}$ ), dan Sodium Proxide ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ). Puncak difraksi tertinggi adalah mineral quartz low (68%). *Fly ash* yang digunakan mengandung Silika (Si) dan Aluminium (Al) yang akan bereaksi dengan alkali aktifator dalam proses geopolimerisasi.

#### 4.3.2. SikagROUT 215M

##### a. Hasil Analisa X-Ray Fluorescence (XRF)

Material SikagROUT 215M merupakan produk PT. Sika Indonesia, dilakukan analisa kimia XRF (X-Ray Fluorescence). Data hasil analisa kimia XRF yang dilakukan di PT. Sucofindo ditampilkan pada **Tabel 4 - 4**.

**Tabel 4 - 4 Hasil Analisa XRF SikagROUT 215M produksi PT. Sika Indonesia**

Paramater	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	$\text{MnO}_2$
Hasil (% wt)	20,44	4,56	3,60	0,27	62,07	1,10	0,01	0,53	0,41	2,87	0,05

##### d. Hasil Pengujian kadar klorida bebas dan terikat

Pengujian kadar klorida bebas dan terikat pada material SikagROUT dilakukan di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan ITS. Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 5**.

**Tabel 4 - 5 Hasil Analisa Klorida SikagROUT 215M produksi PT. Sika Indonesia**

Material	$\text{Cl}^-$ Bebas (ppm)	$\text{Cl}^-$ Terikat (ppm)	$\text{Cl}^-$ Total (ppm)
SikagROUT 215M	10727,06	269,06	10996,12

Data hasil pengujian kadar klorida bebas dan terikat digunakan untuk perhitungan klorida bebas dan terikat pada benda uji.

### 4.3.3. Air Laut

#### a. Hasil Pengujian kadar klorida dan sulfat

Pengujian kadar klorida bebas dan terikat pada air laut dilakukan di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan ITS. Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 6**.

**Tabel 4 - 6 Hasil Analisa Klorida Air Selat Madura**

Material	Bulan	Klorida (ppm)	Sulfat (ppm)
Air Laut	April 2019	17800	1602.33
	Mei 2019	15000	2028.75
	Juni 2019	13800	1544.34
	Juli 2019	19000	1881.20

Rata-rata konsentrasi klorida pada air Selat Madura dari bulan April-Juli 2019 adalah 16400 ppm (1.64 %). Data penelitian dari Halim (2016) menunjukkan nilai konsentrasi klorida air Selat Madura pada bulan Maret 2015 sebesar 14055 ppm (1.41 %). Sedangkan pada penelitian Febryan (2018) nilai konsentrasi klorida sebesar 18807.87 ppm (1.88 %).

### 4.3.4. Ordinary Portland Cement (OPC)

#### a. Berat Jenis

Hasil pengujian berat jenis sesuai dengan ASTM C 118 pada **Tabel 4 - 7**.

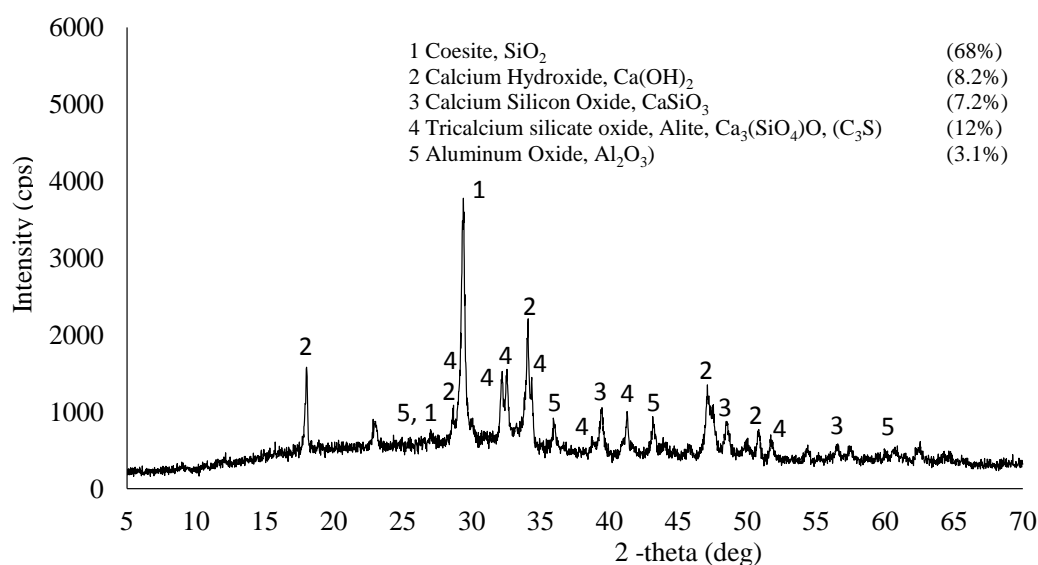
**Tabel 4 - 7 Hasil Analisa Berat Jenis OPC**

Percobaan			1
Likatelir	gr	A	149
Likatelir + Minyak	gr	B	548
Minyak	gr	B-A	399
Likatelir + OPC		C	548
OPC		C-A	250
Likatelir + OPC+ Minyak		D	734.57
Minyak		D-C	176
Isi Sampel		(B-A)-(D-C)	223
Berat Jenis	gr/cm <sup>3</sup>	$(0.8(C-A))/((B-A)-(D-C))$	3.15

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis yang telah dilakukan, OPC yang digunakan memiliki berat jenis sebesar  $3.15 \text{ gr/cm}^3$ .

#### b. Hasil Analisa X-Ray Diffraction (XRD)

Kandungan mineral yang terdapat pada OPC diketahui dari hasil analisa XRD yang dapat dilihat pada **Gambar 4 - 2**.



**Gambar 4 - 2 Grafik hasil analisa XRD OPC**

Dari gambar 4.2, dapat disimpulkan bahwa mineral yang terkandung dalam *fly ash* antara lain Quartz low (SiO<sub>2</sub>), Aluminium Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Calcium Hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>), Calcium Silicon Oxide (CaSiO<sub>3</sub>), dan Tricalcium silicate oxide (C<sub>3</sub>S). Puncak difraksi tertinggi adalah mineral quartz low (68%). Keberadaan Ca(OH)<sub>2</sub> dan C<sub>3</sub>S pada beton yang berada pada lingkungan yang mengandung sulfat akan menghasilkan ettringite.

#### 4.3.5. Agregat Kasar

##### a. Percobaan Berat Jenis Batu Pecah (ASTM C 127-01)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 8**.

**Tabel 4 - 8 Berat Jenis Batu Pecah**

Percobaan			1	2
Berat batu pecah SSD di udara	(B)	gr	300	300
Berat batu pecah di air	(C)	gr	181	188
Berat jenis	B/(B-C)		2.52	2.68

Hasil pengujian berat jenis batu pecah sesuai dengan prosedur ASTM C 127-01 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 2.60 gr/cm<sup>3</sup>. Hasil berat jenis batu pecah memenuhi nilai yang disyaratkan pada ASTM C 127-01, yaitu sebesar 2.4 – 2.7 gr/cm<sup>3</sup>.

- b. Percobaan Berat Volume Batu Pecah (ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 9**.

**Tabel 4 - 9 Berat Volume Batu Pecah**

Percobaan			Tanpa rojokan	Dengan rojokan
Berat silinder	(T)	gr	2570	2570
Berat silinder + batu pecah	(G)	gr	5985	6460
Volume silinder	(V)	liter	3	3
Berat volume	(G-T)/V		1138.33	1296.67

Hasil pengujian berat volume batu pecah sesuai dengan prosedur ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 1217.5 gr/liter.

- c. Percobaan Kelembapan Batu Pecah (ASTM C 566-97 Reapp 03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 10**.

**Tabel 4 - 10 Kelembapan Batu Pecah**

Percobaan			1	2	
Berat batu pecah asli	(W)	gr	500	500	
Berat batu pecah oven	(D)	gr	490	492	
Berat jenis	{(W-D)/D} x 100		%	2.041	1.626

Hasil pengujian kelembapan batu pecah sesuai dengan prosedur ASTM C 566-97 Reapp 03 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 1.833%.

d. Percobaan Air Resapan pada Batu Pecah (ASTM C 127-01)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 11**.

**Tabel 4 - 11 Air Resapan pada Batu Pecah**

Percobaan			1	2	
Berat batu pecah SSD	(B)	gr	250	250	
Berat batu pecah oven	(A)	gr	244	247	
Kadar air resapan	$\{(B-A)/A\} \times 100$		%	2.459	1.215

Hasil pengujian kadar air resapan pada batu pecah sesuai dengan prosedur ASTM C 127-01 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 1.837%. Hasil kadar air resapan batu pecah memenuhi nilai yang disyaratkan pada ASTM C 127-01, yaitu sebesar 1 – 2%.

e. Percobaan Kebersihan Batu Pecah Terhadap Lumpur (ASTM C 117-03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 12**.

**Tabel 4 - 12 Kebersihan Batu Pecah terhadap Lumpur**

Percobaan			1	
Berat batu pecah kering	(B)	gr	100	
Berat batu pecah bersih kering oven	(C)	gr	99	
Kadar air resapan	$\{(B-C)/B\} \times 100$		%	1

Hasil pengujian kebersihan batu pecah terhadap lumpur sesuai dengan prosedur ASTM C 117-03 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 1%.



f. Percobaan Keausan Batu Pecah (ASTM C 131-03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 13**.

**Tabel 4 - 13 Keausan Batu Pecah**

Percobaan			1
Berat seelum diabrasi	(w1)	gr	5000
Berat setelah diabrasi	(w2)	gr	3730
Keausan	$\{(w1-w2)/w1\} \times 100$	%	25.4

Hasil keausan batu pecah sesuai dengan prosedur ASTM C 131-03 didapatkan hasil persentase keausan sebesar 25.4%, yaitu <50% memenuhi syarat.

#### 4.3.6. Agregat Halus

a. Percobaan Berat Jenis Pasir (ASTM C 128-01)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 14**.

**Tabel 4 - 14 Berat Jenis Pasir**

Percobaan			1	2
Berat labu + pasir + air	(C)	gr	1565	1567
Berat pasir SSD	(S)	gr	500	500
Berat labu + air	(B)	gr	1250	1250
Berat jenis	$S/(B+S-C)$		2.70	2.73

Hasil pengujian berat jenis pasir sesuai dengan prosedur ASTM C 128-01 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 2.71 gr/cm<sup>3</sup>. Hasil berat jenis pasir memenuhi nilai yang disyaratkan pada ASTM C 128-01, yaitu sebesar 2.4 – 2.7 gr/cm<sup>3</sup>.

b. Percobaan Berat Volume Pasir (ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 15**.

**Tabel 4 - 15 Berat Volume Pasir**

Percobaan			Tanpa rojokan	Dengan rojokan
Berat silinder	(T)	gr	2570	2570
Berat silinder + pasir	(G)	gr	7540	8015
Berat pasir	(T-G)	gr	4970	5445
Volume silinder	(V)	liter	3	3
Berat volume	(G-T)/V		1656.67	1815.00

Hasil pengujian berat volume pasir sesuai dengan prosedur ASTM C 29/C 29M-97 Reapp. 03 didapatkan hasil rata-rata nilai berat jenis sebesar 1735.83 gr/liter.

c. Percobaan Kelembapan Pasir (ASTM C 566-97 Reapp. 04)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 16**.

**Tabel 4 - 16 Kelembapan Pasir**

Percobaan			1	2
Berat pasir asli	(W)	gr	500	500
Berat pasir oven	(D)	gr	495	494
Kelembapan	$\{(W-D)/D\} \times 100$	%	1.01	1.21

Hasil pengujian kelembapan pasir sesuai dengan prosedur ASTM C 566-97 Reapp. 04 didapatkan hasil rata-rata nilai kelembapan pasir sebesar 1.1%.

d. Percobaan Kadar Air Resapan pasir (ASTM C 128-01)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 17**.

**Tabel 4 - 17 Kadar Air Resapan pada Pasir**

Percobaan			1	2
Berat pasir SSD	(S)	gr	250	250
Berat pasir oven	(A)	gr	235	238
Kadar air resapan	$\{(S-A)/A\} \times 100$	%	6.383	5.042

Hasil pengujian kadar air resapan pada pasir sesuai dengan prosedur ASTM C 128-01 didapatkan hasil rata-rata nilai air resapan sebesar 5.7%.

- e. Percobaan Kebersihan Pasir Terhadap Lumpur (ASTM C 117-03)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 18**.

**Tabel 4 - 18 Kebersihan Pasir terhadap Lumpur**

Percobaan			1
Berat pasir kering	(B)	gr	200
Berat pasir bersih kering oven	(C)	gr	185
Kadar lumpur	$\{(B-C)/B\} \times 100$		% 7.5

Hasil pengujian kebersihan pasir terhadap lumpur sesuai dengan prosedur ASTM C 117-03 didapatkan hasil rata-rata nilai kadar lumpur sebesar 7.5%.

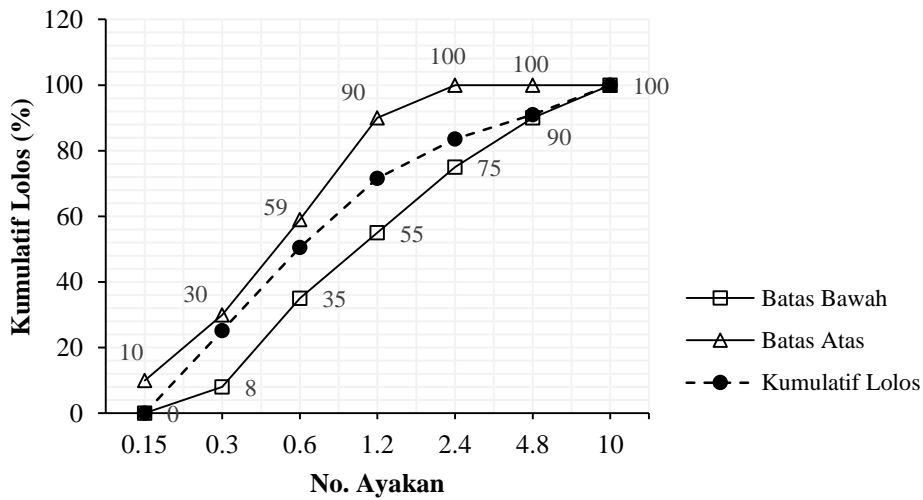
- f. Percobaan Analisa saringan pasir (ASTM C 136-01)

Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4 - 19**.

**Tabel 4 - 19 Hasil analisa saringan pada Pasir**

No. Saringan	Ukuran Saringan (mm)	Gram lolos	% tertinggal	% Kumulatif	E% (% Kumulatif lolos)
	10	0	0.00	0.00	100.00
4	4.76	116	9.05	9.05	90.95
8	2.38	94.6	7.38	16.43	83.57
16	1.19	154.1	12.02	28.45	71.55
30	0.59	269	20.98	49.43	50.57
100	0.149	325.4	25.38	74.81	25.19
Pan	0	323	25.19	100.00	0.00

**Grafik Gradasi Agregat Halus  
Gradasi 2**



**Gambar 4 - 3 Grafik gradasi agregat halus gradasi 2**

Hasil pengujian analisa saringan pada pasir sesuai dengan prosedur ASTM C 136-01 diplot dalam gradasi zona (**Gambar 4 - 3**) dan didapatkan hasil gradasi pasir memenuhi lengkung ayakan pasir untuk gradasi 2.

#### 4.4. Data dan Hasil Pengujian Spesimen

##### 4.4.1. Mix Design Beton OPC

Komposisi beton OPC dalam penelitian ini berdasarkan hasil *mix design* yang telah direncanakan dengan metode DOE. Beton OPC digunakan sebagai spesimen yang akan dilindungi di lingkungan air laut. Sifat mekanik dan durabilitas dari beton OPC diuji setelah diberikan pelapis (*coating*) dengan mortar geopolimer ataupun SikagROUT 215M. Hal ini bertujuan untuk mengetahui efek dari penambahan pelapis pada beton OPC di lingkungan air laut. *Mix design* beton OPC ditampilkan pada **Tabel 4 - 20** dan **Tabel 4 - 21**.

**Tabel 4 - 20 Mix Design beton OPC**

No.	Uraian	Tabel/Grafik/Perhitungan	Nilai
1.	Kuat tekan yang disyaratkan	Ditetapkan	35 MPa pada 28 hari bagian cacat 5%.
2.	Standar deviasi (s)	Tabel 8.1	8.5 MPa
3.	Nilai Tambah (M)		8.5 Mpa
4.	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	1 + 3	43.5 Mpa
5.	Jenis semen		Type I
6.	Jenis Agregat :kasar		Batu pecah
6.	Jenis Agregat :halus		Pasir Alami
7.	Faktor air semen bebas	Grafik 1	0.39
8.	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0.6
9.	Slump	Ditetapkan	80 mm
10.	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	20 mm
11.	Kadar air bebas	Tabel 8.4	205 kg/m <sup>3</sup>
12.	Jumlah semen	11/8 atau 7	525.64 kg/m <sup>3</sup>
13.	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	---
14.	Kadar semen minimum	Ditetapkan	325 kg/m <sup>3</sup>
15.	Faktor air semen yang disesuaikan		---
16.	Susunan besar butir agregat halus		Daerah gradasi susunan butir (Zona 2)
17.	Persen agregat		Agregat halus : 38% Agregat kasar : 62%
18.	Berat jenis relatif agregat (kering permukaan)		2.59 kg/m <sup>3</sup>
19.	Berat jenis beton	Gambar 8.13	2400 kg/m <sup>3</sup>
20.	Kadar agregat gabungan	19 - (12 + 11)	1669.36 kg/m <sup>3</sup>
21.	Kadar agregat halus	17 x 20	634.36 kg/m <sup>3</sup>
22.	Kadar agregat kasar	20 - 21	1035.00 kg/m <sup>3</sup>

**Tabel 4 - 21 Komposisi campuran beton OPC**

	Semen	Air	Agregat Halus	Agregat Kasar
Satuan	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
Tiap m <sup>3</sup>	525.64	205.00	634.36	1035
Tiap campuran uji	1	0.39	1.21	1.97

#### 4.4.2. Mix Design Pelapis

##### a. Mortar geopolimer

*Mix design* mortar geopolimer dalam penelitian ini berdasarkan hasil *mix design* dari beberapa penelitian sebelumnya. Komposisi mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash*, larutan NaOH 12 M, sodium silikat, dan agregat halus. Mortar geopolimer digunakan sebagai spesimen yang melapisi beton OPC. Hal ini

bertujuan untuk melindungi beton OPC dan mengetahui efek dari penambahan pelapis pada beton OPC di lingkungan air laut.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, berat volume mortar geopolimer sebesar  $2219.75 \text{ kg/m}^3$  dengan perbandingan komposisi mortar sebagai berikut:

1. Binder dan Agregat Halus (pasir) adalah 72 : 28
2. *Fly ash* dan alkali aktivator adalah 65 : 35
3. Sodium silikat dan larutan NaOH 12M adalah 2.5 : 1

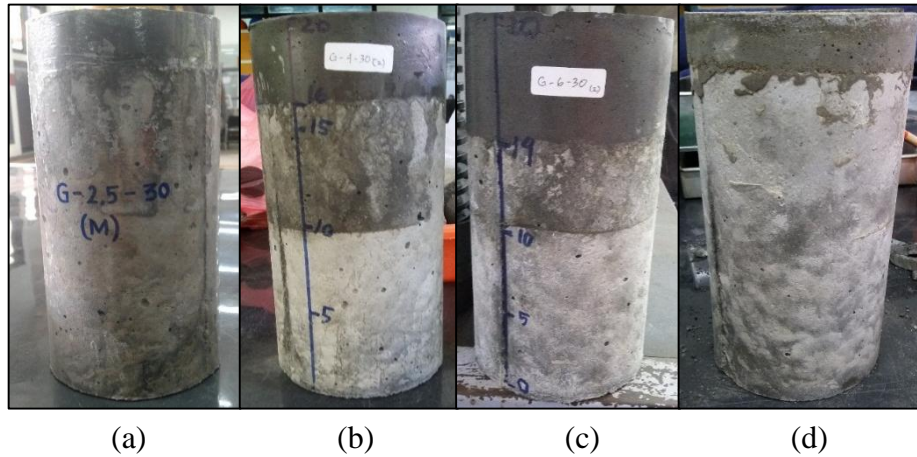
b. Sikagrout 215M

*Mix design* Sikagrout 215M dalam penelitian ini berdasarkan *mix design* Sikagrout 21M pada data produk. Sikagrout 215M digunakan sebagai spesimen pembanding yang melapisi beton OPC. Hal ini bertujuan untuk melindungi beton OPC dan mengetahui efek dari penambahan pelapis pada beton OPC di lingkungan air laut. Berdasarkan data produk, berat volume Sikagrout 215M sebesar 2.26 kg/L dengan perbandingan komposisi Sikagrout 215M dan Air adalah 25 : 4

#### 4.4.3. Visualisasi Spesimen

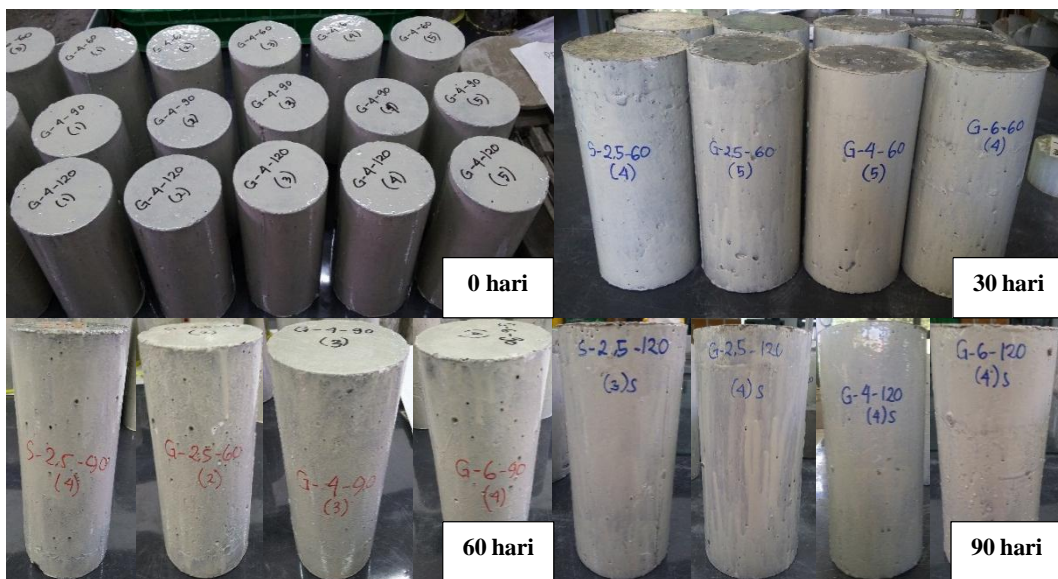
a. Silinder

Spesimen silinder dengan 4 tipe dilakukan perawatan berupa *seawater* dan *moist curing*. Lokasi *Seawater curing* dilakukan di daerah pesisir pantai kenjeran. Perendaman dilakukan selama 90 hari, dari bulan April 2019 – Juli 2019. Sebelum di rendam, silinder diberikan coating di seluruh permukaan kecuali 1 sisi atas silinder untuk jalur masuk air laut seperti ditampilkan pada **Gambar 4 - 4**.



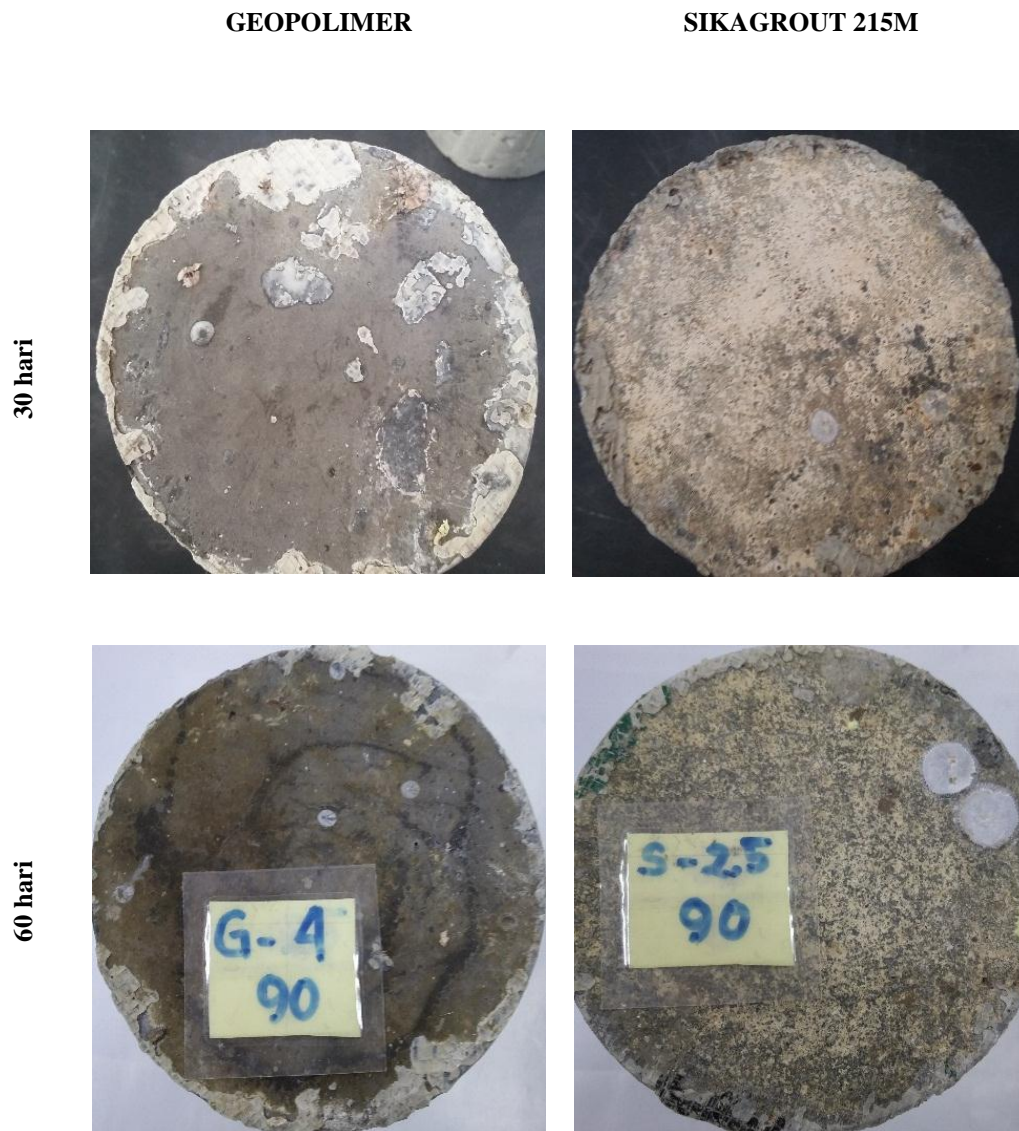
**Gambar 4 - 4** Tipe silinder sebelum di rendam (a) G-2.5, (b) G-4, (c) G-6, dan (d) S-2.5

Pada Gambar 4 - 4 menunjukkan visualisasi 4 tipe spesimen silinder beton OPC yang telah dilapisi dengan mortar geopolimer dan Sikagrout 215M sesuai dengan ketebalan. Semua spesimen yang akan di rendam di *seawater curing* akan di coating dengan bahan epoxy resin. Visualisasi spesimen yang telah di coating sebelum dan setelah direndam dengan *seawater curing* ditunjukkan pada **Gambar 4 - 5**.



