



TUGAS AKHIR - RC14-1501

***G-BLOCK*: BANGUNAN PEMECAH GELOMBANG
MENGUNAKAN BETON GEOPOLIMER**

JONATHAN FEBRYAN
3114100058

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



TUGAS AKHIR - RC14-1501

***G-BLOCK: BANGUNAN PEMECAH GELOMBANG
MENGUNAKAN BETON GEOPOLIMER***

JONATHAN FEBRYAN
3114100058

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



FINAL PROJECT - RC14-1501

***G-BLOCK: BREAKWATER USING GEOPOLYMER
CONCRETE***

JONATHAN FEBRYAN
3114100058

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

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

**G-BLOCK: BANGUNAN PEMECAH GELOMBANG
MENGUNAKAN BETON GEOPOLIMER**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

JONATHAN FEBRYAN

NRP. 3114100058

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



1. Dr. Eng. Januarti J. Kaputri (Pembimbing I)

SURABAYA

JULI, 2018

G-BLOCK: BANGUNAN PEMECAH GELOMBANG MENGUNAKAN BETON GEOPOLIMER

Nama : Jonathan Febryan
NRP : 3114100058
Jurusan : Teknik Sipil, FTSLK, ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Januarti J. Ekaputri

Abstrak

Sebagian besar wilayah Indonesia adalah lautan. Sehingga banyak terdapat bangunan-bangunan yang berada di laut, salah satu bangunan tersebut adalah bangunan pemecah gelombang (*breakwater*). Bangunan ini dibuat dengan menggunakan beton dengan bahan dasar semen yang menghasilkan gas CO_2 yang tinggi serta merusak lingkungan di dalam pembuatannya. Fly ash adalah material limbah dari sisa pembakaran batu bara yang melimpah di Indonesia yang dikenal sebagai material ramah lingkungan dan dapat dijadikan pengganti semen untuk membuat beton yang disebut dengan beton geopolimer. Pada penelitian ini akan dianalisa ketahanan beton geopolimer di air laut yang nantinya akan direkomendasikan sebagai material *breakwater* yang disebut dengan G-BLOCK. Dalam penelitian ini digunakan fly ash kelas F dan bottom ash dari PLTU Suralaya kelas 1-4 dengan larutan NaOH 12M dan 10M terbuat dari air suling dan air laut dengan perbandingan $Na_2SiO_3 : NaOH = 2,5 : 1$ serta beton OPC sebagai kontrol. Beton ditargetkan mencapai mutu K-400 sebagai persyaratan beton di lingkungan air laut. Metode perawatan yang digunakan adalah moist curing selama 28 hari lalu direndam di air laut dan perendaman langsung di air laut saat beton berumur 1 hari. Analisa dilakukan selama 118 hari yang meliputi kuat tekan, keausan, porositas, derajat keasaman (pH), dan penetrasi klorida. Berdasarkan penelitian ini disimpulkan bahwa perendaman di air laut mengakibatkan beton geopolimer dihindangi oleh makhluk hidup teritip, peristiwa ini menunjukkan bahwa beton geopolimer tidak berbahaya (beracun) bagi makhluk hidup laut. Perendaman langsung di air laut pada umur 1 hari dan penggunaan air laut di dalam pembuatan beton geopolimer memberikan dampak yang kurang baik karena kandungan klorida di dalam air laut dapat menurunkan kuat tekan, memperbesar porositas, menurunkan nilai pH, dan meningkatkan kandungan klorida dalam beton. Secara keseluruhan direkomendasikan beton geopolimer air suling 12M sebagai *breakwater* karena mampu memenuhi mutu K-400 dan mengikat klorida lebih baik dari beton OPC.

Kata kunci: beton geopolimer, *breakwater*, penetrasi klorida, sea water curing, teritip (*barnacle*).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

G-BLOCK: BREAKWATER USING GEOPOLYMER CONCRETE

Name : Jonathan Febryan
NRP : 3114100058
Department : Teknik Sipil, FTSLK, ITS
Supervisor : Dr. Eng. Januarti J. Ekaputri

Abstract

Most areas of Indonesia is the ocean. So there are many buildings in the sea, one of that is a breakwater. This building is made using concrete with a cement base material that produces high CO₂ gas and harmful for the environment. Fly ash is a waste material from abundant coal combustion in Indonesia known as environmentally friendly material and can be used as a substitute for cement to make concrete called geopolymer concrete. In this research will be analyzed the resilience of geopolymer concrete in sea water which will be recommended as a breakwater material called G-BLOCK. This research used fly ash class F and bottom ash from PLTU Suralaya class 1-4 with 12M and 10M NaOH solution made from distilled water and seawater with ratio Na₂SiO₃: NaOH = 2.5: 1 and OPC concrete as control. Concrete is targeted to achieve K-400 quality as a concrete requirement in the seawater environment. Curing method used is moist curing for 28 days then soaked in seawater and soaking directly in the sea water when the concrete was 1 day old. The analysis was performed for 118 days which included compressive strength, abrasion, porosity, acidity (pH), and chloride penetration. Based on this research it is concluded that soaking in seawater resulted in geopolymer concrete encountered by living creature of barnacles, this event indicates that geopolymer concrete is not dangerous (toxic) for marine life creatures. Direct immersion in seawater at 1 day and the use of seawater in the manufacture of geopolymer concrete has an adverse effect because the chloride content in seawater can decrease the compressive strength, increase porosity, decrease the pH value, and increase the chloride content in the concrete. Overall it is recommended that a 12 M distilled water geopolymer mixture be used as a breakwater because it is able to meet the quality of K-400 and bind chloride better than OPC concrete.

Keywords: *barnacle, breakwater, chloride penetration, geopolymer concrete, sea water curing.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, rahmat, hikmat, dan anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul '*G-Block: Bangunan Pemecah Gelombang Menggunakan Beton Geopolimer*'.

Judul ini diambil penulis karena melihat limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang melimpah di Indonesia dan masih belum bisa dimanfaatkan secara maksimal untuk diproduksi menjadi suatu produk. Sehingga penulis mencoba memanfaatkan kelimpahan material ini dengan membuat sebuah beton geopolimer yang digunakan sebagai bangunan pemecah gelombang (G-Block). Berhubung juga Indonesia adalah negara dengan panjang garis pantai terpanjang ke-4 di dunia, sehingga akan banyak membutuhkan bangunan-bangunan laut seperti pemecah gelombang.

Di dalam penulisan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis di dalam pengerjaan penelitian ini, serta bantuannya di dalam mendanai penelitian ini.
2. Pak Musli selaku ketua RT 01 RW 03 Nambangan Perak yang telah setia membantu penulis di dalam menaruh benda uji di laut, menyediakan tempat untuk perendaman, menjaga, serta membantu penulis saat pengambilan benda uji dari laut.
3. Pak Muklis selaku ketua RW 03 Nambangan Perak yang telah mengizinkan penulis memakai daerah pantai RW03 sebagai tempat perendaman beton.

4. Laboratorium Beton, Kampus ITS Manyar yang telah mengizinkan penulis menggunakan lab guna melakukan pengujian beton.
5. Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan, Kampus ITS Sukolilo yang telah mengizinkan penulis menggunakan lab guna melakukan pengecoran dan pengujian beton.
6. Seluruh teman-teman yang telah membantu penulis di dalam pengerjaan penelitian ini.

Penulis sangat berharap tugas besar ini nantinya dapat bermanfaat bagi kemajuan dunia teknik sipil di Indonesia khususnya pada bidang inovasi material beton. Karena kebutuhan akan material beton akan terus meningkat seiring dengan pembangunan infrastruktur di Indonesia yang masih terus berkembang.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila di dalam penyusunan dan penulisan tugas akhir ini terdapat kata-kata yang kurang berkenan di hati para pembaca dan terlebih kepada dosen-dosen jurusan Teknik Sipil ITS. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kebaikan di dalam pengembangan penelitian ini di kemudian hari. Terima kasih.

Surabaya, 23 Juli 2018

(Penulis)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR GRAFIK.....	xxvii
DAFTAR TABEL.....	xxxvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Beton Geopolimer.....	7
2.2 Komposisi Beton Geopolimer.....	10
2.2.1 Pasta geopolimer.....	11
2.2.2 Agregat.....	13
2.2.3 <i>Admixtures</i>	14
2.3 Bangunan Pemecah Gelombang (<i>Breakwater</i>) Berbentuk Kubus.....	14

2.4	<i>Curing</i> di Air Laut.....	17
2.4.1	Teritip.....	18
2.5	<i>Moist Curing</i>	21
2.6	Penelitian yang Pernah Dilakukan Sebelumnya.....	23
2.7	Kuat Tekan	36
2.8	Porositas	38
2.9	Derajat Keasaman (pH).....	40
2.10	Penetrasi Klorida.....	40
2.11	Mineral dalam beton.....	42
BAB III	METODOLOGI	57
3.1	Studi Literatur.....	59
3.2	Persiapan Material.....	59
3.2.1	<i>Fly Ash</i>	60
3.2.2	Natrium hidroksida (NaOH).....	61
3.2.3	Natrium silikat (Na ₂ SiO ₃).....	63
3.2.4	Air laut.....	63
3.2.5	Air Suling	64
3.2.6	Alkali aktivator.....	64
3.2.7	<i>Admixtures</i>	64
3.2.8	Agregat halus.....	65
3.2.8.1	Analisa saringan (ASTM C136-01).....	66
3.2.8.2	Berat jenis (ASTM C128-01)	67
3.2.8.3	Air resapan (ASTM C128-01).....	69

3.2.8.4	Kebersihan terhadap bahan organik (ASTM C40-04).....	70
3.2.8.5	Kebersihan terhadap lumpur (ASTM C117-03)..	71
3.2.8.6	Kelembapan (ASTM C566-97, Reapproved 2004).....	71
3.2.9	Agregat kasar.....	72
3.2.9.1	Analisa saringan agregat kasar (ASTM C136-01)	73
3.2.9.2	Berat jenis agregat kasar (ASTM C127-01)....	74
3.2.9.3	Air resapan (ASTM C127-01).....	75
3.2.9.4	Kebersihan terhadap lumpur (ASTM C117-03)..	75
3.2.9.5	Kelembapan (ASTM C566-97, Reapproved 2004).....	76
3.2.10	Air.....	77
3.2.11	Semen portland.....	77
3.3	Pembuatan Benda Uji.....	77
3.3.1	Beton geopolimer	78
3.3.2	Beton Semen Portland	81
3.4	Perawatan Benda Uji	90
3.5	Pengujian Beton	94
3.5.1	Pengujian slump (ASTM C143/C143M-15)	97
3.5.2	Kuat tekan beton (SNI 03-1974-1990)	98
3.5.3	Keausan paving (SNI 03-0691-1996).....	101
3.5.4	Porositas (ASTM C642-06).....	104

3.5.5	Derajat keasaman (pH) (SNI 06-6989.11-2004)	108
3.5.6	Penetrasi klorida (SNI 03-2854-1992)	110
3.5.7	Pengujian XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	112
3.5.8	Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	112
3.6	Analisa Hasil dan Pembahasan	113
3.7	Kesimpulan	113
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	115
4.1	Uji Material	115
4.1.1	<i>Fly ash</i>	115
4.1.2	Air laut	117
4.1.3	Bottom ash	117
4.1.4	Pasir	119
4.1.4.1	Analisa saringan	119
4.1.4.2	Berat jenis	120
4.1.4.3	Air resapan	121
4.1.4.4	Kebersihan terhadap bahan organik	121
4.1.4.5	Kebersihan terhadap lumpur/pencucian	122
4.1.4.6	Kelembapan	123
4.1.5	Batu pecah	123
4.1.5.1	Analisa saringan	123
4.1.5.2	Berat jenis	124
4.1.5.3	Air resapan	125
4.1.5.4	Kebersihan terhadap lumpur/pencucian	126

4.1.5.5	Kelembapan.....	126
4.2	Sea Water Curing	127
4.2.1	Suhu selama <i>sea water curing</i>	137
4.3	Pengujian Beton	138
4.3.1	Analisa pengujian slump	138
4.3.2	Analisa kuat tekan	144
4.3.2.1	Analisa peningkatan kuat tekan.....	148
4.3.2.2	Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap peningkatan kuat tekan	149
4.3.3	Analisa keausan.....	158
4.3.3.1	Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap keausan paving.....	159
4.3.4	Analisa porositas	167
4.3.4.1	Pengaruh porositas tertutup terhadap kuat tekan beton.....	190
4.3.4.2	Pengaruh porositas tertutup permukaan terhadap keausan paving	195
4.3.4.3	Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap porositas rata-rata beton	210
4.3.5	Analisa derajat keasaman (pH).....	216
4.3.5.1	Pengaruh pH dari porositas terbuka	227
4.3.5.2	Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap derajat keasaman (pH).....	236
4.3.6	Analisa penetrasi klorida	242
4.3.6.1	Pengaruh klorida dari porositas terbuka (Po)	264

4.3.6.2	Pengaruh penetrasi klorida terhadap derajat keasaman (pH).....	273
4.3.6.3	Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap penetrasi klorida.....	283
4.3.7	Analisa XRD	294
4.3.8	Analisa SEM.....	303
4.4	Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya.....	303
4.4.1	Penelitian Inne Syabrina Mutiara	303
4.4.2	Penelitian Like Novia Halim	308
4.4.3	Penelitian Ruceh Simanjuntak.....	313
4.4.4	Perbandingan dengan G-BLOCK.....	324
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	337
5.1	Kesimpulan.....	337
5.2	Saran.....	338
	DAFTAR PUSTAKA.....	339
	LAMPIRAN	347
	BIODATA PENULIS.....	359

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Kimia Polysiliate (Davidovits, 1994).....	7
Gambar 2.2 Proses Polimeriasi (Davidovits, 1997)	8
Gambar 2.3 Geopolymer Cements (Davidovits, 2013)	9
Gambar 2.4 Komposisi Beton Geopolimer (Zerfu dan Ekaputri, 2016).....	10
Gambar 2.5 Efek Rasio Massa Natrium Silikat Terhadap Natrium Hidroksida untuk Ambient dan Oven Dry Curing (Joshi dan Kadu, 2012).....	12
Gambar 2.6 Peningkatan Kekuatan Dengan Variasi Molaritas (Das dkk, 2014).....	12
Gambar 2.7 Breakwater Kubus	16
Gambar 2.8 Tabel 6.2 Klasifikasi Lingkungan (Direktorat Bina Marga Program Jalan, 1992)	16
Gambar 2.9 Teritip	19
Gambar 2.10 Pengaruh Suhu Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Perbandingan Water/Geopolymer Solids yang Berbeda (Hardjito dan Rangan, 2005).....	22
Gambar 2.11 Perbandingan Kuat Tekan Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017).....	24
Gambar 2.12 Penetrasi Klorida pada Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)	26

Gambar 2.13 Pengukuran pH pada Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)	27
Gambar 2.14 Pengaruh Molaritas dan Jumlah Na_2SiO_3 terhadap Penetrasi Klorida (Shaikh, 2014)	29
Gambar 2.15 Kuat Tekan pada Perendaman Terus-Menerus (Olivia dan Nikraz, 2013)	31
Gambar 2.16 Kuat Tekan pada Siklus Wetting-Drying (Olivia dan Nikraz, 2013).....	31
Gambar 2.17 Porositas Efektif pada Siklus Wetting-Drying (Olivia dan Nikraz, 2013)	32
Gambar 2.18 Perubahan Berat Beton pada Perendaman Terus-Menerus (Olivia dan Nikraz, 2013).....	33
Gambar 2.19 Kehilangan Berat Beton pada siklus Wetting-Drying (Olivia and Nikraz, 2013).....	33
Gambar 2.20 AVPV dan Porositas Efektif Beton OPC dan Geopolimer (Olivia dan Nikraz, 2011).....	35
Gambar 2.21 Penetrasi Ion Klorida Pada Kedalaman Beton (Olivia dan Nikraz, 2011)	36
Gambar 2.22 Reaksi Pembentukan Garam Friedls.....	41
Gambar 2.23 Reaksi Pembentukan Kalsium Klorida.....	41
Gambar 2.24 Anorthite.....	43
Gambar 2.25 SEM Anorthite (Casasola dkk, 2012).....	43
Gambar 2.26 Natrosilite	44
Gambar 2.27 SEM Natrosilite (Mocioiu dkk, 2014).....	44

Gambar 2.28 Quartz	45
Gambar 2.29 SEM Quartz	45
Gambar 2.30 Lazurite.....	46
Gambar 2.31 SEM Lazurite (Favaro dkk, 2012).....	47
Gambar 2.32 Mullite	48
Gambar 2.33 SEM Mullite (Liu dkk, 2014).....	48
Gambar 2.34 Halite	49
Gambar 2.35 SEM Halite (Sathar dkk, 2012)	49
Gambar 2.36 Zeolite.....	50
Gambar 2.37 SEM Zeolite (Nikolov dan Rostovsky, 2017)	50
Gambar 2.38 Tobermorite	51
Gambar 2.39 SEM Tobermorite (Mostafa dkk, 2009)	52
Gambar 2.40 Portlandite.....	52
Gambar 2.41 SEM Portlandite (Binici dkk, 2009)	53
Gambar 2.42 Ettringite.....	54
Gambar 2.43 SEM Ettringite (Binici dkk, 2009)	54
Gambar 2.44 SEM Friedel Salt (Li dkk, 2017)	55
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	57
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan).....	58
Gambar 3.3 Fly Ash Suralaya Kelas 1-4.....	60
Gambar 3.4 NaOH Flake.....	63
Gambar 3.5 Natrium Silikat (Na_2SiO_3)	63
Gambar 3.6 Superplasticizer	65
Gambar 3.7 Pasir Lumajang	66

Gambar 3.8 Bottom Ash PLTU Suralaya.....	66
Gambar 3.9 Batu Pecah Banyubiru	73
Gambar 3.10 Mix Design G-Block	79
Gambar 3.11 G-Block per 1 m ³	80
Gambar 3.12 Prosedur Perencanaan Campuran Beton.....	82
Gambar 3.13 (Grafik 1) Faktor Air Semen	84
Gambar 3.14 (Tabel 6) Ketentuan Minimum untuk Beton Bertulang Keadap Air	85
Gambar 3.15 (Tabel 3) Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m ³) yang Dibutuhkan untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton.....	86
Gambar 3.16 (Grafik 16) Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan	87
Gambar 3.17 Mix Design Beton OPC.....	88
Gambar 3.18 Kebutuhan Material 1m ³ Beton OPC	89
Gambar 3.19 Moist Curing.....	92
Gambar 3.20 Waring (a) dan Tali Tampar (b)	92
Gambar 3.21 Beton Diletakkan di Atas Waring.....	92
Gambar 3.22 Proses Pengikatan Waring dengan Tali Tampar....	93
Gambar 3.23 Beton Telah Siap untuk Ditaruh pada Bagan	93
Gambar 3.24 Proses Pengangkutan Beton dengan Perahu Menuju Bagan.....	93
Gambar 3.25 Pengikatan Beton pada Bagan	94
Gambar 3.26 Beton yang Baru Diambil dari Bagan.....	94

Gambar 3.27 Kondisi Beton Setelah Dibuka dari Waring	95
Gambar 3.28 Beton Sebelum Dibersihkan	95
Gambar 3.29 Beton Setelah Dibersihkan	95
Gambar 3.30 Beton Digarisi untuk Memberi Tanda Per Kedalaman	96
Gambar 3.31 Beton yang Telah Diberi Warna Per Kedalaman ..	96
Gambar 3.32 Pemberian Kode pada Beton	96
Gambar 3.33 Beton yang Telah Siap Diuji	97
Gambar 3.34 Beton Setelah Diuji Tekan.....	97
Gambar 3.35 Mesin Tekan Beton.....	100
Gambar 3.36 Mesin Pengaus.....	102
Gambar 3.37 Paving Block yang Telah Diauskan.....	102
Gambar 3.38 Perendaman Paving di dalam Air	103
Gambar 3.39 Paving dalam Keadaan SSD	103
Gambar 3.40 (Tabel 1) Sifat-sifat Fisika (SNI 03-0691-1996) .	104
Gambar 3.41 Skema Pengambilan Sampel	105
Gambar 3.42 Pewarnaan Beton	105
Gambar 3.43 Sisa Beton yang Telah Dihancurkan dan Diambil Sampel Per Kedalaman	105
Gambar 3.44 Sampel Per Kedalaman Dimasukkan ke dalam Plastik dan Diberi Kode	106
Gambar 3.45 Benda Uji Dimasukkan ke Dalam Oven.....	107
Gambar 3.46 Benda Uji yang Telah Dihaluskan.....	107
Gambar 3.47 Benda Uji yang Telah Dihaluskan.....	109

Gambar 3.48 Benda Uji yang Telah Ditambah Air Suling dan Diaduk	109
Gambar 3.49 pH Meter.....	110
Gambar 3.50 (Tabel 3) Ketentuan Jumlah Ion Klorida Maksimum dalam Beton (SNI 03-2854-1992).....	111
Gambar 3.51 Mesin XRD.....	112
Gambar 3.52 Mesin SEM.....	113
Gambar 4.1 Lokasi Sea Water Curing.....	127
Gambar 4.2 PN-28 (Moist Curing - 90 Hari Perendaman).....	128
Gambar 4.3 GN-12-28 (Moist Curing - 90 Hari Perendaman)..	129
Gambar 4.4 GN-12-1 (118 Hari Perendaman)	130
Gambar 4.5 GS-12-28 (Moist Curing - 90 Hari Perendaman) ..	131
Gambar 4.6 GS-12-1 (118 Hari Perendaman).....	132
Gambar 4.7 GN-10-28 (Moist Curing - 90 Hari Perendaman)..	133
Gambar 4.8 GN-10-1 (118 Hari Perendaman)	134
Gambar 4.9 GS-10-28 (Moist Curing - 90 Hari Perendaman) ..	135
Gambar 4.10 GS-10-1 (118 Hari Perendaman).....	136
Gambar 4.11 Suhu Selama Masa Perawatan (Sumber: AccuWeather).....	138
Gambar 4.12 Pengujian Slump Beton OPC	139
Gambar 4.13 Pengujian Slump Beton Geopolimer 12M Air Suling	140
Gambar 4.14 Pengujian Slump Beton Geopolimer 12M Air Laut	141

Gambar 4.15 Pengujian Slump Beton Geopolimer 10M Air Suling	142
Gambar 4.16 Pengujian Slump Beton Geopolimer 10M Air Laut	143
Gambar 4.17 Pengujian pH Menggunakan pH Meter	216
Gambar 4.18 XRD GN-12-28-H+28.....	295
Gambar 4.19 XRD GN-12-1-H+118.....	295
Gambar 4.20 XRD GN-12-28-H+118.....	296
Gambar 4.21 XRD GS-12-1-H+118	296
Gambar 4.22 XRD GS-12-28-H+118	297
Gambar 4.23 XRD GN-10-28-H+28.....	297
Gambar 4.24 XRD GN-10-1-H+118.....	298
Gambar 4.25 XRD GN-10-28-H+118.....	298
Gambar 4.26 XRD GS-10-1-H+118	299
Gambar 4.27 XRD GS-10-28-H+118	299
Gambar 4.28 XRD PN-28-H+28.....	301
Gambar 4.29 XRD PN-28-H+118.....	301

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Analisa Saringan Pasir	120
Grafik 4.2 Analisa Saringan Batu Pecah	124
Grafik 4.3 Hasil Analisa Kuat Tekan Beton.....	146
Grafik 4.4 Peningkatan Kuat Tekan Beton.....	148
Grafik 4.5 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Suling (Moist Curing).....	150
Grafik 4.6 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Laut (Moist Curing).....	151
Grafik 4.7 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut (Moist Curing)	152
Grafik 4.8 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Normal Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	153
Grafik 4.9 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	154
Grafik 4.10 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	155

Grafik 4.11 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Suling dengan Moist Curing dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari.....	156
Grafik 4.12 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Laut dengan Moist Curing dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari.....	157
Grafik 4.13 Hasil Pengujian Keausan Paving	158
Grafik 4.14 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Suling (Moist Curing)	159
Grafik 4.15 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Laut (Moist Curing)	160
Grafik 4.16 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut (Moist Curing).....	161
Grafik 4.17 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Suling Direndam di Laut pada Umur 1 Hari...	162
Grafik 4.18 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	163
Grafik 4.19 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	164
Grafik 4.20 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan Moist Curing dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	165

Grafik 4.21 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Laut dengan Moist Curing dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari	166
Grafik 4.22 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton PN-28.....	186
Grafik 4.23 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-12-28	186
Grafik 4.24 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-12-1	187
Grafik 4.25 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-12-28.....	187
Grafik 4.26 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-12-1.....	188
Grafik 4.27 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-10-28	188
Grafik 4.28 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-10-1	189
Grafik 4.29 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-10-28.....	189
Grafik 4.30 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-10-1.....	190
Grafik 4.31 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton PN-28.....	191

Grafik 4.32 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-12-28	191
Grafik 4.33 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-12-1	192
Grafik 4.34 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-12-28.....	192
Grafik 4.35 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-12-1.....	193
Grafik 4.36 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-10-28	193
Grafik 4.37 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-10-1	194
Grafik 4.38 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-10-28.....	194
Grafik 4.39 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-10-1.....	195
Grafik 4.40 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton PN-28.....	196
Grafik 4.41 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-28.....	197
Grafik 4.42 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-1	198
Grafik 4.43 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-28.....	199

Grafik 4.44 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-1.....	200
Grafik 4.45 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-28.....	201
Grafik 4.46 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-1.....	202
Grafik 4.47 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-28.....	203
Grafik 4.48 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-1.....	204
Grafik 4.49 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving PN-28.....	205
Grafik 4.50 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-12-28.....	206
Grafik 4.51 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-12-1.....	206
Grafik 4.52 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-12-28.....	207
Grafik 4.53 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-12-1.....	207
Grafik 4.54 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-10-28.....	208
Grafik 4.55 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-10-1.....	208

Grafik 4.56 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-10-28.....	209
Grafik 4.57 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-10-1	209
Grafik 4.58 Porositas Total Rata-rata.....	211
Grafik 4.59 Porositas Terbuka Rata-rata	213
Grafik 4.60 Porositas Tertutup Rata-rata.....	214
Grafik 4.61 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton OPC	218
Grafik 4.62 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-12-28.....	219
Grafik 4.63 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-12-1	220
Grafik 4.64 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-12-28.....	221
Grafik 4.65 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-12-1	222
Grafik 4.66 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-10-28.....	223
Grafik 4.67 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-10-1	224
Grafik 4.68 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-10-28.....	225

Grafik 4.69 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-10-1	226
Grafik 4.70 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC	228
Grafik 4.71 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28	229
Grafik 4.72 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1	230
Grafik 4.73 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28	231
Grafik 4.74 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1	232
Grafik 4.75 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28	233
Grafik 4.76 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1	234
Grafik 4.77 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28	235
Grafik 4.78 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1	236
Grafik 4.79 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Permukaan Beton (0 cm)	238
Grafik 4.80 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 3,75 cm	239

Grafik 4.81 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 7,5 cm	241
Grafik 4.82 Penetrasi Klorida PN-28	247
Grafik 4.83 Penetrasi Klorida GN-12-28	249
Grafik 4.84 Penetrasi Klorida GN-12-1	251
Grafik 4.85 Penetrasi Klorida GS-12-28	253
Grafik 4.86 Penetrasi Klorida GS-12-1	255
Grafik 4.87 Penetrasi Klorida GN-10-28	257
Grafik 4.88 Penetrasi Klorida GN-10-1	259
Grafik 4.89 Penetrasi Klorida GS-10-28	261
Grafik 4.90 Penetrasi Klorida GS-10-1	263
Grafik 4.91 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) Beton OPC	265
Grafik 4.92 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-12-28	266
Grafik 4.93 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-12-1	267
Grafik 4.94 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-12-28.....	268
Grafik 4.95 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-12-1.....	269
Grafik 4.96 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-10-28	270

Grafik 4.97 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-10-1	271
Grafik 4.98 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-10-28.....	272
Grafik 4.99 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-10-1.....	273
Grafik 4.100 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC	274
Grafik 4.101 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28	275
Grafik 4.102 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1	276
Grafik 4.103 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28.....	277
Grafik 4.104 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1	278
Grafik 4.105 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28	279
Grafik 4.106 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1	280
Grafik 4.107 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28	281
Grafik 4.108 Hubungan Klorida (Cl ⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1	282

Grafik 4.109 Klorida Bebas pada Permukaan Beton (0 cm)	284
Grafik 4.110 Klorida Bebas pada Kedalaman 3,75 cm	285
Grafik 4.111 Klorida Bebas pada Kedalaman 7,5 cm	286
Grafik 4.112 Klorida Terikat pada Permukaan Beton (0 cm) ...	288
Grafik 4.113 Klorida Terikat pada Kedalaman 3,75 cm	289
Grafik 4.114 Klorida Terikat pada Kedalaman 7,5 cm	290
Grafik 4.115 Klorida Total pada Permukaan Beton (0 cm)	291
Grafik 4.116 Klorida Total pada Kedalaman 3,75 cm	292
Grafik 4.117 Klorida Total pada Kedalaman 7,5 cm	293
Grafik 4.118 Perbandingan Kuat Tekan.....	325
Grafik 4.119 Perbandingan Porositas Total.....	326
Grafik 4.120 Perbandingan Porositas Terbuka.....	327
Grafik 4.121 Perbandingan Porositas Tertutup	328
Grafik 4.122 Perbandingan Klorida Total Permukaan (0 cm)...	330
Grafik 4.123 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 4 cm	331
Grafik 4.124 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 8 cm	331
Grafik 4.125 Perbandingan pH Permukaan (0 cm)	333
Grafik 4.126 Perbandingan pH kedalaman 4 cm.....	334
Grafik 4.127 Perbandingan pH Kedalaman 8 cm.....	334

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Porositas Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)	25
Tabel 2.2 Hasil Pengukuran pH pada Perendaman di Air (Halim dkk, 2017).....	25
Tabel 2.3 Kuat Tekan Umur 28 Hari (Shaikh, 2014).....	28
Tabel 2.4 Kuat Tekan Beton (Olivia dan Nikraz, 2011)	34
Tabel 3.1 Chemical Requirements (ASTM C618-05).....	61
Tabel 3.2 Kebutuhan Kubus Beton Geopolimer	80
Tabel 3.3 Kebutuhan Paving Beton Geopolimer.....	81
Tabel 3.4 Kebutuhan Total Material Beton Geopolimer.....	81
Tabel 3.5 Kebutuhan Total Material Beton OPC	89
Tabel 3.6 Kebutuhan Total Material Penelitian	90
Tabel 3.7 Penamaan Beton.....	91
Tabel 3.8 Daftar Konversi (SNI 03-1974-1990)	100
Tabel 3.9 Standar Kontrol Beton (SNI 03-6815-2002)	100
Tabel 4.1 Hasil Analisa XRF Fly Ash Suralaya Kelas 1-4	116
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Klorida (Cl ⁻) Bebas dan Terikat Fly Ash PLTU Suralaya 1-4.....	116
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Klorida (Cl ⁻) Bebas dan Terikat Air Laut Pantai Kenjeran	117

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Klorida (Cl ⁻) Bebas dan Terikat Bottom Ash PLTU Suralaya.....	117
Tabel 4.5 Berat Jenis Bottom Ash (BA).....	118
Tabel 4.6 Hasil Pengujian XRF Bottom Ash PLTU Suralaya ..	119
Tabel 4.7 Analisa Saringan Pasir	120
Tabel 4.8 Berat Jenis Pasir	121
Tabel 4.9 Air Resapan Pasir.....	121
Tabel 4.10 Kebersihan Pasir terhadap Bahan Organik.....	122
Tabel 4.11 Kebersihan Pasir terhadap Lumpur/Pencucian.....	122
Tabel 4.12 Kelembapan Pasir.....	123
Tabel 4.13 Analisa Saringan Batu Pecah	124
Tabel 4.14 Berat Jenis Batu Pecah	125
Tabel 4.15 Air Resapan Batu Pecah.....	125
Tabel 4.16 Kebersihan Batu Pecah terhadap Lumpur/Pencucian	126
Tabel 4.17 Kelembapan Batu Pecah.....	127
Tabel 4.18 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton (a).....	144
Tabel 4.19 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton (b).....	145
Tabel 4.20 Peningkatan Kuat Tekan beton.....	148
Tabel 4.21 Hasil Pengujian Keausan Paving.....	158
Tabel 4.22 Hasil Pengujian Porositas PN-28	168
Tabel 4.23 Hasil Pengujian Porositas GN-12-28	170
Tabel 4.24 Hasil Pengujian Porositas GN-12-1	172
Tabel 4.25 Hasil Pengujian GS-12-28.....	174

Tabel 4.26 Hasil Pengujian Porositas GS-12-1	176
Tabel 4.27 Hasil Pengujian Porositas GN-10-28	178
Tabel 4.28 Hasil Pengujian Porositas GN-10-1	180
Tabel 4.29 Hasil Pengujian Porositas GS-10-28	182
Tabel 4.30 Hasil Pengujian Porositas GS-10-1	184
Tabel 4.31 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton PN-28.....	196
Tabel 4.32 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-28.....	197
Tabel 4.33 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-1	198
Tabel 4.34 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-28.....	199
Tabel 4.35 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-1.....	200
Tabel 4.36 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-28.....	201
Tabel 4.37 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-1	202
Tabel 4.38 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-28.....	203
Tabel 4.39 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-1.....	204
Tabel 4.40 Porositas Total Rata-rata	211

Tabel 4.41 Porositas Terbuka Rata-rata	212
Tabel 4.42 Porositas Tertutup Rata-rata.....	214
Tabel 4.43 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH).....	217
Tabel 4.44 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC	227
Tabel 4.45 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28	228
Tabel 4.46 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1	229
Tabel 4.47 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28	230
Tabel 4.48 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1	231
Tabel 4.49 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28	232
Tabel 4.50 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1	233
Tabel 4.51 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28.....	234
Tabel 4.52 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1	235
Tabel 4.53 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Permukaan Beton (0 cm)	237

Tabel 4.54 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 3,75 cm.....	239
Tabel 4.55 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 7,5 cm	240
Tabel 4.56 Hasil Analisa Klorida Bebas	243
Tabel 4.57 Hasil Analisa Klorida Terikat.....	244
Tabel 4.58 Hasil Analisa Klorida Total.....	245
Tabel 4.59 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Klorida (Cl ⁻) Total Beton OPC.....	264
Tabel 4.60 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-12-28	265
Tabel 4.61 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-12-1	266
Tabel 4.62 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-12-28.....	267
Tabel 4.63 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-12-1.....	268
Tabel 4.64 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-10-28	269
Tabel 4.65 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GN-10-1	270
Tabel 4.66 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl ⁻) GS-10-28.....	271

Tabel 4.67 Hubungan Porositas Terbuka (P_o) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-10-1.....	272
Tabel 4.68 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC	274
Tabel 4.69 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28	275
Tabel 4.70 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1	276
Tabel 4.71 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28	277
Tabel 4.72 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1	278
Tabel 4.73 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28	279
Tabel 4.74 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1	280
Tabel 4.75 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28	281
Tabel 4.76 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1	282
Tabel 4.77 Klorida Bebas pada Permukaan Beton (0 cm) (%) .	284
Tabel 4.78 Klorida Bebas pada Kedalaman 3,75 cm (%)	285
Tabel 4.79 Klorida Bebas pada Kedalaman 7,5 cm (%)	286
Tabel 4.80 Klorida Terikat pada Permukaan Beton (0 cm) (%)	287

Tabel 4.81 Klorida Terikat pada Kedalaman 3,75 cm (%).....	288
Tabel 4.82 Klorida Terikat pada Kedalaman 7,5 cm (%).....	289
Tabel 4.83 Klorida Total pada Permukaan Beton (0 cm) (%)...	291
Tabel 4.84 Klorida Total pada Kedalaman 3,75 cm (%).....	292
Tabel 4.85 Klorida Total pada Kedalaman 7,5 cm (%).....	293
Tabel 4.86 Hasil Pengujian XRD Beton Geopolimer (%)	295
Tabel 4.87 Hasil Pengujian Beton OPC (%)	301
Tabel 4.88 Perbandingan Kuat Tekan	325
Tabel 4.89 Perbandingan Porositas Total.....	326
Tabel 4.90 Perbandingan Porositas Terbuka.....	327
Tabel 4.91 Perbandingan Porositas Tertutup.....	328
Tabel 4.92 Perbandingan Klorida Total Permukaan (0 cm).....	329
Tabel 4.93 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 4 cm	329
Tabel 4.94 Klorida Total Kedalaman 8 cm	330
Tabel 4.95 Perbandingan pH Permukaan (0 cm).....	332
Tabel 4.96 Perbandingan pH Kedalaman 4 cm.....	332
Tabel 4.97 Perbandingan pH Kedalaman 8 cm.....	333

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara di Asia Tenggara yang dilintasi garis khatulistiwa dan berada di antara benua Asia dan Australia serta antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia. Menurut Deputi Kedaulatan Maritim Kemenko Bidang Kemaritiman Arif Havas Oegroseno, Indonesia telah mencatat sebanyak 17.504 pulau yang masuk dalam wilayah kedaulatan NKRI (Sekretariat Kabinet RI, 2017). Indonesia juga adalah negara kepulauan terbesar dan memiliki garis pantai sepanjang ke-4 di dunia setelah Kanada, Amerika Serikat, dan Rusia (Bambang, 2009). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia adalah negara yang sebagian besar wilayahnya terdiri dari lautan, sehingga banyak terdapat bangunan-bangunan yang berada di laut atau di pesisir laut.

Salah satu bangunan yang berada di laut adalah pemecah gelombang (*breakwater*). Breakwater adalah prasarana yang dibangun untuk memecahkan ombak/gelombang, dengan menyerap sebagian energi gelombang. Pemecah gelombang digunakan untuk mengendalikan abrasi yang menggerus garis pantai dan untuk menenangkan gelombang (Jackson dkk, 2015). Pemecah gelombang dapat dibuat dari tumpukan batu, blok beton, beton masa, turap dan sebagainya dengan semen sebagai material utamanya.

Air laut memiliki kandungan garam yang tinggi yang dapat mengurangi keawetan bangunan beton bertulang. Hal ini disebabkan ion klorida (Cl^-) yang terdapat pada air laut sebanyak 19-80 gr/liter (Mehta, 1991) yang merupakan material

agresif terhadap bahan logam, termasuk tulangan dalam beton maupun bahan betonnya. Kerusakan dapat terjadi akibat reaksi antara air laut yang agresif yang terpenetrasi ke dalam beton dengan mineral di dalam beton yang mengakibatkan beton kehilangan sebagian massa, kehilangan kekuatan dan kekakuannya serta mempercepat proses pelapukan.

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia dengan semen Portland (OPC) sebagai bahan pengikatnya. Konsumsi energi selama pembuatan semen Portland melepaskan sejumlah besar gas rumah kaca ke atmosfer yang menyebabkan pemanasan global. Produksi satu ton semen Portland melepaskan 0,95 ton CO₂ ke atmosfer (Davidovits, 2013). Pengurangan penggunaan jumlah semen Portland harus menjadi prioritas para praktisi dan produsen semen. Beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* diperkenalkan sebagai beton ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi CO₂ sampai sembilan kali lebih kecil dari semen Portland (Davidovits, 2015).

Beton geopolimer berbasis *fly ash* yang didapat dari limbah pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang melimpah di Indonesia memiliki banyak manfaat seperti ramah lingkungan, berkinerja tinggi, dan bermanfaat secara ekonomi. Beton geopolimer berbasis *fly ash* juga tahan terhadap korosi serta memproduksi sedikit CO₂ (Zerfu dan Ekaputri, 2016). Beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* terbentuk dari reaksi polimerisasi akibat reaksi alkali-aluminosilikat yang menghasilkan material kuat berstruktur seperti zeolit. Dalam campurannya, sumber silika dan alumina direaksikan dengan larutan alkali sebagai aktivatornya. Aktivator yang umumnya digunakan adalah campuran dari Na₂SiO₃ dan NaOH.

Dalam pembuatan beton ada hal-hal yang berpengaruh terhadap kekuatan (*durability*) beton, salah satunya adalah

perawatan (*curing*). Perawatan beton yang baik umumnya menggunakan air bersih (air yang tidak mengandung kandungan kimia yang dapat merusak beton). Akan tetapi dalam proses pembuatan bangunan beton di daerah pantai, kontak dengan air laut yang banyak mengandung klorida (Cl^-) terkadang tidak dapat dihindari sehingga tentunya akan mempengaruhi kekuatan beton.

Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk menyelidiki seperti apa dampak perawatan yang dilakukan di air laut yang banyak mengandung klorida (Cl^-) terhadap beton geopolimer. Halim dkk (2017) menyimpulkan bahwa beton geopolimer dengan kadar NaOH 8M memiliki kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan beton OPC di dalam air garam. Shaikh (2014) menyimpulkan bahwa beton geopolimer memiliki sifat yang lebih baik dari beton OPC, yaitu kemampuan dalam menahan penetrasi klorida karena beton geopolimer memiliki resapan air yang rendah. (Olivia dan Nikraz, 2011 dan 2013) menyimpulkan bahwa air laut tidak menimbulkan efek yang signifikan terhadap kekuatan beton geopolimer dan juga tidak terdapat pengurangan porositas pada beton geopolimer, serta beton geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dan porositas yang rendah yang mana bermanfaat untuk beton di lingkungan air laut.

G-Block, nama dari produk pada penelitian ini. Diharapkan *G-Block* dapat menjadi solusi terhadap beton konvensional yang memiliki banyak kekurangan bila dihadapkan dengan lingkungan korosif seperti air laut. Sementara itu hanya sedikit penelitian yang membahas kuat tekan, keausan, porositas, derajat keasaman (pH), dan penetrasi klorida pada beton geopolimer di lingkungan air laut. Pada penelitian ini juga akan dicoba suatu inovasi yaitu pembuatan larutan NaOH menggunakan air laut, dengan perlakuan *sea water curing* saat umur beton 1 hari dan 28 hari (dengan *moist curing* terlebih dahulu). Yang nantinya diharapkan *G-Block*

dapat diaplikasikan sebagai *breakwater*. Maka dari itu diperlukan suatu penelitian untuk membahas masalah tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Secara umum berdasarkan latar belakang diatas, terdapat beberapa masalah yang dibahas pada penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Apa saja dampak *sea water curing* yang banyak mengandung klorida (Cl^-) terhadap kuat tekan, keausan, derajat keasaman (pH), porositas, dan penetrasi ion klorida *G-Block*?
2. Apa pengaruh dari *moist curing* dan perendaman pada umur 1 hari terhadap kuat tekan, keausan, derajat keasaman (pH), porositas, dan penetrasi ion klorida *G-Block*?
3. Apa tipe beton yang paling baik yang dapat memberikan kekuatan dan ketahanan yang terbaik untuk *G-Block* di lingkungan air laut?
4. Apakah pengaruh air laut jika digunakan dalam pembuatan larutan NaOH terhadap kuat tekan, keausan, derajat keasaman (pH), porositas, dan penetrasi ion klorida *G-Block*?

1.3 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan di dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. *Sea water curing* dilaksanakan pada pesisir Pantai Kenjeran, Surabaya.

2. Digunakan *fly ash* yang berasal dari PLTU Suralaya 1-4.
3. Air laut yang digunakan dalam campuran NaOH adalah air laut Pantai Kenjeran.
4. Penelitian ini dikerjakan dalam skala laboratorium sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut jika diterapkan dalam skala produksi pabrik.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh yang diberikan dari *sea water curing* terhadap *G-Block*.
2. Menganalisis perbedaan dari *moist curing* dengan perendaman pada umur 1 hari terhadap *G-Block*.
3. Menganalisis penggunaan air laut dalam pembuatan larutan NaOH dan apa saja dampaknya.
4. Mendapatkan tipe beton geopolimer yang dapat direkomendasikan untuk *G-Block*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memanfaatkan *fly ash* dan *bottom ash* di dalam pembuatan *breakwater*.
2. Memanfaatkan air laut di dalam pembuatan beton geopolimer.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

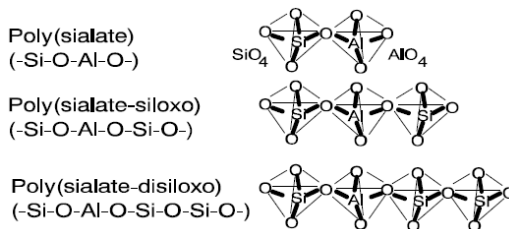
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

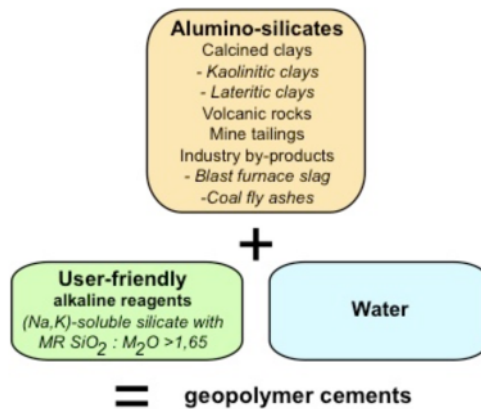
Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa teori yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Adapun hal-hal yang menjadi acuan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

2.1 Beton Geopolimer

Beton *geopolimer* adalah beton yang menggunakan semen geopolimer sebagai *binder*-nya. Semen geopolimer merupakan material inovatif dan alternatif dari semen Portland yang dapat digunakan pada infrastruktur-infrastruktur sipil. Semen ini juga tahan terhadap banyak permasalahan yang dapat merusak beton konvensional. Beton geopolimer terbentuk dari proses polimerisasi. Proses polimerisasi yang terjadi di dalam beton geopolimer meliputi reaksi kimia yang terjadi antara alkalin dengan mineral *Si - Al* sehingga menghasilkan rantai polimeric tiga - dimensi dan ikatan struktur *Si - O - Al - O* (poly(sialate)) yang konsisten (Davidovits, 1997). Davidovits menggolongkan polysialate menjadi 3 tipe (Gambar 2.1), yaitu: Poly (sialate), Poly (sialate-siloxo), dan Poly (sialate-disiloxo).