**Gambar 4 - 5** Spesimen silinder yang di coating sebelum dan setelah di rendam di *seawater curing*

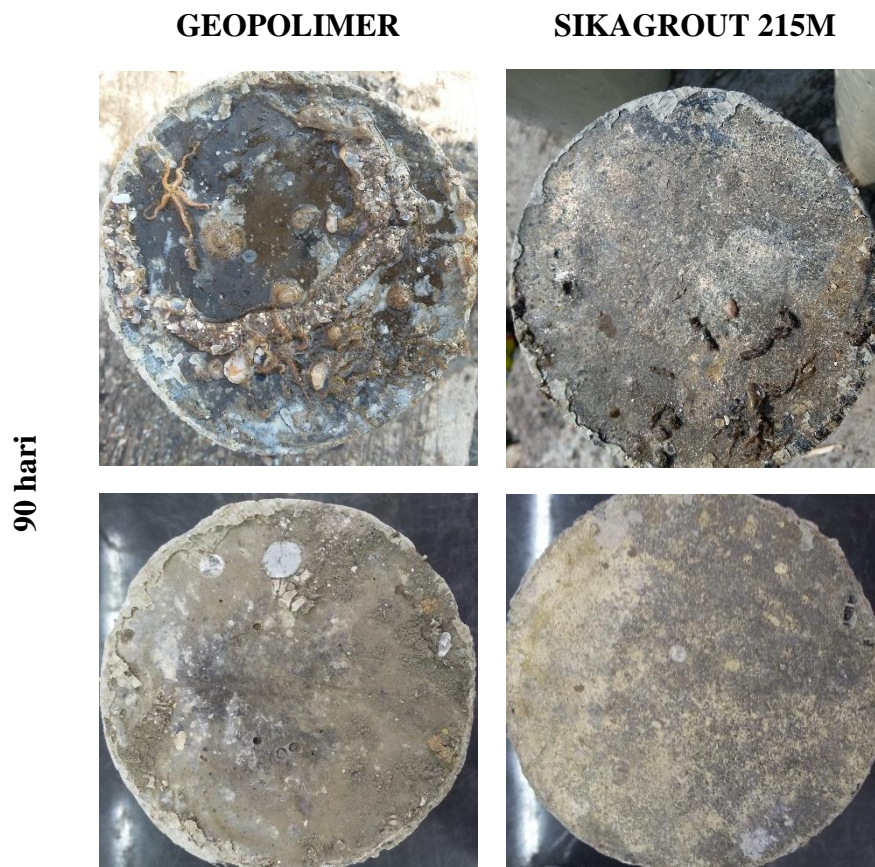
Setelah direndam pada *seawater*, spesimen diangkat dan kemudian dibersihkan sebelum dilakukan pengujian. Untuk sisi spesimen yang dicoating dengan epoxy resin permukaan dapat dibersihkan dengan mudah seperti yang terlihat pada **Gambar 4 - 5**. Satu sisi atas yang tidak terlapisi dengan *coating* dibersihkan dari makhluk hidup yang menempel pada spesimen yang ditunjukkan pada **Gambar 4 - 6**.



**Gambar 4 - 6** Tampak atas lapisan geopolimer dan SikagROUT 215M selama 30-60 hari (*seawater curing*)



Pada umur rendaman 90 hari, makhluk hidup yang menempel pada spesimen jauh lebih banyak dibandingkan dengan umur rendaman sebelumnya. **Gambar 4 - 7** menunjukkan beton dengan pelapis mortar geopolimer dan Sikagrout (atas) sebelum dibersihkan terlihat makhluk hidup yang masih menempel. **Gambar 4 - 7** (bawah) menunjukkan spesimen yang telah dibersihkan dari makhluk hidup yang menempel.



**Gambar 4 - 7** Tampak atas lapisan geopolimer dan Sikagrout 215M selama 90 hari (*seawater curing*) sebelum dan sesudah dibersihkan

#### 4.4.4. Analisa Kuat Tekan

##### a. Kuat tekan beton OPC

Pengujian kuat tekan beton OPC dilakukan pada 3 buah silinder berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Pengujian dilakukan saat umur beton OPC 30

hari setelah *moist curing*. Hasil pengujian kuat tekan dan kontrol kualitas beton ditampilkan pada **Tabel 4 - 22**.

**Tabel 4 - 22 Hasil uji kuat tekan beton OPC**

Umur (hari)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata- rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi
30	252000		32.086			
30	265000	7853.982	33.741	32.31	1.334	Istimewa
30	244270		31.101			

Dari tabel hasil uji, kuat tekan beton OPC yang dicapai pada umur 30 hari adalah sebesar 32.31 MPa dengan klasifikasi kontrol kualitas pelaksanaan pencampuran beton yang Istimewa.



**Gambar 4 - 8 Pengujian kuat tekan beton OPC umur 30 hari**

Hasil kuat tekan beton OPC dihitung kembali dengan Faktor Koreksi yang didapatkan dari hasil interpolasi L/D untuk menyesuaikan dengan beton OPC yang terlapisi dengan mortar geopolimer dan Sikagrout 215M. Hasil perhitungan ditampilkan pada **Tabel 4 - 23**.

**Tabel 4 - 23 Nilai kuat tekan dihitung dengan Faktor Koreksi (ASTM C42-03)**

Tinggi beton OPC	L/D	Faktor Koreksi	Kuat Tekan (MPa)
20	2	1	32.31
1.75	1.75	0.98	32.97
16	1.6	0.968	33.38
14	1.4	0.948	34.08

b. Kuat tekan mortar geopolimer

Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan pada 3 buah kubus berukuran 5 x 5 x 5 cm. Pengujian dilakukan saat umur mortar 30 hari setelah *moist curing*. Hasil pengujian kuat tekan mortar dan kontrol kualitas mortar ditampilkan pada **Tabel 4 - 24**.

**Tabel 4 - 24 Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer**

Umur (hari)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi
30	150023		60.009			
30	150023	2500	60.009	60.25	0.419	Istimewa
30	151836		60.734			

Dari tabel hasil uji, kuat tekan mortar geopolimer dicapai pada umur 30 hari adalah sebesar 60.25 MPa dengan klasifikasi kontrol kualitas yang Istimewa.



**Gambar 4 - 9 Pengujian kuat tekan mortar geopolimer umur 30 hari**

c. Kuat tekan Sikagrout 215M

Pengujian kuat tekan Sikagrout 215M dilakukan pada 3 buah kubus berukuran 5 x 5 x 5 cm. Pengujian dilakukan saat umur mortar 30 hari setelah *moist curing*. Hasil pengujian kuat tekan mortar dan kontrol kualitas ditampilkan pada **Tabel 4 - 25**.

**Tabel 4 - 25 Hasil uji kuat tekan Sikagrout 215M**

Umur (hari)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi
30	128617		51.447			
30	146250	2500	58.500	54.00	0.433	Istimewa
30	130148		52.059			

Dari tabel hasil uji, kuat tekan mortar geopolimer dicapai pada umur 30 hari adalah sebesar 54.00 MPa dengan klasifikasi kontrol kualitas yang Istimewa.



**Gambar 4 - 10 Pengujian kuat tekan Sikagrout 215M umur 30 hari**

c. Kuat tekan 4 tipe spesimen silinder

Pengujian kuat tekan spesimen silinder dilakukan pada 3 sampel dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Ada 4 tipe spesimen silinder yang dilakukan pengujian yaitu G-2.5, G-4, G-6, dan S-2.5. Pengujian dilakukan saat umur rendaman spesimen dengan *seawater curing* dari 0 hari, 30 hari, 60 hari, dan 90 hari. Sebagai pembanding dengan *moist curing* dilakukan untuk 4 tipe silinder. Hasil pengujian kuat tekan spesimen dan kontrol kualitas beton pada sebelum direndam (0 hari *seawater curing*) ditampilkan pada **Tabel 4 - 26**.

**Tabel 4 - 26 Hasil uji kuat tekan silinder umur sebelum direndam**

Umur (hari)	Tipe	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi
0	G-2.5	268000	7853.982	34.123	35.85	1.553	Sangat Baik
		285000		36.287			
		291655		37.135			
	G-4	249671	7853.982	31.789	37.20	1.871	Sangat Baik
		279068		35.532			
		347787		44.282			
	G-6	286572	7853.982	36.478	38.81	0.182	Istimewa
		289424		36.487			
		338418		43.089			
	S-2.5	268313	7853.982	34.163	34.61	0.673	Istimewa
		269221		34.278			
		277889		35.382			

Dari **Tabel 4 - 26** didapatkan nilai kuat tekan dari spesimen yang telah dilapisi dengan mortar geopolimer dan Sikagrout 215M. Sedangkan nilai kuat tekan beton OPC sesungguhnya telah didapatkan dari perhitungan kuat tekan beton OPC asli dengan Faktor Koreksi. **Tabel 4 - 27** menunjukkan kontribusi dari mortar pelapis terhadap kuat tekan beton OPC. Mortar geopolimer memberikan kontribusi yang lebih tinggi terhadap kuat tekan beton OPC dibandingkan Sikagrout 215M dengan tebal pelapisan yang sama. Ketebalan lapisan mortar geopolimer memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton OPC. Makin tebal lapisan mortar dan makin rendah tinggi beton OPC maka makin meningkat kuat tekan dari spesimen.

**Tabel 4 - 27 Kontribusi mortar pelapis terhadap kuat tekan beton OPC**

Spesimen	Kuat tekan spesimen (MPa)	Kuat tekan beton OPC (MPa)	Kontribusi kuat tekan mortar pelapis (MPa)
G-2.5	35.85	32.97	2.88
G-4	37.2	33.38	3.82
G-6	38.81	34.08	4.73
S-2.5	34.61	32.97	1.64

Hasil pengujian kuat tekan spesimen dan kontrol kualitas beton dengan *seawater curing* ditampilkan pada **Tabel 4 - 28** dan dengan *moist curing* pada **Tabel 4 - 29**.

**Tabel 4 - 28 Hasil uji kuat tekan silinder dengan *seawater curing***

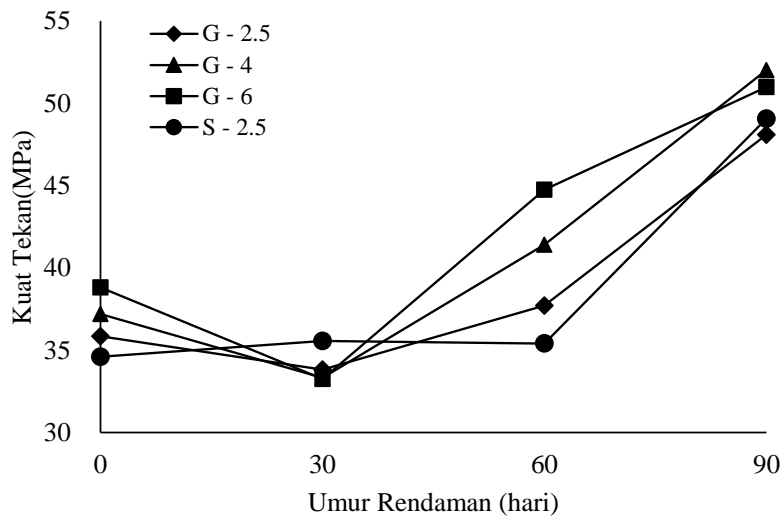
Umur (hari)	Tipe	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata- rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi		
30	G-2.5	257797	7853.982	32.824	33.83	1.003	Istimewa		
		257797		32.824					
		273555		34.830					
	G-4	254802		32.442	33.32	0.777		Istimewa	
		263963		33.609					
		266369		33.915					
	G-6	239586		30.505	33.25	1.942			Baik
		239586		30.505					
		282733		35.999					
S-2.5	269683	34.337	35.56	1.219	Istimewa				
	269683	34.337							
	288835	36.776							
60	G-2.5	269250	7853.982	34.282		34.73	0.445	Istimewa	
		276234		35.171					
		316125		40.250					
	G-4	294438		37.489		38.99	1.505		Sangat Baik
		294438		37.489					
		356063		45.335					
	G-6	396844		50.528	50.99	0.326	Istimewa		
		396844		50.528					
		404078		51.449					
S-2.5	257844	32.830	33.39	0.564	Istimewa				
	266703	33.958							
	309609	39.421							
90	G-2.5	360547	7853.982	45.906		48.09		1.786	Baik
		360547		45.906					
		394898		50.280					
	G-4	363523		46.285		52.01	1.522	Sangat Baik	
		363523		46.285					
		453461		57.736					
	G-6	334289		42.563	44.75	1.789	Baik		
		334289		42.563					
		368711		46.946					
S-2.5	381109	48.524	49.07	0.774	Istimewa				
	281109	48.524							
	389711	49.620							

Data uji kuat tekan untuk perendaman 0, 30, 60, dan 90 hari ditunjukkan pada **Tabel 4 - 28**. Hasilnya menunjukkan bahwa ketebalan lapisan telah meningkatkan kekuatan tekan beton dalam air laut. G-4 memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi daripada tipe lainnya pada 90 hari, hingga 52,01 MPa. Namun, kuat tekan G-2.5 dan G-6 lebih rendah dari G-4, masing-masing hingga 48,09 dan 50,99 MPa.

**Tabel 4 - 29 Hasil uji kuat tekan silinder dengan *moist curing***

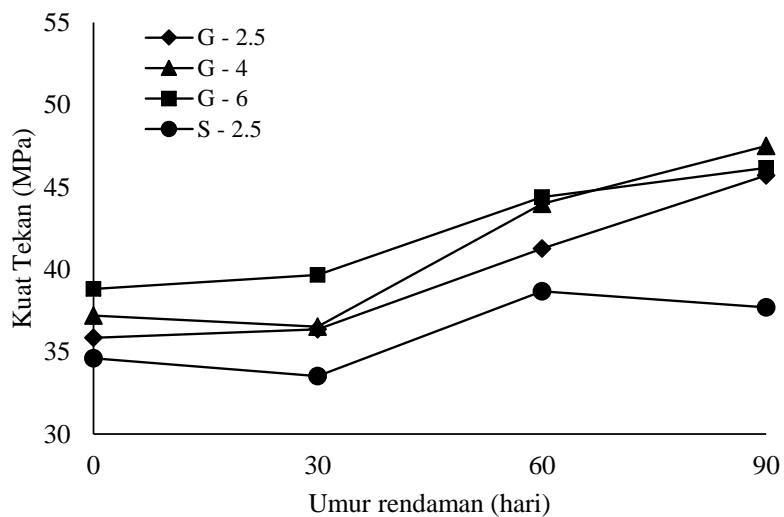
Umur (hari)	Tipe	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	fc (MPa)	Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Klasifikasi	
30	G-2.5	269237	7853.982	34.280	36.37	0.648	Istimewa	
		269237		34.280				
		302075		38.461				
	G-4	280502		35.715	36.53	0.813		
		280502		35.715				
		293280		37.342				
	G-6	284310		36.199	39.66	0.394		Istimewa
		284310		36.199				
		338689		43.123				
	S-2.5	252396		32.136	33.52	1.381		Istimewa
		252396		32.136				
		274081		34.879				
60	G-2.5	305750	38.929	41.27	1.911	Baik		
		305750	38.929					
		342516	43.611					
	G-4	294844	37.541	43.99	1.436	Sangat Baik		
		396109	50.434					
		396109	50.434					
	G-6	340000	43.290	44.39	1.102	Istimewa		
		357313	45.495					
		357313	45.495					
	S-2.5	291969	37.175	38.67	1.443	Sangat Baik		
		315391	40.157					
		315391	40.157					
90	G-2.5	353063	44.953	48.09	1.057	Istimewa		
		353063	44.953					
		364805	46.448					
	G-4	356109	45.341	52.01	1.773	Baik		
		356109	45.341					
		390211	49.683					
	G-6	357438	45.510	44.75	0.934	Istimewa		
		357438	45.510					
		367813	46.831					
	S-2.5	297250	37.847	49.07	0.222	Istimewa		
		294781	37.532					
		294781	37.532					

Hasil kuat tekan 4 tipe spesimen dengan *seawater curing* dan *moist curing* dibuat grafik untuk menampilkan perbandingan kuat tekan yang ditunjukkan pada **Gambar 4 - 11** dan **Gambar 4 - 12**.



**Gambar 4 - 11** Grafik perbandingan kuat tekan 4 tipe silinder dengan *seawater curing*

Berdasarkan **Gambar 4 - 11**, dapat dilihat kuat tekan G-2.5, G-4, dan G-6 mengalami penurunan saat umur rendaman di *seawater curing* 30 hari. Pada umur rendaman 60 – 90 hari ketiga tipe silinder mengalami kenaikan kuat tekan yang cukup tinggi.



**Gambar 4 - 12** Grafik perbandingan kuat tekan 4 tipe silinder dengan *moist curing*



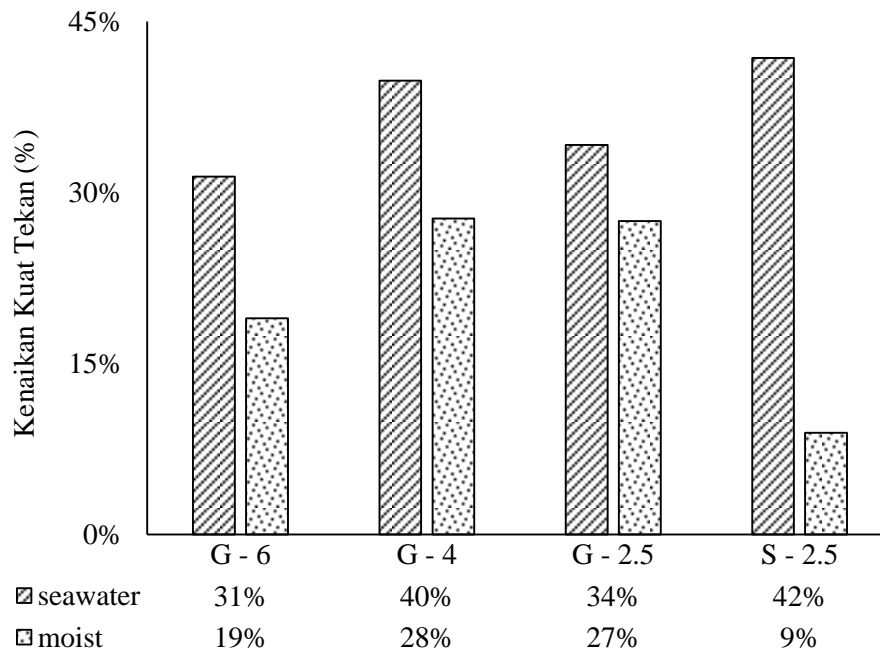
Pada **Gambar 4 - 12** perbandingan kuat tekan 4 tipe silinder dengan *seawater* dan *moist curing* mengalami penurunan dan peningkatan selama masa rendaman. Dapat ditentukan persentase penurunan dan kenaikan nilai kuat tekan yang ditunjukkan pada **Tabel 4 - 30**.

**Tabel 4 - 30 Persentase Penurunan/Kenaikan Kuat Tekan 4 tipe silinder**

Tipe perawatan	Tipe silinder	% kenaikan kuat tekan			
		0 hari	30 hari	60 hari	90 hari
<i>Seawater curing</i>	G - 6	0%	-14%	15%	31%
	G - 4	0%	-10%	11%	40%
	G - 2.5	0%	-6%	5%	34%
	S - 2.5	0%	3%	2%	42%
<i>Moist curing</i>	G - 6	0%	2%	14%	19%
	G - 4	0%	-2%	18%	28%
	G - 2.5	0%	1%	15%	27%
	S - 2.5	0%	-3%	12%	9%

Kekuatan tekan beton meningkat hingga 90 hari perendaman (**Gambar 4 - 13**). Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Bayuaji et al. (2015) menyatakan bahwa kekuatan tekan geopolimer yang terendam di laut secara signifikan dipengaruhi oleh rasio aktivator alkali dan *fly ash*. Kuat tekan geopolimer pada *moist curing* mencapai lebih dari 35 MPa. Dalam proses geopolimerisasi, aluminosilikat oksida bereaksi terhadap alkali polisilikat dan menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Ikatan polimer aluminosilikat lebih stabil ketika terendam dalam air laut.

Penelitian Wiyono et al. (2006) menyatakan bahwa kuat tekan mortar geopolimer pada lingkungan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 10% selama 56 hari lebih stabil dan bentuk fisik mortar masih terjaga dengan baik. Selain itu, kuat tekan semua spesimen berkurang menjadi 33 MPa pada 30 hari, ditunjukkan pada **Gambar 4 - 11**.



**Gambar 4 - 13 Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tekan 4 tipe silinder umur 90 hari (*seawater curing*)**

Sesuai dengan hasil penelitian oleh Albitar et al. (2017), serangan sulfat pada beton OPC mengurangi kekuatan tekan dari usia 14 hari pencelupan. Sementara kekuatan tekan geopolimer telah meningkat hingga 60 hari. Halim et al. (2017) melaporkan bahwa kation di sekitar geopolimer tidak mengganggu mekanisme dan membentuk geopolimer. Alnahhal et al. (2018) menjelaskan bahwa sulfat dalam air laut akan bereaksi dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  untuk membentuk mineral ettringit. Selain itu, gypsum akan bereaksi dengan  $\text{C}_3\text{A}$  untuk membentuk ettringite. Kehadiran ettringite akan menyebabkan retakan yang dalam dan kekuatan beton berubah.

Bentuk kehancuran spesimen ditunjukkan pada **Gambar 4 - 14** setelah pengujian kuat tekan. Menurut ASTM C 39, sebagian besar pola mekanisme adalah berbentuk kolom, kerucut dan split, atau pola kerucut dan geser (**Gambar 4 - 15**). Ini menunjukkan bahwa penerapan bahan pelapis pada beton silinder memenuhi persyaratan untuk melakukan pengujian kekuatan tekan.



G-2.5



G-4



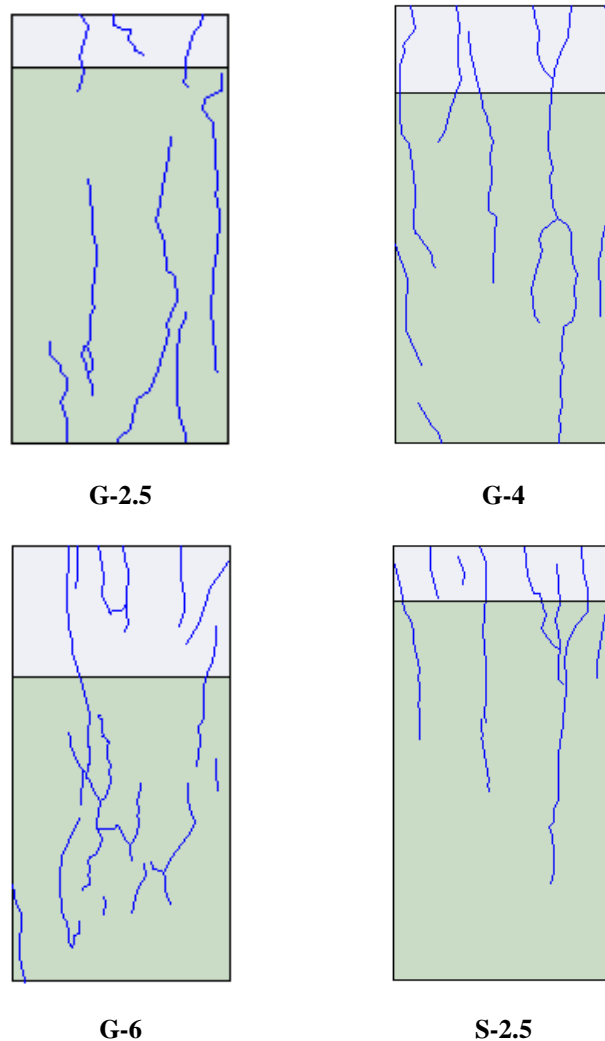
G-6



S-2.5

**Gambar 4 - 14 Spesimen silinder setelah pengujian kuat tekan**

Tarmidzi (2016), menyatakan bahwa nilai kuat tekan mempengaruhi kegagalan beton induk yang memiliki kuat tekan lebih rendah dibandingkan bahan *repair*. Selain itu, berdasarkan rasio L/D spesimen dan kuat tekan dari material mempengaruhi pola kehancuran spesimen. Rasio L/D beton OPC dengan ketebalan pelapis 2,5 cm, 4 cm, dan 6 cm berturut-turut adalah, 1.75, 1.6, dan 1.4. Beton OPC yang memiliki kuat tekan lebih rendah dibandingkan pelapis geopolimer dengan rasio L/D beton OPC jauh lebih kecil menunjukkan kehancuran beton OPC terlebih dahulu dibandingkan pelapisnya. Sedangkan dengan rasio L/D beton OPC yang lebih besar dengan pelapis geopolimer yang tipis, menunjukkan kehancuran beton OPC dan pelapis yang merata.



**Gambar 4 - 15 Mekanisme keruntuhan spesimen setelah pengujian kuat tekan**

#### **4.4.5. Analisa Tarik Belah**

##### **a. Kuat tarik belah beton OPC**

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada 2 buah silinder berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Pengujian dilakukan saat umur beton OPC 30 hari setelah *moist curing* (0 hari *seawater curing*) dan 90 hari *seawater curing*. Hasil pengujian kuat tarik belah beton ditampilkan pada **Tabel 4 - 31**.