Gambar 2.1 Struktur Kimia Polysilicate (Davidovits, 1994)



Gambar 2.3 *Geopolymer Cements* (Davidovits, 2013)

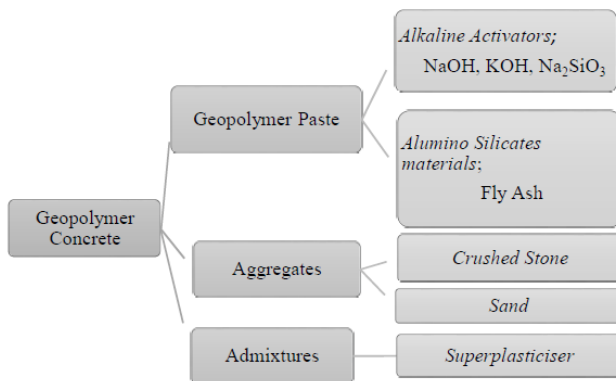
Jika dibandingkan dengan beton konvensional, beton geopolimer memiliki beberapa keunggulan yaitu sebagai berikut (Li dkk, 2004):

1. Terbuat dari bahan baku yang melimpah, yaitu semua campuran material pozolan, sumber silikat, atau alumino-silikat yang mudah larut dalam larutan alkali.
2. Pembuatan bahan dasar alumino-silikat beton geopolimer lebih hemat energi, karena hanya menggunakan kurang dari 3/5 energi pada pembuatan material semen beton konvensional. Beton geopolimer ini juga tidak melepaskan CO₂ ke udara sehingga dapat mengurangi efek pemanasan global.
3. Memiliki volume yang stabil karena penyusutan yang terjadi 4/5 kali lebih rendah jika dibandingkan beton konvensional.
4. Mampu mencapai kuat tekan sebesar 70% dari kuat tekan akhir dalam waktu 4 jam.

5. Tahan terhadap lingkungan agresif dan suhu yang tinggi (1000 K – 1200 K) tanpa mengurangi fungsi yang dimilikinya.

2.2 Komposisi Beton Geopolimer

Zerfu dan Ekaputri (2016) menguraikan beberapa hal mengenai komposisi beton geopolimer. Pada dasarnya, beton geopolimer terdiri dari pasta geopolimer, agregat dan admixtures. Dalam campuran *alkali-activated*, bahan pengikat utamanya adalah *fly ash* yang kaya akan mineral alumina-silikat. Komposisi beton geopolimer dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Komposisi Beton Geopolimer (Zerfu dan Ekaputri, 2016)

Pada Gambar 2.4 dijelaskan bahwa beton geopolimer terdiri dari pasta geopolimer, agregat, dan *admixture*. Pasta geopolimer terdiri dari *alkaline activator* (campuran NaOH atau KOH dengan Na_2SiO_3) dan *fly ash*. Agregat terdiri dari agregat

kasar (kerikil) dan agregat halus (pasir). Serta *admixture* terdiri dari *superplasticizer* (SP).

2.2.1 Pasta geopolimer

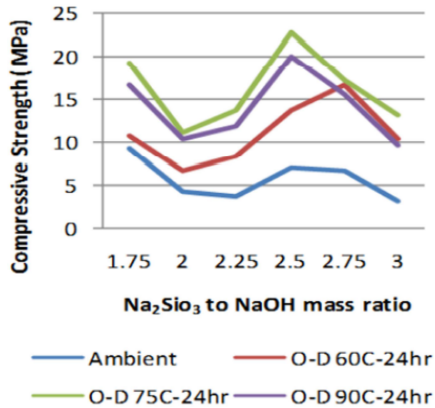
Bahan pengikat pasta geopolimer berbasis *fly ash* terbuat dari *alkaline activator* dan abu terbang (*fly ash*). Karena *fly ash* kaya akan silika dan alumina, maka dapat digunakan sebagai bahan baku dalam semen geopolimer.

a) Abu terbang (*fly ash*)

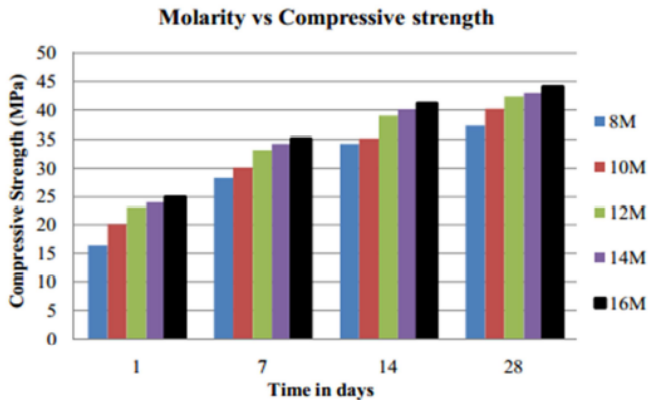
Adalah produk sampingan dari pembakaran batubara di pembangkit listrik. Menurut ASTM C618 terdapat dua jenis abu terbang, yaitu kelas F dan kelas C. Hal utama yang membedakan jenis abu terbang terdapat pada kandungan silikon dioksida (SiO_2) + aluminium oksida (Al_2O_3) + besi (III) oksida (Fe_2O_3), yaitu pada kelas F lebih dari 70% dan kelas C antara 50-70%.

b) *Alkaline activators*

Bahan umum yang digunakan sebagai *alkaline activators* adalah natrium silikat (Na_2SiO_3), natrium hidroksida (NaOH), dan kalium hidroksida (KOH). Dalam campuran beton geopolimer, larutan berbasis natrium lebih banyak dipilih dari larutan berbasis kalium karena harganya relatif lebih murah dan mudah didapat di pasar dalam bentuk pelet dan gel (cairan). Rasio massa cairan alkali terhadap abu terbang 0,35 dan rasio massa natrium silikat terhadap natrium hidroksida sebanyak 2,50 memberikan kekuatan tekan optimum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Kekuatan geopolimer juga meningkat seiring dengan peningkatan molaritas larutan alkali (Gambar 2.6).



Gambar 2.5 Efek Rasio Massa Natrium Silikat Terhadap Natrium Hidroksida untuk *Ambient* dan *Oven Dry Curing* (Joshi dan Kadu, 2012)



Gambar 2.6 Peningkatan Kekuatan Dengan Variasi Molaritas (Das dkk, 2014)

1 Natrium silikat (Na_2SiO_3)

Natrium silikat merupakan salah satu bahan tertua dan paling aman yang sering digunakan dalam industri kimia, hal ini dikarenakan proses produksi yang lebih sederhana, maka sejak tahun 1818 natrium silikat berkembang dengan cepat. Natrium silikat terdapat dalam dua bentuk, yaitu berupa padat dan larutan. Untuk campuran beton lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Natrium silikat atau yang lebih dikenal dengan nama *water glass*, pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya natrium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, *coating*, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa natrium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran dalam beton (Achmad dan Hidjan, 2012).

2 Natrium hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam fly ash sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Achmad dan Hidjan, 2012).

2.2.2 Agregat

Agregat merupakan *filler* dari sebuah campuran beton, seperti pada beton dengan semen Portland agregat menempati volume terbesar, yaitu sekitar 60-80% massa pada beton geopolimer (Joseph dan Mathew, 2012). Beton geopolimer umumnya menggunakan kerikil dan pasir. Namun pada *G-*

Block digunakan kerikil, pasir, dan *bottom ash*. *Bottom ash* adalah limbah hasil pembakaran batu bara sebagai sumber energi pada unit pembangkit uap (*boiler*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *Bottom ash* berbentuk partikel halus dan bersifat pozzolan serta ukurannya lebih besar dari *fly ash* (Ristinah dkk, 2012).

2.2.3 Admixtures

Admixtures adalah bahan kimia atau bahan alami, yang digunakan untuk memperbaiki sifat khusus beton segar atau yang sudah mengeras seperti: daya tahan, kemudahan pengerjaan (*workability*) atau karakteristik kekuatan beton tersebut (National Ready Mixed Association, 2014). Pada beton geopolimer penggunaan *admixtures* bertujuan untuk kemudahan pengerjaan (*workability*). Campuran yang biasa digunakan dalam beton geopolimer adalah *superplasticizer*. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan *superplasticizer* meningkatkan kemampuan kerja beton segar, namun memiliki efek buruk pada kuat tekan beton. Dosis *superplasticizer* bervariasi dari 0,6-2% dari berat abu terbang (Motorwala dkk, 2013).

2.3 Bangunan Pemecah Gelombang (*Breakwater*) Berbentuk Kubus

Berdasarkan invensi dalam paten No: IDP0023145 “Susunan Kubus Beton untuk Pemecah Gelombang” (Wahyudin, 2009) diuraikan beberapa hal mengenai *breakwater* berbentuk kubus sebagai berikut:

1. Untuk melindungi daerah pantai dari serangan gelombang, suatu pantai memerlukan bangunan peredam

gelombang. Peredam gelombang adalah suatu bangunan yang bertujuan untuk mereduksi atau menghancurkan energi gelombang. Gelombang yang menjalar mengenai suatu bangunan peredam gelombang sebagian energinya akan dipantulkan (refleksi), sebagian diteruskan (transmisi) dan sebagian dihancurkan (dissipasi) melalui pecahnya gelombang, kekentalan fluida, gesekan dasar dan lain-lainnya. Pembagian besarnya energi gelombang yang dipantulkan, dihancurkan dan diteruskan tergantung karakteristik gelombang datang (periode, tinggi, kedalaman air), tipe bangunan peredam gelombang (permukaan halus dan kasar).

2. Peredam gelombang bentuk kubus adalah peredam gelombang yang mempunyai permukaan lebih kecil/sempit dikarenakan cara pemasangannya disesuaikan dengan sifat dan arah datangnya gelombang, sehingga menyebabkan gelombang akan kehilangan energi lebih besar karena gesekan dengan permukaan peredam gelombang datar (kubus).
3. Breakwater berbentuk kubus sangat efektif untuk meredam energi gelombang, dengan cara pemasangan sudut menghadap arah datangnya gelombang. Gelombang akan dipecah oleh sudut kubus sehingga energi yang dibawa oleh gelombang berkurang, seterusnya energi yang sudah tereduksi diterima kembali oleh kubus dibelakangnya, demikian seterusnya sampai gelombang laut benar-benar berkurang energinya.
4. Ada beberapa keuntungan penggunaan breakwater model kubus, yaitu sebagai berikut:
 - a) Pembuatannya sangat mudah.
 - b) Waktu pembuatannya cepat.
 - c) Bila penggunaan dianggap cukup, kubus dapat dipindah ketempat lain.

d) Punya nilai estetika yang baik.



Gambar 2.7 *Breakwater* Kubus

Bangunan pemecah gelombang umumnya terbuat dari beton karena keefesienan dan kemudahan dalam pengerjaannya. Berdasarkan Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan, BMS 1992 bagian 6, Tabel 6.2 (Gambar 2.8), untuk beton yang keadaan permukaan bagian komponennya berada dalam air dan terletak dalam lingkungan daerah pasang surut, termasuk dalam klasifikasi C. Dalam tipe tersebut mutu beton yang digunakan harus memiliki kuat tekan karakteristik (f^c) tidak kurang dari 35 MPa atau sekitar mutu K-400.

Keadaan Permukaan dan Lingkungan	Klasifikasi Lingkungan
4. Permukaan bagian komopnen dalam air	
(a) Dalam air tawar	B1
(b) Dalam air laut	
(i) Terendam secara permanen	B2
(ii) Dalam daerah pasang surut	C
(c) Dalam air mengalir	U

Keterangan:

- a) 15 MPa untuk klasifikasi tidak terlindung A.
- b) 20 MPa untuk klasifikasi tidak terlindung B1.
- c) 25 MPa untuk klasifikasi tidak terlindung B2.
- d) 35 MPa untuk klasifikasi tidak terlindung C.

Gambar 2.8 Tabel 6.2 Klasifikasi Lingkungan (Direktorat Bina Marga Program Jalan, 1992)

2.4 Curing di Air Laut

Air laut mengandung 3,5% garam-garaman yang dapat menggerogoti kekuatan dan keawetan beton. Garam-garaman utama yang terdapat dalam air laut adalah klorida (55%), natrium (31%), sulfat (8%), magnesium (4%), kalsium (1%), potasium (1%) dan sisanya (kurang dari 1%) terdiri dari bikarbonat, bromida, asam borak, strontium dan fluorida (Hidayat, 2011). Kandungan klorida (Cl) yang begitu tinggi pada air laut merupakan garam yang bersifat agresif terhadap bahan lain, termasuk beton. Kerusakan dapat terjadi pada beton akibat reaksi antara air laut yang agresif yang terpenetrasi ke dalam beton dengan senyawa-senyawa di dalam beton yang mengakibatkan beton kehilangan sebagian massa, kehilangan kekuatan dan kekakuannya serta mempercepat proses pelapukan.

Garam-garam Sodium yang terkandung dalam air laut dapat menjadi unsur yang berbahaya bila berkombinasi dengan agregat alkali yang reaktif, sama seperti dengan kombinasi dengan semen alkali. Karena itu air laut tidak boleh dipakai untuk beton yang diketahui mempunyai potensi agregat alkali reaktif, bahkan bila kadar alkalinya rendah. Garam-garam seperti Kalsium Klorida dan Magnesium klorida akan bereaksi secara kimiawi dengan semen segingga mengurangi *setting time*, kekuatan dini meningkat tetapi untuk kekuatan akhirnya menurun dan konsentrasi sulfat pada air laut juga bias menyebabkan kerusakan pada pasta. Selain reaksi kimia, kristalisasi garam dalam rongga beton dapat mengakibatkan kehancuran akibat tekanan kristalisasi tadi. Karena kristalisasi terjadi pada titik penguapan air, bentuk serangan terjadi di dalam beton di atas permukaan air. Garam naik di dalam beton

dengan aksi kapiler, jadi serangan terjadi hanya jika air dapat terserap dalam beton (Nugraha, 2007 dalam Hidayat, 2011).

Porositas pada beton sangat penting diteliti terutama pada bangunan tepi pantai dan bangunan yang bersinggungan dengan tanah. Pada bangunan tepi pantai, beton akan bersinggungan dengan air garam yang mengandung NaCl yang dapat meresap ke dalam beton sehingga dapat merusak dan bahkan menghancurkan beton. Kerusakan beton terjadi ketika NaCl tersebut menguap sehingga di dalam pori-pori beton timbul kristal-kristal yang akan mendesak pori-pori dinding beton. Akibatnya beton pecah menjadi serpihan-serpihan lepas.

Maka dari itu biasanya untuk mengurangi kerugian yang ditimbulkan akibat pengaruh klorida pada beton ini, seringkali digunakan beton dengan mutu tinggi. Hal ini dimaksudkan agar penetrasi air laut ke dalam beton menjadi semakin sulit karena tingkat kepadatan beton yang tinggi. Sehingga kekuatan beton yang berada di lingkungan laut tidak mengalami perubahan (Hunggurami dkk, 2014).

2.4.1 Teritip

Biofouling adalah penempelan dan pertumbuhan organisme pada permukaan benda atau material yang terbenam di laut. Organisme ini dapat saja melekat sementara maupun permanen pada permukaan material yang ditempelinya. Kelompok *biofouling* yang umum ditemukan antara lain: Moluska teritip, bryozoa, tunicata, decapoda, krustasea, hidroid dan anthozoa (Ruslan, 2014).

Organisme *fouling* (*biofouling*) yang menempel pada kapal dan berbagai struktur buatan manusia di laut memberikan

kerugian (ekonomis maupun operasional). Keberadaan organisme *fouling* pada lambung kapal yang telah berlayar selama 6-8 bulan dapat mengakibatkan berkurangnya kecepatan kapal hingga 50%. Hal tersebut mengakibatkan tertundanya waktu berlayar selama 10-15% dari total waktu berlayar serta meningkatkan konsumsi bahan bakar hingga 40% (Chambers dkk, 2006).

Teritip (Gambar 2.9) dianggap sebagai salah satu makhluk hidup tertua di bumi, karena diperkirakan hidup jutaan tahun yang lalu. Teritip merupakan krustasea yang mirip dengan kepiting dan udang. Mereka termasuk dalam kelas Cirripedia. Teritip adalah invertebrata yang hidup di laut, dimana kehidupannya melalui dua stadium yaitu stadium larva yang bersifat planktonis dan stadium dewasa yang bersifat menempel. Teritip cenderung menempel pada substrat yang kasar, yang memiliki retakan atau celah-celah. Teritip biasanya hidupnya di bagian teratas zona pasang surut, mulai dari pasang tertinggi hingga pada kedudukan rata-rata pasang surut (Mahuri dkk, 2014).



Gambar 2.9 Teritip

Teritip termasuk ke dalam *Teredo* (jenis *Bernacles*) juga disebut tiram pengebor atau cacing kapal (*Shipworm*). Walaupun namanya cacing kapal, tetapi sebenarnya bukan cacing biasa tetapi bivalvia (*Mollusca*) pelubang kayu, batu dan beton. Hidupnya pada tumpukan kayu, dermaga, galangan kapal dan bangunan batu/beton. Biota ini dapat mengebor dengan cara mengeluarkan *enzym* yang melunakkan/menghancurkan selulosa/kapur/batu. Biota ini juga mengeluarkan cairan sejenis protein untuk merekatkan hewan tersebut pada bangunan sipil yang tertempel (CaCO_3 dan SiO_2). Hewan ini sanggup menancapkan tubuhnya di batu karang atau bangunan dari beton hingga dalam.

Tempelan teritip dapat merusak permukaan beton karena menempel paling kuat antara permukaan beton dan senyawa chitin dari cangkang. Chitin merupakan komponen utama kulit hewan krustasea (berkulit keras) seperti kepiting, lobster, dan udang. Terjadi penurunan kekuatan lentur, tarik dan desak struktur beton seiring dengan penambahan waktu umur rendaman di air laut.

Mekanisme proses terjadinya kerusakan bangunan beton diawali dengan terkelupasnya tempelan biota laut yang menempel pada bangunan beton, diikuti dengan adanya intrusi air laut, sehingga mempercepat terjadinya kerusakan struktur beton. Selain hal itu, pada kondisi awal perendaman ada suatu reaksi kimia antara bahan kimia penyusun beton dan bahan kimia yang ada pada air laut, sehingga menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton meningkat, tetapi pada umur beton tertentu, reaksi bahan kimia tersebut menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton menurun. Hal ini dikarenakan pula reaksi yang terjadi dalam air laut: 2NaCl_2 dengan $\text{CaO/SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dan H_2O Larut menjadi CaCl_2 dan

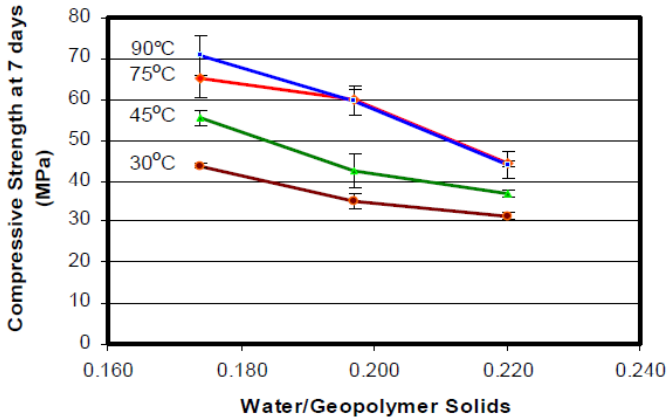
2NaOH, sehingga menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton menurun, karena CaO yang mengikat komponen semen larut menjadi CaCl_2 dalam air laut (komponen semen jadi keropos) (Hartono dkk, 2012).

2.5 *Moist Curing*

Curing adalah pemeliharaan kadar air dan suhu pada beton selama jangka waktu tertentu untuk mencapai karakteristik beton yang diinginkan. Pada beton OPC yang baru selesai dicampur memiliki kadar air yang lebih banyak yang dibutuhkan untuk proses hidrasi semen, bagaimanapun kehilangan air dari proses penguapan dapat mengurangi proses hidrasi yang berlangsung terutama pada permukaan beton. Maka dari itu proses penguapan air pada beton harus dikurangi atau dicegah untuk menjaga kandungan air di dalam beton yang dibutuhkan untuk proses hidrasi. Beton dengan kandungan air yang sedikit membutuhkan proses *curing* yang berbeda. Ketika proses hidrasi berlangsung (secara kimiawi bergabung dengan air) kelembaban relatif internal menurun menyebabkan pasta mengering jika tidak ada air eksternal yang disediakan. Pasta mengering sendiri ketika proses hidrasi berhenti. Hal ini dapat mempengaruhi katakarakteristik beton, seperti menurunnya kuat tekan dan menyebabkan beton menjadi susut (Kosmatka dkk, 2002).

Untuk pekerjaan di lapangan proses *curing* yang paling efektif adalah dengan menutup beton dengan lapisan kedap air atau karung goni yang basah (*moist curing*). Metode ini bermanfaat dalam menjaga suhu dan kelembaban beton yang berpengaruh ke dalam proses hidrasi yang berlangsung.

Metode *curing* dengan pemanasan secara substansial membantu reaksi kimia yang terjadi pada pasta geopolimer, lamanya *curing* dan suhu mempengaruhi kekuatan tekan dari beton geopolimer (Gambar 2.10). Suhu dari metode *curing* dengan pemanasan bisa dilakukan pada suhu 30°C yang mana pada daerah beriklim tropis seperti Indonesia suhu ini dapat dicapai pada suhu rata-rata ruangan. Suhu ini dapat dicapai pada metode *moist curing* yang memanfaatkan suhu ruangan di dalam prosesnya. Meskipun tidak menghasilkan kuat tekan yang terlalu tinggi, metode ini lebih mudah diterapkan di lapangan (Rangan, 2010).