**Tabel 4 - 31 Hasil uji kuat tarik belah silinder OPC**

Umur (hari)	P (N)	D (mm)	L (mm)	fct (MPa)	Rata-rata (MPa)
30 hari ( <i>moist curing</i> )	107795 77928.6	100 100	200 200	10.78 7.79	9.29
90 hari ( <i>seawater curing</i> )	107588 138825	100 100	200 200	10.76 13.88	12.32

Dari **Tabel 4 - 31** hasil uji, kuat tarik belah beton OPC dicapai pada umur 0 hari *seawater curing* adalah sebesar 9.29 MPa dan setelah 90 hari *seawater curing* sebesar 12.32 MPa.



**Gambar 4 - 16 Pengujian kuat tarik belah beton OPC**

b. Kuat tarik belah spesimen

Pengujian tarik belah spesimen silinder dilakukan pada 2 sampel dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Ada 4 tipe spesimen silinder yang dilakukan pengujian yaitu G-2.5, G-4, G-6, dan S-2.5. Pengujian dilakukan saat umur rendaman spesimen dengan *seawater curing* dari 0 hari, 30 hari, 60 hari, dan 90 hari. Untuk spesimen kontrol uji tarik belah dilakukan pada spesimen OPC pada

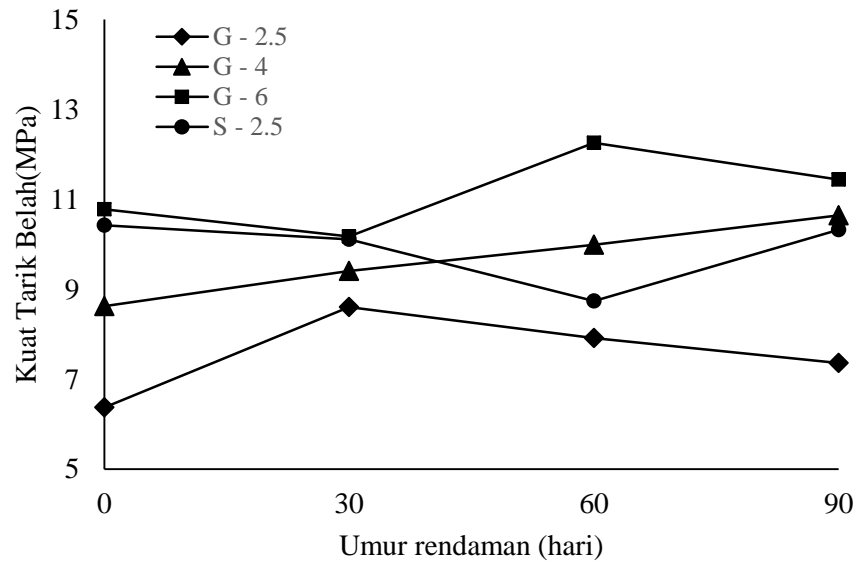
umur rendaman 0 hari dan 90 hari. Hasil pengujian tarik belah spesimen dengan *seawater curing* ditampilkan pada **Tabel 4 - 32**.

**Tabel 4 - 32 Hasil uji kuat tarik belah 4 tipe silinder dengan *seawater curing***

Tipe curing	Tipe Silinder	Kuat Tarik Belah (MPa)			
		0 hari	30 hari	60 hari	90 hari
<i>Seawater</i>	G - 6	10.78	10.17	12.26	11.44
	G - 4	8.62	9.41	9.99	10.64
	G - 2.5	6.37	8.61	7.91	7.36
	S - 2.5	10.42	10.11	8.74	10.32



**Gambar 4 - 17 Pengujian kuat tarik belah spesimen silinder dengan *seawater curing***

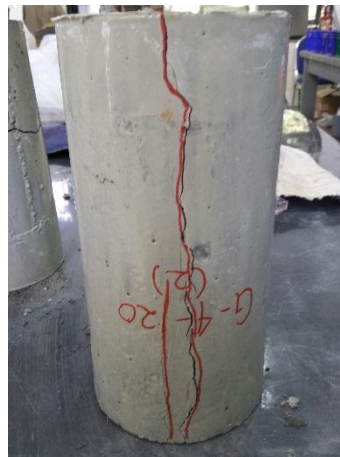


**Gambar 4 - 18** Grafik perbandingan kuat tarik belah 4 tipe silinder dengan *seawater curing*

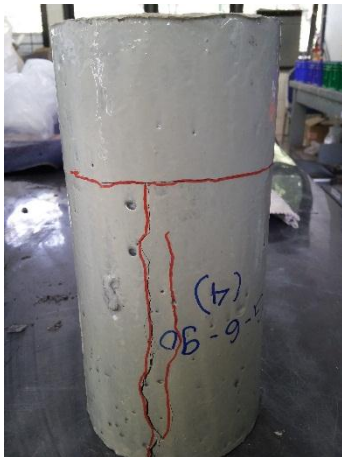
Data uji kuat tarik belah untuk perendaman 0, 30, 60, dan 90 hari ditunjukkan pada **Gambar 4 - 18**. Hasilnya menunjukkan bahwa ketebalan lapisan telah meningkatkan kekuatan tekan beton dalam air laut. G-6 memiliki kekuatan tarik belah yang lebih tinggi daripada tipe lainnya pada 90 hari, hingga 11,44 MPa. Kuat tarik belah G-2.5 dan G-4 lebih rendah dari G-6, masing-masing hingga 7,36 dan 10,64 MPa. Untuk kuat tarik belah S-2.5 mencapai 10,32 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan G-2.5 dengan ketebalan lapisan yang sama.



G-2.5



G-4



G-6

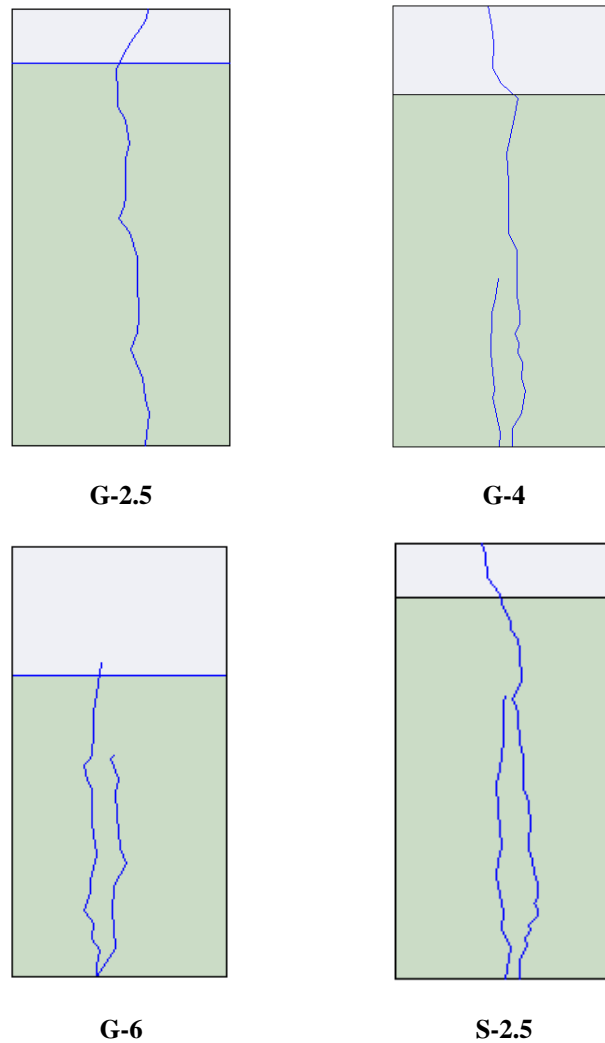


S-2.5

**Gambar 4 - 19 Spesimen silinder setelah pengujian kuat tarik belah**

Bentuk kehancuran spesimen ditunjukkan pada **Gambar 4 - 19** setelah pengujian kuat belah. Dapat dilihat bahwa belah yang terjadi pada spesimen tidak merata seperti pada beton OPC. Pola retak spesimen diilustrasikan pada gambar. Seperti pada spesimen uji kuat tekan, dapat dilihat bahwa belah yang terjadi pada silinder dipengaruhi oleh nilai kuat tekan dan rasio L/D dari beton OPC serta bahan pelapis. Kuat tekan beton OPC yang lebih rendah mempengaruhi belah yang lebih dahulu terjadi dibandingkan mortar geopolimer yang lebih kuat, terutama dengan tinggi L beton OPC yang lebih kecil.





**Gambar 4 - 20 Mekanisme keruntuhan spesimen setelah pengujian kuat tarik belah**

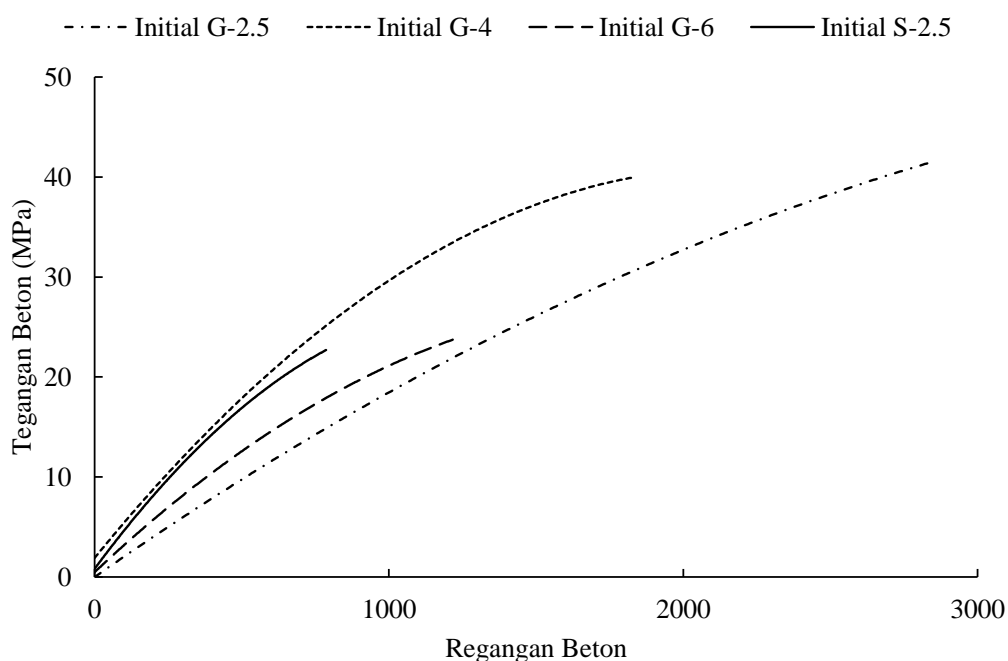
#### **4.4.6. Analisa Modulus Elastisitas**

Pengujian modulus elastisitas dilakukan bersamaan dengan pengujian kuat tekan spesimen silinder. Ada 4 tipe spesimen silinder yang dilakukan pengujian yaitu G-2.5, G-4, G-6, dan S-2.5. Pengujian dilakukan saat umur rendaman spesimen dengan *seawater curing* dari 0 hari dan 90 hari. Hasil pengujian modulus elastisitas spesimen ditampilkan pada **Tabel 4 - 33**.

**Tabel 4 - 33 Hasil uji modulus elastisitas silinder beton**

Umur (hari)	Kode	Kuat Tekan (MPa)	Regangan Maksimum	Modulus Elastisitas (MPa)
0	G-2.5	36.41	2832.86	17781.87
	G-4	40.39	1829.11	29860.97
	G-6	36.48	1216.9	30652.69
	S-2.5	30.29	1181.23	36453.55
90	G-2.5	36.74	3644.28	11440.2
	G-4	37.43	8842.52	5277.13
	G-6	38.34	4979.88	17725.43
	S-2.5	38.02	7621.4	7370.67

Modulus elastisitas S-2.5 mencapai 36453.55 MPa sebelum direndam merupakan nilai tertinggi dibandingkan tipe lainnya. Dapat disimpulkan bahwa S-2.5 bersifat paling getas dibandingkan tipe lainnya. Hasil modulus elastisitas dengan bahan pelapis geopolimer mencapai nilai tertinggi dengan lapisan 6 cm yaitu, 30653.69 MPa. Untuk tipe G-2.5 dan G-4, masing-masing adalah 17781.87 MPa dan 29860.97 MPa.

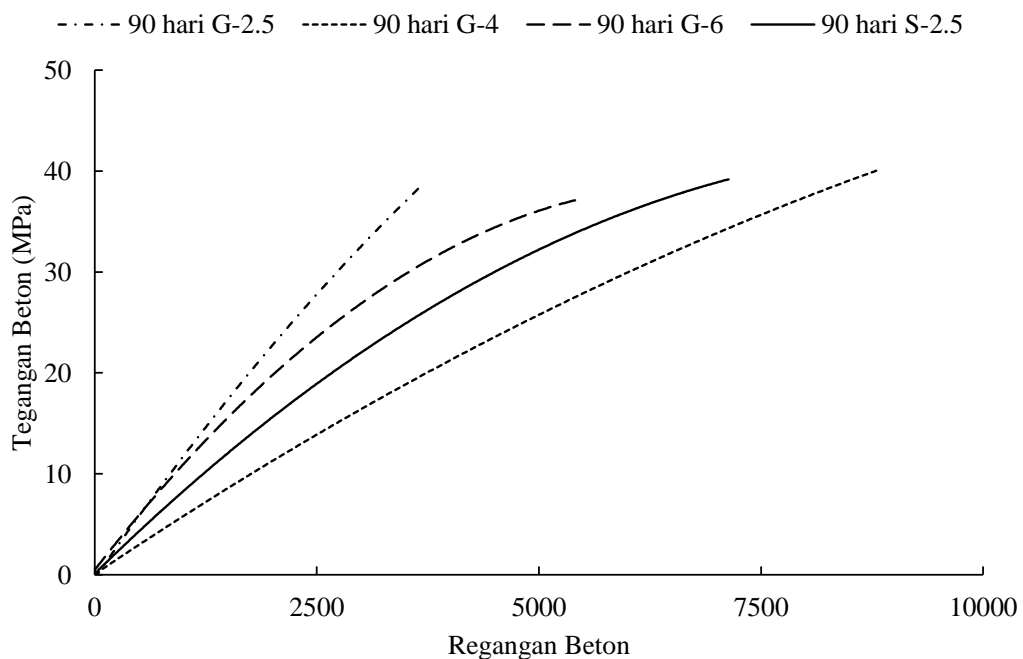


**Gambar 4 - 21 Perbandingan modulus elastisitas 4 tipe spesimen initial (0 hari)**

Modulus elastisitas S-2.5 pada umur spesimen 90 hari rendaman menurun secara signifikan hingga mencapai 7370.67 MPa atau dengan penurunan sebesar 80%. Hasil modulus elastisitas dengan bahan pelapis geopolimer juga mengalami penurunan dan untuk nilai tertinggi modlus elastisitas dengan lapisan 6 cm yaitu, 17724.43 MPa. Untuk tipe G-2.5 dan G-4, masing-masing adalah 5277.13 MPa dan 11440.2 MPa.

Dari **Gambar 4 - 21** menunjukkan bahwa regangan beton dari terbesar yang terjadi berturut-turut adalah G-2.5, G-4, G-6 dan S-2.5. Sehingga penambahan lapisan mortar geopolimer dengan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton OPC meningkatkan sifat getas spesimen. Semakin menebalnya lapisan pada beton makin getas spesimen tersebut.

Pada **Gambar 4 - 22** menunjukkan bahwa regangan beton terbesar yang terjadi berturut-turut adalah G-4, S-2.5, G-6 dan G-2.5. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen yang bersifat paling getas adalah G-2.5 dengan penurunan nilai modulus elastisitas sebesar 36%, dan spesimen G-6 mengalami penurunan sebesar 42%. Penurunan nilai modulus elastisitas terbesar terjadi pada G-4, yaitu sebesar 82%.



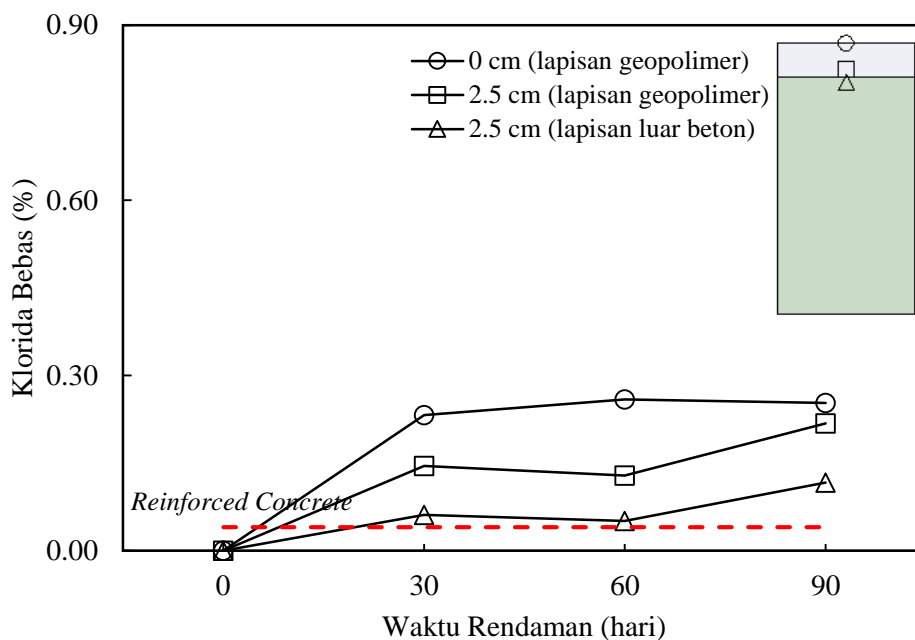
**Gambar 4 - 22 Perbandingan modulus elastisitas 4 tipe spesimen dengan seawater curing (90 hari)**

#### 4.4.7. Analisa Penetrasi Klorida dan Koefisien Difusi Klorida

Pengukuran konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada spesimen yang direndam dengan *seawater curing* berdasarkan kedalaman. Titik sampel kedalaman yang diambil berdasarkan tipe spesimen dan telah dideskripsikan pada bab 3. Pengukuran konsentrasi klorida pada sampel uji dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan ITS. Konsentrasi klorida yang diukur adalah klorida bebas dan total.

##### a. Konsentrasi Klorida Bebas

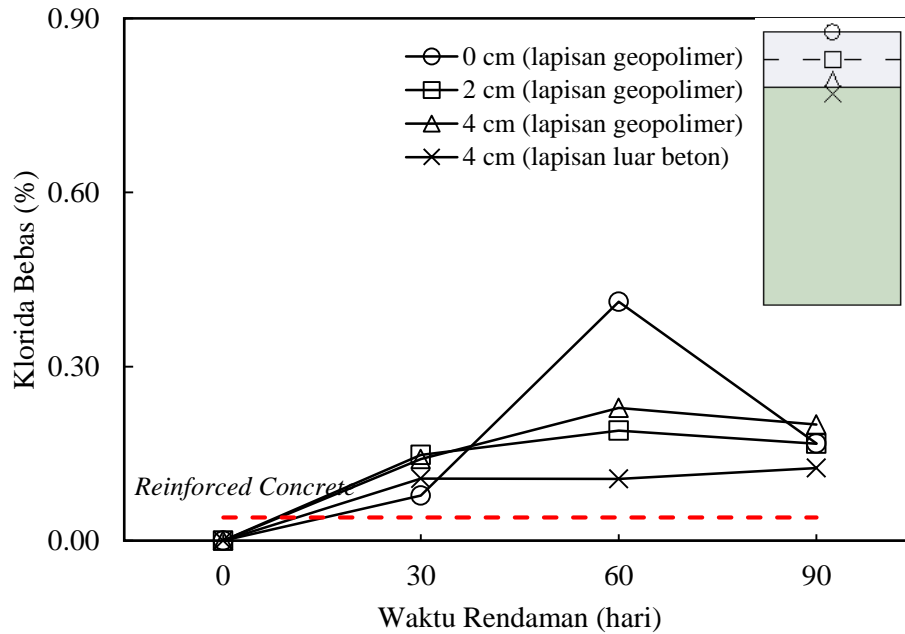
Hasil konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada kedalaman tertentu di setiap spesimen di tunjukkan pada **Gambar 4 - 23** sampai **Gambar 4 - 26**. Pengukuran dilakukan pada spesimen yang telah terendam dengan *seawater curing* dari umur 0 hari hingga 90 hari.



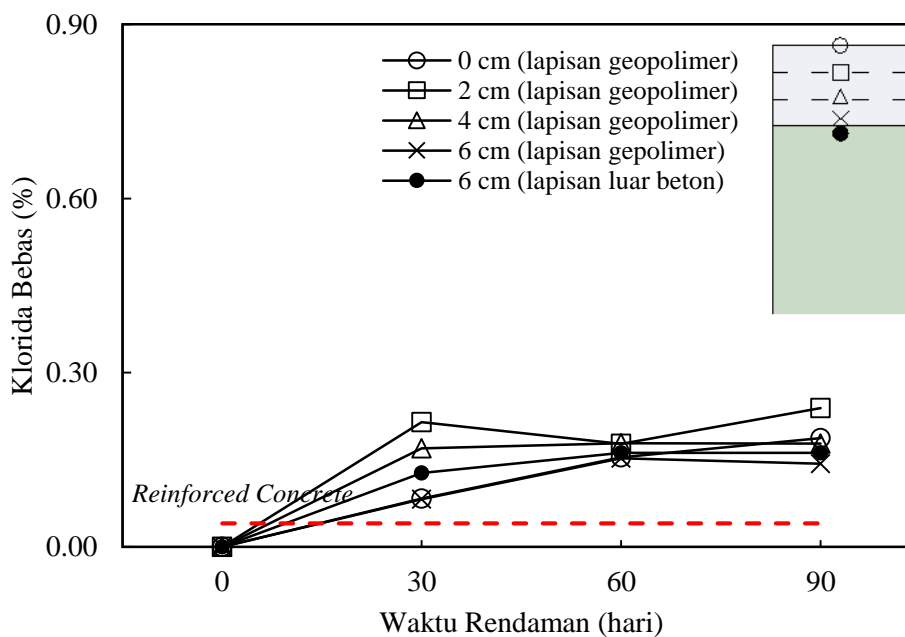
**Gambar 4 - 23** Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-2.5

Dari **Gambar 4 - 23** konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada beton OPC pada umur 90 hari mencapai 0.12%. Sedangkan pada permukaan yang terkena air laut dan kedalaman 2.5 cm, berturut-turut nilai konsentrasi klorida bebas sebesar 0.25% dan 0.22%.

Pada **Gambar 4 - 24** konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada beton OPC pada umur 90 hari mencapai 0.13%. Sedangkan pada permukaan yang terkena air laut, kedalaman 2.5 cm dan 4 cm, berturut-turut nilai konsentrasi klorida bebas sebesar 0.17%, 0.17% dan 0.20%.

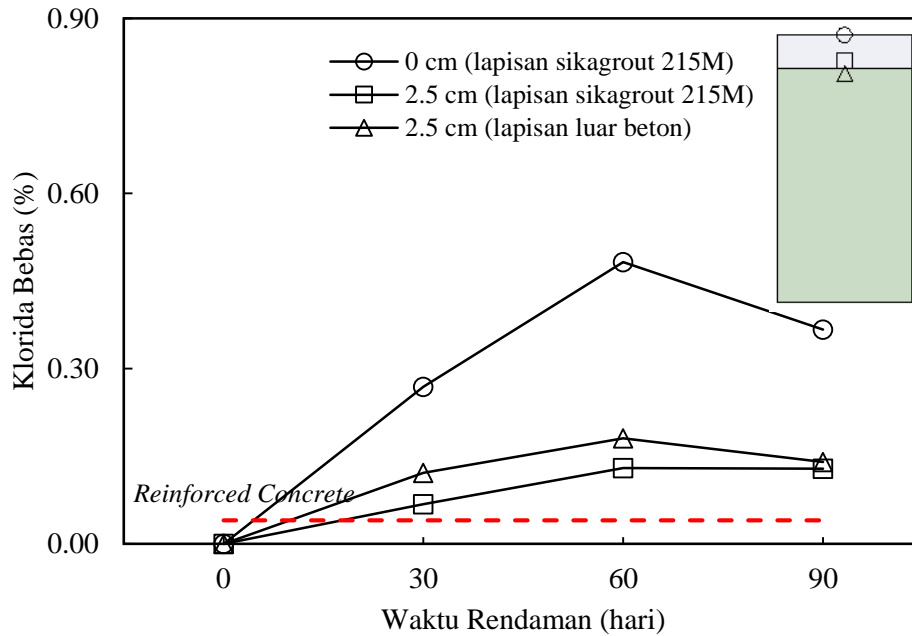


**Gambar 4 - 24** Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-4



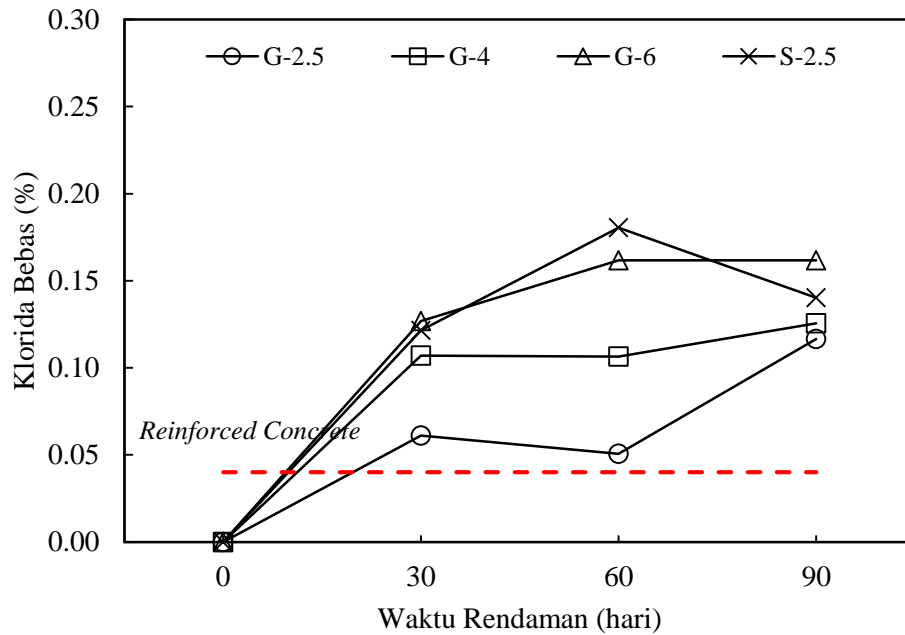
**Gambar 4 - 25** Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe G-6

Dari **Gambar 4 - 25** konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada beton OPC pada umur 90 hari mencapai 0.16%. Sedangkan pada permukaan yang terkena air laut, kedalaman 2.5 cm, 4 cm, dan 6 cm berturut-turut nilai konsentrasi klorida bebas sebesar 0.19%, 0.24%, 0.18% dan 0.14%.



**Gambar 4 - 26 Perkembangan konsentrasi klorida bebas tipe S-2.5**

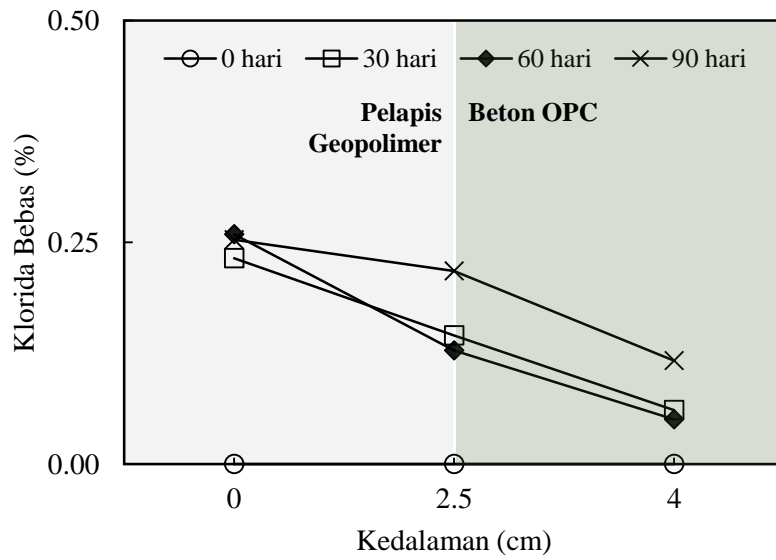
Dari **Gambar 4 - 26** konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada beton OPC pada umur 60 hari sudah mencapai 0.18%. Sedangkan pada permukaan yang terkena air laut dan kedalaman 2.5 cm, berturut-turut nilai konsentrasi klorida bebas sebesar 0.37% dan 0.13%.



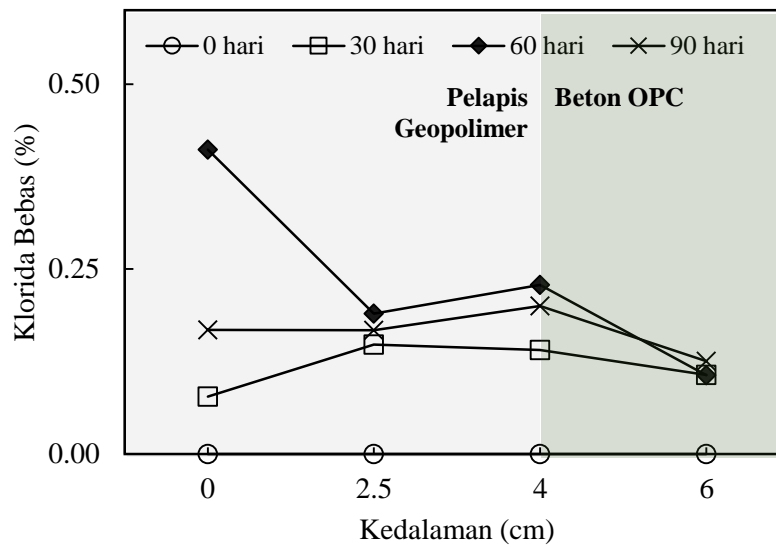
**Gambar 4 - 27 Perkembangan konsentrasi klorida bebas pada OPC tiap tipe spesimen**

Konsentrasi klorida bebas yang terkandung pada permukaan luar beton yang terlapis dengan geopolimer dihitung dari berat beton dengan mix design pada yang digunakan. Berdasarkan SNI 2854-1992. Kadar klorida bebas pada beton bertulang disyaratkan minimal 0.15% dari berat semen. Sehingga dari perhitungan mix design beton OPC didapatkan kadar minimal kandungan klorida bebas yang disyaratkan adalah 0.04% dari berat beton OPC.

Pada umur rendaman 30 hari hingga umur 90 hari kadar klorida bebas dari beton OPC di semua tipe spesimen melebihi syarat minimal klorida bebas yaitu 0.04% dari berat semen. Nilai kandungan klorida bebas beton OPC terlapis mortar geopolimer paling rendah didapatkan dengan tebal pelapisan 2,5 cm, di ikuti kemudian dengann tebal 4 cm dan 6 cm. Sedangkan dengan pelapis Sikagrout 215M 2,5 cm memiliki kandungan klorida bebas paling tinggi (**Gambar 4 - 27**). Secara umum konsentrasi klorida bebas melebihi batas minimal syarat klorida bebas yaitu 0.05%. Perbandingan konsentrasi klorida setiap kedalaman dapat dilihat pada **Gambar 4 - 28** sampai **Gambar 4 - 31**.

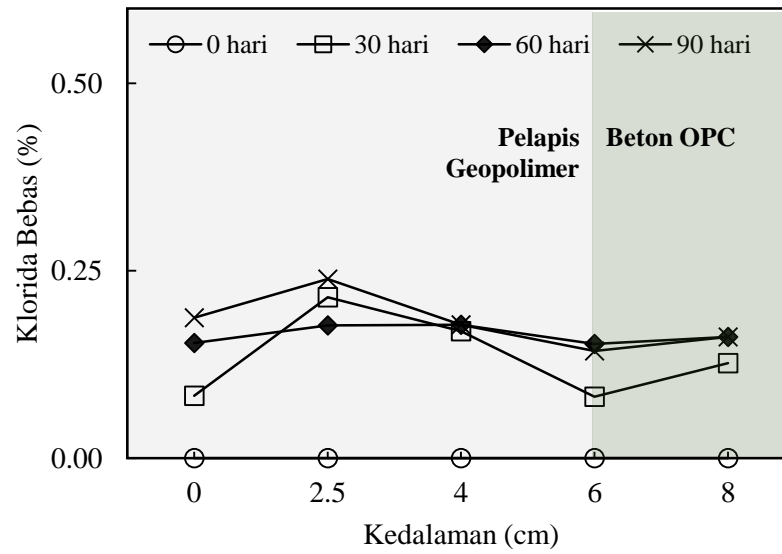


**Gambar 4 - 28 Konsentrasi klorida pada tipe G-2.5 vs kedalaman**

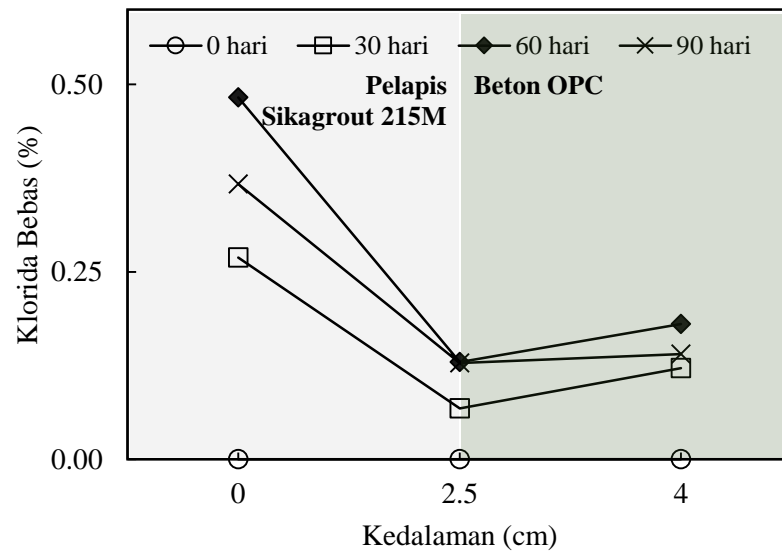


**Gambar 4 - 29 Konsentrasi klorida pada tipe G-4 vs kedalaman**



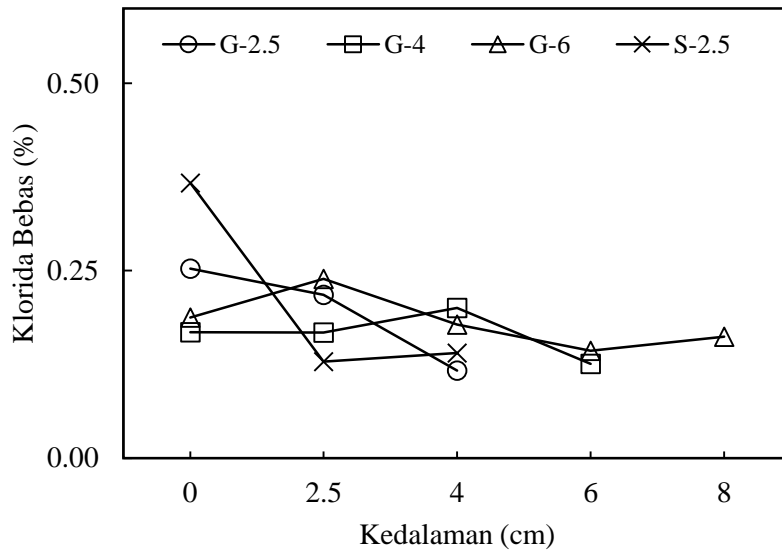


**Gambar 4 - 30** Konsentrasi klorida pada tipe G-6 vs kedalaman



**Gambar 4 - 31** Konsentrasi klorida pada tipe S-2.5 vs kedalaman

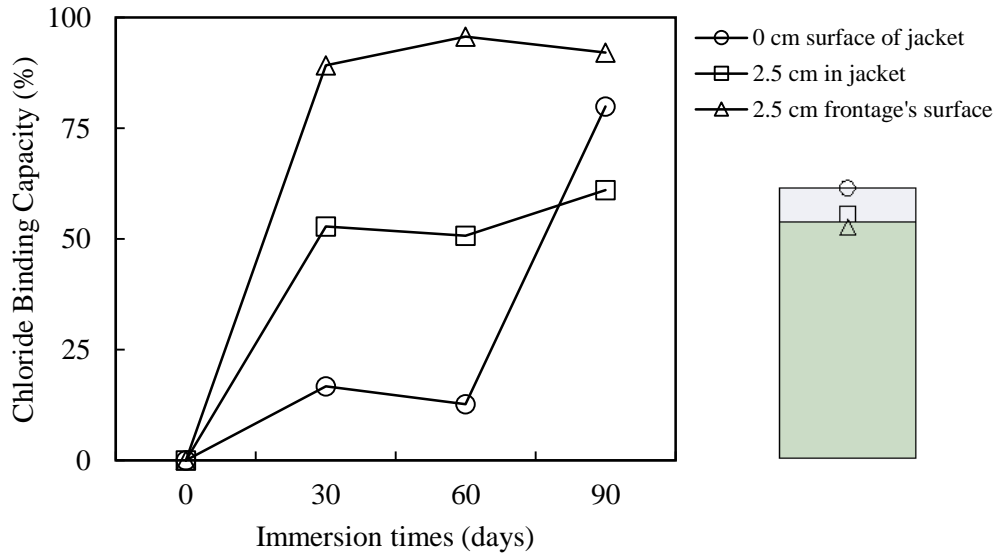
Dari gambar konsentrasi klorida vs kedalaman pada semua tipe di bandingkan pada umur 90 hari yang ditunjukkan pada **Gambar 4 - 32**.



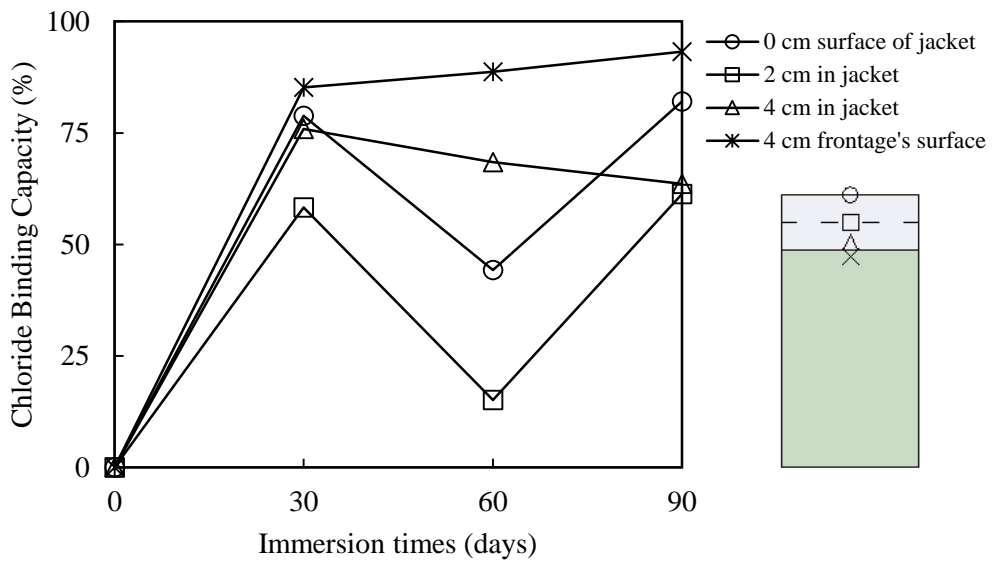
**Gambar 4 - 32 Konsentrasi klorida tiap kedalaman umur 90 hari**

Kandungan klorida bebas untuk G-2.5, G-4, G-6, dan S-2.5 pada permukaan bagian depan beton masing-masing adalah 0.12%, 0.13%, 0.16%, dan 0.14%. Untuk G-2.5 dan G-4, kandungan klorida bebas menurun dari 0,22% menjadi 0,12% (G-2,5) dan 0,20% menjadi 0,13% (G-4). Persentase pengurangan kandungan klorida bebas dalam G-2.5 dan G-4 adalah 45,45% dan 35%. Sedangkan pada G-6, kandungan klorida bebas meningkat dari 0,14% menjadi 0,16%, dengan persentase peningkatan 12,5%. Persentase kandungan klorida bebas pada semua tipe (permukaan bagian depan beton) melebihi batas syarat beton bertulang yaitu 0.04%..

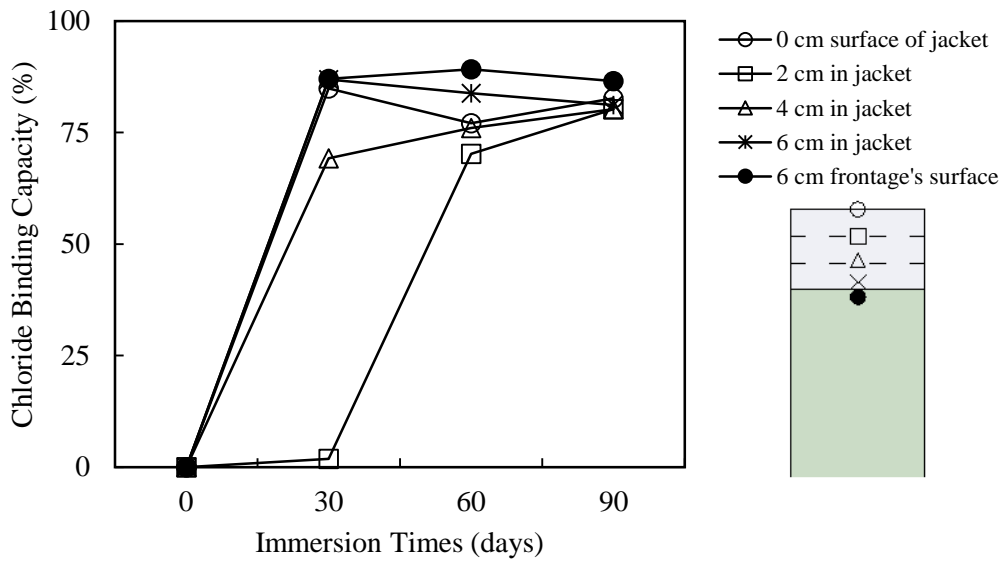
b. Kapasitas Pengikatan Klorida



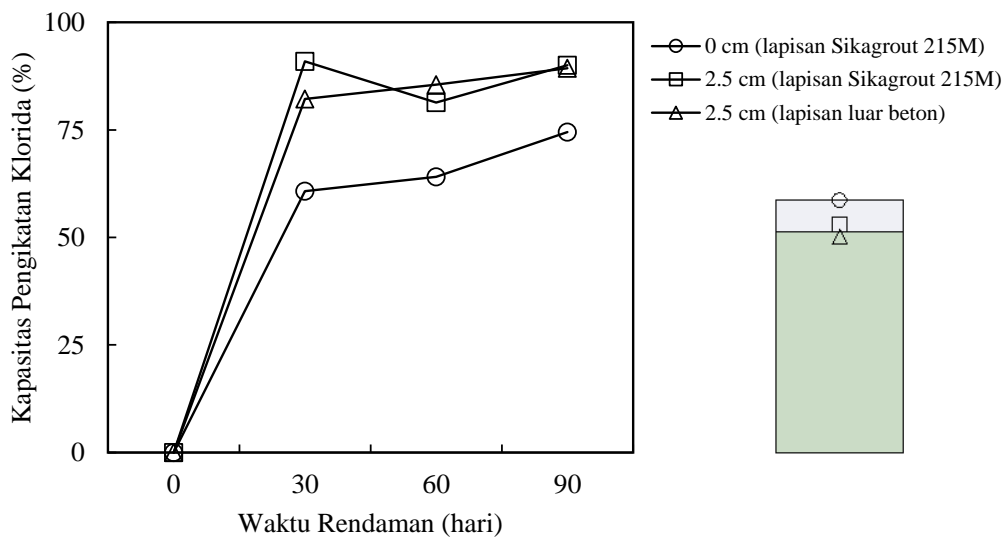
**Gambar 4 - 33 Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-2.5**



**Gambar 4 - 34 Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-4**



**Gambar 4 - 35 Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe G-6**



**Gambar 4 - 36 Kapasitas Pengikatan Klorida pada tipe S-2.5**

Kapasitas pengikatan klorida dari tiga variabel ditunjukkan pada **Gambar 4 - 33** sampai **Gambar 4 - 36**. Kapasitas pengikatan klorida yang terjadi pada permukaan depan beton adalah 92,13%, 93,23%, dan 86,53% (pada kedalaman 2,5, 4, dan 6 cm). Kapasitas pengikatan klorida yang terjadi dalam 2 cm mencapai 86,30% pada perendaman 90 hari. Sedangkan pada kedalaman 4 cm mencapai

87,61%, dan pada kedalaman 6 cm adalah 88,95%. Kapasitas pengikatan klorida dalam lapisan geopolimer adalah sekitar 80-88%. Dapat dilihat bahwa lapisan beton dengan mortar geopolimer dapat mengurangi kandungan klorida bebas yang masuk ke beton. Kapasitas pengikatan klorida yang tinggi menyebabkan penurunan kandungan klorida bebas dalam beton.

Gunasekara et al. (2019) menyatakan bahwa kapasitas pengikatan klorida yang lebih tinggi terjadi dalam beton, karena komposisi kimia dan pembentukan garam Friedel ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Ion klorida terikat pada produk hidrasi dari semen, gel C-S-H dan C-A-H. Namun, ion klorida dalam geopolimer terikat dengan alumina dan kalsium oksida untuk membentuk garam Friedel, mengurangi masuknya klorida ke beton. Menurut penelitian Abd El Fattah et al. (2018), kapasitas pengikatan klorida dalam geopolimer mengurangi konsentrasi klorida bebas. Kandungan klorida bebas yang lebih rendah dapat mengurangi potensi klorida bebas untuk terlibat dalam pemecahan lapisan penguat pasif.

### c. Koefisien Difusi Klorida

Perhitungan koefisien difusi klorida dilakukan pada tiap spesimen dalam waktu rendaman hingga 90 hari di lingkungan air laut. Pengambilan sampel klorida untuk diukur berdasarkan kedalaman kemudian di plot dan dihitung koefisien difusi klorida. Hasil pengukuran koefisien difusi klorida dengan *Fick's Second Law* ditampilkan pada **Tabel 4 - 34** dan **Tabel 4 - 35**.

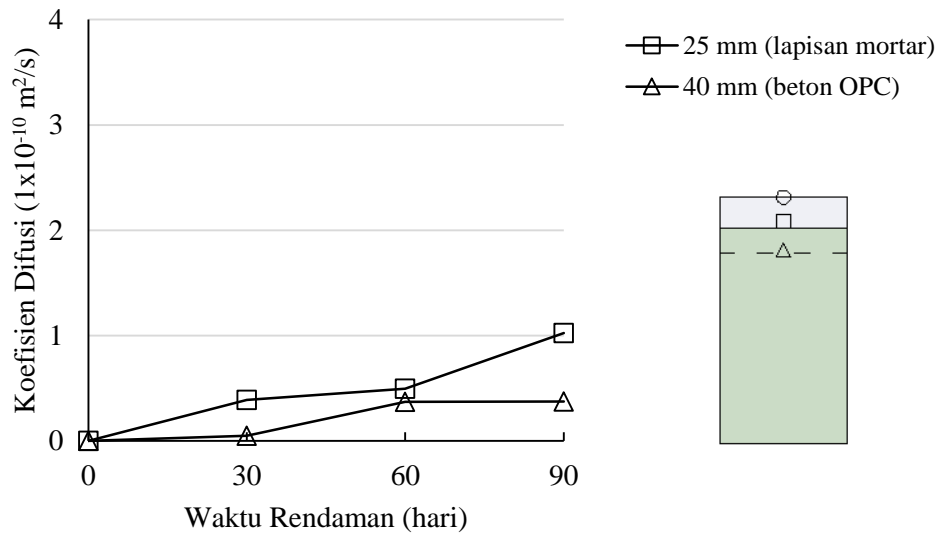
**Tabel 4 - 34 Hasil Koefisien Difusi Klorida dengan *Fick's Second Law***

Tipe spesimen	Umur (hari)	Kedalaman (mm)	Da ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
G-2.5	30		3.905.E-11
	60	25	4.954.E-11
	90		1.024.E-10
	30		4.988.E-12
	60	40	3.727.E-11
	90		3.737.E-11

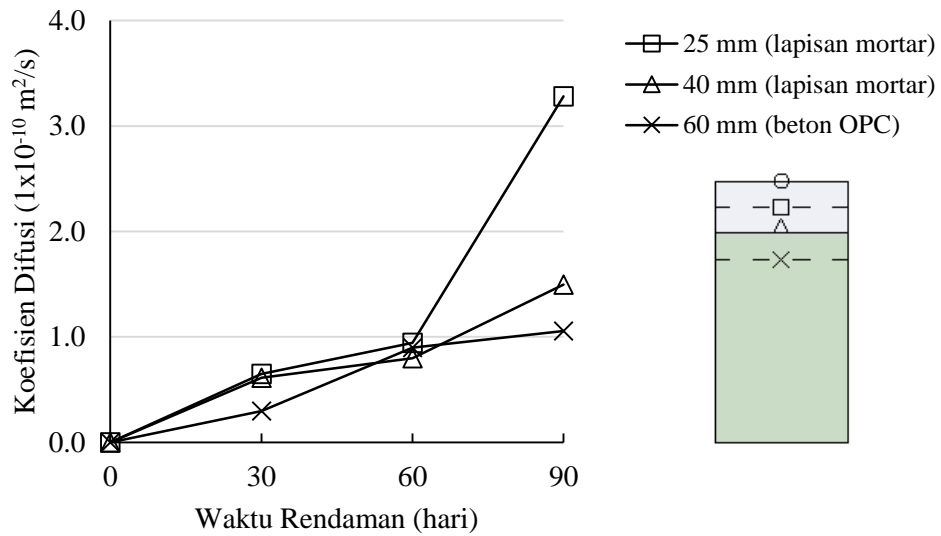
**Tabel 4 - 35 Hasil Koefisien Difusi Klorida dengan *Fick's Second Law* (lanjutan)**

<b>Tipe spesimen</b>	<b>Umur (hari)</b>	<b>Kedalaman (mm)</b>	<b>Da (m<sup>2</sup>/s)</b>
S-2.5	30		2.491.E-11
	60	25	5.077.E-11
	90		1.127.E-10
	30		6.134.E-11
	60	40	8.916.E-11
	90		1.561.E-10
G-4	30		6.472.E-11
	60	25	9.430.E-11
	90		3.283.E-10
	30		6.130.E-11
	60	40	7.987.E-11
	90		1.494.E-10
G-6	30		2.954.E-11
	60	60	8.971.E-11
	90		1.056.E-10
	30		1.604.E-11
	60	25	3.842.E-11
	90		3.812.E-10
G-6	30		6.337.E-11
	60	40	7.402.E-11
	90		1.542.E-10
	30		8.807.E-11
	60	60	2.333.E-10
	90		2.686.E-10
G-6	30		6.260.E-11
	60	80	1.665.E-10
	90		1.952.E-10

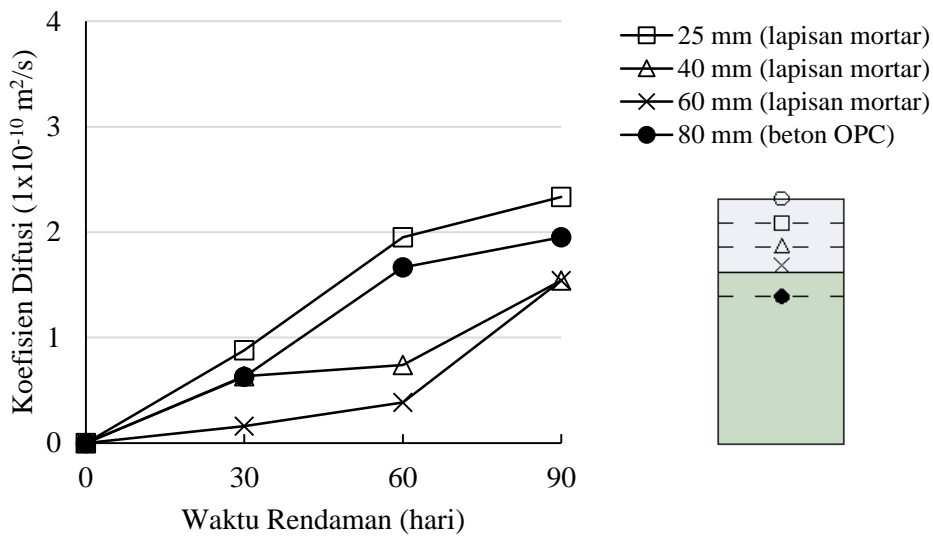
Dari tabel hasil pengukuran koefisien difusi digambarkan secara grafik pada **Gambar 4 - 37** hingga **Gambar 4 - 40**. Dapat dilihat bahwa nilai koefisien difusi dari semua spesimen meningkat dengan bertambah umur rendaman di lingkungan air laut.