Gambar 2.10 Pengaruh Suhu Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Perbandingan *Water/Geopolymer Solids* yang Berbeda (Hardjito dan Rangan, 2005)

2.6 Penelitian yang Pernah Dilakukan Sebelumnya

Beberapa penelitian sudah pernah dilakukan untuk mengetahui ketahanan beton geopolimer terhadap air laut atau air dengan kandungan garam yang tinggi, yaitu sebagai berikut:

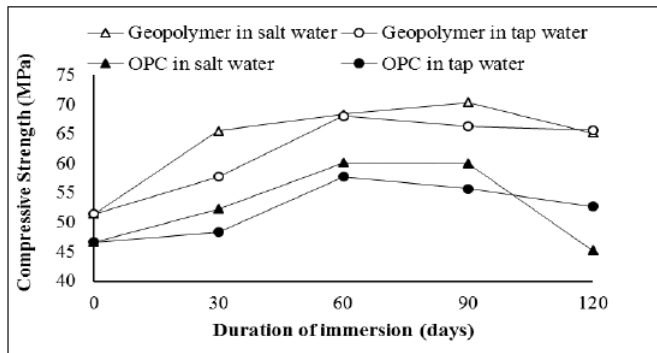
- a) *The Influence of Salt Water on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete* (Halim dkk, 2017).

Penelitian ini menggunakan kelas F *fly ash* dari PT. Petrokimia Gresik Indonesia dengan NaOH 8M dan rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH sebesar 2,5. Penelitian ini menggunakan *superplasticizer* (SP) *Polycarbonic Acid Salts* sebesar 2% dari berat *fly ash*. Dengan spesimen kontrol terbuat dari beton dengan semen OPC.

Beton dicor ke dalam silinder 100 x 200 mm. Satu hari setelah pengecoran, beton di *curing* pada suhu kamar selama satu hari sebelum direndam di dalam air keran selama 28 hari. Setelah itu perendaman dilanjutkan dalam dua kondisi, yaitu air keran dan air garam dengan kadar larutan NaCl 3,5%. Semua specimen di *curing* selama 30, 60, 90, dan 120 hari.

Pada penelitian ini didapatkan hasil yaitu beton geopolimer memiliki kuat tekan yang lebih tinggi pada air garam dibandingkan dengan beton OPC (Gambar 2.11). Dan dapat bertahan di lingkungan yang agresif karena terdapat kelimpahan Na^+ dalam air garam. Na^+ dan juga kation lainnya (Ca^{2+}) dalam sampel beton kurang rentan terhadap pencucian/larut dengan air garam. Kelebihan kation yang berada di sekitar larutan *curing* dan di dalam sampel membantu membentuk reaksi mekanisme dan pembentukan geopolimer. Selama proses geopolimerisasi, silika dan alumina dalam *fly ash* larut dengan NaOH untuk membentuk natrium-alumina-silikat, yang memberikan kontribusi pada kekuatan beton

geopolimer. Air garam yang mengandung ion natrium dari NaCl menyimpan ion-ion dalam beton geopolimer selama geopolimerisasi (Shaikh, 2014). Hal ini menyebabkan kuat tekan beton geopolimer lebih tinggi dari beton OPC. Kekuatan tekan pada OPC berkurang karena portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) keluar dari beton OPC. Kemudian, ikatan senyawa ini dengan NaCl membentuk kalsium klorida (CaCl_2) yang kemudian bereaksi dengan aluminat dalam semen. Akibatnya, reaksi ini membentuk garam Friedle ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) yang mengisi pori-pori. Klorida dalam air asin dapat menyebabkan retakan dan akumulasi kristal garam juga (Ishida, 2008). Hal ini juga terjadi pada kekuatan tekan dari beton geopolimer yang direndam dalam air asin. Kekuatan itu menurun pada usia 118 hingga 148 hari karena kalsium oksida dalam *fly ash* akan bereaksi dengan NaCl untuk membentuk kalsium silikat klorida ($\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2$). Tetapi, kandungan kalsium dalam *fly ash* tidak sebanyak pada semen dan senyawa ini sangat mudah bereaksi dengan senyawa lain.



Gambar 2.11 Perbandingan Kuat Tekan Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)

Porositas beton OPC dalam air garam lebih besar dari pada air keran. Ini menunjukkan bahwa beton OPC memiliki ketahanan yang baik dalam air keran. Jika dibandingkan dengan beton geopolimer, porositas total beton OPC lebih kecil dari pada beton geopolimer dalam air garam (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Perbandingan Porositas Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)

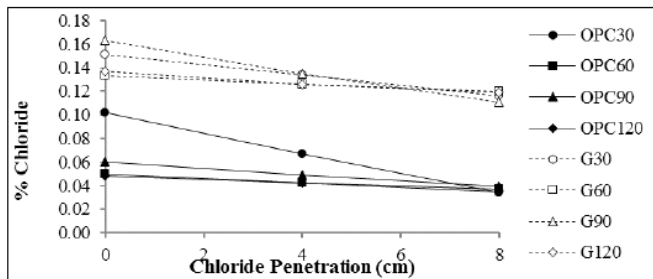
Type of Concrete	Curing (days)	Total Porosity Pt (%)				
		0	30	60	90	120
	Age (days)	28	58	88	118	148
Geopolymer	Salt water	20.10	20.56	21.71	21.19	20.67
	Tap water	20.10	20.40	23.94	22.38	23.58
OPC	Salt water	14.20	18.27	22.38	20.00	21.15
	Tap water	14.20	22.83	20.42	22.28	20.48

Dalam perawatan dengan air keran, natrium keluar dari beton ke air, hal ini menyebabkan beton geopolimer menjadi lebih keropos. Natrium yang keluar dapat dilihat dari nilai pH air rendaman garam yang meningkat seiring lama perendaman beton geopolimer, sehingga *moist curing* lebih direkomendasikan daripada merendam beton geopolimer pada air keran (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Hasil Pengukuran pH pada Perendaman di Air (Halim dkk, 2017)

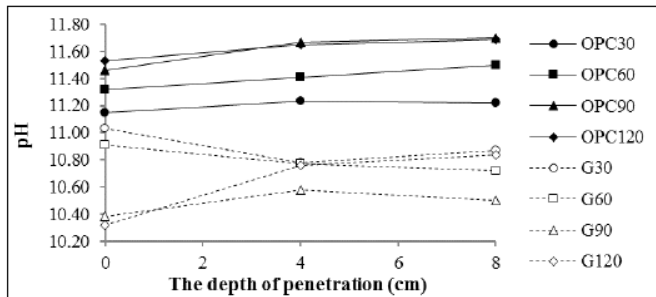
Days of immersion	pH	Concentration of solution Ppm
1	7.9	266
2	9.6	383
3	9.7	461
4	10.1	593
5	10.0	685
6	10.1	763
7	10.1	801
8	10.2	958
9	10.4	1096
10	10.4	1283

Penetrasi klorida beton geopolimer lebih tinggi dari beton OPC (Gambar 2.12). Hal ini mengindikasikan adanya korelasi antara porositas dan penetrasi klorida. Porositas yang lebih besar meningkatkan penetrasi klorida pada beton geopolimer. Konsentrasi klorida yang besar dalam beton geopolimer disebabkan karena tidak ada C_3A dalam fly ash, yang dapat memungkinkan mekanisme pengikatan klorida untuk meminimalkan penetrasi ion klorida langsung dari pasta beton (Olivia, 2011).



Gambar 2.12 Penetrasi Klorida pada Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)

Pada umumnya beton geopolimer memiliki pH yang tinggi (Gambar 2.13) karena reaksi yang terjadi ketika *fly ash* dicampur dengan larutan alkali. Setelah direndam di air garam, pH beton geopolimer lebih kecil dari beton OPC. Nilai pH dipengaruhi oleh porositas. Semakin besar total porositas maka semakin banyak natrium yang keluar dari dalam beton akibat perendaman dengan air garam (NaCl). Nilai pH pada beton geopolimer dan OPC berkisar antara 10,32 sampai 11,70. Ini berarti kedua beton bersifat basa dan bagus untuk ketahanan terhadap korosi.



Gambar 2.13 Pengukuran pH pada Beton Geopolimer dan OPC (Halim dkk, 2017)

Disimpulkan pada penelitian ini bahwa beton geopolimer memiliki kuat tekan yang lebih tinggi daripada beton OPC pada air dengan NaCl 3,5%. Dan juga dibuktikan bahwa beton geopolimer mampu bertahan di lingkungan agresif karena terdapat kelimpahan Na^+ di dalam air garam.

b) *Effect of Alkali Solutions on Corrosion Durability of Geopolymer Concrete* (Shaikh, 2014)

Penelitian ini menggunakan *fly ash* kelas F untuk beton geopolimer. Digunakan NaOH 14M dan 16M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5; 3; \text{ dan } 3,5$. Dengan kontrol beton berupa beton dengan semen OPC.

Setelah beton geopolimer dimasukkan ke dalam cetakan, segera dilakukan *steam curing* dengan suhu 60°C selama 24 jam. Setelah itu beton geopolimer dikeluarkan dari dalam cetakan dan dibiarkan pada udara terbuka. Untuk beton OPC setelah dikeluarkan dari cetakan, beton direndam di dalam air. Cetakan beton berbentuk silinder 10×20 cm. Setelah beton berumur 28 hari, beton dilapisi dengan *epoxy* pada setiap sisi, kecuali satu sisi datar pada permukaan silinder beton, lalu beton

direndam di dalam air yang mengandung 3,5% NaCl selama 4 hari lalu setelah itu dibiarkan kering selama 3 hari, siklus ini dilakukan berulang selama 8 minggu.

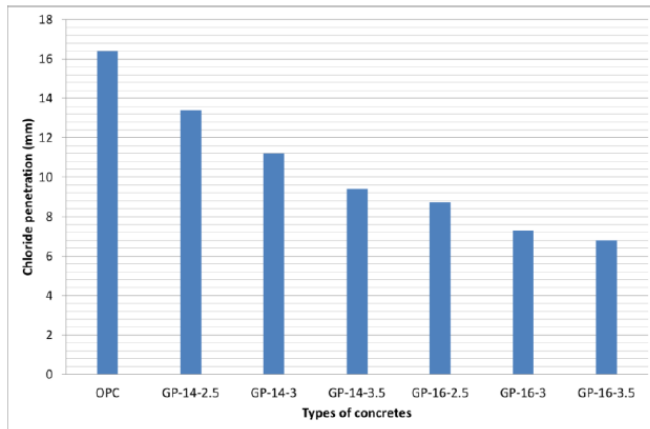
Dari penelitian ini didapatkan hasil, bahwa kuat tekan beton geopolimer pada 28 hari meningkat seiring dengan meningkatnya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dan molaritas NaOH (Tabel 2.3). Kuat tekan yang tinggi pada molaritas yang lebih tinggi disebabkan oleh tingkat disolusi (melarut) lebih cepat dan lebih tinggi dari silikat dan aluminat di dalam *fly ash* (Fansuri, 2012). Selama proses geopolimerisasi, silikat dan aluminat dalam *fly ash* dilarutkan oleh NaOH dan membentuk produk geopolimerisasi natrium-alumina-silikat yang berkontribusi pada kekuatan dari matriks geopolimer. Hasil yang sama juga didapatkan pada penelitian lain (Olivia dan Nikraz, 2011).

Tabel 2.3 Kuat Tekan Umur 28 Hari (Shaikh, 2014)

Series	Mix type/ Designation	28 days compressive strength (MPa)
1	OPC	40
2	GP-14-2.5	31
3	GP-14-3	35
4	GP-14-3.5	38
5	GP-16-2.5	33
6	GP-16-3	37
7	GP-16-3.5	50

Pada penetrasi klorida terjadi penurunan. Didapatkan bahwa penurunan penetrasi klorida seiring dengan meningkatnya molaritas NaOH dan jumlah dari

Na_2SiO_3 (Gambar 2.14). Penetrasi klorida pada beton geopolimer lebih kecil dari beton OPC. Kemampuan beton geopolimer menahan penetrasi klorida karena rendahnya penyerapan air dari beton geopolimer. Semakin kecil nilai penetrasi klorida pada beton geopolimer juga menghasilkan kuat tekan yang lebih baik.



Gambar 2.14 Pengaruh Molaritas dan Jumlah Na_2SiO_3 terhadap Penetrasi Klorida (Shaikh, 2014)

Disimpulkan dalam penelitian ini bahwa beton geopolimer memiliki sifat yang lebih baik dari beton OPC, yaitu kemampuan dalam menahan penetrasi klorida karena beton geopolimer memiliki resapan air yang rendah.

c) *Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater Environment* (Olivia dan Nikraz, 2013)

Pada penelitian ini digunakan *fly ash* kelas F dari Pembangkit Listrik Collie, Australia Barat. Digunakan NaOH 14M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2 dan

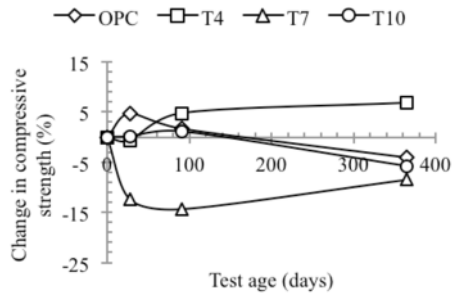
2,5, juga digunakan SP *naphthalene sulphonate polymer-based superplasticizer* sebanyak 1,5% dari berat *fly ash*. Beton di cor ke dalam silinder 10x20 cm untuk pengujian kuat tekan dan 10x5 cm untuk pengujian porositas.

Setelah pengecoran pada beton geopolimer dimasukkan ke dalam cetakan dan dilakukan *steam curing* 12h-70°C, 24h-60°C, dan 24h-75°C. Kemudian dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan *room curing* dengan suhu 23-25°C untuk beton geopolimer dan direndam di air tawar untuk beton OPC. Beton ditargetkan mencapai kuat tekan 55 MPa. Setelah itu beton direndam di dalam larutan 3,5% NaCl dengan pergantian larutan setiap bulan dan juga terdapat siklus *wetting-drying* sebagai simulasi terhadap air laut dengan cara merubah suhu menjadi suhu ruang 23-25°C selama 24 jam lalu suhu kering 80°C selama 24 jam.

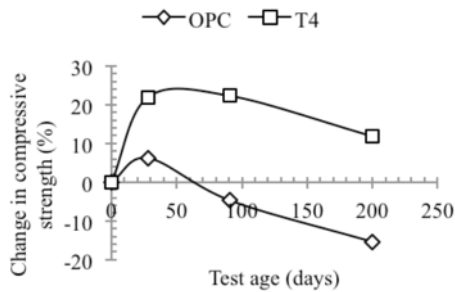
Berdasarkan penelitian ini didapatkan dengan perendaman di air garam secara terus-menerus menurunkan kekuatan beton OPC (Gambar 2.15). Penurunan kuat tekan beton OPC disebabkan oleh pencucian portlandit atau Ca(OH)_2 oleh larutan garam. Sementara itu pada beton geopolimer terdapat beberapa sampel yang meningkat dan menurun kuat tekannya.

Pada siklus *wetting-drying* beton OPC juga mengalami penurunan kuat tekan, hal ini disebabkan oleh perbedaan suhu yang ekstrim yang juga berpengaruh terhadap proses hidrasi yang terjadi pada beton (Gambar 2.16). Namun siklus ini mengakibatkan peningkatan kuat tekan beton geopolimer karena siklus ini menyebabkan percepatan proses kristalisasi beton geopolimer. Karena tidak ada perubahan yang signifikan dalam kekuatan tekan beton geopolimer yang dikenai siklus *wetting-*

drying, beton geopolimer dapat diaplikasikan di zona pasang-surut dan berombak.



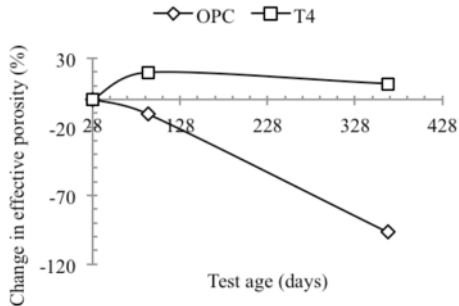
Gambar 2.15 Kuat Tekan pada Perendaman Terus-Menerus (Olivia dan Nikraz, 2013)



Gambar 2.16 Kuat Tekan pada Siklus *Wetting-Drying* (Olivia dan Nikraz, 2013)

Porositas efektif beton OPC menurun akibat siklus *wetting-drying* (Gambar 2.17), karena siklus ini mempercepat proses hidrasi yang dapat menurunkan porositas beton, serta bahaya lain yang timbul akibat siklus ini yang berulang. Tidak ada perubahan yang signifikan dari porositas beton geopolimer. Karena

kandungan kalsium yang rendah tidak ada penambahan pori pada proses hidrasi yang berlangsung, kecuali proses kristalisasi alumina silikat. Proses kristalisasi ini lebih berpengaruh terhadap kekuatan beton daripada porositas pada siklus *wetting-drying*.

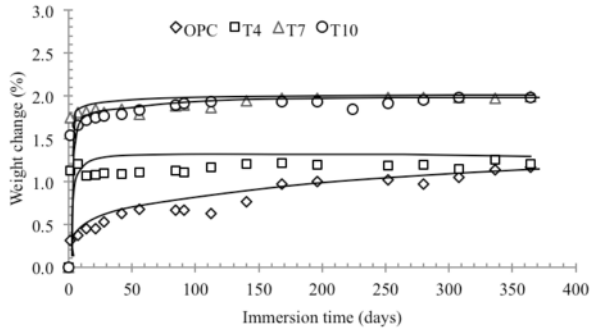


Gambar 2.17 Porositas Efektif pada Siklus *Wetting-Drying* (Olivia dan Nikraz, 2013)

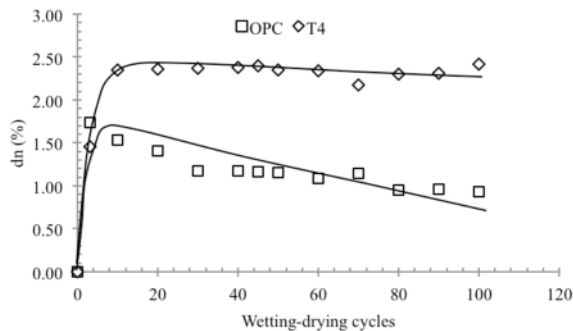
Pada perendaman terus-menerus didapatkan bahwa berat beton geopolimer meningkat dengan presentase yang kecil (Gambar 2.18). Sementara pada beton OPC berat beton meningkat secara drastis, hal ini disebabkan oleh kristalisasi klorida di dalam beton OPC yang dapat menambah berat beton.

Pada siklus *wetting-drying* berat beton OPC dan geopolimer sama-sama menurun (Gambar 2.19), namun penurunan berat terbesar terdapat pada beton OPC. Penurunan berat yang kecil dari beton geopolimer dari siklus ini disebabkan oleh interkoneksi antar pori yang besar yang memungkinkan perpindahan ion klorida yang cepat dari luar ke dalam beton, serta tidak terjadi kristalisasi klorida berulang yang terbentuk di dalam beton. Kristalisasi klorida lebih terlihat pada beton OPC

karena terdapat penurunan berat secara bertahap yang besar pada siklus ini.



Gambar 2.18 Perubahan Berat Beton pada Perendaman Terus-Menerus (Olivia dan Nikraz, 2013)



Gambar 2.19 Kehilangan Berat Beton pada siklus *Wetting-Drying* (Olivia and Nikraz, 2013)

Disimpulkan pada penelitian ini bahwa air garam dan siklus *wetting-drying* berpengaruh buruk terhadap beton OPC, sementara itu air laut tidak menimbulkan efek yang signifikan terhadap kekuatan beton

geopolimer. Ketahanan beton geopolimer timbul dari suhu yang tinggi saat siklus *wetting-drying* yang menimbulkan proses kristalisasi yang lebih cepat.

d) *Durability of Fly Ash Geopolymer Concrete in a Seawater Environment* (Olivia dan Nikraz, 2011)

Penelitian ini menggunakan *fly ash* kelas F dari Pembangkit Listrik Collie, Australia Barat dan Semen Portland tipe I (AS 2350). Beton geopolimer menggunakan NaOH 14M dengan perbandingan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,0$ dan digunakan *naphthalene sulphonate polymer-based superplasticizer*. Beton ditargetkan mencapai kuat tekan 55 MPa di dalam 28 hari.

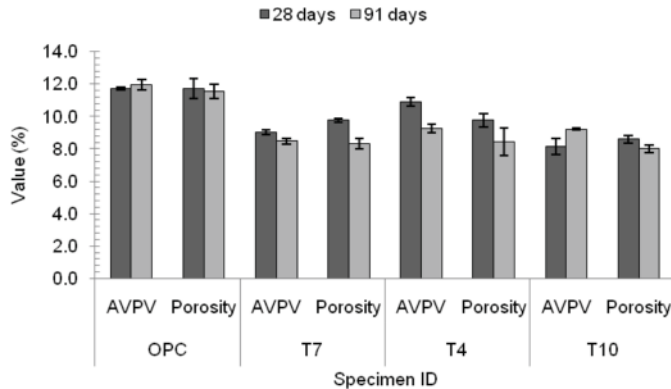
Pada beton geopolimer dilakukan *steam curing* dengan metode 24h-60°C, 12h-70°C, dan 24h-75°C saat di dalam cetakan. Setelah dikeluarkan dari cetakan, beton di *curing* pada ruangan dengan suhu 23-25°C. Sedangkan beton OPC setelah dikeluarkan dari cetakan, direndam di dalam air tawar selama 28 hari. Setelah itu beton direndam di air yang mengandung 3,5% larutan NaCl selama 60 hari.

Didapatkan hasil kuat tekan beton geopolimer dan OPC meningkat setelah direndam di larutan NaCl, dengan kuat tekan beton OPC lebih besar dari beton geopolimer pada umur 91 hari (Tabel 2.4).

Tabel 2.4 Kuat Tekan Beton (Olivia dan Nikraz, 2011)

Mixtures	Compressive strength (28 days)		Compressive strength (91 days)	
	f_c (MPa)	SD	f_c (MPa)	SD
OPC	56.22	1.63	59.86	4.88
T7	56.49	1.28	56.51	0.78
T4	56.24	4.45	58.85	3.48
T10	60.20	5.40	63.29	5.62

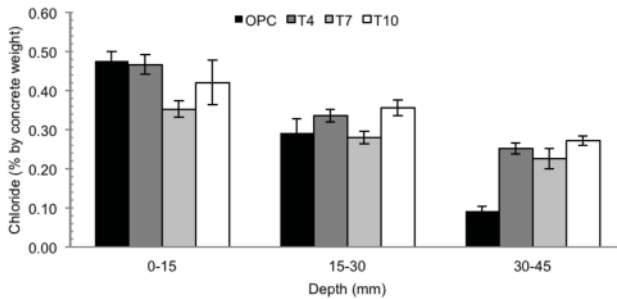
Didapatkan juga bahwa porositas efektif beton geopolimer lebih kecil dari beton OPC (Gambar 2.20).



Gambar 2.20 AVPV dan Porositas Efektif Beton OPC dan Geopolimer (Olivia dan Nikraz, 2011)

Untuk penetrasi klorida didapatkan hasil bahwa beton OPC memiliki kandungan klorida yang tinggi pada kedalaman 0-15 mm dan menurun dengan tajam pada kedalaman 15-30 mm dan 30-45 mm. Sementara itu beton geopolimer memiliki klorida yang tinggi juga pada kedalaman 0-15 mm dan menurun pada kedalaman 15-30 mm dan 30-45 mm, namun memiliki kandungan klorida yang lebih besar dari beton OPC pada kedalaman 15-45 mm (Gambar 2.21). Kandungan klorida yang besar pada beton geopolimer ini disebabkan karena beton geopolimer dengan kandungan kalsium yang rendah tidak mempunyai C_3A yang bisa mengaktifkan mekanisme pengikatan klorida untuk meminimalkan peningkatan penetrasi klorida pada beton. Kemampuan mengikat klorida dari beton OPC dengan C_3A sangat penting untuk meminimalkan penetrasi ion klorida (Neville, 1995). Salah satu faktor lainnya adalah tidak ada proses hidrasi terus menerus pada beton geopolimer

seperti yang terdapat pada beton OPC ketika direndam pada medium air. Proses hidrasi pada beton OPC yang terus berlangsung bermanfaat untuk menurunkan porositas dan mencegah klorida masuk ke dalam beton. Namun kandungan klorida yang tinggi pada beton geopolimer tidak menyebabkan korosi, hal ini karena kandungan natrium silikat yang masuk ke dalam sistem yang berfungsi seperti inhibitor korosi dan dapat menurunkan tingkat korosi dari tulangan (Yuan, 2010).



Gambar 2.21 Penetrasi Ion Klorida Pada Kedalaman Beton (Olivia dan Nikraz, 2011)

Disimpulkan pada penelitian ini bahwa beton geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dan porositas yang rendah yang mana bermanfaat untuk beton di lingkungan air laut.

2.7 Kuat Tekan

Kuat tekan beban beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui hasil dari kuat tekan dari beton OPC dan beton geopolimer dengan *fly ash* kelas F di lingkungan air dengan kandungan garam. Hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Kuat tekan beton geopolimer dan OPC meningkat setelah direndam di larutan NaCl, dengan kuat tekan beton OPC lebih besar dari beton geopolimer pada umur 91 hari (Olivia dan Nikraz, 2011).

Beton geopolimer memiliki kuat tekan yang lebih tinggi pada air garam dibandingkan dengan beton OPC. Dan dapat bertahan di lingkungan yang agresif karena terdapat kelimpahan Na^+ dalam air garam. Na^+ dan juga kation lainnya (Ca^{2+}) dalam sampel beton kurang rentan terhadap pencucian/larut dengan air garam. Kelebihan kation yang berada di sekitar larutan curing dan di dalam sampel membantu membentuk reaksi mekanisme dan pembentukan geopolimer (Halim dkk, 2017). Selama proses geopolimerisasi, silika dan alumina dalam *fly ash* larut dengan NaOH untuk membentuk natrium-alumina-silikat, yang memberikan kontribusi pada kekuatan beton geopolimer. Air garam yang mengandung ion natrium dari NaCl menyimpan ion-ion dalam beton geopolimer selama geopolimerisasi (Shaikh, 2014). Hal ini menyebabkan kuat tekan beton geopolimer lebih tinggi dari beton OPC.

Kekuatan beton geopolimer yang direndam di air garam menurun pada usia 118 hingga 148 hari karena kalsium oksida dalam *fly ash* akan bereaksi dengan NaCl untuk membentuk kalsium silikat klorida ($\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2$). Tetapi, kandungan kalsium dalam *fly ash* tidak sebanyak pada semen dan senyawa ini sangat mudah bereaksi dengan senyawa lain (Halim dkk, 2017).

Semakin tinggi perbandingan berat Na_2SiO_3 dan larutan NaOH tidak selalu menghasilkan kuat tekan yang tinggi, sedangkan semakin tinggi molaritas yang digunakan, maka semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan (Ekaputri dan Triwulan, 2013). Kuat tekan yang tinggi pada molaritas yang lebih tinggi disebabkan oleh tingkat disolusi (melarut) lebih cepat dan lebih tinggi dari silikat dan aluminat di dalam *fly ash*. Selama proses geopolimerisasi, silikat dan aluminat dalam *fly ash* dilarutkan oleh NaOH dan membentuk produk geopolimerisasi natrium-alumina-silikat yang berkontribusi pada kekuatan dari matriks geopolimer (Fansuri dkk, 2012).

Perendaman di air garam secara terus-menerus menurunkan kekuatan beton OPC. Penurunan kuat tekan beton OPC disebabkan oleh pencucian portlandit atau $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oleh larutan garam (Olivia dan Nikraz, 2013). Kekuatan tekan pada OPC berkurang karena portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) keluar dari beton OPC. Kemudian, ikatan senyawa ini dengan NaCl membentuk kalsium klorida (CaCl_2) yang kemudian bereaksi dengan aluminat dalam semen. Akibatnya, reaksi ini membentuk garam Friedle ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) yang mengisi pori-pori. Klorida dalam air asin dapat menyebabkan retakan dan akumulasi kristal garam juga (Ishida dkk, 2008).

2.8 Porositas

Pori terbuka yaitu pori yang bersifat permeable (dapat ditembus, baik oleh udara ataupun air). Pori tertutup adalah pori yang bersifat impermeable (tidak dapat ditembus). Pori yang tertutup lebih baik dari pada pori yang terbuka karena pori yang tertutup memiliki tekanan hidrostatik yang menambah kuat tekan *binder* dan terhindar dari retak, sedangkan pori yang

terbuka membuat *binder* menjadi keropos sehingga menurunkan kuat tekan *binder* (Ekaputri dan Triwulan, 2013).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui porositas dari beton OPC dan beton geopolimer dengan *fly ash* kelas F di lingkungan air dengan kandungan garam. Hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Porositas total beton OPC lebih kecil dari pada beton geopolimer dalam air garam (Halim dkk, 2017). Namun tidak ada perubahan yang signifikan dari porositas beton geopolimer. Karena kandungan kalsium yang rendah tidak ada penambahan pori pada proses hidrasi yang berlangsung, kecuali proses kristalisasi alumina silikat. Proses kristalisasi ini lebih berpengaruh terhadap kekuatan beton daripada porositas pada siklus *wetting-drying* (Olivia dan Nikraz, 2013).

Beton yang memiliki prosentase pori tertutup optimum mengindikasikan perilaku mikrostruktur yang baik. Hasil tes porositas ini berhubungan erat dengan hasil tes tekan. Semakin banyak jumlah pori tertutup dalam beton, dan semakin sedikit jumlah pori terbukanya, maka semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan (Ekaputri dan Triwulan, 2013). Dan pori terbuka yang ada di dalam binder menyebabkan beton menjadi keropos (Subekti, 2012).

Semakin tinggi molaritas, jumlah total pori semakin sedikit tetapi jumlah pori tertutup semakin banyak. Kepekatan berhubungan dengan semakin berkurangnya air yang dicampurkan dalam larutan. Pada saat proses curing dilakukan, air yang berada dalam *binder* akan menguap sehingga rongga yang dulunya ditempati oleh air menjadi kosong (Ekaputri dan Triwulan, 2013)

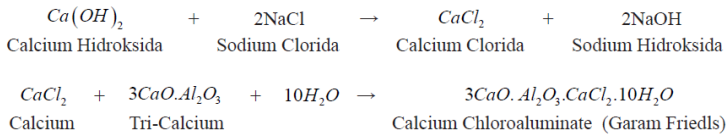
2.9 Derajat Keasaman (pH)

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh suatu larutan. pH didefinisikan sebagai kologaritma aktivitas ion hydrogen (H^+) yang terlarut (SNI 06-6989.11-2004).

Pada umumnya beton geopolimer memiliki pH yang tinggi karena reaksi yang terjadi ketika *fly ash* dicampur dengan larutan alkali. Setelah direndam di air garam, pH beton geopolimer lebih kecil dari beton OPC. Nilai pH dipengaruhi oleh porositas. Semakin besar total porositas maka semakin banyak natrium yang keluar dari dalam beton akibat perendaman dengan air garam (NaCl). Nilai pH pada beton geopolimer dan OPC berkisar antara 10,32 sampai 11,70. Ini berarti kedua beton bersifat basa dan bagus untuk ketahanan terhadap korosi (Halim dkk, 2017).

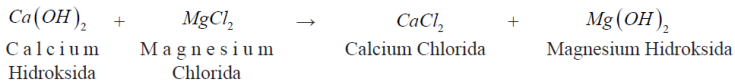
2.10 Penetrasi Klorida

Ion klorida sebagai penyebab yang merugikan kekuatan beton, dapat menyerang dengan berbagai bentuk yang berbeda, tetapi umumnya serangan tersebut berasal dari hasil reaksi kimia yang bersifat ekspansif (mengembang) dari sejenis garam, yang bernama garam Friedls (Calcium Chloroaluminate); dalam rumus kimia garam Friedls ditulis sebagai $(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O)$. Garam ini punya kemampuan mengembang mulai dari tingkat rendah sampai sedang. Garam Friedls terbentuk dari rembesan larutan kalsium klorida yang masuk ke dalam beton sebagai akibat dari naiknya kemampuan penyerapan air oleh beton. Proses serangan klorida pada beton dapat dilihat pada gambar berikut (Islam dkk, 2010).



Gambar 2.22 Reaksi Pembentukan Garam Friedls

MgCl_2 setelah bereaksi dengan Ca(OH)_2 dari hidrat semen, membentuk Kalsium Klorida yang akan larut lalu merembes dalam beton sebagai awal terjadinya kemunduran material menjadi lebih lunak; reaksi kimianya dapat dilihat pada gambar berikut ini (Mehta dan Monteiro, 2006).



Gambar 2.23 Reaksi Pembentukan Kalsium Klorida

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui kandungan klorida dari beton OPC dan beton geopolimer dengan *fly ash* kelas F di lingkungan air dengan kandungan garam. Hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Penetrasi klorida beton geopolimer lebih tinggi dari beton OPC. Hal ini mengindikasikan adanya korelasi antara porositas dan penetrasi klorida. Porositas yang lebih besar meningkatkan penetrasi klorida pada beton geopolimer (Halim dkk, 2017). Konsentrasi klorida yang besar dalam beton geopolimer disebabkan karena tidak ada C_3A dalam *fly ash*, yang dapat memungkinkan mekanisme pengikatan klorida untuk meminimalkan penetrasi ion klorida langsung dari pasta beton. Salah satu faktor lain dari tingginya kandungan klorida di dalam beton geopolimer adalah tidak ada proses hidrasi terus menerus pada beton geopolimer seperti yang terdapat pada beton OPC ketika direndam pada medium air (Olivia dan

Nikraz, 2011). Namun kandungan klorida yang tinggi pada beton geopolimer tidak menyebabkan korosi, hal ini karena kandungan natrium silikat yang masuk ke dalam sistem yang berfungsi seperti inhibitor korosi dan dapat menurunkan tingkat korosi dari tulangan (Yuan dkk, 2010).

Pada penetrasi klorida terjadi penurunan. Didapatkan bahwa penurunan penetrasi klorida seiring dengan meningkatnya molaritas NaOH dan jumlah dari Na_2SiO_3 . Kemampuan beton geopolimer menahan penetrasi klorida karena rendahnya penyerapan air dari beton geopolimer. Semakin kecil nilai penetrasi klorida pada beton geopolimer juga menghasilkan kuat tekan yang lebih baik (Shaikh, 2014).

Pada beton OPC di lingkungan air garam, proses hidrasi pada beton OPC yang terus berlangsung bermanfaat untuk menurunkan porositas dan mencegah klorida masuk ke dalam beton lebih dalam (Olivia dan Nikraz, 2011).

2.11 Mineral dalam beton

Beberapa mineral yang terdapat di dalam beton di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

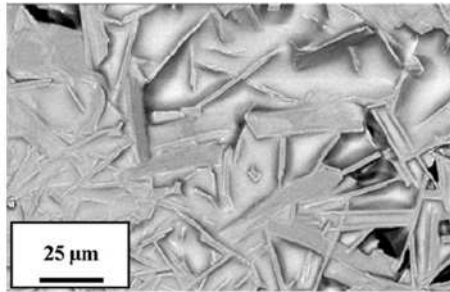
1. Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Anorthite adalah *endmember* (mineral yang berada di ujung yang ekstrem dari seri mineral dalam hal kemurnian) kaya kalsium dari seri solusi padat plagioklas feldspar (kelompok mineral tektosilikat pembentuk batuan yang membentuk 41% kerak Bumi. Feldspar mengkristal dari magma pada batuan beku intrusif dan ekstrusif dalam bentuk urat, dan juga terdapat dalam berbagai jenis batuan metamorf dan sedimen) yang langka. Plagioklas adalah mineral yang melimpah di

kerak Bumi. Formula dari anorthite murni adalah $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Anorthite menyusun sebagian besar dataran tinggi di bulan. Dengan skala kekerasan Mohs 7 dan berat jenis $2,73 \text{ g/cm}^3$.

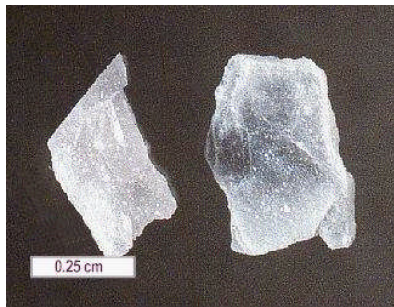


Gambar 2.24 Anorthite

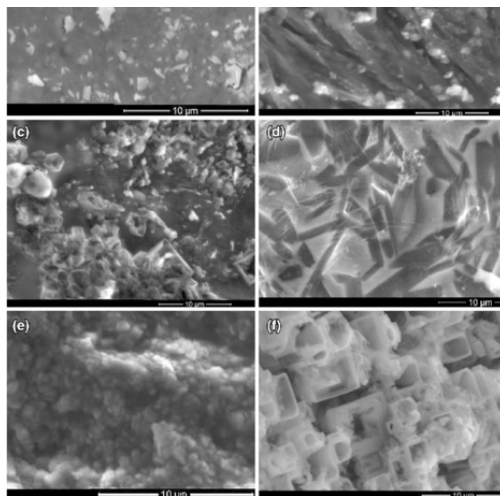


Gambar 2.25 SEM Anorthite (Casasola dkk, 2012)

2. Natrosilite ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$)
Mineral ini disusun oleh Natrium dan Silikon ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$). Mineral ini tidak berwarna serta larut dalam air dan asam lemah.



Gambar 2.26 Natrosilite



Gambar 2.27 SEM Natrosilite (Mocioiu dkk, 2014)

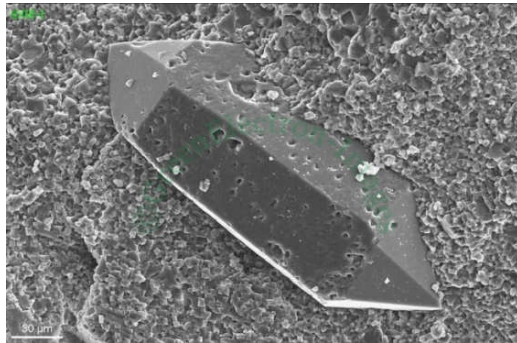
3. Quartz (SiO_2)

Quartz adalah salah satu mineral yang umum ditemukan di kerak kontinen bumi. Mineral ini memiliki struktur kristal heksagonal yang terbuat dari silika trigonal terkrystalisasi (silikon dioksida, SiO_2), dengan skala kekerasan Mohs 7 dan densitas $2,65 \text{ g/cm}^3$. Bentuk

umum kuarsa adalah prisma segienam yang memiliki ujung piramida segienam. Beberapa jenis quartz adalah alpha/low quartz (trigonal) memiliki suhu rendah dan merupakan kuarsa pada umumnya, serta beta/high quartz (hexagonal) memiliki suhu tinggi (573°C) dan tidak stabil. Pada kenyataannya alpha quartz *paramorphs* (pada kondisi tertentu berubah bentuk menjadi mineral lain dengan struktur kimia yang sama karena tidak stabil) dari beta quartz.



Gambar 2.28 Quartz



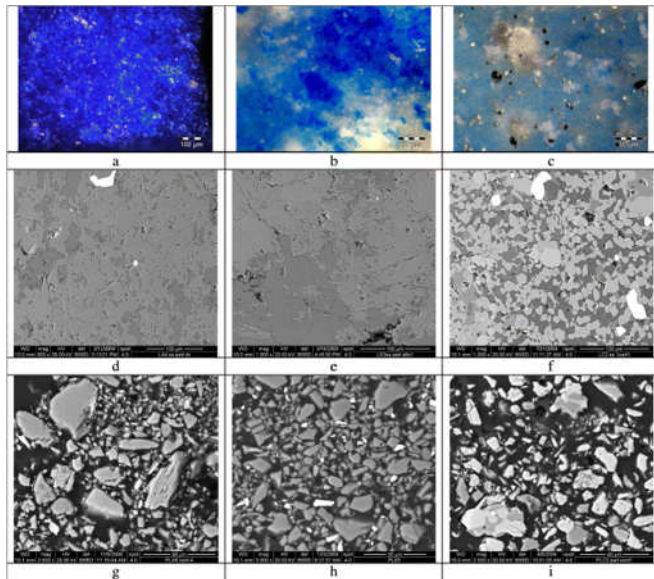
Gambar 2.29 SEM Quartz

(http://www.greenelectron-images.co.uk/sem/quartz/authigenic_qtz-2.html)

4. Lazurite (Na, Ca) $8 [(S, Cl, SO_4, OH)_2 (Al_6Si_6O_{24})]$
Lazurite adalah mineral tektosilikat dengan sulfat, sulfur dan klorida dengan rumus: (Na, Ca) $8 [(S, Cl, SO_4, OH)_2 (Al_6Si_6O_{24})]$. Memiliki skala kekerasan Mohs 5 - 5,5 dengan berat jenis 2,4 g/cm³ dan merupakan feldspathoid (mineral dengan kandungan silika yang rendah) dan anggota kelompok sodalite (mineral ringan yang relatif keras namun rapuh, dengan kandungan natrium yang tinggi). Lazurit mengkristal dalam sistem isometrik meskipun kristal yang terbentuk sangat jarang. Biasanya besar dan membentuk sebagian besar batu permata lapis lazuli. Lazurite larut dalam HCl.

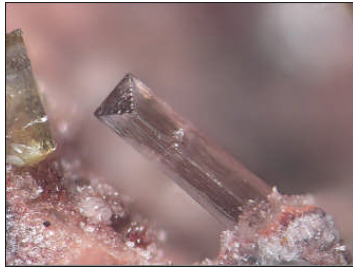


Gambar 2.30 Lazurite

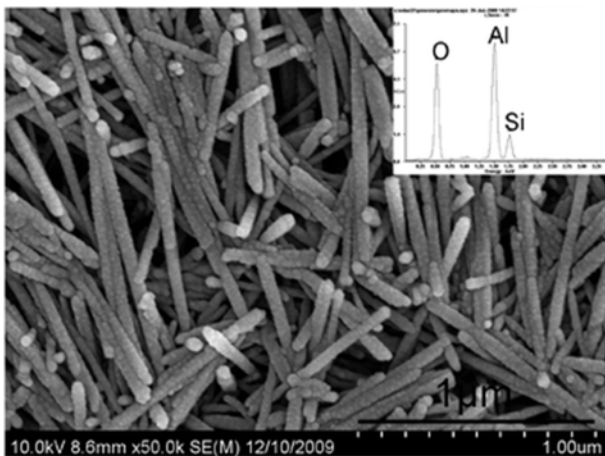


Gambar 2.31 SEM Lazurite (Favaro dkk, 2012)

5. Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ atau $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)
 Mullite atau porcelainite adalah mineral silikat langka dari genesis pasca-tanah liat. Mineral ini dapat membentuk dua bentuk stoikiometri $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ atau $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Mullite tidak memiliki muatan yang menyeimbangkan kation. Akibatnya, ada tiga situs aluminium yang berbeda: dua tetrahedral terdistorsi dan satu oktahedral. Memiliki berat jenis $3,17 \text{ g/cm}^3$.



Gambar 2.32 Mullite



Gambar 2.33 SEM Mullite (Liu dkk, 2014)

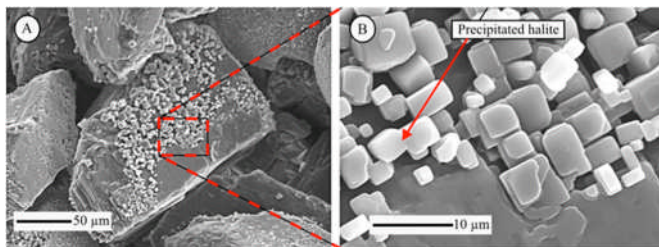
6. Halite (NaCl)

Halite umumnya dikenal sebagai garam batu, adalah jenis garam, mineral (alami) bentuk natrium klorida (NaCl). Halit membentuk kristal isometrik. Mineral ini biasanya tidak berwarna atau putih, tetapi mungkin juga biru muda, biru tua, ungu, merah muda, merah, oranye, kuning atau abu-abu tergantung pada jumlah dan jenis kotoran. Mineral ini biasanya terjadi dengan mineral deposit evaporite (deposit garam atau mineral alami yang

tersisa setelah penguapan sebuah badan air) lainnya seperti beberapa sulfat, halida, dan borat. Memiliki berat jenis $2,165 \text{ g/cm}^3$ dengan skala kekerasan Mohs 2,0-2,5.



Gambar 2.34 Halite



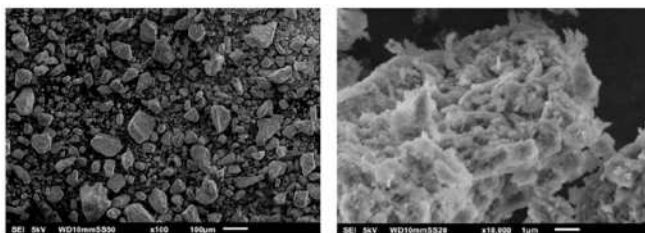
Gambar 2.35 SEM Halite (Sathar dkk, 2012)

7. Zeolite ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
 Zeolit adalah senyawa zat kimia alumino-silikat berhidrat dengan kation natrium, kalium dan barium. Zeolit mempunyai beberapa sifat antara lain: mudah melepas air akibat pemanasan, tetapi juga mudah mengikat kembali molekul air dalam udara lembap. Oleh sebab sifatnya tersebut maka zeolit banyak digunakan sebagai bahan pengering. Disamping itu zeolit juga mudah melepas kation dan diganti dengan kation lainnya, misal zeolit melepas natrium dan digantikan dengan mengikat kalsium atau magnesium. Sifat ini pula menyebabkan zeolit dimanfaatkan untuk melunakkan air. Zeolit

memiliki struktur berpori yang dapat mengakomodasi berbagai macam kation, seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} dan lainnya. Ion positif ini kurang kuat diikat dan dapat dengan mudah ditukar dengan yang lain dalam larutan kontak. Beberapa mineral zeolit yang lebih umum adalah analcime, chabazite, clinoptilolite, heulandite, natrolite, phillipsite, dan stilbite. Contoh rumus mineral zeolit adalah: $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, rumus untuk natrolit. Kation ini bertukar zeolit memiliki keasaman yang berbeda dan mengkatalisis beberapa katalisis asam.