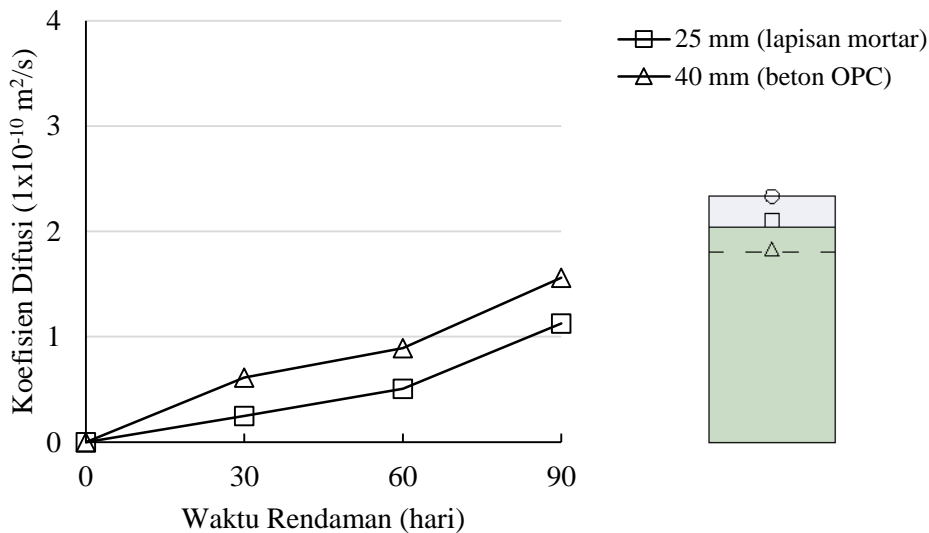
**Gambar 4 - 37 Koefisien Difusi Klorida (m<sup>2</sup>/s) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-2.5**



**Gambar 4 - 38 Koefisien Difusi Klorida (m<sup>2</sup>/s) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-4**



**Gambar 4 - 39 Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe G-6**



**Gambar 4 - 40 Koefisien Difusi Klorida ( $m^2/s$ ) vs Waktu Rendaman (hari) pada tipe s-2.5**

Berdasarkan **Gambar 4 - 37** hingga **Gambar 4 - 40**, nilai koefisien difusi cenderung meningkat dengan jarak kedalaman sampel dengan permukaan yang terekspos makin dekat. Sesuai dengan Sutrisno (2017) menyatakan bahwa makin



jauh jarak permukaan terkspose dengan kedalam yang diukur menunjukkan keberadaan ion Cl yang semakin sedikit, sehingga koefisien difusi semakin kecil.

Perhitungan koefisien difusi klorida juga dilakukan pada spesimen mortar geopolimer dan Sikagrout 215 M dengan metode ASTM C1202-97 dalam skala laboratorium. Hasil pengukuran koefisien difusi klorida ditampilkan pada **Tabel 4 - 36**.

**Tabel 4 - 36 Hasil pengukuran Koefisien Difusi dengan *Fick's Second Law***

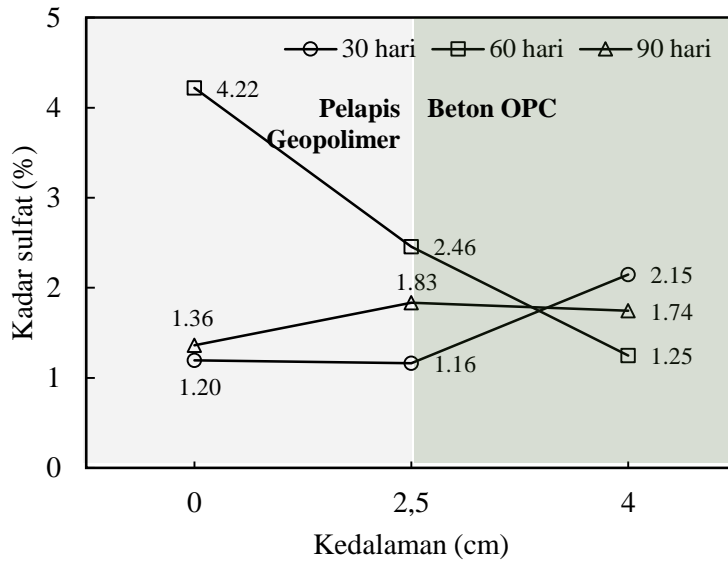
Material	Co (%)	Cd (%)	T (K)	RTL/ZFU	xd (m)	t (s)	$\alpha$	D (m <sup>2</sup> /s)
Geopolimer	0.23	0.15	303	2.18E-05	0.025	21600	0.012	2.33.E-11
Sikagrout 215M	0.27	0.07	303	2.18E-05	0.025	21600	0.005	2.45.E-11

Dari hasil pengukuran didapatkan nilai koefisien difusi mortar geopolimer lebih kecil dibandingkan Sikagrout 215M, akan tetapi perbedaannya tidak terlalu jauh. Sedangkan dari perhitungan dengan *Fick's Second Law* nilai koefisien difusi yang didapatkan berbeda dengan hasil pengukuran dengan skala laboratorium. Nilai koefisien difusi mortar geopolimer lebih kecil dibandingkan Sikagrout 215M meskipun tidak berbeda jauh.

#### 4.4.8. Analisa Penetrasi Sulfat

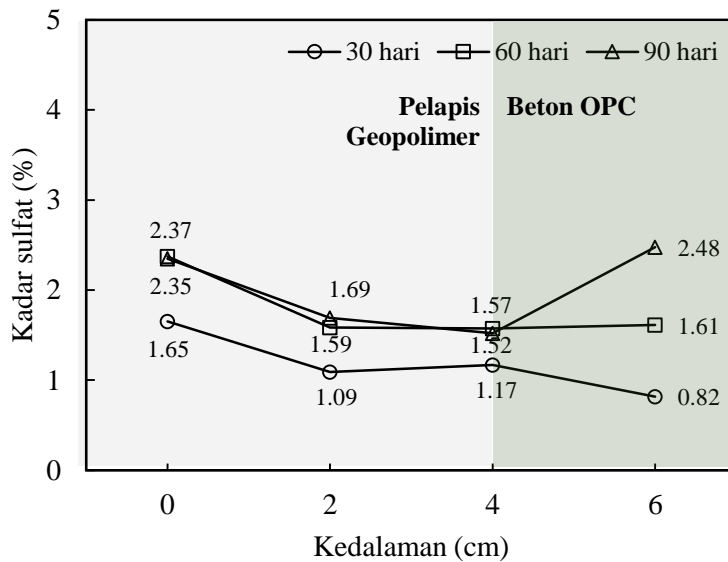
Pengukuran kandungan sulfat pada spesimen yang direndam dengan *seawater curing* berdasarkan kedalaman. Titik sampel kedalaman yang diambil berdasarkan tipe spesimen dan telah dideskripsikan pada bab 3. Pengukuran konsentrasi sulfat pada sampel uji dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan ITS.

Hasil konsentrasi sulfat yang terkandung pada kedalaman tertentu di setiap spesimen di tunjukkan pada **Gambar 4 - 41** sampai **Gambar 4 - 44**. Pengukuran dilakukan pada spesimen yang telah terendam dengan *seawater curing* hingga 90 hari.



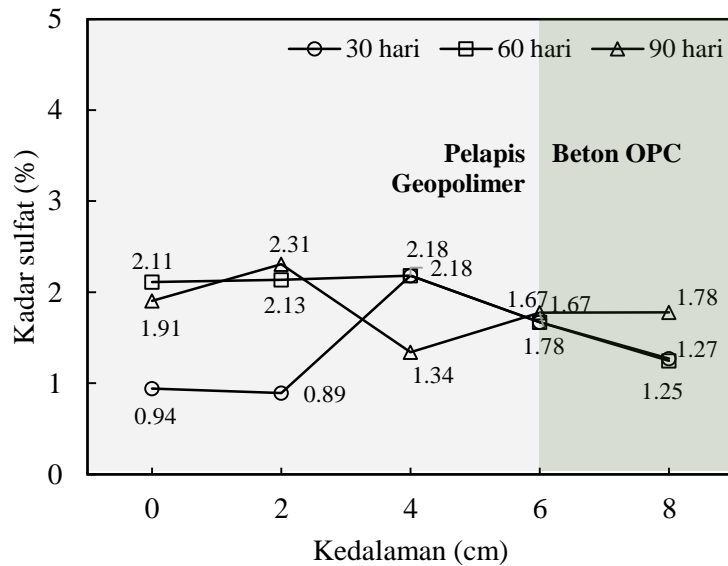
**Gambar 4 - 41 Kandungan sulfat tipe G-2.5 (seawater curing)**

Dari **Gambar 4 - 41** menunjukkan konsentrasi sulfat yang terkandung pada beton OPC yang terlapis mortar geopolimer dengan tebal 2,5 cm pada umur 90 hari mencapai 1.22%. Sedangkan pada umur 30 dan 60 hari kandungan sulfat lebih tinggi yaitu sebesar 2.15% dan 1.74%.



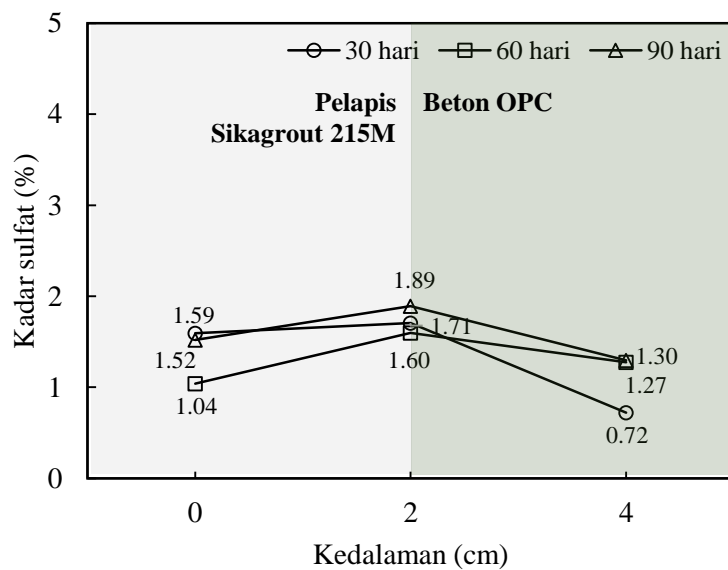
**Gambar 4 - 42 Kandungan sulfat tipe G-4 (seawater curing)**

Dari **Gambar 4 - 42** menunjukkan konsentrasi sulfat yang terkandung pada beton OPC yang terlapsi mortar geopolimer dengan ketebalan 4 cm, pada umur 30 hari hingga 90 hari mengalami peningkatan dari 0.82% hingga 2.48%.



**Gambar 4 - 43** Kandungan sulfat tipe G-6 (*seawater curing*)

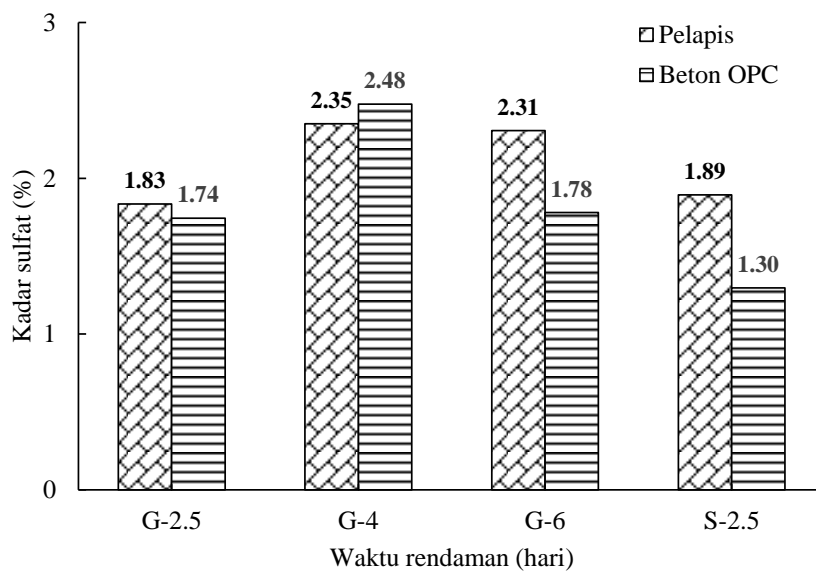
Pada **Gambar 4 - 43** menunjukkan konsentrasi sulfat yang terkandung pada beton OPC yang terlapsi mortar geopolimer dengan ketebalan 6 cm, pada umur 30 hari hingga 90 hari mengalami peningkatan dari 1.25% hingga 1.78%



**Gambar 4 - 44** Kandungan sulfat tipe S-2.5 (*seawater curing*)

Dari **Gambar 4 - 44** konsentrasi sulfat yang terkandung pada beton OPC yang terlapsi Sikagrout 215M dengan ketebalan 2,5 cm pada umur 30 hari hingga 90 hari mengalami peningkatan dari 0.72% hingga 1.30%.

Kandungan sulfat yang di ukur adalah total dari sulfat yang berasal dari material maupun air laut. Kandungan sulfat material dihitung dari persen sulfat dari hasil XRF material dengan komposisi campuran sesuai mix design yang digunakan. Dari hasil perhitungan tersebut didapatkan kandungan sulfat tiap berat beton atau mortar. Kandungan sulfat yang berasal dari material *fly ash* adalah 0.29%, sedangkan yang berasal dari semen adalah 0.44%. Untuk material Sikagrout 215M memiliki kandungan sulfat sebesar 2.91%.



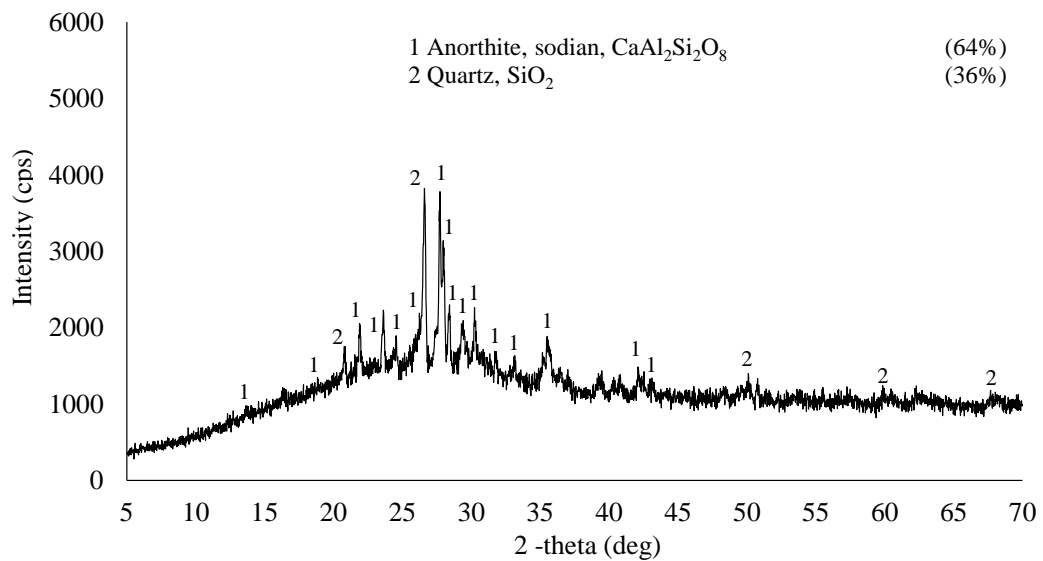
**Gambar 4 - 45 Perbandingan kandungan sulfat yang pada spesimen umur 90 hari (*seawater curing*)**

Pada **Gambar 4 - 45** menampilkan kandungan sulfat pada OPC terlapsi mortar geopolimer paling tinggi terdapat pada tipe G-4 yaitu sebesar 2.48%, akan tetapi dalam mortar geopolimer mengandung sulfat paling tinggi yaitu 2.35%. Nilai kuat tekan G-4 lebih tinggi dibandingkan tipe G-2.5 maupun G-6. Tipe G-6 memiliki kandungan sulfat pada mortar geopolimer lebih tinggi dibandingkan tipe

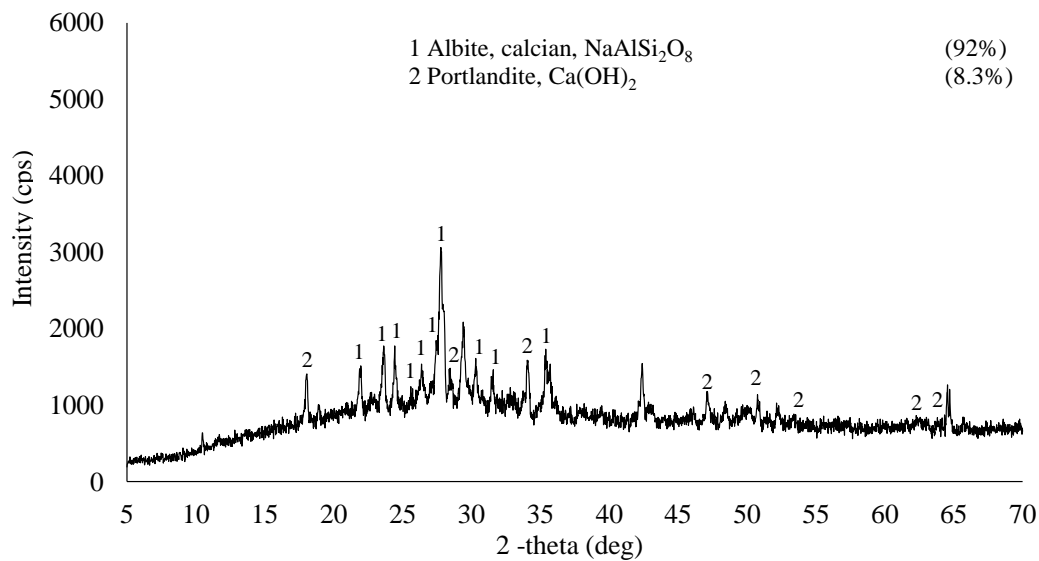
G-2.5, sehingga kuat tekan G-2.5 paling kecil dibanding tipe spesimen dengan pelapis geopolimer lain. Untuk S-2.5 kandungan sulfat pada beton OPC lebih kecil dibandingkan tipe G-2.5 dan kandungan sulfat pada pelapisnya lebih tinggi sehingga kuat tekan S-2.5 pada umur 90 hari lebih tinggi dibandingkan tipe G-2.5.

#### 4.4.9. Analisa XRD (X-Ray Diffraction)

Analisa XRD dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral yang terdapat pada spesimen mortar geopolimer, Sikagrout dan beton OPC yang telah direndam dengan *seawater curing* pada umur 90 hari. Kandungan mineral yang terdapat pada mortar geopolimer dan beton OPC yang dilapisi dapat dilihat pada **Gambar 4 - 46** hingga **Gambar 4 - 49**. **Gambar 4 - 46** menunjukkan kandungan mineral yang terbentuk di mortar geopolimer. Ada 2 mineral yang terbentuk yaitu anordhite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) dan Quartz ( $\text{SiO}_2$ ). Kandungan mineral anordhite lebih banyak yaitu 64% dibandingkan quartz yaitu sebesar 36%.

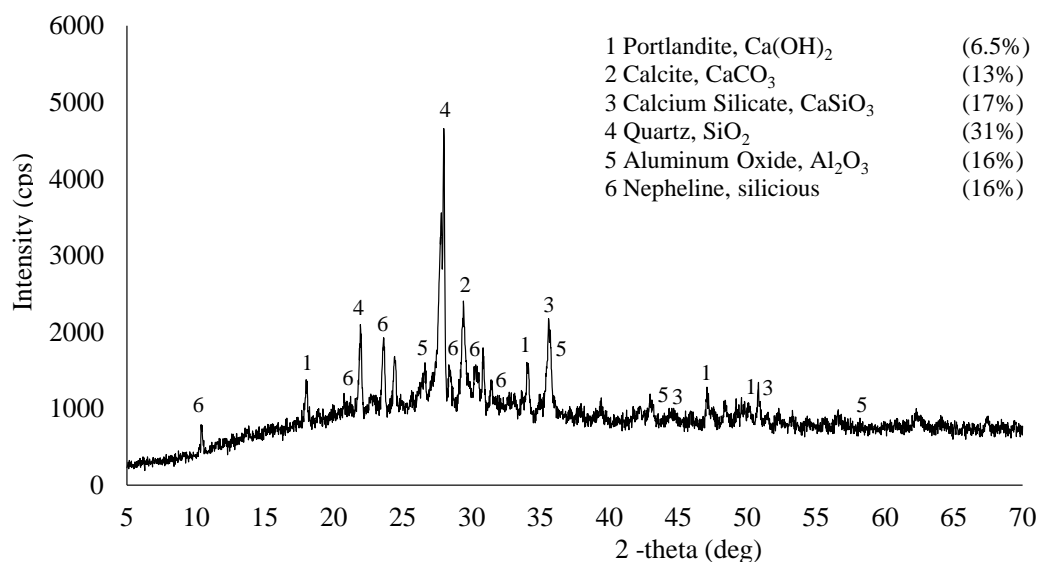


**Gambar 4 - 46** Grafik hasil analisa XRD mortar geopolimer (90 hari *seawater curing*)

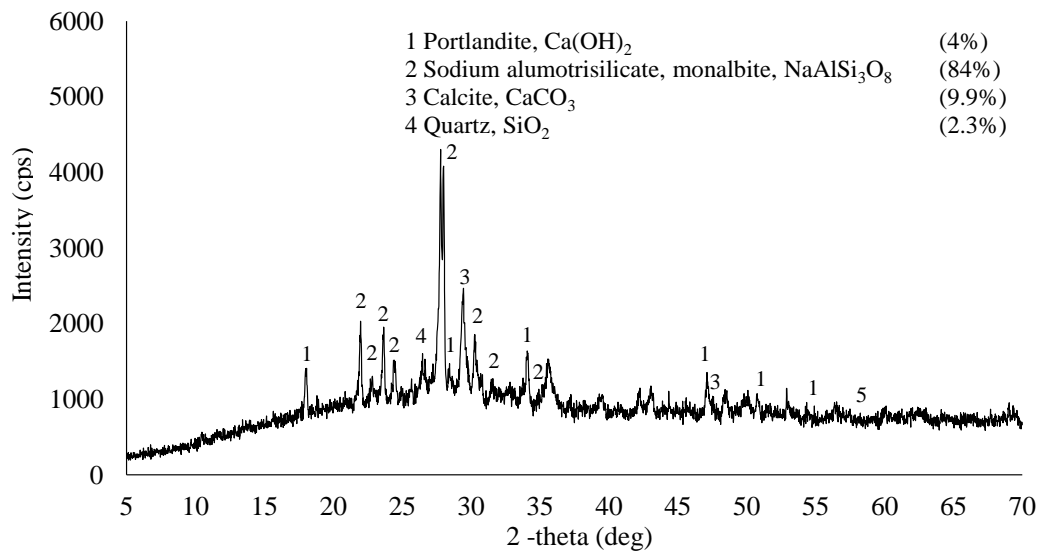


**Gambar 4 - 47 Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-2.5 (90 hari seawater curing)**

**Gambar 4 - 47** menunjukkan kandungan mineral yang terbentuk di beton OPC yang dilapisi dengan mortar geopolimer 2.5 cm. Ada 2 mineral yang terbentuk yaitu albite ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8$ ) dan portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Kandungan mineral albite lebih banyak yaitu 92% dibandingkan portlandite yaitu sebesar 8.3%.



**Gambar 4 - 48 Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-4 (90 hari seawater curing)**

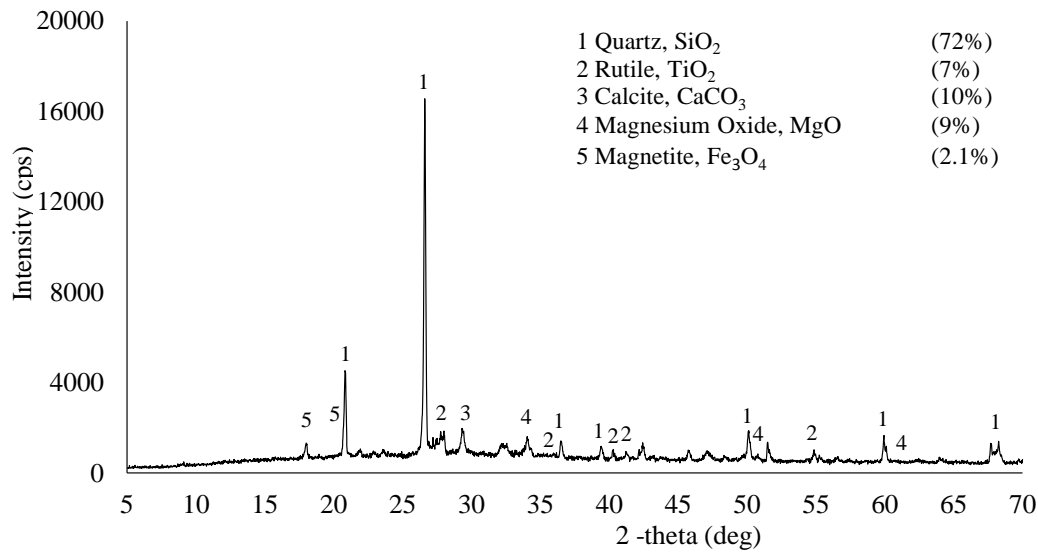


**Gambar 4 - 49** Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe G-6 (90 hari seawater curing)

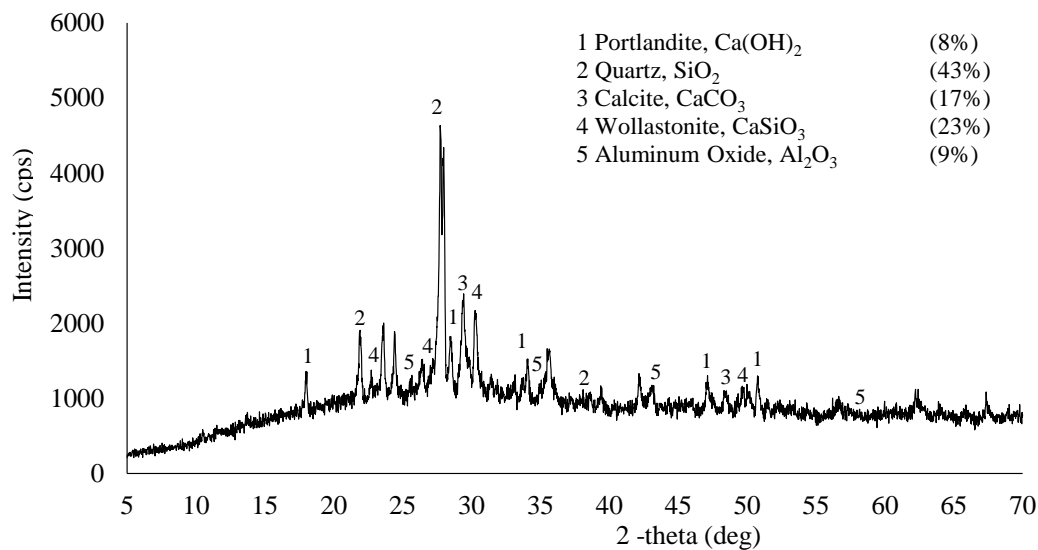
**Gambar 4 - 48** menunjukkan kandungan mineral yang terbentuk di beton OPC yang dilapisi dengan mortar geopolimer 4 cm. Ada 6 mineral yang terbentuk yaitu portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), Calsium silicate ( $\text{CaSiO}_3$ ), quartz ( $\text{SiO}_2$ ), aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dan nepheline. Kandungan mineral terbesar adalah quartz yaitu 31%. Pada **Gambar 4 - 49** menunjukkan kandungan mineral yang terbentuk di beton OPC yang dilapisi dengan mortar geopolimer 6 cm. Ada 4 mineral yang terbentuk yaitu portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sodium alumotrisilicate ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dan quartz ( $\text{SiO}_2$ ). Kandungan mineral terbesar adalah sodium alumotrisilicate yaitu 84%.

Berdasarkan hasil XRD menunjukkan bahwa kandungan mineral portlandite pada beton OPC menurun seiring menebalnya lapisan mortar geopolimer. Mineral calcite yang terbentuk hanya pada beton OPC yang dilapisi mortar geopolimer dengan ketebalan 4 cm dan 6 cm. Dengan ketebalan lapisan 6 cm mengandung mineral calcite lebih rendah yaitu 9.9% dibandingkan pada tebal lapisan 4 cm yaitu 13%.

**Gambar 4 - 50** hingga **Gambar 4 - 51** menunjukkan kandungan mineral yang terdapat pada Sikagrout 215M dan beton OPC yang dilapisi.



**Gambar 4 - 50** Grafik hasil analisa XRD SikagROUT 215M (90 hari seawater curing)



**Gambar 4 - 51** Grafik hasil analisa XRD beton OPC tipe S-2.5 (90 hari seawater curing)

Pada **Gambar 4 - 50** menunjukkan kandungan mineral yang terbentuk di SikagROUT 215M. Ada 5 mineral yang terbentuk yaitu quartz (SiO<sub>2</sub>), rutile (TiO<sub>2</sub>), calcite (CaCO<sub>3</sub>), magnesium oxide (MgO), dan Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Kandungan mineral terbesar adalah quartz yaitu 72%. Pada **Gambar 4 - 51** menunjukkan



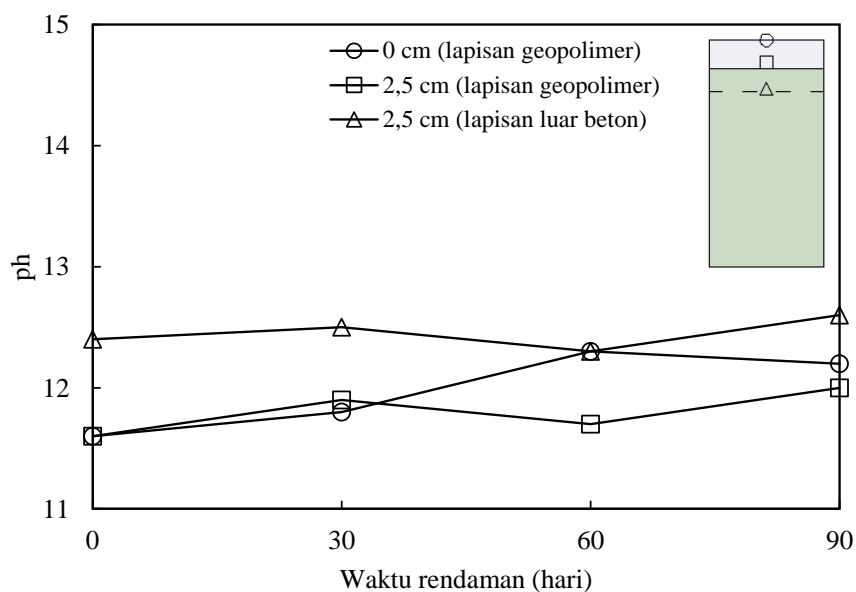
kandungan mineral yang terbentuk di beton OPC yang dilapisi dengan Sikagrout 2.5 cm. Ada 5 mineral yang terbentuk yaitu portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), quartz ( $\text{SiO}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) dan aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Kandungan mineral terbesar adalah quartz yaitu 43%.

Dari **Gambar 4 - 50** hingga **Gambar 4 - 51** menunjukkan bahwa kandungan mineral calcite terbentuk pada beton OPC maupun Sikagrout 215M. Dengan ketebalan lapisan 2.5 cm mineral calcite pada beton OPC terlapisi Sikagrout 215M (17%) paling tinggi dibandingkan beton OPC yang terlapisi mortar geopolimer. Calcite merupakan hasil reaksi dari portlandite dengan  $\text{CO}_2$ . Pada penelitian Zhang, et al. (2010) menyatakan bahwa keberadaan calcite akan menyebabkan *microcracks* pada beton, sehingga memberikan celah untuk zat-zat agresif lainnya masuk kedalam beton dan mempercepat karbonasi yang terjadi. Sesuai dengan hasil kandungan klorida bebas pada umur 60 hari perendaman beton OPC yang terlapisi dengan Sikagrout 215M lebih tinggi dibandingkan beton OPC yang terlapisi dengan mortar geopolimer.

Kandungan sulfat yang terdapat pada mortar geopolimer, beton OPC maupun Sikagrout 215M tidak dapat dideteksi dari hasil pengujian XRD, yang disebabkan oleh kadar konsentrasi yang sedikit. Pengukuran konsentrasi sulfat ini dapat dibaca dengan metode spektrofotometri di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan ITS.

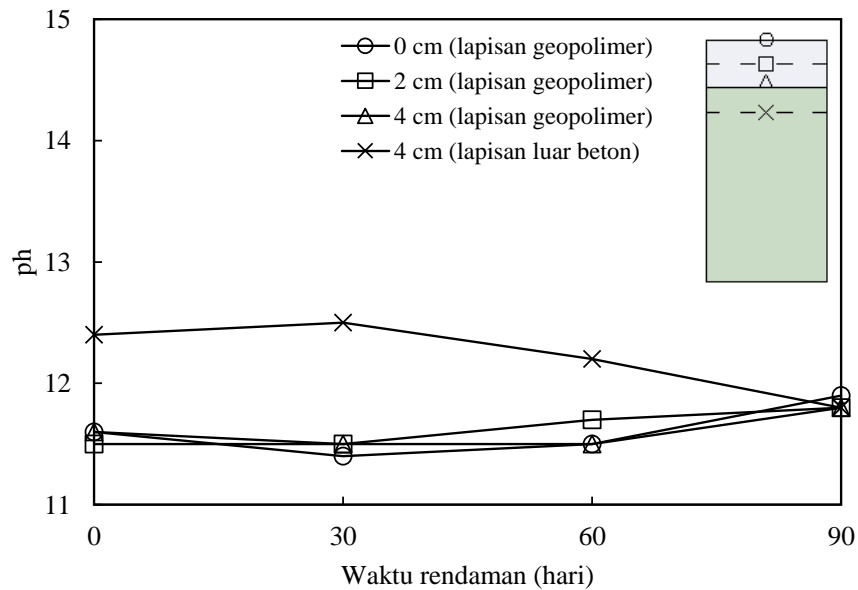
#### **4.4.10. Analisa Derajat Keasaman (pH)**

Pengukuran derajat keasaman spesimen yang direndam dengan *seawater curing* berdasarkan kedalaman bersama dengan pengukuran klorida bebas dan terikat. Titik sampel kedalaman yang diambil berdasrakan tipe spesimen dan telah dideskripsikan pada Bab 3. Pengukuran pada sampel uji dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan ITS. Hasil pengujian derjat keasaman pada kedalaman tertentu di setiap spesimen di tunjukkan pada **Gambar 4 - 52** sampai **Gambar 4 - 55**. Pengukuran dilakukan pada spesimen yang telah terendam degan *seawater curing* dari umur 0 hari hingga 90 hari.



**Gambar 4 - 52 Hasil pengujian pH tipe G-2.5**

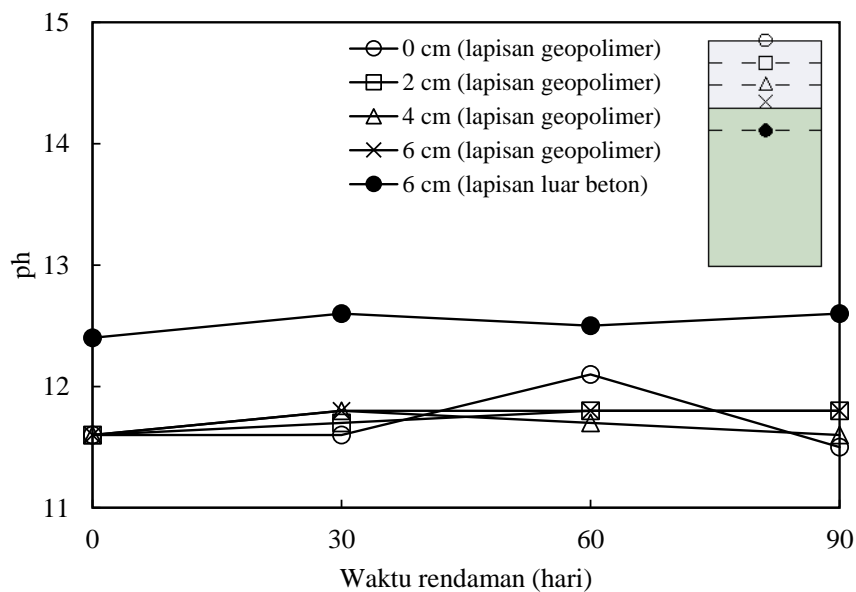
**Gambar 4 - 52** menunjukkan grafik perkembangan nilai pH spesimen tiap kedalam 0 – 2.5 cm dengan pelapis geopolimer. Berdasarkan grafik tersebut, nilai pH pada permukaan pelapis geopolimer yang terkena langsung dengan air laut peningkatan hingga umur 90 hari yaitu dari 11.60 hingga 12.20. Sedangkan pada kedalaman 2.5 cm, nilai pH mengalami penurunan pada umur 60 hari yaitu 11.70 dan meningkat kembali di umur 90 hari yaitu 12.00. Pada permukaan beton OPC yang terlapis nilai pH mengalami penurunan pada umur 60 hari yaitu 12.30 dan meningkat pada umur 90 hari yaitu 12.60.



**Gambar 4 - 53 Hasil pengujian pH tipe G-4**

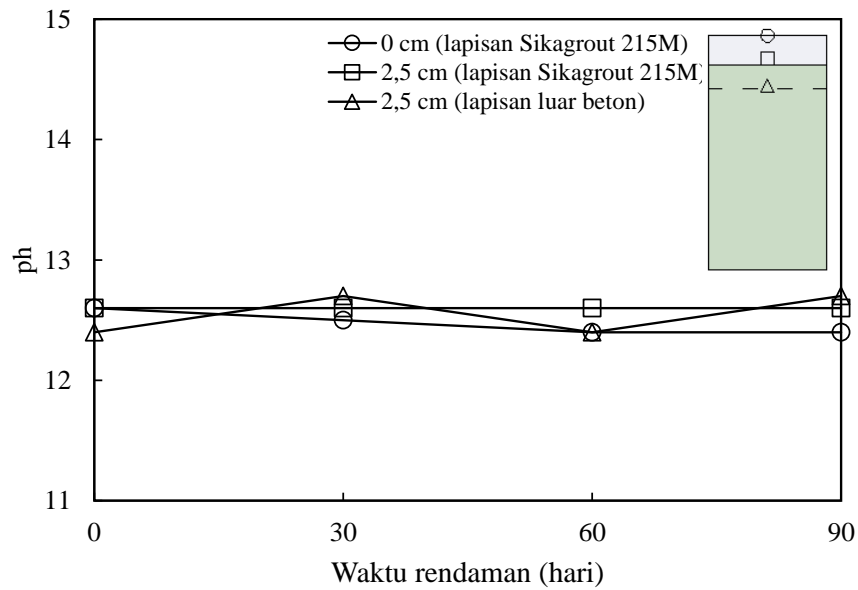
**Gambar 4 - 53** menunjukkan grafik perkembangan nilai pH spesimen tiap kedalaman 0 – 4 cm dengan pelapis geopolimer. Berdasarkan grafik tersebut, nilai pH pada permukaan pelapis geopolimer yang terkena langsung dengan air laut peningkatan hingga umur 90 hari yaitu dari 11.60 hingga 11.90. Pada kedalaman 2 dan 4 cm nilai pH juga mengalami peningkatan yaitu dari 11.50-11.80 dan 11.60-11.80. Pada permukaan beton OPC yang terlapis nilai pH mengalami penurunan pada umur 60 -90 hari yaitu 12.40 menjadi 11.80.

**Gambar 4 - 54** menunjukkan grafik perkembangan nilai pH spesimen tiap kedalaman 0 – 6 cm dengan pelapis geopolimer. Berdasarkan grafik tersebut, nilai pH pada permukaan pelapis geopolimer yang terkena langsung dengan air laut peningkatan hingga umur 60 hari yaitu dari 11.60 hingga 12.10 kemudian menurun menjadi 11.50 pada umur 90 hari. Pada kedalaman 2 dan 6 cm, nilai pH mengalami peningkatan hingga umur 90 hari yaitu dari 11.60 menjadi 11.80. Sedangkan pada kedalaman 4 cm nilai pH meningkat hingga umur 30 hari dari 11.60 menjadi 11.80, kemudian menurun hingga umur 90 hari menjadi 11.60. Pada permukaan beton OPC yang terlapis nilai pH mengalami penurunan pada umur 60 hari yaitu 12.50 dan meningkat pada umur 90 hari yaitu 12.60.



**Gambar 4 - 54 Hasil pengujian pH tipe G-6**

**Gambar 4 - 55** menunjukkan grafik perkembangan nilai pH spesimen tiap kedalaman 0 – 2.5 cm dengan pelapis Sikagrout 215M. Berdasarkan grafik tersebut, nilai pH pada permukaan pelapis yang terkena langsung dengan air laut mengalami penurunan hingga umur 90 hari yaitu dari 12.60 hingga 12.40. Sedangkan pada kedalaman 2.5 cm, nilai pH tidak berubah pada nilai pH 12.60. Pada permukaan beton OPC yang terlapis, nilai pH mengalami peningkatan pada umur 90 hari yaitu dari 12.40 menjadi 12.70.



**Gambar 4 - 55 Hasil pengujian pH tipe S-2.5**

Dari 4 tipe spesimen, nilai pH beton yang paling tinggi pada umur rendaman 90 hari dicapai oleh S-2.5 dengan nilai 12.70. Sedangkan dengan pelapis geopolimer nilai pH beton OPC didapatkan mencapai 12.60. Nilai pH beton OPC yang telah terlapis mengalami peningkatan dari nilai pH 12.40 sebelum direndam. Nilai pH dari pelapis geopolimer paling tinggi dicapai sebesar 12.30 pada umur 90 hari, dan nilai pH sebesar 11.60 sebelum direndam. Pada pelapis dengan SikagROUT 215M, nilai pH antara 12.40-12.60 selama masa 90 hari perendaman. Secara keseluruhan beton OPC yang telah terlapis mengalami peningkatan nilai pH yang hampir sama. Perbedaan nilai pH dapat dilihat dari masing-masing material pelapis yang berbeda antar mortar geopolimer dengan SikagROUT 215M. Nilai pH dari mortar geopolimer lebih rendah dibandingkan dengan pH OPC dan SikagROUT 215M. Hal ini menunjukkan bahwa klorida bebas pada mortar geopolimer lebih mudah terikat dibandingkan pada SikagROUT 215M dan beton OPC.

#### 4.4.11. Analisa Porositas

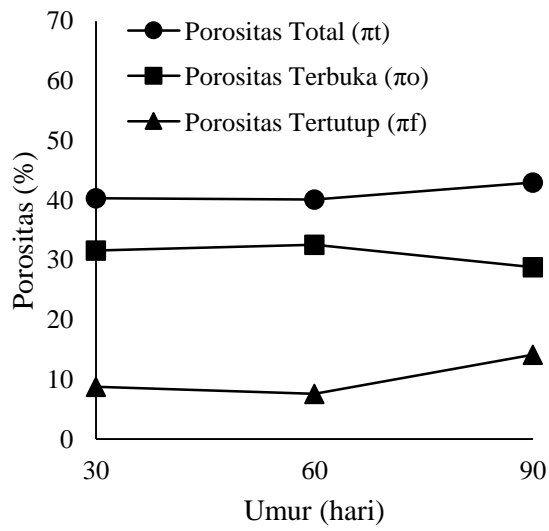
Pengujian porositas spesimen yang direndam dengan *seawater curing* berdasarkan kedalaman. Titik sampel kedalaman yang diambil berdasarkan tipe

spesimen dan telah dideskripsikan pada bab 3. Hasil pengujian porositas dapat dilihat pada **Tabel 4 - 37**. Pengukuran dilakukan pada spesimen yang telah terendam dengan *seawater curing* dari umur 0 hari hingga 90 hari.

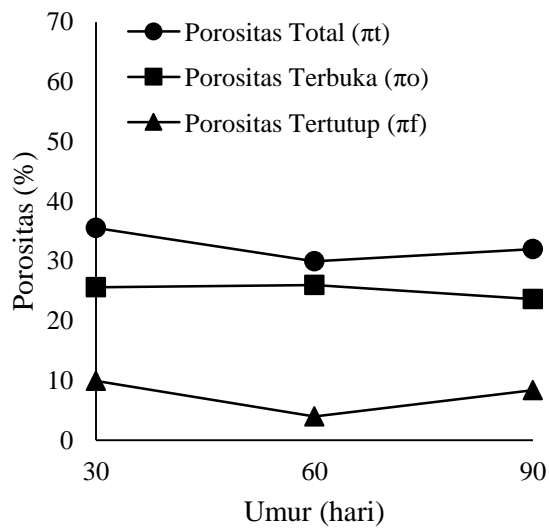
**Tabel 4 - 37 Hasil pengujian porositas**

Tipe	Umur	Kode	Porositas	Porositas	Porositas
			Total ( $\pi_t$ )	Terbuka ( $\pi_o$ )	Tertutup ( $\pi_f$ )
			%	%	%
G-2.5	Geo	30	40.4	31.6	8.8
		60	40.2	32.6	7.6
		90	43.0	28.8	14.2
	OPC	30	30.8	24.2	6.7
		60	33.3	24.1	9.3
		90	28.8	19.7	9.1
G-4	Geo	30	35.5	25.6	9.9
		60	29.9	26.0	3.9
		90	32.0	23.6	8.4
	OPC	30	25.0	16.9	8.1
		60	30.8	22.2	8.5
		90	31.8	21.0	10.9
G-6	Geo	30	32.3	27.6	4.7
		60	29.7	25.8	3.9
		90	30.9	26.8	4.1
	OPC	30	25.2	21.0	4.2
		60	24.1	19.4	4.6
		90	28.2	19.7	8.5
S-2.5	Sika	30	29.4	20.2	9.2
		60	26.1	17.1	17.1
		90	25.9	18.8	7.1
	OPC	30	27.5	22.5	4.9
		60	26.0	21.9	4.0
		90	24.0	19.6	4.4

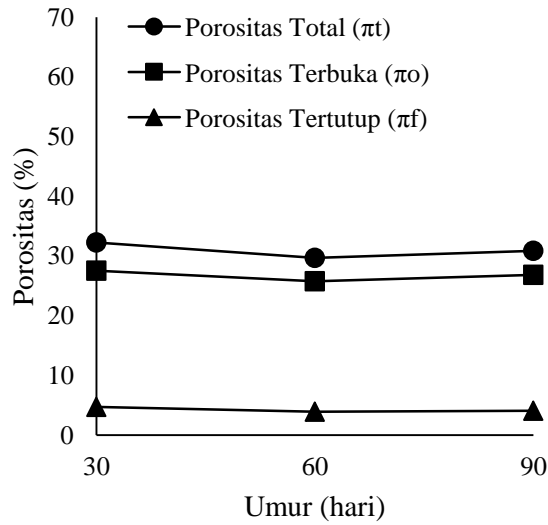
Dari **Tabel 4 - 37** hasil pengujian porositas berupa porositas total, porositas tertutup, dan porositas terbuka digambarkan secara grafik pada **Gambar 4 - 56** hingga **Gambar 4 - 63**.



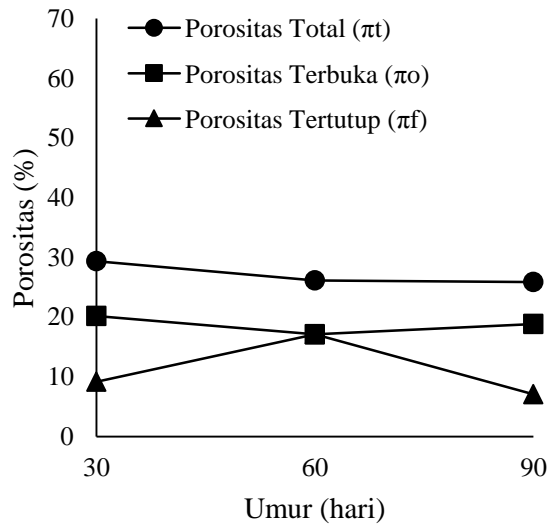
**Gambar 4 - 56 Porositas Geopolimer tipe G-2.5**



**Gambar 4 - 57 Porositas Geopolimer tipe G-4**



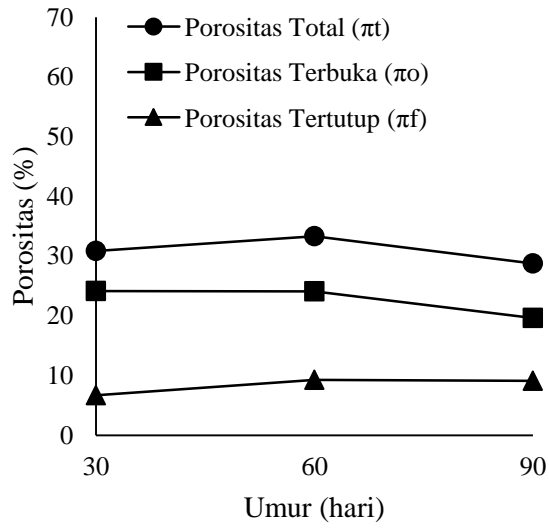
**Gambar 4 - 58 Porositas Geopolimer tipe G-6**



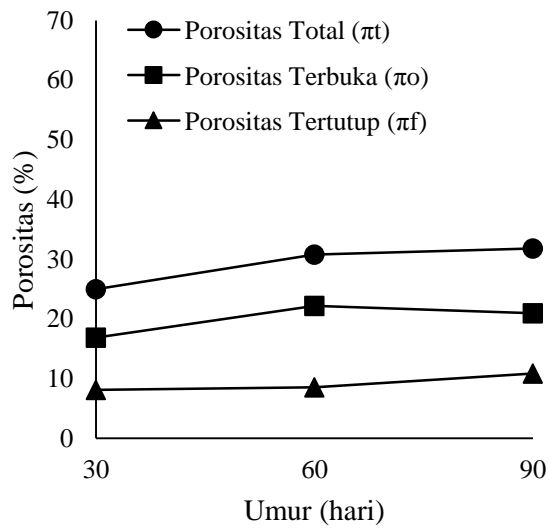
**Gambar 4 - 59 Porositas Sikagrout 215M tipe S-2.5**

Dari **Gambar 4 - 56** hingga **Gambar 4 - 59**, nilai porositas total dan porositas terbuka dari mortar geopolimer lebih tinggi dibandingkan dengan Sikagrout 215M. Hal ini menunjukkan bahwa mortar geopolimer lebih berpori dan memberikan celah bagi zat-zat luar masuk ke beton.