Gambar 2.36 Zeolite



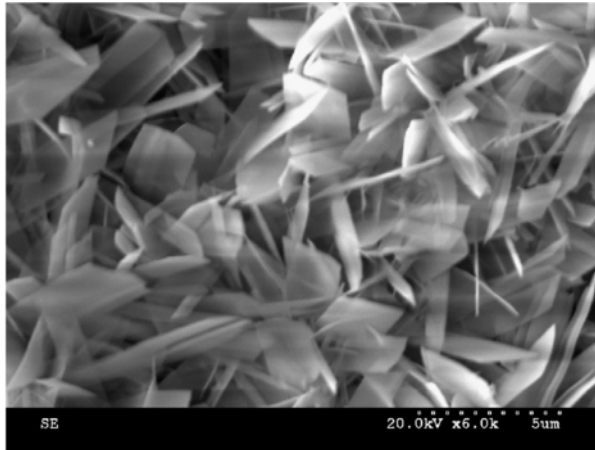
Gambar 2.37 SEM Zeolite (Nikolov dan Rostovsky, 2017)

8. Tobermorite ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ atau $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O}, \text{OH})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Tobermorite adalah mineral hidrat kalsium silikat dengan rumus kimia: $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ atau $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O}, \text{OH})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Tobermorite terjadi dalam pasta semen terhidrasi dan dapat ditemukan di alam sebagai mineral alterasi di batu kapur metamorfosis dan di skarn. Penggantian aluminium dengan tobermorite dipahami menjadi bahan kunci dalam umur panjang dari beton Romawi bawah kuno. Abu vulkanik yang digunakan orang Romawi untuk pembangunan dinding laut mengandung phillipsite, dan bahwa interaksi dengan air laut benar-benar menyebabkan struktur kristal di dalam mortar mengembang dan menguat, membuat material itu jauh lebih tahan lama daripada beton modern ketika terkena air laut. Memiliki skala kekerasan Mohs 2,5 dengan berat jenis $2,4 \text{ g/cm}^3$.



Gambar 2.38 Tobermorite



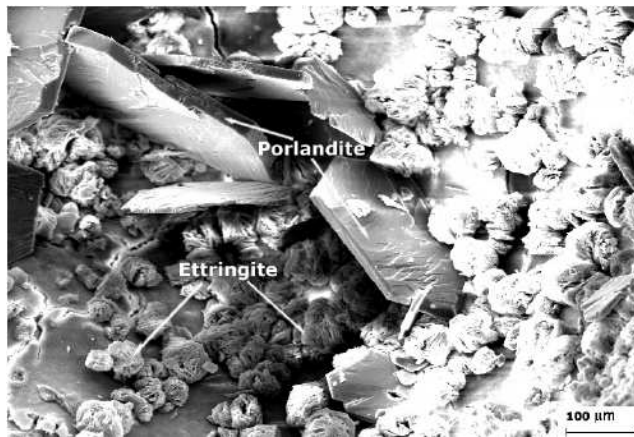
Gambar 2.39 SEM Tobermorite (Mostafa dkk, 2009)

9. Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Portlandite adalah mineral oksida. Ini adalah bentuk alami kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan analog kalsium brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Bernama portlandite karena kalsium hidroksida kimia adalah produk hidrolisis umum dari semen Portland. Memiliki skala kekerasan mohs 2,0 dan berat jenis $2,24 \text{ g/cm}^3$. Mineral ini larut di dalam air dan menghasilkan larutan alkalin.



Gambar 2.40 Portlandite



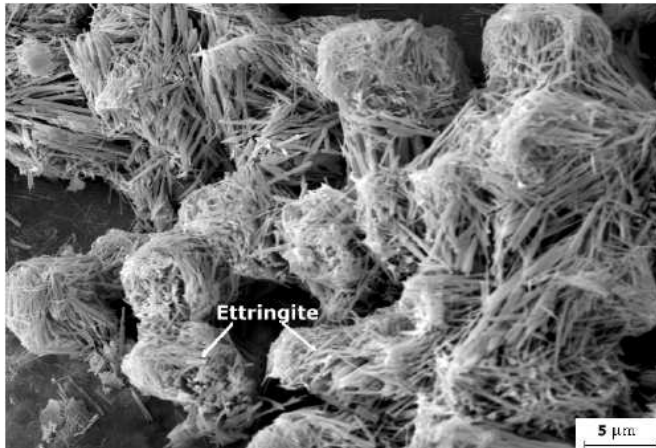
Gambar 2.41 SEM Portlandite (Binici dkk, 2009)

10. Ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)

Ettringite adalah mineral kalsium sulfat hidro kalsium dengan rumus: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Memiliki skala kekerasan Mohs 2,0-2,5 dengan berat jenis $1,76 \text{ g/cm}^3$. Ettringite memiliki kandungan mineral sulfat sulfoaluminat sulfat yang tinggi. dahulu dikenal dengan "bacillus semen." Terjadi secara alami atau terbentuk oleh serangan sulfat pada mortar dan beton. Bacillus umumnya adalah bakteri yang meningkatkan kekuatan kompresi beton melalui biomassa. Disintegrasi beton dalam larutan air laut dan sulfat disebabkan oleh pembentukan ettringite. Ini adalah produk reaksi utama yang dibentuk oleh bentuk perluasan serangan sulfat. Ketika ettringit terbentuk dalam sistem semen yang sudah mengeras, tegangan tarik yang dihasilkannya mengarah pada perluasan sistem secara keseluruhan, dan ini menghasilkan retakan yang, pada waktunya, akhirnya menyebabkan keruntuhan total.



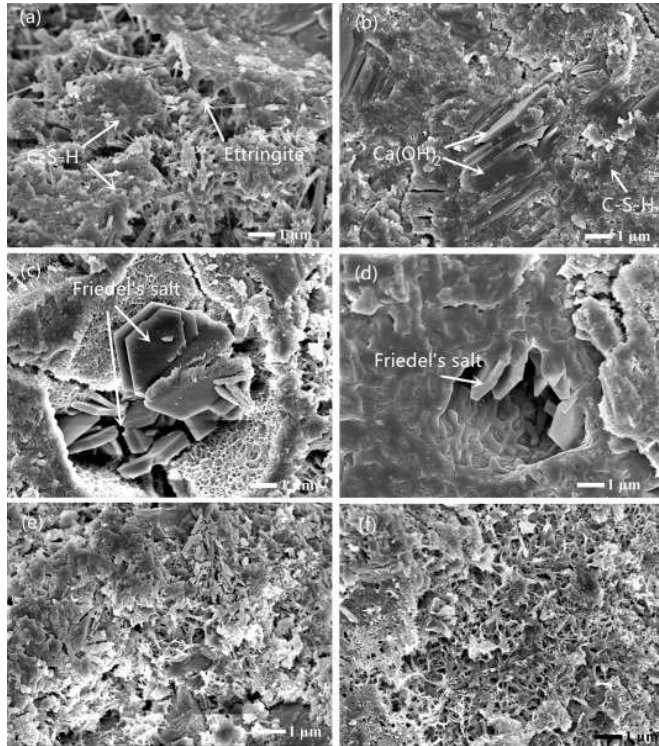
Gambar 2.42 Ettringite



Gambar 2.43 SEM Ettringite (Binici dkk, 2009)

11. Friedel salt ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$)
Garam Friedel adalah mineral penukar anion milik keluarga hidroksida ganda berlapis (LDHs). Ini memiliki afinitas untuk anion sebagai klorida dan iodida dan mampu mempertahankan mereka sampai batas tertentu

dalam struktur kristalografi. Formula Friedel's salt adalah $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.



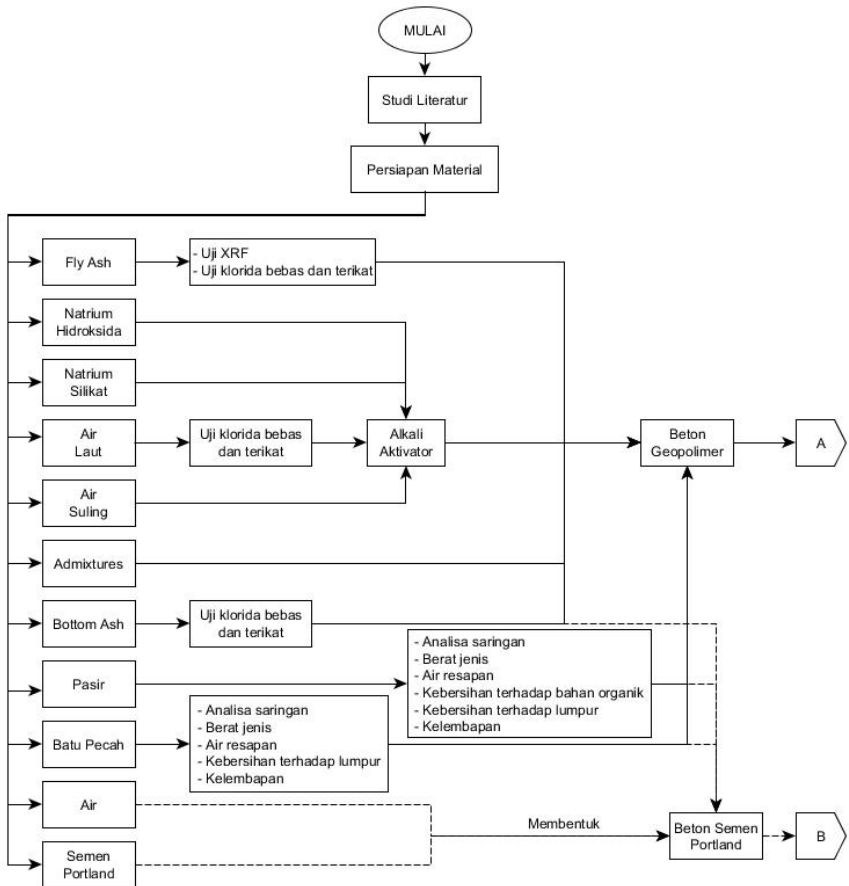
Gambar 2.44 SEM Friedel Salt (Li dkk, 2017)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

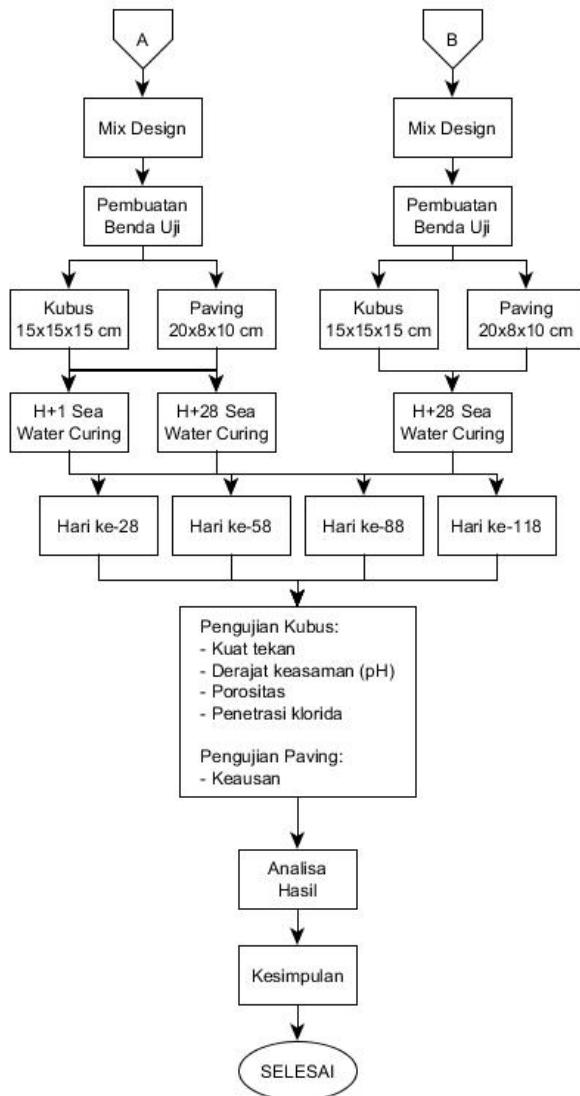
BAB III

METODOLOGI

Metode dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

3.1 Studi Literatur

Tahapan ini dilakukan untuk mendapatkan pemahaman terhadap penelitian yang akan dilakukan melalui literatur yang bersumber dari jurnal, prosiding, serta penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan penelitian ini. Literatur yang digunakan meliputi pembahasan:

1. Beton geopolimer
Studi literatur mencakup dasar-dasar teori tentang beton geopolimer, cara pembuatan, serta komposisinya.
2. Bangunan pemecah gelombang (*breakwater*) kubus
Studi literatur mencakup pengertian dasar tentang *breakwater* serta *breakwater* kubus.
3. Beton geopolimer di lingkungan air laut
Studi literatur mencakup tentang perawatan (*curing*) di air laut dengan dibandingkan dengan *moist curing*, beberapa penelitian yang pernah dilakukan terhadap ketahanan beton geopolimer pada lingkungan air laut dengan kandungan klorida (Cl^-) yang tinggi (korosif), serta pengujian-pengujian yang pernah dilakukan terhadap beton geopolimer pada media dengan kandungan klorida (Cl^-) yang tinggi.

3.2 Persiapan Material

Material-material yang perlu disiapkan untuk melakukan penelitian ini adalah *fly ash*, natrium hidroksida (NaOH), natrium silikat (Na_2SiO_3), air laut, air suling, *admixtures*, agregat halus, agregat kasar, air, dan semen Portland. Material-material tersebut akan dijelaskan pada subbab-subbab berikut ini.

3.2.1 *Fly Ash*

Fly ash yang digunakan adalah *fly ash* dari PLTU Suralaya kelas 1-4 (Gambar 3.3) yang berlokasi di Banten. Dilakukan pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) di PT. Sucofindo untuk mengetahui karakteristik *fly ash* melalui presentase komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash*. Presentase unsur-unsur ini yang nantinya akan menentukan kelas dari *fly ash* tersebut yang ditentukan berdasarkan ASTM C618-05 seperti pada Tabel 3.1. Pada *fly ash* juga dilakukan pengujian klorida (Cl^-) bebas dan terikat untuk mengetahui jumlah klorida mula-mula yang terkandung di dalamnya, yang nantinya akan digunakan di dalam perhitungan penetrasi klorida. Pengujian klorida dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia, FTI, ITS.



Gambar 3.3 Fly Ash Suralaya Kelas 1-4

Tabel 3.1 *Chemical Requirements* (ASTM C618-05)

	Class		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminium oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70,0	70,0	50,0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4,0	5,0	5,0
Moisture content, max, %	3,0	3,0	3,0
Loss on ignition, max, %	10,0	12,0	6,0

3.2.2 Natrium hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida yang digunakan dalam penelitian ini adalah dalam berbentuk larutan dengan kadar molaritas 10M dan 12M yang dibuat dengan air suling dan air laut. Pada penelitian ini digunakan NaOH yang berbentuk padatan (NaOH *flake*). Untuk menghitung kebutuhan NaOH digunakan rumus pada persamaan 3.1 dan 3.2.

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

Keterangan:

- n = Jumlah mol zat terlarut (mol)
- M = Kemolaran larutan (mol/liter)
- V = Volume larutan (liter)

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

Keterangan:

- Massa NaOH = Berat NaOH yang dibutuhkan (gram)
- n mol = Jumlah mol zat terlarut (mol)
- Mr = Massa relatif atom (gram/mol)

Dari rumusan di atas dapat dibuat 1 liter larutan NaOH 10M dan 12M dengan massa NaOH *flake* sebagai berikut.

- Menghitung Mr NaOH:
 - Ar Na = 23; O = 16; H = 1.
 - Mr NaOH = 23 + 16 + 1 = 40
- Massa NaOH 10M = n mol x Mr

$$= M \times V \times Mr$$

$$= 10 \times 1 \times 40$$

$$= 400 \text{ gram}$$
- Massa NaOH 12M = n mol x Mr

$$= M \times V \times Mr$$

$$= 12 \times 1 \times 40$$

$$= 480 \text{ gram}$$

Langkah-langkah untuk membuat larutan NaOH adalah sebagai berikut:

1. Timbang kebutuhan NaOH sesuai kadar molaritas.
2. Masukkan NaOH ke dalam gelas ukur dengan volume 1 liter.
3. Tambahkan air suling atau air laut ke dalam gelas ukur sampai volumenya 1 liter.
4. Aduk larutan tersebut, gunakan sarung tangan dalam proses ini karena larutan NaOH menimbulkan rasa gatal bila tersentuh permukaan kulit.
5. Tutup rapat larutan tersebut dengan menggunakan plastik sehingga tidak terganggu oleh gas maupun zat yang tidak diinginkan.
6. Dinginkan larutan hingga suhu larutan tersebut sesuai dengan suhu ruangan.
7. Lakukan langkah-langkah di atas untuk membuat larutan NaOH lainnya.



Gambar 3.4 NaOH Flake

3.2.3 Natrium silikat (Na_2SiO_3)

Natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan tipe BE-52 yang digunakan dalam penelitian ini berupa gel yang didapatkan dari PT. Kasmaji.



Gambar 3.5 Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

3.2.4 Air laut

Air laut yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Pantai Kenjeran. Air laut ini digunakan sebagai salah satu

pelarut di dalam pembuatan larutan NaOH. Pada air laut ini dilakukan pengujian klorin terikat dan bebas untuk mengetahui jumlah klorin mula-mula yang terkandung di dalamnya, yang nantinya akan digunakan di dalam perhitungan penetrasi klorida. Pengujian klorin terikat dan bebas dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia, FTI, ITS.

3.2.5 Air Suling

Air suling digunakan sebagai salah satu pelarut dalam pembuatan larutan NaOH. Air suling ini didapatkan dengan membeli di toko bahan kimia.

3.2.6 Alkali aktivator

Alkali aktivator adalah campuran dari larutan NaOH dengan natrium silikat (Na_2SiO_3). Pada penelitian ini digunakan alkali aktivator dengan perbandingan $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 2,5 : 1$. Cara pembuatan larutan alkali aktivator adalah dengan mencampurkan gel natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan larutan NaOH sebanyak 2,5 kali berat NaOH, aduk dan tunggu sampai suhunya sama dengan suhu ruangan, dan larutan alkali aktivator dapat digunakan.

3.2.7 Admixtures

Admixtures yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Superplasticizer Plastiment VZ* yang berasal dari PT. Sika Indonesia. *Superplasticizer* yang digunakan adalah sebanyak 2% dari berat *fly ash*.



Gambar 3.6 *Superplasticizer*

3.2.8 Agregat halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir dan *bottom ash*. Pasir yang digunakan adalah Pasir Lumajang (Gambar 3.7) dan *bottom ash* yang digunakan berasal dari PLTU Suralaya (Gambar 3.8). Pada *bottom ash* akan dilakukan pengujian klorida bebas dan terikat yang dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia, FTI, ITS dan beberapa pengujian agregat halus. Berikut adalah beberapa pengujian agregat halus yang dilakukan sebelum agregat tersebut digunakan sebagai bahan campuran beton, pengujian agregat halus dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS.



Gambar 3.7 Pasir Lumajang



Gambar 3.8 *Bottom Ash* PLTU Suralaya

3.2.8.1 Analisa saringan (ASTM C136-01)

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran sebagai pegangan dalam pemeriksaan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan menggunakan saringan.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Satu set saringan ASTM C33

- Bahan:
 - ❖ Agregat halus dalam keadaan kering oven.
- Cara pengujian:
 - 1) Timbang bahan sebanyak 500 gram.
 - 2) Bersihkan saringan dengan sikat/kuas, kemudian susun saringan.
 - 3) Masukkan bahan dalam ayakan dengan ukuran saringan paling besar ditempatkan paling atas dan diguncang-guncang dengan tangan selama 10 menit.
 - 4) Agregat halus yang tertinggal pada tiap-tiap ayakan ditimbang.
 - 5) Kontrol berat agregat halus secara keseluruhan yaitu 500 gram
- Analisa:

Hitunglah persentase berat agregat halus yang tertahan di atas masing-masing saringan terhadap berat total agregat halus setelah disaring.

3.2.8.2 Berat jenis (ASTM C128-01)

Berat jenis yaitu berat (dalam hal ini agregat halus yang berada pada kondisi SSD) per satuan volume. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis agregat halus pada kondisi SSD.

- Peralatan:
 - ❖ Labu takar 1000 cc.
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Pan.
 - ❖ *Hair dryer*/kipas angin.
 - ❖ Kerucut dan rojokan SSD.
- Bahan:
 - ❖ Agregat halus.

- Cara pengujian:
- 1) Persiapkan bahan.
 - 2) Rendam agregat halus selama 24 jam, selanjutnya angkat dan tiriskan hingga airnya hilang.
 - 3) Keringkan dengan hair dryer/kipas angin sambil dibolak-balik dengan sendok untuk mencari keadaan SSD.
 - 4) Tempatkan kerucut SSD pada bidang datar yang tidak menghisap air.
 - 5) Isi kerucut SSD satu per tiga tingginya dan rojok 9 kali, isi lagi satu per tiga tinggi dan rojok 8 kali, isi lagi satu per tiga tinggi dan rojok 8 kali.
 - 6) Ratakan permukaannya dan angkat kerucutnya, bila agregat masih berbentuk kerucut maka agregat belum mencapai kondisi SSD.
 - 7) Keringkan lagi bila masih belum mencapai kondisi SSD, ulangi lagi pengisian dengan prosedur seperti sebelumnya, bila kerucut diangkat dan agregat halus gugur tetapi berpuncak maka sudah dalam kondisi SSD dan siap untuk digunakan dalam pengujian.
 - 8) Timbang labu takar 1000 cc.
 - 9) Timbang agregat halus kondisi SSD sebanyak 500 gram dan masukkan ke dalam labu takar dan timbang.
 - 10) Isi labu takar yang berisi agregat halus dengan air bersih hingga penuh.
 - 11) Pegang labu takar yang sudah berisi air dan agregat halus dalam posisi miring, putar kiri dan kanan hingga gelembung-gelembung udara dalam agregat keluar.
 - 12) Sesudah gelembung-gelembung keluar tambahkan air ke dalam labu takar hingga batas kapasitas dan timbang (W_1).

13) Keluarkan agregat halus dan air dari dalam labu takar dan labu takar dibersihkan kemudian isi labu takar dengan air sampai batas kapasitas dan timbang (W_2).

➤ Analisa:

$$Berat\ jenis = \frac{500}{(500+W_2)-W_1} \dots\dots\dots (3.3)$$

Keterangan:

- W_1 = Berat labu + agregat halus + air (gram)
- W_2 = Berat labu + air (gram)
- 500 = Berat benda uji dalam keadaan kering permukaan jenuh (gram)

3.2.8.3 Air resapan (ASTM C128-01)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar air resapan pada agregat halus.