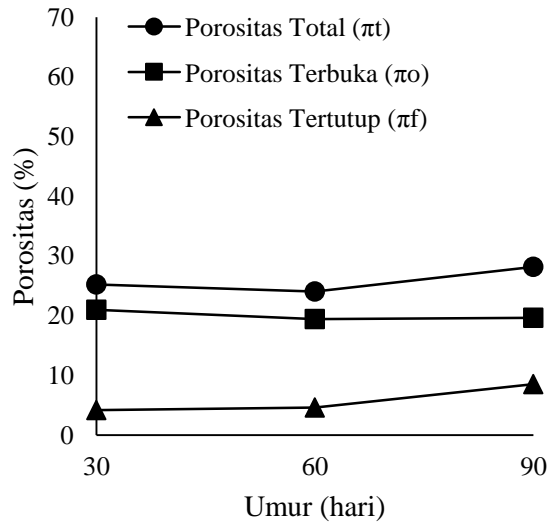




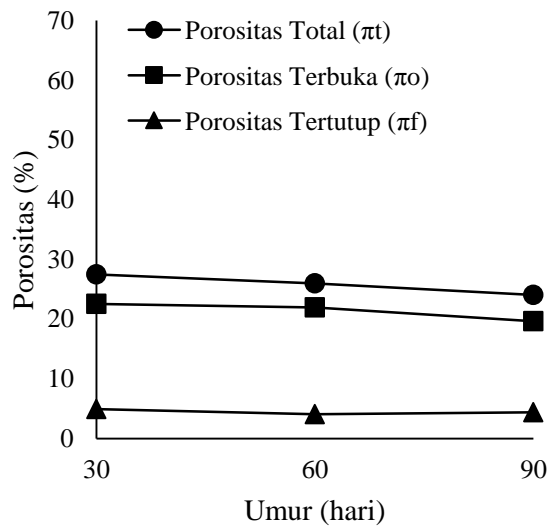
**Gambar 4 - 60 Porositas OPC tipe G-2.5**



**Gambar 4 - 61 Porositas OPC tipe G-4**



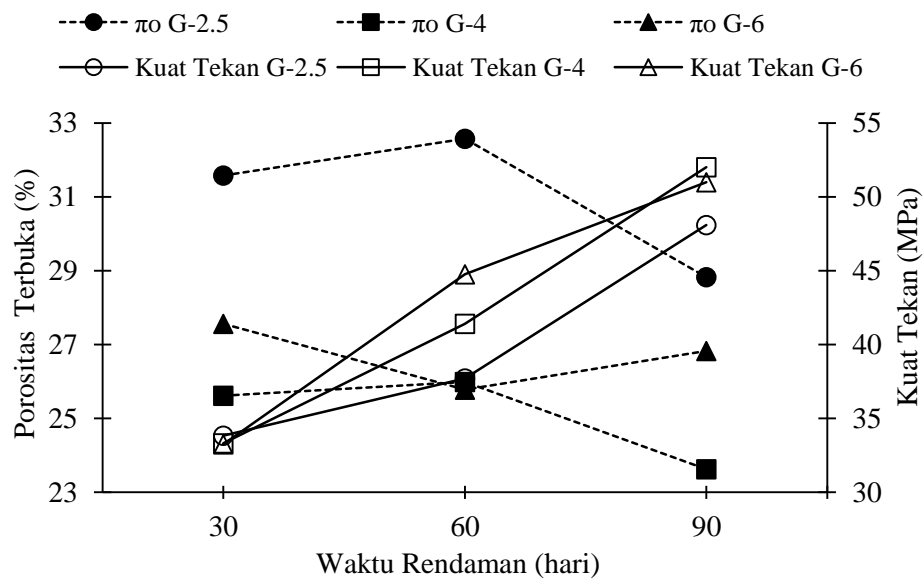
**Gambar 4 - 62 Porositas OPC tipe G-6**



**Gambar 4 - 63 Porositas OPC tipe S-2.5**

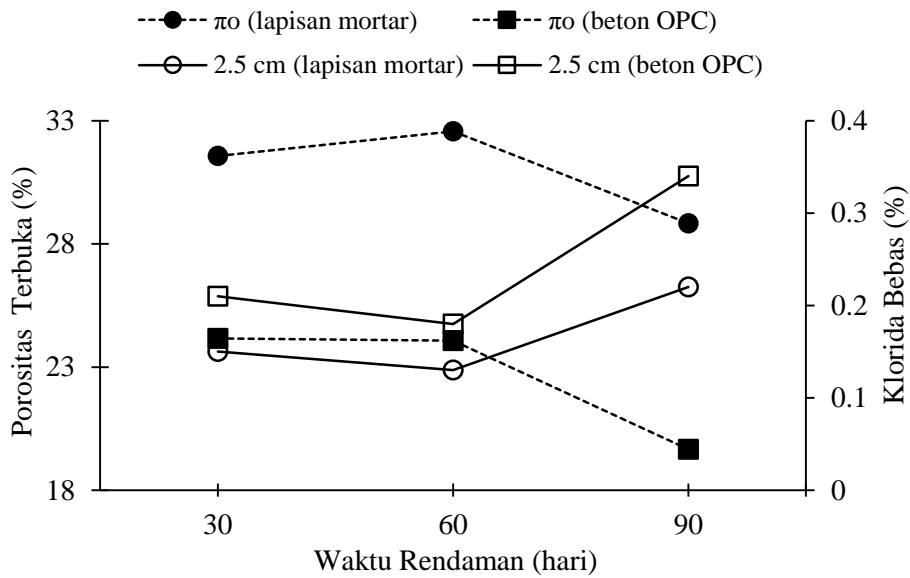
Dari **Gambar 4 - 60** hingga **Gambar 4 - 63**, nilai porositas total dan porositas terbuka dari beton OPC yang terlapisinya oleh mortar geopolimer dan Sikagrout 215M cenderung sama. Hal ini menunjukkan bahwa nilai porositas terbuka pada beton OPC di semua spesimen tidak berubah secara signifikan.

Dapat dilihat bahwa nilai porositas terbuka terbesar adalah mortar geopolimer dibandingkan Sikagrout 215M dan Beton OPC. Nilai porositas terbuka untuk beton OPC cenderung stabil dibandingkan bahan pelapisnya. Dibandingkan 3 jenis tebal pelapisan nilai porositas terbuka lebih kecil didapatkan pada tipe G-4. Hal ini mampu mempengaruhi kuat tekan spesimen yang dicapai dibandingkan 2 tebal pelapisan lainnya. Penelitian Ekaputri dan Triwulan (2013) menyatakan bahwa pori tertutup berbanding terbalik dengan pori terbuka. Nilai porositas tertutup dan terbuka pada beton berkaitan erat dengan kuat tekan dan kuat belah dari beton, semakin tinggi nilai porositas tertutup semakin rendah nilai porositas terbuka yang ada, sehingga semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan. Hubungan kuat tekan dengan porositas terbuka dapat dilihat pada **Gambar 4 - 64**.

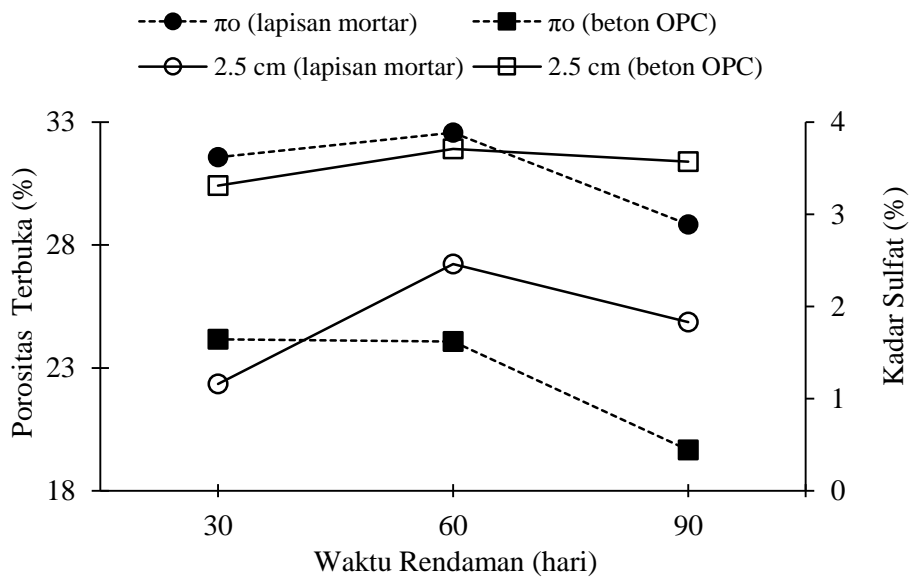


**Gambar 4 - 64 Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dengan kuat tekan spesimen yang direndam di lingkungan air laut**

Pada **Gambar 4 - 65** menggambarkan hubungan antara porositas terbuka dengan kandungan klorida bebas. Mortar geopolimer memiliki porositas terbuka yang lebih tinggi dibandingkan beton OPC, berbanding terbalik dengan kandungan klorida bebas.



**Gambar 4 - 65 Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dan beton OPC dengan klorida bebas pada spesimen G-2.5**

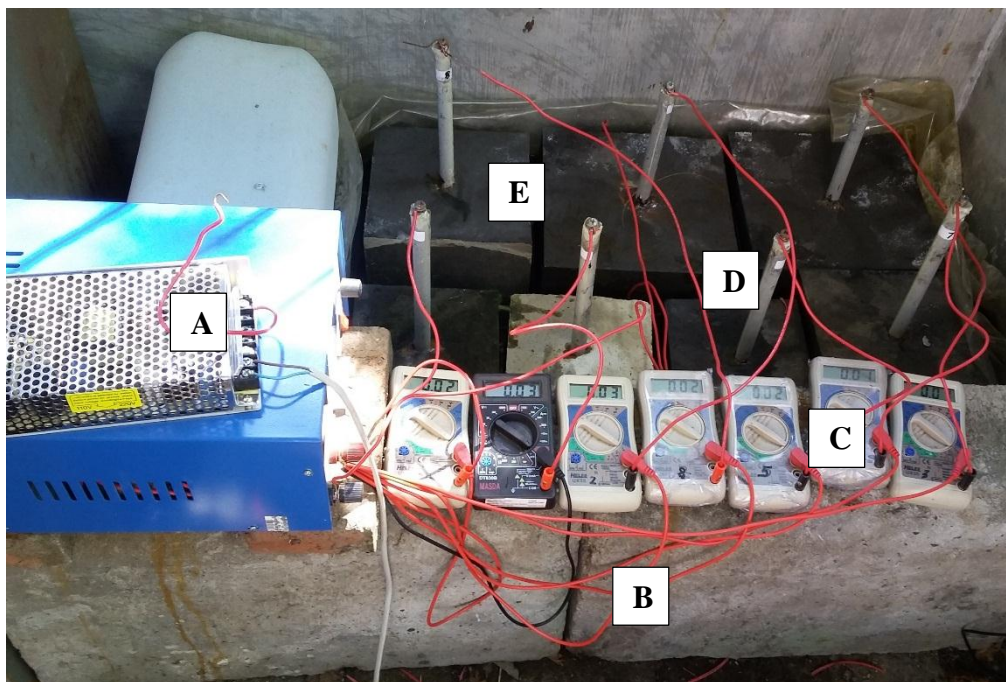


**Gambar 4 - 66 Hubungan porositas terbuka mortar geopolimer dan beton OPC dengan kadar sulfat pada spesimen G-2.5**

**Gambar 4 - 66** menggambarkan hubungan antara porositas terbuka dengan kadar sulfat. Mortar geopolimer memiliki porositas terbuka yang lebih tinggi dibandingkan beton OPC, akan tetapi kandungan sulfat lebih rendah. Pada umur 90 hari, nilai porositas terbuka semakin menurun di mortar geopolimer maupun beton OPC akan tetapi kandungan sulfat makin meninggi. Dapat disimpulkan bahwa sulfat yang masuk dari air laut mengisi pori-pori pada beton OPC maupun mortar geopolimer. Sehingga pada umur 90 hari kuat tekan beton meningkat disemua tipe spesimen akibat sulfat yang mengisi pori-pori.

#### 4.4.12. Analisa Laju Korosi dengan *Mass Loss Method*

Spesimen uji berbentuk kubus dengan 4 tipe ukuran yang telah dideskripsikan pada Bab 3. Spesimen uji diberikan perawatan dengan *moist curing* selama 28 hari sebelum dilakukan percepatan korosi. Percepatan korosi pada spesimen dilakukan dengan merendam pada larutan NaCl 5%, kemudian dialiri arus tertentu. Instalasi rangkaian listrik untuk percepatan korosi ditampilkan pada **Gambar 4 - 67**.



**Gambar 4 - 67** Instalasi rangkaian listrik untuk percepatan korosi

Keterangan Gambar:

- A = DC *power supply* 24 Volt
- B = Kabel tembaga
- C = AVOMeter
- D = Stainless steel sebagai Katoda
- E = Spesimen lolipop kubus (Anoda)

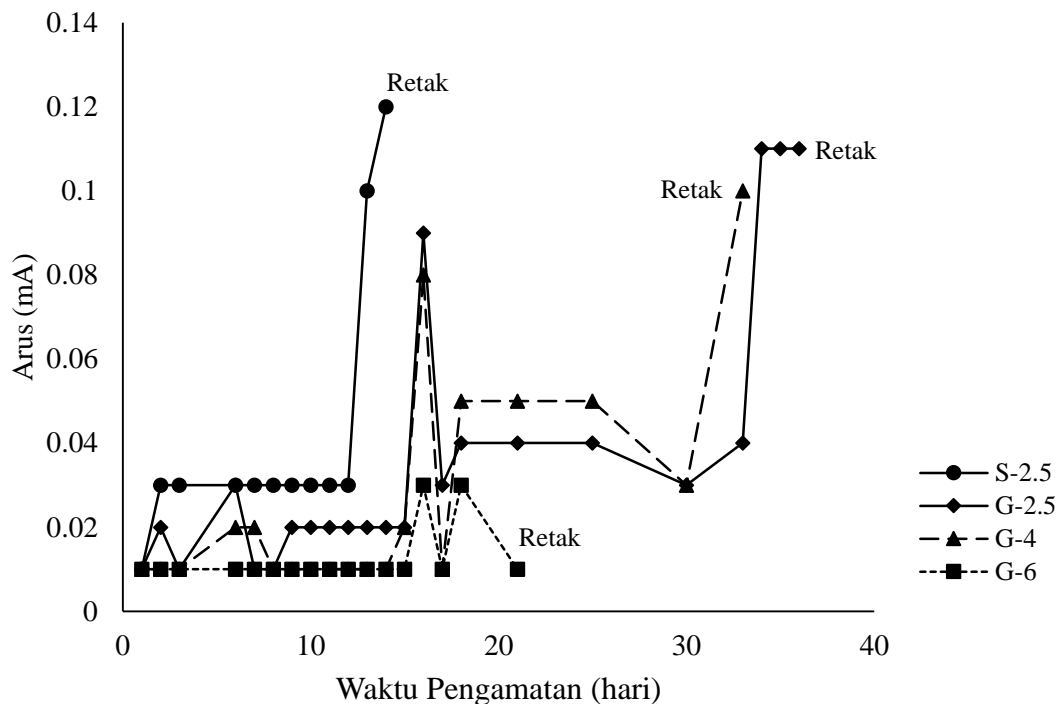
Sumber listrik menggunakan DC *power supply* dengan voltage konstan sebesar 24 Volt. Sebagai katoda adalah *stainless steel* dan anoda adalah tulangan polos 16 mm yang tertanam pada spesimen kubus. Pembacaan arus dilakukan setiap hari dengan AVOMeter yang dihubungkan ke masing-masing spesimen.

**Tabel 4 - 38 Pengamatan arus 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**

Hari ke	Arus (mA)				Keterangan
	S-2.5	G-2.5	G-4	G-6	
1	0.01	0.01	0.01	0.01	
2	0.03	0.02	0.01	0.01	
3	0.03	0.01	0.01	0.01	
6	0.03	0.03	0.02	0.01	
7	0.03	0.01	0.02	0.01	
8	0.03	0.01	0.01	0.01	
9	0.03	0.02	0.01	0.01	
10	0.03	0.02	0.01	0.01	
11	0.03	0.02	0.01	0.01	
12	0.03	0.02	0.01	0.01	
13	0.1	0.02	0.01	0.01	
14	0.12	0.02	0.01	0.01	S-2.5 retak
15		0.02	0.02	0.01	
16		0.09	0.08	0.03	
17		0.03	0.01	0.01	
18		0.04	0.05	0.03	
21		0.04	0.05	0.01	G-6 retak
25		0.04	0.05		
30		0.03	0.03		
33		0.04	0.10		G-4 retak
34		0.11			
35		0.11			
36		0.11			G-2.5 retak

Pembacaan arus dilakukan hingga terlihat retak pada spesimen dan dicatat pada **Tabel 4 - 38**. Pembacaan arus dilakukan karena perbedaan tebal spesimen yang berbeda, sehingga arus yang masuk berbeda.

Berdasarkan **Tabel 4 - 38**, spesimen S-2.5 mengalami retak yang lebih cepat dibandingkan. Nilai arus yang masuk lebih besar dibandingkan tipe G2.5, G-4, dan G-6. Hal ini dikarenakan perbedaan material pelapis yang digunakan. Nilai arus yang masuk pada beton yang dilapisi mortar geopolimer lebih kecil dan resistant dibandingkan dengan pelapis Sikagrout 215M. Hasil pengamatan arus di gambarkan grafik pada **Gambar 4 - 68**.



**Gambar 4 - 68 Perbandingan arus mengalir pada 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**

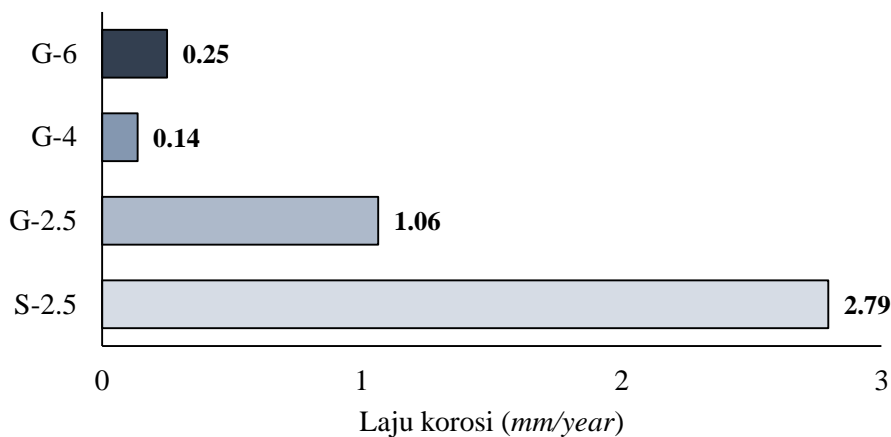
Dari hasil percepatan korosi, tulangan yang terkorosi akan dihitung untuk penentuan laju korosi spesimen. Tulangan akan ditimbang sebelum dikorosi dan setelah dikorosi, sehingga didapatkan berat tulangan yang hilang. Berat tulangan yang hilang akan dihitung dengan variabel lainnya seperti waktu korosi dan luas

tulangan yang ditinjau. Hasil pengukuran laju korosi ditampilkan pada **Tabel 4 - 39**.

**Tabel 4 - 39 Hasil laju korosi 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**

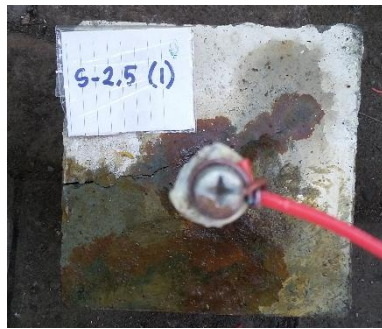
KODE	T	Berat tulangan		Berat yang hilang	A	D	K	L	Kondisi Spesimen
		Awal	Akhir						
		Jam	gram						
S - 2.5	288	117.99	111.6	6.387	88.467	7.857	87600	2.79	Retak
G - 2.5	792	115.58	108.9	6.684	88.467	7.857	87600	1.06	Retak
G - 4	720	114.68	113.9	0.782	88.467	7.857	87600	0.14	Retak
G - 6	432	114.76	113.9	0.858	88.467	7.857	87600	0.25	Retak

Dari **Tabel 4 - 39** didapatkan hasil pengukuran laju korosi. Nilai laju korosi paling tinggi pada spesimen S-2.5 yaitu *2.79 mm/year*, dan yang paling rendah adalah G-4 sebesar *0.14 mm/year*. Ketebalan lapisan berpengaruh pada nilai laju korosi spesimen. Pada spesimen G-6, awal mula pengujian korosi telah terjadi retak akibat material yang terlalu getas dengan ketebalan 6 cm, sehingga spesimen tidak sama kondisinya dengan tebal lapisan 2.5 cm dan 4 cm. Grafik perbandingan laju korosi ditampilkan pada **Gambar 4 - 69**. Sesuai dengan penelitian Halim (2017) menunjukkan bahwa ketebalan selimut beton mempengaruhi laju korosi dan karat yang terjadi pada tulangan baja. Visualisasi spesimen yang retak ditunjukkan pada **Gambar 4 - 70**.

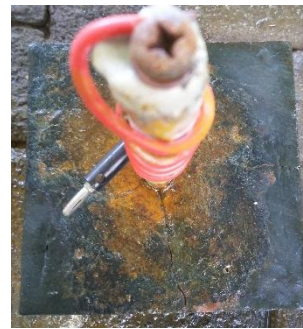


**Gambar 4 - 69 Perbandingan Laju Korosi pada 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**





S-2.5



G-2.5



G-4



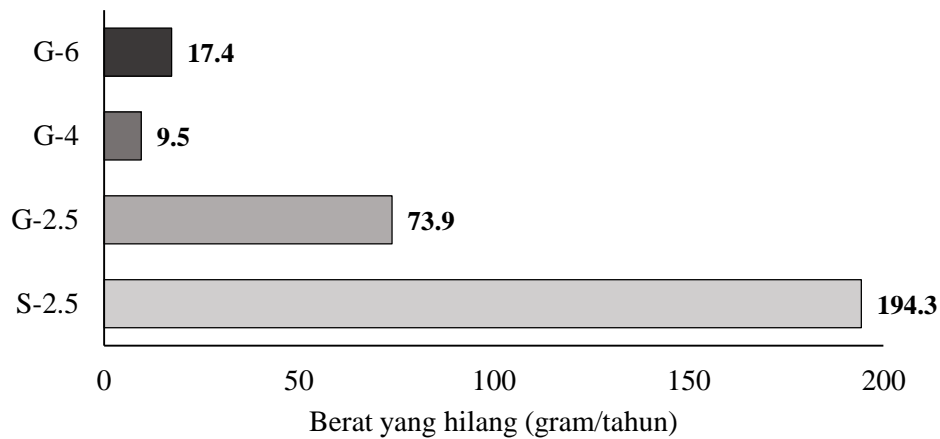
G-6

**Gambar 4 - 70 Visualisasi retak pada 4 tipe spesimen**

Perhitungan berat yang hilang pada pengujian korosi ditunjukkan pada **Tabel 4 - 40**. Berat yang hilang paling banyak adalah pada S-2.5 yaitu sebesar 194.3 gr/tahun. Sedangkan berat yang hilang paling sedikit pada G-4 sebesar 9.5 gr/tahun. Grafik perbandingan kehilangan berat ditampilkan pada **Gambar 4 - 71**. Penentuan berat yang hilang pada tulangan ditinjau pada tulangan yang tertanam pada beton sepanjang 8 cm. Gambar tulangan yang terkorosi sebelum di bersihkan dan sesudah dibersihkan dari karat ditampilkan pada **Gambar 4 - 72** dan **Gambar 4 - 73**.

**Tabel 4 - 40 Rekap berat yang hilang 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**

Kode	Waktu hari	Berat tulangan		Berat yang hilang		
		Awal	Akhir	gram	gram/hari	gram/tahun
		gram	gram			
S-2.5	12	117.99	111.6	6.39	0.53	194.3
G-2.5	33	115.58	108.9	6.68	0.20	73.9
G-4	30	114.68	113.9	0.78	0.03	9.5
G-6	18	114.76	113.9	0.86	0.05	17.4



**Gambar 4 - 71 Perbandingan berat yang hilang pada 4 tipe spesimen kubus (NaCl 5%)**

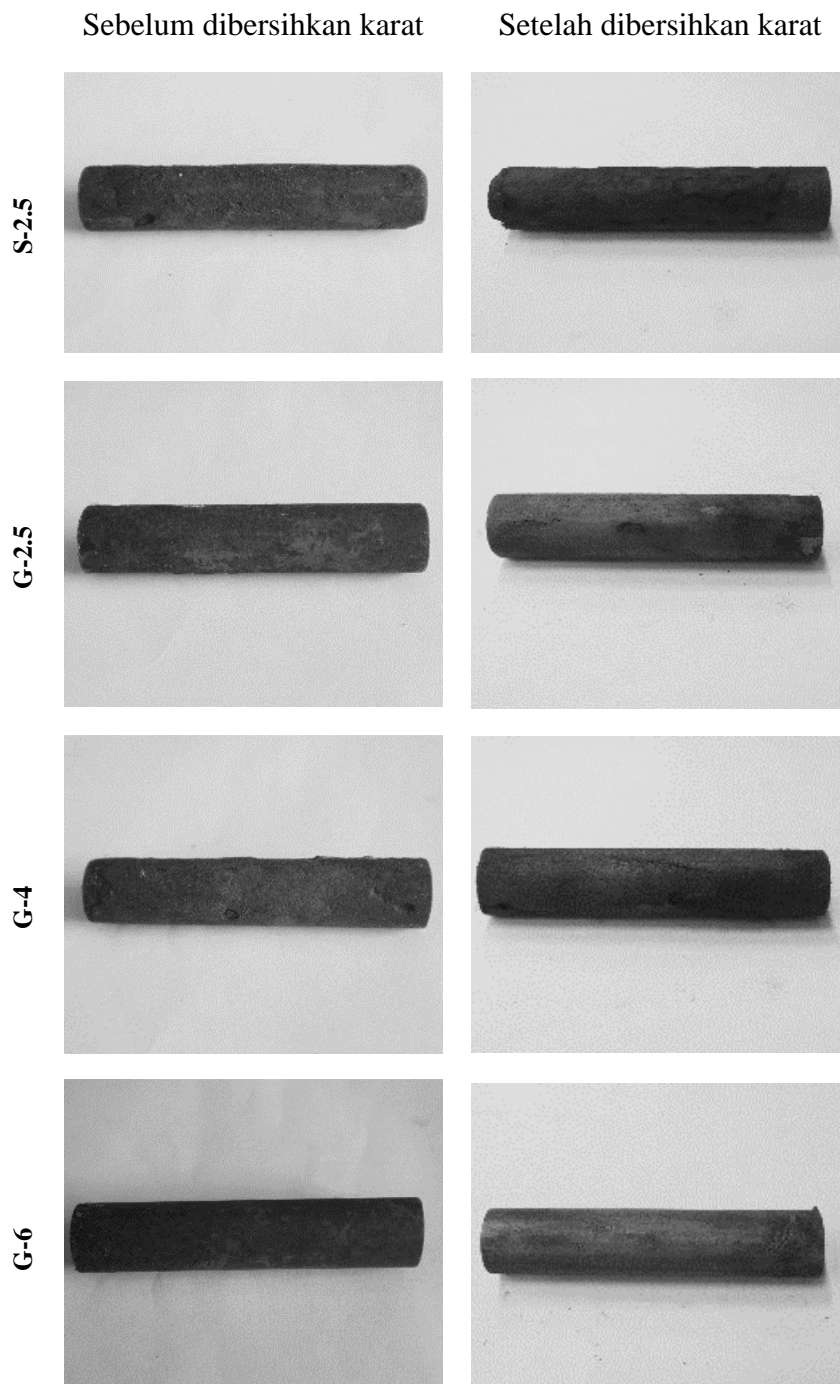


**Gambar 4 - 72 Visualisasi tulangan karat setelah dilepas dari kubus**

Dapat dilihat pada **Gambar 4 - 72**, dalam waktu 14 hari karat terjadi pada tulangan yang tertanam pada beton OPC terlapisi Sikagrout 215 lebih banyak dibandingkan dengan tulangan yang tertanam pada beton OPC yang terlapisi dengan mortar geopolimer 4 cm dan 6 cm pada waktu lebih dari 20 hari. Sedangkan dengan mortar geopolimer yang melapisi dengan tebal 2,5 cm dalam waktu yang cukup lama memberikan karat yang banyak pada tulangan yang tertanam di beton

OPC. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan lapisan mortar geopolimer mempengaruhi pembentukan karat yang terjadi pada tulangan. Semakin tipis tebal lapisannya semakin cepat untuk ion-ion korida masuk ke dalam beton OPC dan bereaksi dengan zat besi yang merusak lapisan pasif pada tulangan baja. Tulangan baja yang terekspos akan bereaksi dengan oksigen dan kemudian membentuk karat pada lapisan luar tulangan baja. Banyaknya karat yang ada pada tulangan sebagai indikasi bahwa ion klorida yang masuk lebih banyak pada beton OPC yang terlapisi dengan ketebalan lapisan 2,5 cm.

Keberadaan silika dan aluminium yang tinggi pada *fly ash* dan  $\text{Na}^+$  pada alkali aktifator yang digunakan untuk proses geopolimerisasi membentuk ikatan Si-O-Al yang stabil di lingkungan air garam, sehingga meningkatkan kuat tekan dari geopolimer (Davidovits, 1991; Zhang et al., 2010; Wijaya dan Ekaputri, 2017). Dalam penelitian Halim (2017) hasil kandungan ion klorida pada beton geopolimer lebih banyak akan tetapi laju korosi yang terjadi lebih rendah. Kandungan  $\text{Na}^+$  pada beton geopolimer yang banyak mampu mengikat Cl bebas sehingga mengurangi kandungan klorida bebas yang akan masuk ke dalam beton OPC dan merusak lapisan pasif pada tulangan baja. Kemampuan yang baik dalam mengikat klorida pada geopolimer juga sebanding dengan kuat tekan beton silinder yang terendam pada lingkungan air garam.



**Gambar 4 - 73 Visualisasi tulang karat sebelum dan setelah dibersihkan karatnya**

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang telah dianalisa dapat diambil kesimpulan:

1. Kenaikan kuat tekan semua spesimen lebih tinggi dengan *seawater curing* dibandingkan dengan *moist curing*. Kuat tekan tertinggi dicapai dengan tebal pelapisan 4 cm. Porositas terbuka mortar geopolimer lebih tinggi dibandingkan mortar SikagROUT 215M dan beton OPC. Porositas terbuka pada mortar geopolimer mempengaruhi nilai kuat tekan beton, kuat tekan tertinggi memiliki porositas terbuka yang rendah.
2. Ketebalan pelapisan 2,5 cm dengan mortar geopolimer mengalami retak yang lebih lama dibandingkan dengan pelapis SikagROUT 215M. Laju korosi dengan pelapis SikagROUT 215M lebih besar dibandingkan dengan pelapis geopolimer. Laju korosi paling rendah didapatkan dengan pelapisan mortar geopolimer dengan ketebalan 4 cm.
3. Kapasitas pengikatan oleh mortar geopolimer dengan tebal lapisan 2,5 cm dan 4 cm lebih tinggi dibandingkan SikagROUT 215M. Kapasitas pengikatan klorida yang tinggi mengurangi konsentrasi klorida bebas yang masuk ke dalam beton OPC. Semakin tebal pelapisan, nilai koefisien difusi semakin kecil karena keberadaan ion  $Cl^-$  yang semakin sedikit.

#### **5.2. Saran**

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya, adalah:

1. Umur rendaman pada lingkungan air laut lebih lama, sehingga mendapatkan hasil yang lebih baik dalam jangka waktu yang lama.
2. Pemberian *coating* yang sangat diperhatikan untuk memastikan zat-zat yang masuk dari satu arah dapat tercapai.
3. Spesifikasi kuat tekan dan modulus elastisitas bahan pelapis mortar geopolimer dengan beton OPC yang digunakan mendekati atau sama.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd El Fattah, A. *et al.* (2018) 'Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 165, pp. 663–674. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077.
- ACI Committee 357 (1997) 'Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures', *ACI Recommended Practice*, (Reapproved), pp. 1–23. doi: 10.1016/j.jphs.2016.03.013.
- AFNOR NF B 49104 (2004) 'Tes Porositas Beton'.
- Aguirre-Guerrero, A. M., Mejía-De-Gutiérrez, R. and Montês-Correia, M. J. R. (2016) 'Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments', *Construction and Building Materials*, 121, pp. 704–716. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038.
- Aguirre-Guerrero, A. M., Robayo-Salazar, R. A. and de Gutiérrez, R. M. (2017) 'A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion', *Applied Clay Science*. Elsevier B.V., 135, pp. 437–446. doi: 10.1016/j.clay.2016.10.029.
- Albitar, M. *et al.* (2017) 'Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 136, pp. 374–385. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056.
- Ali, M. S., Ji, C. and Mirza, M. S. (2015) 'Durable design of reinforced concrete elements against corrosion', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 93, pp. 317–325. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.011.
- Alnahhal, M. F. *et al.* (2018) 'Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 163, pp. 482–495. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.106.
- Antoni, Wijaya, S. W. and Hardjito, D. (2016) 'Compressive Strength of Geopolymer Based on the Fly Ash Variation', *Materials Science Forum*,

- 841, pp. 98–103. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.98.
- ASTM C 29/C 29M-97 (2003) Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. United States: ASTM International.
- ASTM C 39/C 39M-01 (2001) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States: ASTM International.
- ASTM C 40-99 (1999) Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. United States: ASTM International.
- ASTM C 42-03 (2003) Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. United States: ASTM International.
- ASTM C 117-95 (2003) Standard Test Method for Material Finer than 75 $\mu$ m (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. United States: ASTM International.
- ASTM C 118-95 (2003) Standard Test Method for Material Finer than 75 $\mu$ m (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. United States: ASTM International.
- ASTM C 127-01 (2001) Standard Test Method for Density Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. United States: ASTM International.
- ASTM C 128-01 (2001) Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of fine Aggregate. United States: ASTM International.
- ASTM C 131-03 (2003) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. United States: ASTM International.
- ASTM C 136-01 (2003) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. United States: ASTM International.
- ASTM G1-90 Reapp 99 (1999) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. United States: ASTM International.
- ASTM C 469-02 (2002) Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. United States: ASTM International.
- ASTM C 566-97 (2004) Standard Test Method for Total Evaporable Moisture



- Content of Aggregate by Drying. United States: ASTM International.
- ASTM C 618 (2003) Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. United States: ASTM International.
- ASTM C 1202-97 (1997) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. United States: ASTM International.
- ASTM C 1556 (2003) Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. United States: ASTM International.
- Bayuaji, R. *et al.* (2015) 'The Influence of Chloride Environment on Compressive Strength of Geopolymer Concrete with Fly Ash Using Taguchi Approach', *Applied Mechanics and Materials*, 754–755, pp. 400–405. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.400.
- Broomfield, J. P. (2007) *Corrosion of Steel in Concrete*. 2nd edn. United States of America: Taylor & Francis.
- Cement Concrete & Aggregates Australia (2009) *Chloride Resistance of Concrete, Cement Concrete & Aggregates Australia*. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.001.
- Chindaprasirt, P. and Chalee, W. (2014) 'Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site', 63, pp. 303–310.
- Costa, A. and Appleton, J. (1999) 'Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration', 32(May), pp. 252–259.
- Davidovits, J. (1991) 'Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials', *Journal of Thermal Analysis*, 37, pp. 1633–1656.
- Davidovits, J. (2011) *Geopolymer Chemistry and Applications 3rd edition* Joseph.
- Ekaputri, J. J. and Triwulan, T. (2013) 'Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer', *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 20(1), pp. 1–10.
- Emmons, P. H. (1994) *Concrete Repair and Maintenance Illustrated*. Kingston: R.S. Means Company, Inc.

- Febryan, J. (2018) *G-Block: Bangunan PEmechah Gelombang menggunakan Beton Geopolimer*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Gunasekara, C. *et al.* (2019) ‘Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 200, pp. 502–513. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.168.
- Guyana, K., Hardjito, D. and Antoni (2015) ‘Durabilitas Jangka Panjang Mortar 100% Fly Ash Tipe C di Lingkungan Sulfat’, pp. 219–226.
- Hájková, K. *et al.* (2018) ‘Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability’, *Engineering Structures*, 174(July), pp. 768–777. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.006.
- Halim, L. N. (2016) *Pengaruh Penetrasi Khlorida pada Laju Korosi Beton Geopolimer*. Tesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Halim, L. N., Ekaputri, J. J. and Triwulan (2017) ‘The Influence of Salt Water on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete’, *MATEC Web of Conferences*, 97, p. 01002. doi: 10.1051/mateconf/20179701002.
- Hardianti, H., Kristiawan, S. A. and Wibowo (2017) ‘Pengaruh Konsentrasi Klorida Terhadap Laju Penetrasi Ion Klorida Ke Dalam Beton High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete ( HVFA-SCC )’, *Matriks Teknik Sipil*, (September), pp. 974–980.
- Jeyasehar, C. A., Salahuddin, M. and Thirugnanasambandam, S. (2013) *Development Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Precast Elements*.
- Ken, P. W., Ramli, M. and Ban, C. C. (2015) ‘An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 77, pp. 370–395. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.065.
- Kwasny, J. *et al.* (2018) ‘Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 166, pp. 537–553. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129.
- Li, K. *et al.* (2018) ‘Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 115(November 2017), pp. 545–558. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.08.006.

- Liu, M. *et al.* (2016) 'Indoor accelerated corrosion test and marine field test of corrosion-resistant low-alloy steel rebars', *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier Ltd., 5, pp. 87–99. doi: 10.1016/j.cscm.2016.09.005.
- Lopez-Calvo, H. Z. *et al.* (2018) 'Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash', *Cement and Concrete Composites*, 88, pp. 200–210. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.016.
- Lu, Y. yan *et al.* (2018) 'Active and passive protection of steel reinforcement in concrete column using carbon fibre reinforced polymer against corrosion', *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, 278, pp. 124–136. doi: 10.1016/j.electacta.2018.05.037.
- Luping, T. (2003) *Estimation of cement/binder profile parallel to the determination of chloride profile in concrete, NORDTEST project No.1581-02*.
- Nurwidayati, R. *et al.* (2016) 'Characterization of Fly Ash on Geopolymer Paste', *Materials Science Forum*, 841, pp. 118–125. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.118.
- Otieno, M., Beushausen, H. and Alexander, M. (2016) 'Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 79, pp. 373–385. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.08.009.
- Sirivivatnanon, V. *et al.* (1999) 'Characterising Chloride Penetration Resistance Of Concrete Chloride penetration resistance of concrete', *Durability of Building Materials and Components*, 8. Available at: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2281.pdf>.
- SNI 03-2491-2003 (2003) Metode pengujian kuat tarik belah beton. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-2854-1992 (1992) Spesifikasi Kadar Ion Klorida dalam Beton. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 06-6989.11-2004 (2004) Air dan air limbah - Bagian 11: Cara uji derajat keasaman (pH) dengan menggunakan alat pH meter. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2847-2013 (2013) Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung.

Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.

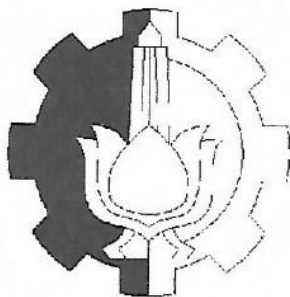
- Sturm, P. *et al.* (2018) ‘Sulfuric acid resistance of one-part alkali-activated mortars’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 109(February), pp. 54–63. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.009.
- Subekti, S., Triwulan and Irmawan, M. (2008) ‘Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash’, (978).
- Sutrisno, W. (2017) *Model Prediksi Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah Dan Kering*. Disertasi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tarmidzi, N. (2017) *Analisa Perilaku Lentur pada Balok Beton Bertulang dengan Tambalan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash sebagai Bahan Repair*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tittarelli, F. *et al.* (2018) ‘Corrosion behaviour of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides’, *Corrosion Science*. Elsevier, 134(February), pp. 64–77. doi: 10.1016/j.corsci.2018.02.014.
- Verma, S. K., Bhadauria, S. S. and Akhtar, S. (2013) ‘Evaluating effect of chloride attack and concrete cover on the probability of corrosion’, *Front. Struct. Civ. Eng.*, 7(4), pp. 379–390. doi: 10.1007/s11709-013-0223-9.
- Wijaya, A. L. and Ekaputri, J. J. (2017) ‘Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste’, in. doi: 10.1051/mateconf/201713801010.
- Wiyono, D., Vianthi, A. and Hardjito, D. (2006) ‘Durabilitas Mortar Geopolymer Berbasis Lumpur Sidoarjo’, pp. 1–8. doi: 10.1021/cr00017a013.
- Zhang, Z., Yao, X. and Wang, H. (2010) ‘Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete I. Basic Properties’, *Applied Clay Science*. Elsevier B.V., 49, pp. 1–6. doi: 10.1016/j.clay.2010.01.014.
- Zhang, Z., Yao, X. and Wang, H. (2012) ‘Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment’, *Applied Clay Science*. Elsevier B.V., 67–68, pp. 57–60. doi: 10.1016/j.clay.2012.05.008.
- Zhang, Z., Yao, X. and Zhu, H. (2010) ‘Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion

mechanism', *Applied Clay Science*. Elsevier B.V., 49, pp. 7–12. doi: 10.1016/j.clay.2010.04.024.

Zuquan, J. *et al.* (2018) 'Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 177, pp. 170–183. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.120.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **LAMPIRAN**

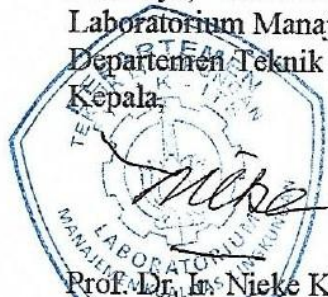


## DATA ANALISA AIR

Dikirim Oleh : Sdri. Rihmatul Ilmiah  
Dikirim Tanggal : 16 Mei 2019  
Sampel Dari : Air Laut di Kenjeran

Kode Sampel	Hasil Analisa Klorida (mg/L Cl)	Hasil Analisa Sulfat (mg/L SO <sub>4</sub> )
Air Laut Bulan April	17.800,00	1.602,33
Air Laut Bulan Mei	15.000,00	2.028,75
Metoda Analisa	Argrometri	Spektrofotometri

Surabaya, 10 Juni 2019  
Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS  
Kepala

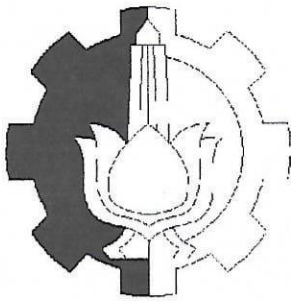


Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc. *N*  
NIP. 195501281985032001

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan air yang diterima laboratorium kami





## DATA ANALISA AIR

Pengirim : Sdri. Asti  
Dikirim Tanggal : 05 Agustus 2019  
Sampel : Cuplikan Air Laut

Kode Sampel	Hasil Analisa Klorida (mg/L Cl)	Hasil Analisa Sulfat (mg/L SO <sub>4</sub> )
Air Laut Bulan Juni	13,800,00	1.544,34
Air Laut Bulan Juli	19.000,00	1.881,20
Metoda Analisa	Argentometri	Spektrofotometri

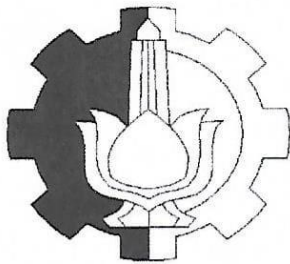
Surabaya, 14 Agustus 2019  
Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS  
Kepala,



Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc  
NIP. 195501281985032001

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan air yang diterima laboratorium kami



LABORATORIUM MANAJEMEN KUALITAS LINGKUNGAN  
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA  
TELEPON (031)5948886 FAX. (031)5928387

DATA ANALISA CUPLIKAN

Pengirim : Sdri. Asti  
Dikirim Tanggal : 20 Mei  
Sampel : Cuplikan Beton

Kode Sampel	Hasil Analisa Klorida Bebas (ppm Cl <sup>-</sup> )	Hasil Analisa Klorida Terikat (ppm Cl <sup>-</sup> )	Hasil Analisa Sulfat (ppm SO <sub>4</sub> )	Hasil Analisa pH
Initial Geo	4.227,05	5.665,77	14.286,74	11,60
Initial OPC	667,56	7.294,23	15.691,37	12,40
Initial Sika	8.064,52	1.659,96	21.077,02	12,60
Sika Grout 215 M	10.727,06	269,06	22.327,37	12,50
FA Suralaya Silo 1-4	-	-	23.685,72	9,60
<b>Metoda Analisa</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Spektrofotometri</b>	<b>pHmeter</b>

Surabaya, 10 Juni 2019

Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS

Kepala,



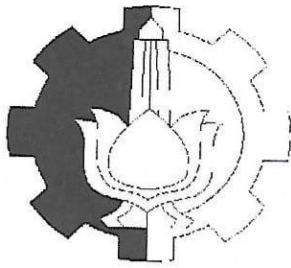
Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc  
NIP. 195501281985032001

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan yang diterima laboratorium kami

Konfirmasi data klorida ( 30 Desember 2019)

	Cl <sup>tot</sup>	Cl <sup>-</sup>	Cl <sup>terikat</sup>
Initial geo	5464,48	2153,85	3310,63
Initial opc	5961,72	1875,78	4085,94
Initial sika	4510,31	2315,41	2194,90
Sikagrout 215M	3337,38	2666,67	670,71



LABORATORIUM MANAJEMEN KUALITAS LINGKUNGAN  
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA  
TELEPON (031)5948886 FAX. (031)5928387


DATA ANALISA CUPLIKAN

Pengirim : Sdri. Asti  
Dikirim Tanggal : 05 Agustus 2019  
Sampel : Cuplikan Beton

Kode Sampel	Hasil Analisa Khlorida Bebas (ppm Cl)	Hasil Analisa Khlorida Terikat (ppm Cl)	Hasil Analisa Sulfat (ppm SO <sub>4</sub> )	Hasil Analisa pH
G2,5 - 60/ 0 cm Geo	2.321,98	5.823,38	11.954,46	11,80
G2,5 - 60/2,5 cm Geo	1.450,33	6.982,21	11.641,62	11,90
G2,5 - 60/2,5 cm OPC	610,13	5.053,30	21.474,77	12,50
S2,5 - 60/ 0 cm Geo	2.689,98	4.166,56	15.922,76	12,50
S2,5 - 60/2,5 cm Geo	677,97	6.793,30	17.063,84	12,60
S2,5 - 60/2,5 cm OPC	1.215,56	5.602,62	7.228,91	12,70
G4 - 60/ 0 cm Geo	777,00	8.255,26	16.525,91	11,40
G4 - 60/ 2,5 cm Geo	1.479,29	7.424,82	10.895,02	11,50
G4 - 60/ 4 cm Geo	1.405,48	9.782,13	11.669,78	11,50
G4 - 60/ 4 cm OPC	1.069,90	6.157,43	8.169,60	12,50
G6 - 60/ 0 cm Geo	831,95	10.023,74	9.398,33	11,60
G6 - 60/ 2,4 cm Geo	2.145,92	5.398,66	8.920,13	11,70
G6 - 60/ 4 cm Geo	1.694,92	9.163,41	9.345,03	11,80
G6 - 60/ 6 cm Geo	821,02	10.787,61	10.043,84	11,80
G6 - 60/ 6 cm OPC	1.269,04	8.507,50	12.709,53	12,60
<b>Metoda Analisa</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Spektrofotometri</b>	<b>pHmeter</b>

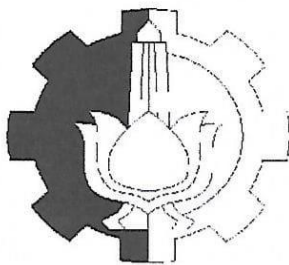
Surabaya, 14 Agustus 2019

Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS  
Kepala,

  
Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc  
NIP. 195501281985032001

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan yang diterima laboratorium kami



LABORATORIUM MANAJEMEN KUALITAS LINGKUNGAN  
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA  
TELEPON (031)5948886 FAX. (031)5928387

DATA ANALISA CUPLIKAN

Pengirim : Sdri. Asti  
Dikirim Tanggal : 09 Agustus 2019  
Sampel : Cuplikan Beton

Kode Sampel	Hasil Analisa Khlorida Bebas (ppm Cl)	Hasil Analisa Khlorida Terikat (ppm Cl)	Hasil Analisa Sulfat (ppm SO <sub>4</sub> )	Hasil Analisa pH
G-2,5-90, 0cm Geo	2.588,44	5.733,34	42.203,40	12,30
G-2,5-90, 2,5cm Geo	1.282,87	6.678,91	24.571,76	11,70
G-2,5-90, 2,5cm OPC	11.149,83	↔ 505,19	12.480,01	12,30
G-4-90, 0cm Geo	4.115,23	8.623,63	23.728,09	11,50
G-4-90, 2,5cm Geo	1.898,25	5.696,68	15.856,54	11,70
G-4-90, 4cm Geo	2.286,59	10.326,03	15.721,27	11,50
G-4-90, 4cm OPC	8.396,95	↕ 1.064,48	16.118,50	12,20
S-2,5-90, 0cm Sika	8.611,69	↕ 4.825,37	10.418,30	12,40
S-2,5-90, 2,5cm Sika	5.654,28	↕ 1.295,84	15.948,02	12,60
S-2,5-90, 2,5cm OPC	10.695,19	↕ 1.804,81	12.748,61	12,40
G-6-90, 0cm Geo	1.538,46	10.542,08	21.128,58	12,10
G-6-90, 2,5cm Geo	1.773,05	9.539,17	21.346,12	11,60
G-6-90, 4cm Geo	1.780,63	10.995,22	21.823,60	11,70
G-6-90, 6cm Geo	1.525,32	13.271,23	16.702,86	11,80
G-6-90, 6cm OPC	4.876,22	10.049,15	12.470,63	12,50
<b>Metoda Analisa</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Spektrofotometri</b>	<b>pHmeter</b>

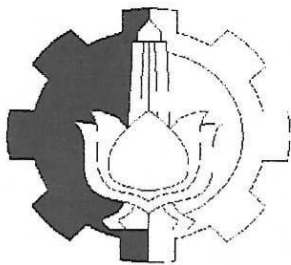
Surabaya, 26 Agustus 2019  
Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS  
Kepala,

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan yang diterima laboratorium kami

Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc  
NIP. 195501281985032001

↔ : data tertukar (konfirmasi 30 desember 2019)



LABORATORIUM MANAJEMEN KUALITAS LINGKUNGAN  
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA  
TELEPON (031)5948886 FAX. (031)5928387


## DATA ANALISA CUPLIKAN

Pengirim : Sdri. Asti  
Dikirim Tanggal : 09 Agustus 2019  
Sampel : Cuplikan Beton

Kode Sampel	Hasil Analisa Klorida Bebas (ppm Cl)	Hasil Analisa Klorida Terikat (ppm Cl)	Hasil Analisa Sulfat (ppm SO <sub>4</sub> )	Hasil Analisa pH
G-2,5-120, 0cm Geo	2.527,38	15.432,39	13.628,54	12,20
G-2,5-120, 2,5cm Geo	2.175,49	8.764,02	18.347,28	12,00
G-2,5-120, 2,5cm OPC	1.165,50	13.639,34	17.440,52	12,60
G-4-120, 0cm Geo	1.679,26	13.049,42	23.492,83	11,90
G-4-120, 2,5cm Geo	1.673,36	8.010,64	16.907,17	11,80
G-4-120, 4cm Geo	2.001,33	8.855,12	15.216,46	11,80
G-4-120, 4cm OPC	1.255,23	17.293,16	24.755,13	11,80
S-2,5-120, 0cm Sika	3.670,47	10.732,82	15.202,51	12,40
S-2,5-120, 2,5cm Sika	1.284,25	11.652,36	18.933,72	12,60
S-2,5-120, 2,5cm OPC	1.402,52	11.786,92	12.967,89	12,70
G-6-120, 0cm Geo	1.872,66	14.280,06	19.064,30	11,50
G-6-120, 2,5cm Geo	2.390,06	15.051,80	23.068,06	11,80
G-6-120, 4cm Geo	1.779,36	12.577,69	13.408,20	11,60
G-6-120, 6cm Geo	1.431,64	11.529,48	17.757,96	11,80
G-6-120, 6cm OPC	1.616,81	10.383,19	17.796,07	12,60
<b>Metoda Analisa</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Argentometri</b>	<b>Spektrofotometri</b>	<b>pHmeter</b>

Surabaya, 26 Agustus 2019

Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan  
Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS  
Kepala,



Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc

NIP. 195501281985032001

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan yang diterima laboratorium kami

## LAMPIRAN

**Tabel Hasil Pengujian *X-Ray Fluorescence* OPC**

<b>Paramater</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Hasil (% wt)	17,26	3,29	2,90	0,24	67,43	1,24	0,01

**Tabel Hasil Pengujian *X-Ray Fluorescence* OPC (lanjutan)**

<b>Paramater</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>MnO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>LOI</b>
Hasil (% wt)	0,48	0,15	1,58	0,07	0,09	-

## RIWAYAT HIDUP



**Syahidah Fani Nastiti**, lahir di Blitar pada tanggal 23 Maret 1994 sebagai putri sulung dari pasangan bapak Musthofa Najib dan ibu Endang Winarni. Penulis sekarang bertempat tinggal di Jl Kol Suwignyo gg Pisang Agung Dalam RT 02 RW 04 Kelurahan Kepuharjo, Kecamatan Lumajang, Kabupaten Lumajang.

Pendidikan yang telah ditempuh yaitu tahun 2006 telah menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Citrodiwangsan 02. Setelah itu melanjutkan ke jenjang SLTP pada tahun 2006 di SMPN 01 Lumajang dan menyelesaikan pada tahun 2009. Pada Tahun 2009 menempuh studi di SMAN 02 Lumajang dan lulus dari jenjang SLTA pada tahun 2012. Kemudian penulis menempuh pendidikan Sarjana di Universitas Negeri Malang, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Program Studi S1 Teknik Sipil pada tahun 2012 dan lulus pada tahun 2016. Penulis memilih melanjutkan ke jenjang Magister di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Program Studi Pascasarjana S-2 Teknik Sipil bidang Struktur pada Semester Ganjil 2017/2018. Penulis berhasil menyelesaikan Tesis dengan judul “Pengaruh Tebal Lapisan Geopolimer pada Beton Normal terhadap Laju Korosi Baja Tulangan” pada Semester Ganjil 2019/2020.