➤ Peralatan:

- ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
- ❖ Oven.
- ❖ Pan.

➤ Bahan:

- ❖ Agregat halus dalam keadaan SSD.

➤ Cara pengujian:

- 1) Timbang agregat halus dalam kondisi SSD (W_1).
- 2) Masukkan ke dalam oven selama 24 jam.
- 3) Agregat halus dikeluarkan dan setelah dingin ditimbang beratnya (W_2).

➤ Analisa:

$$Air\ resapan = \frac{W_1-W_2}{W_2} \times 100\% \dots\dots\dots (3.4)$$

Keterangan:

W_1 = Berat agregat halus kondisi SSD (gram)

W_2 = Berat agregat halus setelah dioven (gram)

3.2.8.4 Kebersihan terhadap bahan organik (ASTM C40-04)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan adanya bahan organik dalam agregat halus yang akan digunakan sebagai bahan campuran beton.

- Peralatan:
 - ❖ Botol bening.
 - ❖ Penggaris.
- Bahan:
 - ❖ Agregat halus.
 - ❖ NaOH.
- Cara pengujian:
 - 1) Botol bening diisi agregat halus sampai kurang lebih 130 ml.
 - 2) Tambahkan larutan NaOH sampai 200 ml dan tutup rapat dan kocok botol kurang lebih 10 menit.
 - 3) Diamkan selama 24 jam.
 - 4) Selanjutnya amati warna cairan di atas permukaan agregat halus yang ada dalam botol, bandingkan warnanya.
- Analisa:

Jika warna cairan dalam botol berisi agregat lebih tua (coklat) warnanya dari pembanding, berarti dalam agregat tersebut mengandung kadar zat organik yang terlalu tinggi.

3.2.8.5 Kebersihan terhadap lumpur (ASTM C117-03)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar lumpur dalam agregat halus.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Saringan No. 200 dan No. 50.
 - ❖ Oven dan pan.
- Bahan:
 - ❖ Agregat halus keadaan kering oven.
- Cara pengujian:
 - 1) Timban agregat halus kering oven sebanyak 500 gram (W_1).
 - 2) Lalu dicuci hingga bersih, yaitu dengan mengaduk dengan air berkali-kali hingga tampak bening.
 - 3) Tuangkan air cucian ke dalam saringan No. 200 berkali-kali.
 - 4) Agregat halus yang ikut tertuang dan tinggal di atas saringan dikembalikan ke pan.
 - 5) Agregat halus dioven dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
 - 6) Keluarkan agregat halus dari dalam oven, tunggu sampai dingin dan timbang beratnya (W_2).
- Analisa:

$$\text{Kebersihan} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (3.5)$$

Keterangan:

W_1 = Berat agregat halus kondisi kering (gram)

W_2 = Berat agregat halus bersih kering (gram)

3.2.8.6 Kelembapan (ASTM C566-97, Reapproved 2004)

Kelembapan adalah perbandingan berat air yang dikandung agregat halus pada kondisi asli terhadap berat pada

kondisi kering oven. Tujuan pengujian ini adalah mengetahui besar kelembapan agregat halus.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Pan.
- Bahan:
 - ❖ Agregat halus.
- Cara pengujian:
 - 1) Timbang agregat halus dalam keadaan asli sebanyak 500 gram (W_1).
 - 2) Masukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
 - 3) Keluarkan dari oven, setelah dingin timbang beratnya (W_2).

- Analisa:

$$\text{Kelembapan} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (3.6)$$

Keterangan:

W_1 = Berat agregat halus kondisi asli (gram)

W_2 = Berat agregat halus kering oven (gram)

3.2.9 Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat yang dihasilkan dari proses pemecahan batu yang biasa disebut batu pecah dari Banyubiru, Pasuruan (Gambar 3.9). Berikut adalah beberapa pemeriksaan agregat kasar yang dilakukan sebelum agregat tersebut digunakan sebagai bahan campuran beton, pengujian agregat kasar dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS.



Gambar 3.9 Batu Pecah Banyubiru

3.2.9.1 Analisa saringan agregat kasar (ASTM C136-01)

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran sebagai pegangan dalam pemeriksaan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dengan menggunakan saringan.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan 25 kg.
 - ❖ Satu set ayakan ASTM dengan diameter 3/2", 3/4", 3/8" bila perlu dengan ayakan diameter 4,75" dan 2,38".
- Bahan:
 - ❖ Batu pecah dalam keadaan kering oven.
- Cara pengujian:
 - 1) Masukkan batu pecah ke dalam ayakan yang telah disusun dari ayakan yang paling besar (di atas) sampai ayakan yang paling kecil (di bawah).
 - 2) Kemudian goncang ayakan tersebut selama kurang lebih 10 menit.
 - 3) Timbang batu pecah yang tertinggal pada masing-masing ayakan.

- 4) Mengontrol berat total = 15 kg.
- Analisa:
Hitunglah persentase berat benda uji yang tertahan di atas masing-masing saringan terhadap berat total benda uji setelah disaring.

3.2.9.2 Berat jenis agregat kasar (ASTM C127-01)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis batu pecah pada kondisi SSD.

- Peralatan:
- ❖ Timbangan 25 kg.
 - ❖ Keranjang kawat yang tergantung pada timbangan.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Kain lap.
- Bahan:
- ❖ Batu pecah dalam keadaan SSD.
- Cara pengujian:
- 1) Kerikil yang telah direndam selama 24 jam diangkat kemudian dilap satu per satu
 - 2) Timbang sebanyak 3000 gram (W_1).
 - 3) Masukkan keranjang yang berisi kerikil SSD ke dalam air. Timbang berat dalam air (keranjang dan kerikil) (W_2).
- Analisa:

$$\text{Berat jenis} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \dots \dots \dots (3.7)$$

Keterangan:

W_1 = Berat batu pecah di udara (gram)

W_2 = Berat batu pecah di air (gram)

3.2.9.3 Air resapan (ASTM C127-01)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar air resapan pada batu pecah.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 3000 gram.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Pan.
- Bahan:
 - ❖ Batu pecah dalam keadaan SSD.
- Cara pengujian:
 - 1) Timbang batu pecah kondisi SSD sebanyak 3000 gram.
 - 2) Masukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
 - 3) Batu pecah dikeluarkan, setelah dingin timbang beratnya (W).
 - 4) Batu pecah dioven, setelah dingin ditimbang.
- Analisa:

$$\text{Air resapan} = \frac{3000-W}{W} \times 100\% \dots \dots \dots (3.8)$$

Keterangan:

W = Berat batu pecah kering oven (gram)

3.2.9.4 Kebersihan terhadap lumpur (ASTM C117-03)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar lumpur dalam batu pecah.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Saringan No. 200 dan No. 50.
 - ❖ Oven dan pan.

- Bahan:
 - ❖ Batu pecah keadaan kering oven.
- Cara pengujian:
 - 1) Timbang batu pecah oven sebanyak 1000 gram (W_1).
 - 2) Batu pecah dicuci hingga bersih, yaitu dengan mengaduk batu pecah dengan air berkali-kali hingga tampak bening.
 - 3) Tuangkan air cucian ke dalam saringan No. 200 berkali-kali.
 - 4) Batu pecah yang ikut tertuang dan tinggal di atas saringan dikembalikan ke pan.
 - 5) Batu pecah dioven dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
 - 6) Keluarkan batu pecah dari dalam oven, tunggu sampai dingin dan timbang beratnya (W_2).
- Analisa:

$$\text{Kebersihan batu pecah} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (3.9)$$

Keterangan:

W_1 = Berat batu pecah kering (gram)

W_2 = Berat batu pecah bersih kering (gram)

3.2.9.5 Kelembapan (ASTM C566-97, Reapproved 2004)

Tujuan pengujian ini adalah mengetahui kelembapan batu pecah.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan analisa 2600 gram.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Pan.
- Bahan:
 - ❖ Batu pecah dalam keadaan asli.

- Cara pengujian:
 - 4) Timbang batu pecah dalam keadaan asli sebanyak 3000 gram (W_1).
 - 5) Batu pecah dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
 - 6) Keluarkan batu pecah dari oven, setelah dingin batu pecah ditimbang beratnya (W_2).
- Analisa:

$$\text{Kelembapan} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (3.10)$$

Keterangan:

W_1 = Berat batu pecah dalam keadaan asli (gram)

W_2 = Berat batu pecah kering oven (gram)

3.2.10 Air

Air digunakan sebagai pengaktif semen di dalam pembuatan beton semen Portland. Air yang digunakan adalah air PAM (Perusahaan Air Minum).

3.2.11 Semen portland

Semen Portland digunakan untuk membuat benda uji beton OPC (Ordinary Portland Cement) yang digunakan sebagai pembanding dari beton geopolimer. Semen OPC yang digunakan berasal dari PT. Semen Indonesia.

3.3 Pembuatan Benda Uji

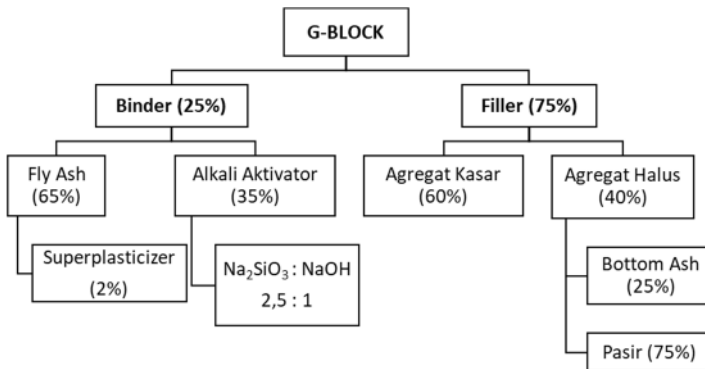
Pada penelitian ini akan dilakukan pengecoran beton ke dalam bentuk kubus (15x15x15 cm) dan paving (20x8x10 cm) dengan urutan pembuatan sebagai berikut:

1. Timbang material sesuai komposisi yang telah direncanakan.
2. Masukkan kerikil dan *fly ash* ke dalam molen, kemudian aduk.
3. Tambahkan *alkaline activator* yang sudah dicampur dengan *superplasticizer* secara perlahan.
4. Aduk kembali hingga tercampur rata.
5. Masukkan pasir dan tambahkan *bottom ash* secara perlahan sambil diaduk.
6. Setelah semua bahan telah tercampur dengan baik, maka beton dapat dimasukkan ke dalam cetakan.

Benda uji di dalam penelitian ini dibagi dua, yaitu benda uji beton geopolimer dan benda uji beton semen Portland (OPC) sebagai pembandingan.

3.3.1 Beton geopolimer

Komposisi beton geopolimer pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.10. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa G-Block terdiri dari 25% binder dan 75% filler. Penyusun binder terdiri dari 65% fly ash dan 35% alkali aktivator, alkali aktivator tersusun dari Na_2SiO_3 dan NaOH dengan perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH sebesar 2,5. Kadar molaritas NaOH yang digunakan di dalam penelitian ini terdiri dari 10M dan 12M di mana pada masing-masing kadar molaritas tersebut terbuat dari air suling dan air laut. Sementara itu penyusun filler terdiri dari 60% agregat kasar dan 40% agregat halus, dan agregat halus tersusun dari 25% bottom ash dan 75% pasir. Serta digunakan superplasticizer sebanyak 2% dari berat fly ash.



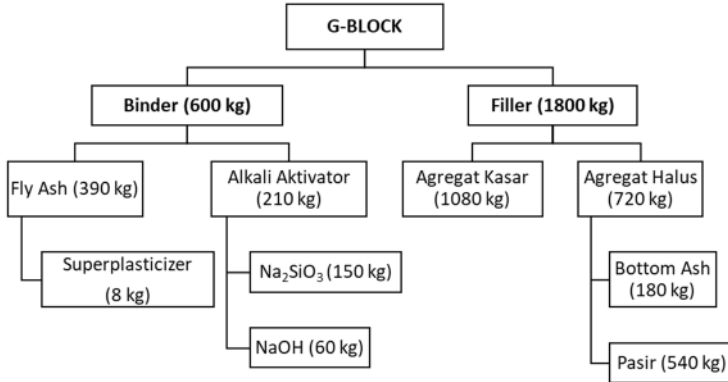
Gambar 3.10 *Mix Design G-Block*

Sehingga untuk 1 m³ *G-Block* didapatkan *mix design* dengan total berat beton 2400 kg/m³ seperti pada Gambar 3.11. Pada gambar ini dapat dilihat bahwa untuk membuat 1 m³ *G-Block* dibutuhkan 390 kg *fly ash*, 210 kg *alkaline activator*, 1080 kg agregat kasar (kerikil), 180 kg *bottom ash*, 540 kg pasir, dan 8 kg *superplasticizer*.

Sehingga untuk memenuhi target penelitian maka dibutuhkan jumlah kubus beton seperti pada Tabel 3.2, sementara kebutuhan jumlah paving untuk pengujian abrasi dapat dilihat pada Tabel 3.3. Dapat dilihat pada Tabel 3.2 untuk setiap umur pengujian kubus beton dibutuhkan 3 buah sampel sehingga total kubus beton geopolimer yang harus dibuat adalah 96 buah. Pada Tabel 3.3 untuk setiap umur pengujian beton dibutuhkan paving sebanyak 1 buah sehingga total paving beton geopolimer yang harus dibuat adalah 32 buah.

Total kebutuhan material untuk pembuatan beton geopolimer pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4. Pada tersebut dapat dilihat bahwa untuk menyelesaikan penelitian ini dibutuhkan total 248 kg *fly ash*, 62 kg Na₂SiO₃,

25 kg NaOH, 446 kg agregat kasar, 75 kg *bottom ash*, 223 kg pasir, dan 4 kg *superplasticizer*.



Gambar 3.11 *G-Block* per 1 m³

Tabel 3.2 Kebutuhan Kubus Beton Geopolimer

No.	Kode	Kebutuhan Kubus				Total
		28D	58D	88D	118D	
1	GN10-1	3	3	3	3	12
2	GN12-1	3	3	3	3	12
3	GS10-1	3	3	3	3	12
4	GS12-1	3	3	3	3	12
5	GN10-28	3	3	3	3	12
6	GN12-28	3	3	3	3	12
7	GS10-28	3	3	3	3	12
8	GS12-28	3	3	3	3	12
Total						96

Keterangan: Penjelasan kode dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.3 Kebutuhan Paving Beton Geopolimer

No.	Kode	Kebutuhan Paving				Total
		28D	58D	88D	118D	
1	GN10-1	1	1	1	1	4
2	GN12-1	1	1	1	1	4
3	GS10-1	1	1	1	1	4
4	GS12-1	1	1	1	1	4
5	GN10-28	1	1	1	1	4
6	GN12-28	1	1	1	1	4
7	GS10-28	1	1	1	1	4
8	GS12-28	1	1	1	1	4
Total						32

Keterangan: Penjelasan kode dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.4 Kebutuhan Total Material Beton Geopolimer

No.	Keterangan	1m ³ (kg)	1 Kubus (kg)	1 Paving (kg)	Total Keseluruhan			Pembulatan (kg)	
					96 Kubus (kg)	32 Paving (kg)	Total (kg)		
1	Binder	600	2,025	0,960	194,400	30,720	225,120	247,632	248
2	Fly ash	390	1,316	0,624	126,360	19,968	146,328	160,961	161
3	Alkali Aktivator	210	0,709	0,336	68,040	10,752	78,792	86,671	87
4	Na ₂ SiO ₃	150	0,506	0,240	48,600	7,680	56,280	61,908	62
5	NaOH	60	0,203	0,096	19,440	3,072	22,512	24,763	25
6	Filler	1800	6,075	2,880	583,200	92,160	675,360	742,896	743
7	A. Kasar	1080	3,645	1,728	349,920	55,296	405,216	445,738	446
8	A. Halus	720	2,430	1,152	233,280	36,864	270,144	297,158	298
9	Bottom ash	180	0,608	0,288	58,320	9,216	67,536	74,290	75
10	Pasir	540	1,823	0,864	174,960	27,648	202,608	222,869	223
11	Superplasticizer	8	0,026	0,012	2,527	0,399	2,927	3,219	4

3.3.2 Beton Semen Portland

Dalam pembuatan spesimen kontrol berupa beton dari semen Portland ditargetkan mencapai mutu beton K-400. *Mix design* yang digunakan untuk spesimen kontrol menggunakan acuan SNI 03-2834-2000. Langkah-langkah menentukan komposisi beton semen portland dengan secara garis besar dapat dilihat pada Gambar 3.12.

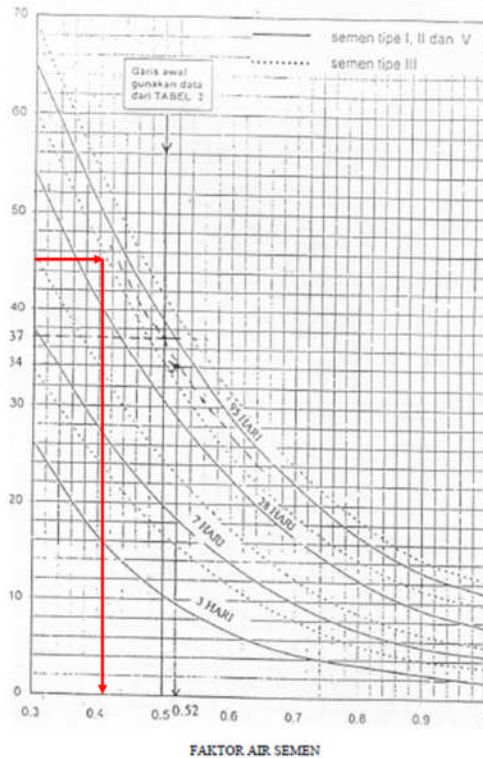
No. ---	Uraian ---	Tabel/Grafik/ Perhitungan	Nilai ---
1	Kuat tekan yang disyaratkan (benda uji silinder/kubus)	Ditetapkan	... MPa pada 28 hari Bagian cacat 5 persen, $k=1,64$
2	Deviasi Standar	Butir 4.3.2.1.1),(2 tabel 1)	... MPa atau tanpa data
3	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2)	... Mpa
4	Kekuatan rata-ata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.3)	$1,64 \times \dots = \dots$ MPa
5	Jenis semen	Ditetapkan	$\dots + \dots =$ MPa
6	Jenis agregat : - kasar - halus		...
7	Faktor air semen bebas	Tabel 2 Grafik 1 atau 2	Ambil nilai yang terendah
8	Faktor air semen maksimum	Butir 4.2.3.2. 2)	...
9	Slump	Ditetapkan Butir 4.2.3.3	... mm
10	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan Butir 4.2.3.4	... mm
11	Kadar air bebas	Tabel 3 Butir 4.2.3.4	... kg/m^3
12	Julah semen	11 : 8 atau 7	... kg/m^3
13	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	... kg/m^3
14	Jumlah semen minimum	Ditetapkan Butir 4.2.3.2 Tabel 4,5,6	... kg/m^3 (pakai bila lebih besar dari 12, lalu hitung 15)
15	Faktor air semen yang disesuaikan	-	...
16	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3 s/d 6	Daerah gradasi susunan butir 2
17	Susunan agregat kasar atau gabungan	Grafik 7, 8, 9 atau Tabel 7	
18	Persen agregat halus	Grafik 10, 11, 12 Grafik 13 s/d 15 atau perhitungan	... persen
19	Berat jenis relative, agregat (kering permukaan)	Diketahui/dianggap	...
20	Berat isi beton	Grafik 16	... kg/m^3
21	Kadar agregat gabungan	$20-(12+11)$	$\dots - \dots = \dots$ kg/m^3
22	Kadar agregat kasar	18×21	$\dots \times \dots = \dots$ kg/m^3
23	Proporsi campuran:	21-22	$\dots - \dots = \dots$ kg/m^3
24	- tiap m ³ - tiap campuran uji m ³	Semen Air (kg/1t) (kg)	Agregat kondisi jenuh kering permukaan Halus Kasar (kg) (kg)
25	Koreksi proporsi campuran		

Gambar 3.12 Prosedur Perencanaan Campuran Beton

Prosedur di atas diuraikan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

- *Langkah 1: Kuat tekan yang direncanakan*
Pada penelitian ini direncanakan kuat tekan beton dengan mutu K-400 atau setara dengan 33,2 MPa.
- *Langkah 2: Deviasi standar*
Deviasi standar ditetapkan sebesar 12 MPa, seperti yang tercantum pada poin 4.2.3.1.(5) di dalam SNI.

(5) bila data uji lapangan untuk menghitung deviasi standar yang memenuhi persyaratan butir 4.2.3.1 1) di atas tidak tersedia, maka kuat tekan rata-rata yang ditargetkan f_{ct} harus diambil tidak kurang dari $(f_c + 12 \text{ MPa})$;
- *Langkah 3: Nilai tambah*
Berdasarkan langkah 2 maka didapatkan nilai tambah sebesar 12 MPa.
- *Langkah 4: Kekuatan rata-rata yang ditargetkan*
Maka didapat kekuatan rata-rata sebesar $33,2 + 12 = 45,2$ MPa.
- *Langkah 5: Jenis semen*
Jenis semen yang digunakan adalah OPC tipe 1.
- *Langkah 6: Jenis agregat*
Jenis agregat yang dipakai adalah batu pecah untuk agregat kasar dan pasir untuk agregat halus.
- *Langkah 7: Faktor air semen bebas*
Faktor air semen bebas ditentukan dengan Gambar 3.13. Berdasarkan grafik tersebut didapatkan faktor air semen bebas sebesar 0,41.



Gambar 3.13 (Grafik 1) Faktor Air Semen

- *Langkah 8: Faktor air semen maksimum*
 Faktor air semen maksimum untuk beton yang berada di air laut ditentukan oleh Gambar 3.14. Berdasarkan tabel tersebut didapatkan faktor air semen maksimum sebesar 0,45-0,50.

Gambar 3.14 (Tabel 6) Ketentuan Minimum untuk Beton Bertulang Kepad Air

Jenis beton	Kondisi lingkungan yang berhubungan dengan	Factor air semen maksimum	Tipe semen	Kandungan semen minimum (kg/m^3)	
				Ukuran nominal Maksimum agregat	
				40 mm	20 mm
Bertulang atau Pra tegang	Air tawar	0,50	Tipe – V	280	300
	Air payau	0,45	Tipe I + Pozolan (15-40%) atau Semen Portland Pozalen	340	380
	Air laut	0,50	Tip ell atau Tipe V		
		0,45	Tipe II atau Tipe V		

➤ *Langkah 9: Slump*

Nilai slump ditetapkan sebesar 30-60 mm.

➤ *Langkah 10: Ukuran agregat maksimum*

Ukuran agregat maksimum ditetapkan sebesar 20 mm.

➤ *Langkah 11: Kadar air bebas*

Kadar air bebas ditentukan oleh Gambar 3.15. Berdasarkan tabel tersebut untuk ukuran agregat maksimum sebesar 20 mm dan nilai slump 30-60 mm didapatkan besar kadar air bebas sebesar 180 kg/m^3 untuk agregat halus dan 210 kg/m^3 untuk agregat kasar. Sehingga kadar air bebas didapat dengan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Kadar air bebas} = \frac{2}{3} \times Wh + \frac{1}{3} \times Wk \text{ (kg/m}^3\text{)} \dots\dots (3.11)$$

Keterangan:

Wh = Perkiraan kadar air bebas agregat halus

Wk = Perkiraan kadar air bebas agregat kasar

Sehingga:

$$\text{Kadar air bebas} = \frac{2}{3} \times 180 + \frac{1}{3} \times 210 = 190 \text{ kg/m}^3$$

Gambar 3.15 (Tabel 3) Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m³) yang Dibutuhkan untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton

Slump (mm)		0-10	10-30	30-60	60-180
Ukuran besar butir agregat maksimum	Jenis agregat	---	---	---	---
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Catatan : Koreksi suhu udara :

Untuk suhu di atas 25 °C, setiap kenaikan 5 °C harus ditambah air 5 liter per m² adukan beton.

- *Langkah 12: Jumlah semen*
Jumlah semen didapat dengan membagi kadar air bebas dengan faktor air semen bebas.
$$\text{Jumlah semen} = \frac{190}{0,41} = 463,415 \text{ kg/m}^3$$
- *Langkah 13: Jumlah semen maksimum*
Jumlah semen maksimum tidak ditetapkan.
- *Langkah 14: Jumlah semen minimum*
Jumlah semen minimum ditetapkan berdasarkan Tabel 3.5 yaitu sebesar 380 kg/m³.
- *Langkah 15: Faktor air semen yang disesuaikan*
Karena jumlah semen lebih dari jumlah semen minimum maka tidak ada penyesuaian faktor air semen.
- *Langkah 16: Susunan besar butir agregat halus*
Susunan besar butir agregat halus *well graded*.
- *Langkah 17: Susunan agregat kasar*
Susunan agregat kasar *well graded*.
- *Langkah 18: Persen agregat halus*
Persen agregat halus digunakan sebesar 40%.
- *Langkah 19: Berat jenis relatif agregat*

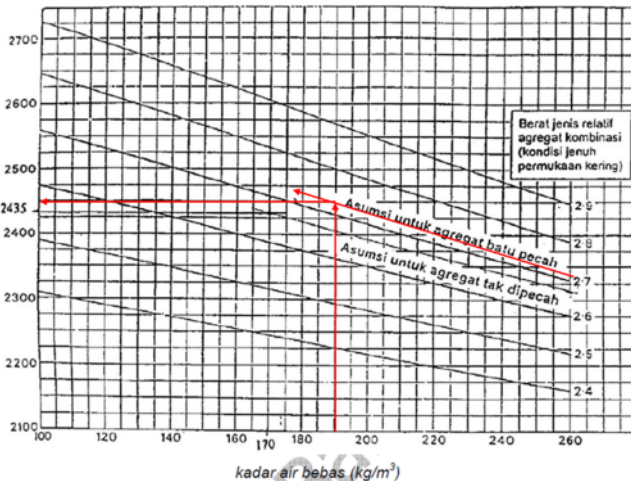
Berdasarkan percobaan didapatkan berat jenis agregat halus sebesar $2,681 \text{ kg/m}^3$ dan agregat kasar $2,636 \text{ kg/m}^3$ sehingga didapat berat jenis relatif agregat sesuai poin 4.2.3.6 yaitu sebagai berikut.

4.2.3.6 Berat Jenis Relatif Agregat
 Berat jenis relative agregat ditentukan sebagai berikut:
 1) diperoleh dari data hasil uji atau bila tidak tersedia dapat dipakai nilai dibawah ini:
 (1) agregat tak dipecah : 2,5
 (2) agregat dipecah : 2,6 atau 2,7
 2) berat jenis agregat gabungan dihitung sebagai berikut:
 berat jenis agregat gabungan = persentase agregat halus x berat jenis agregat halus + persentase agregat kasar x berat jenis agregat kasar

$$BJ_{gab} = 40\% \times 2,681 + 60\% \times 2,636 = 2,654 \text{ kg/m}^3$$

➤ *Langkah 20: Berat isi beton*

Berat isi beton ditentukan menggunakan Gambar 3.16. Berdasarkan grafik tersebut didapat berat isi beton sebesar 2450 kg/m^3 .



Gambar 3.16 (Grafik 16) Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan

➤ *Langkah 21: Kadar agregat gabungan*

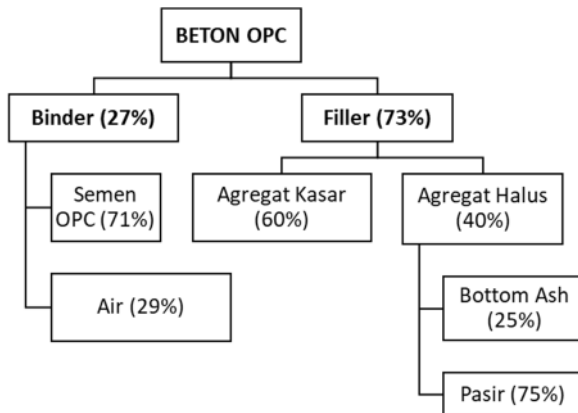
$$\begin{aligned} \text{Kadar agregat gabungan} &= 2450 - (463,415 + 190) \\ &= 1796,59 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- *Langkah 22: Kadar agregat halus*

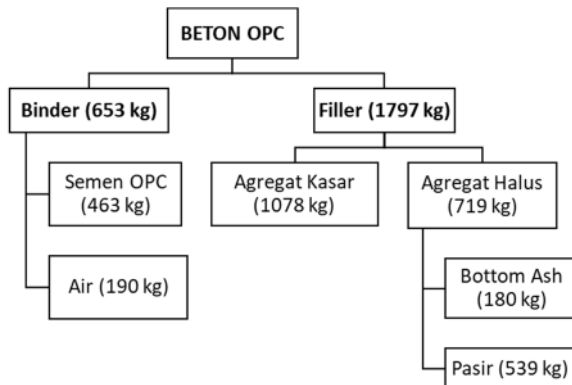
$$\begin{aligned} \text{Kadar agregat halus} &= 40\% \times 1796,59 \\ &= 718,63 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$
- *Langkah 23: Kadar agregat kasar*

$$\begin{aligned} \text{Kadar agregat kasar} &= 1896,59 - 718,63 \\ &= 1077,95 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$
- *Langkah 24: Proporsi campuran*

Pada penelitian ini persentas agregat halus terdiri dari 75% pasir dan 25% *bottom ash*. Sehingga berdasarkan perhitungan-perhitungan di atas maka didapatkan *mix design* beton OPC pada Gambar 3.17, beton OPC per 1m^3 pada Gambar 3.18, serta total kebutuhan beton OPC pada



Gambar 3.17 *Mix Design* Beton OPC

Gambar 3.18 Kebutuhan Material 1m³ Beton OPC

Tabel 3.5 Kebutuhan Total Material Beton OPC

No.	Keterangan	1m ³ (kg)	1 Kubus (kg)	1 Paving (kg)	Total Keseluruhan				
					12 Kubus (kg)	4 Paving (kg)	Total (kg)	SF (1,1)	Pembulatan (kg)
1	Semen OPC	463,415	1,564	0,741	18,768	2,966	21,734	23,908	24
2	Air	190,000	0,641	0,304	7,695	1,216	8,911	9,802	10
3	A. Kasar	1077,951	3,638	1,725	43,657	6,899	50,556	55,612	56
4	Pasir	538,976	1,819	0,862	21,829	3,449	25,278	27,806	28
5	Bottom Ash	179,659	0,606	0,287	7,276	1,150	8,426	9,269	10

Sehingga didapat total kebutuhan material di dalam penelitian ini meliputi *G-Block* dan spesimen kontrol seperti pada Tabel 3.6. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa pada penelitian ini dibutuhkan 161 kg *fly ash*, 62 kg Na₂SiO₃, 25 kg NaOH, 502 kg agregat kasar, 85 kg *bottom ash*, 251 kg pasir, 24 kg semen OPC, 10 kg air, 12,5 kg air suling, 12,5 kg air laut, dan 4 kg *superplasticizer*.

Tabel 3.6 Kebutuhan Total Material Penelitian

No.	Keterangan	Jumlah (kg)
1	<i>Fly ash</i>	161
2	Na ₂ SiO ₃	62
3	NaOH	25
4	A. Kasar	502
5	<i>Bottom ash</i>	85
6	Pasir	251
7	Semen OPC	24
8	Air	10
9	Air Suling	12,5
10	Air Laut	12,5
11	Superplasticizer	4

3.4 Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji di lingkungan air laut (*sea water curing*) berlokasi di Pesisir Pantai Kenjeran. Beton geopolimer diletakkan di lingkungan air laut saat umur beton 1 hari (H+1 *sea water curing*) dan 28 hari (H+28 *sea water curing*). Namun beton OPC hanya diletakkan di lingkungan air laut setelah beton berumur 28 hari saja, karena sifat beton OPC yang tidak dapat bertahan dengan baik di lingkungan air laut bila langsung diletakkan di lingkungan air laut tanpa melakukan *curing* terlebih dahulu untuk memaksimalkan kekuatan beton tersebut. Untuk benda uji yang diletakkan di lingkungan air laut saat berumur 28 hari, sebelumnya dilakukan *moist curing* sampai benda uji berumur 28 hari. Sehingga diberi penamaan untuk setiap campuran beton seperti pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Penamaan Beton

No.	Kode	Keterangan
1	GN10-1	Beton geopolimer-NaOH 10M dengan air normal (H+1 SWC)
2	GN12-1	Beton geopolimer-NaOH 12M dengan air normal (H+1 SWC)
3	GS10-1	Beton geopolimer-NaOH 10M dengan air laut (H+1 SWC)
4	GS12-1	Beton geopolimer-NaOH 12M dengan air laut (H+1 SWC)
5	GN10-28	Beton geopolimer-NaOH 10M dengan air normal (H+28 SWC)
6	GN12-28	Beton geopolimer-NaOH 12M dengan air normal (H+28 SWC)
7	GS10-28	Beton geopolimer-NaOH 10M dengan air laut (H+28 SWC)
8	GS12-28	Beton geopolimer-NaOH 12M dengan air laut (H+28 SWC)
9	PN-28	Beton normal dengan air normal (H+28 SWC)

Berdasarkan Tabel 3.7 terdapat beberapa nama dari spesimen pada penelitian ini. Secara garis besar spesimen pada penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu H+1 *sea water curing* dan H+28 *sea water curing* (sebelumnya dilakukan *moist curing*). Untuk masing-masing perlakuan *sea water curing* terdapat dua spesimen yaitu spesimen dengan kadar molaritas NaOH 10M dan 12M, untuk satu kadar molaritas NaOH dibagi menjadi dua yaitu pembuatan larutan NaOH dengan air suling dan air laut. Untuk spesimen kontrol terbuat dari semen Portland (OPC). *Moist curing* (Gambar 3.19) dilakukan dengan cara menyelimuti beton yang sudah dilepaskan dari bekisting dengan kain/karung basah dan dibiarkan di suhu lingkungan (*outdoor*) sampai umur 28 hari. Dan *sea water curing* dilakukan dengan meletakkan beton di lingkungan air laut, yaitu di pesisir Pantai Kenjeran, dengan cara membungkusnya dengan waring dan diikat dengan tali pada bangunan nelayan yang bernama bagan (tumpukkan bambu untuk menaruh peralatan nelayan, sekitar 30 m dari pesisir pantai).



Gambar 3.19 *Moist Curing*

Metode penaruhan beton pada bagan adalah sebagai berikut.

1. Siapkan waring dan tali tampar.



(a)

(b)

Gambar 3.20 Waring (a) dan Tali Tampar (b)

2. Bungkus beton dengan waring dan ikat dengan tali tampar.



Gambar 3.21 Beton Diletakkan di Atas Waring



Gambar 3.22 Proses Pengikatan Waring dengan Tali Tampar



Gambar 3.23 Beton Telah Siap untuk Ditaruh pada Bagan

3. Beton diangkut menggunakan perahu menuju bagan.



Gambar 3.24 Proses Pengangkutan Beton dengan Perahu Menuju Bagan

4. Beton diikat pada bagan.



Gambar 3.25 Pengikatan Beton pada Bagan

3.5 Pengujian Beton

Proses pengambilan beton dari bagan dan persiapan untuk pengujian beton adalah sebagai berikut.

1. Beton dilepaskan ikatannya dari bagan dan diangkut dengan perahu menuju pesisir.



Gambar 3.26 Beton yang Baru Diambil dari Bagan

2. Buka ikatan dan waring pada beton.



Gambar 3.27 Kondisi Beton Setelah Dibuka dari Waring

3. Bersihkan beton dari teritip pada permukaannya.



Gambar 3.28 Beton Sebelum Dibersihkan



Gambar 3.29 Beton Setelah Dibersihkan

4. Pilih satu beton yang memiliki permukaan terbaik, lalu beri warna untuk memudahkan pengujian porositas, pH, dan penetrasi klorida. Warna kuning untuk kedalaman 3,75 cm dan warna merah untuk kedalaman 7,5 cm.



Gambar 3.30 Beton Digarisi untuk Memberi Tanda Per Kedalaman



Gambar 3.31 Beton yang Telah Diberi Warna Per Kedalaman

5. Beri kode pada beton agar tidak tertukar.



Gambar 3.32 Pemberian Kode pada Beton

6. Beton telah siap diuji.



Gambar 3.33 Beton yang Telah Siap Diuji



Gambar 3.34 Beton Setelah Diuji Tekan

Pada penelitian ini dilakukan beberapa metode pengujian sebagai berikut:

3.5.1 Pengujian slump (ASTM C143/C143M-15)

Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengukur *workability* (kemudahan pengerjaan) dari campuran beton. Langkah-langkah pengujian slump beton segar adalah sebagai berikut.

- Peralatan:
 - ❖ Alat slump, lengkap dengan plat dasar ukuran kerucut terpancung.

- ❖ Tongkat pemadat terbuat dari baja berdiameter 16 mm dan panjang 60 cm dengan salah satu ujungnya berbentuk bulat.
- ❖ Sendok spesi.
- ❖ Mistar.
- Bahan :
 - ❖ Beton segar.
- Cara pengujian:
 - 1) Basahi cetakan dan plat slump dengan plat basah.
 - 2) Letakkan cetakan di atas pelat slump.
 - 3) Beton dimasukkan ke dalam cetakan secara bertahap menjadi 3 lapisan, setiap lapisan dirojok sebanyak 25 kali.
 - 4) Ratakan permukaan adukan beton dan biarkan selama 30 detik. Selama waktu menunggu ini cetakkan dan plat slump dibersihkan dari campuran beton yang berjatuhan.
 - 5) Angkat cetakan secara perlahan lahan dan dijaga tetap dalam keadaan vertikal.
 - 6) Letakkan kerucut di sisi beton dalam keadaan terbalik, dan ukur dengan menggunakan mistar.
 - 7) Ukur selisih tinggi beton dan kerucut. Nilai selisih tersebut merupakan nilai slump beton tersebut.

3.5.2 Kuat tekan beton (SNI 03-1974-1990)

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan ditargetkan mencapai mutu K-400 pada umur 28 hari sesuai dengan persyaratan pada Gambar 2.8. Pengujian kuat tekan beton dilakukan saat umur beton 28, 58, 88, dan 118 hari di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Departemen

Teknik Sipil, FTSLK, ITS. Langkah-langkah pengujian kuat tekan beton adalah sebagai berikut.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan.
 - ❖ Mesin tekan, kapasitas sesuai kebutuhan.
- Bahan:
 - ❖ Beton berbentuk kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm.
- Cara pengujian:
 - 1) Siapkan benda uji yang akan dilakukan tes tekan, bersihkan dari kotoran yang menempel.
 - 2) Timbang berat benda uji.
 - 3) Letakkan benda uji pada mesin tekan.
 - 4) Nyalakan mesin dan catat hasilnya.
- Analisa:

$$f_c' = \frac{P}{A} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (3.12)$$

Keterangan:

- fc' = Kuat tekan beton (kg/cm²)
- P = Beban maksimum (kg)
- A = Luas penampang (cm²)

Untuk mengkonversi kekuatan beton dari bentuk kubus ke bentuk silinder digunakan faktor pengali seperti pada Tabel 3.8. Berdasarkan tabel tersebut untuk mengkonversi hasil kuat tekan kubus beton 15x15x15 cm ke dalam bentuk silinder 15x30 cm maka harus dikali dengan faktor pengali 0,83.



Gambar 3.35 Mesin Tekan Beton

Tabel 3.8 Daftar Konversi (SNI 03-1974-1990)

Bentuk benda uji	Perbandingan
Kubus : 15 cm x 15 cm x 15 cm	1,0
: 20 cm x 20 cm x 20 cm	0,95
Silinder : 15 cm x 30 cm	0,83

Hasil dari kuat tekan cenderung bervariasi, nilai rata rata diambil dari beberapa benda uji. Karena adanya variasi kuat tekan beton tersebut maka diperlukan pengendalian mutu atau kontrol kualitas. Salah satu indikator kualitas campuran adalah standar deviasi atau koefisien variasi (kovarian) dari benda uji campuran yang telah dibuat. Standar deviasi kontrol beton sesuai dengan kelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Standar Kontrol Beton (SNI 03-6815-2002)

Standar Deviasi (kg/cm ²)		Kovarian (%)		Kualitas
Kelas Operasi		Kelas Operasi		
Lapangan	Laboratorium	Lapangan	Laboratorium	
< 28,1	< 14,1	< 3,0	< 2,0	Terbaik
28,1 - 35,2	14,1 - 17,6	3,0 - 4,0	2,0 - 3,0	Sangat Baik
35,2 - 42,2	17,6 - 21,1	4,0 - 5,0	3,0 - 4,0	Baik
42,2 - 49,2	21,1 - 24,6	5,0 - 6,0	4,0 - 5,0	Cukup
> 49,2	> 24,6	> 6,0	> 5,0	Kurang

Pada kuat tekan beton juga dilakukan analisa dari peningkatan kuat tekan yang terjadi. Peningkatan kuat tekan yang dimaksud adalah persentase kenaikan kuat tekan yang didapat dari selisih kuat tekan beton dengan umur sebelumnya dibandingkan terhadap kuat tekan umur sebelumnya, dengan perhitungan peningkatan kuat tekan dimulai pada umur 58 hari dibandingkan terhadap umur 28 hari. Untuk menghitung peningkatan kuat tekan yang terjadi digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta f c' = \frac{f c'_n - f c'_{n-1}}{f c'_{n-1}} \dots\dots\dots (3.13)$$

Keterangan:

- $\Delta f c'$ = Peningkatan kuat tekan (%)
- $f c'_n$ = Kuat tekan beton umur tertentu (MPa)
- $f c'_{n-1}$ = Kuat tekan beton sebelum umur tertentu (MPa)

3.5.3 Keausan paving (SNI 03-0691-1996)

Pengujian keausan paving dilakukan pada umur beton 28, 58, 88, dan 118 hari. Pengujian ini bukan untuk mengetahui ketahanan benda uji terhadap keausan permukaan yang disebabkan oleh abrasi air laut oleh gelombang laut (ombak), namun pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekerasan permukaan beton akibat perlakuan *curing* di dalam air laut. Pengujian keausan dilakukan terhadap sampel paving dengan metode pemotong berputar adalah sebagai berikut.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan.
 - ❖ Mesin pengaus.
 - ❖ Stopwatch.
- Bahan:
 - ❖ Paving block.

- Cara pengujian:
- 1) Timbang berat paving mula-mula.
 - 2) Benda uji digerus menggunakan mesin pengaus selama 5 menit, setelah itu benda uji diputar 90° dan pengausan dilanjutkan lagi hingga pengausan berlangsung 2 x 5 menit.



Gambar 3.36 Mesin Pengaus

- 3) Setelah proses pengausan selesai permukaan benda uji yang diauskan dibersihkan dan beratnya ditimbang ulang.



Gambar 3.37 Paving Block yang Telah Diauskan

- 4) Paving yang telah digerus selanjutnya direndam dalam air selama 24 jam.



Gambar 3.38 Perendaman Paving di dalam Air

- 5) Setelah 24 jam permukaan paving dilap hingga kering, kondisi ini disebut kondisi SSD (*standard surface dry*), lalu timbang beratnya.



Gambar 3.39 Paving dalam Keadaan SSD

- 6) Lalu timbang berat paving di dalam air.

➤ Perhitungan:

$$Keausan = \frac{A \times 10}{B_j \times L \times w} \text{ (mm/menit) } \dots\dots\dots (3.14)$$

Keterangan:

A = Selisih berat benda uji sebelum dan sesudah diaus (gr)

L = Luas bidang aus (cm²)

BJ = Berat jenis rata-rata lapisan kepala (gr/cm³)

w = lama pengausan dihitung 2 x 5 menit (menit)

Nilai keausan pada beton memiliki batas dengan kategori tertentu yang dapat dilihat pada gambar Gambar 3.40.

Mutu	Kuat tekan (MPa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maks.
	Rata-rata	min.	Rata-rata	maks	%
A	40	35	0,090	0,103	3
B	20	17,0	0,130	0,149	6
C	15	12,5	0,160	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

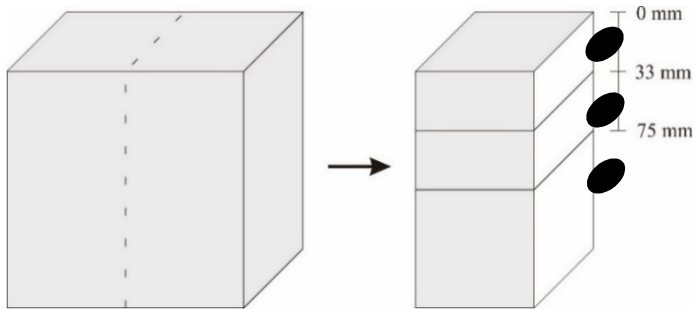
Keterangan:

- Mutu A: Digunakan untuk jalan.
- Mutu B: Digunakan untuk peralatan parkir.
- Mutu C: Digunakan untuk pejalan kaki.
- Mutu D: Digunakan untuk taman dan penggunaan lain.

Gambar 3.40 (Tabel 1) Sifat-sifat Fisika (SNI 03-0691-1996)

3.5.4 Porositas (ASTM C642-06)

Tes ini dilakukan untuk mengetahui pori terbuka (*permeable*) dan pori tertutup (*impermeable*) yang terdapat pada beton. Pengujian porositas beton dilakukan pada umur beton 28, 58, 88, dan 118 hari di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS. Metode pengambilan sampel yaitu diambil bongkahan sampel kubus 15x15x15 cm pada permukaan beton (0 cm), kedalaman 3,75 cm, dan 7,5 cm dari permukaan beton (Gambar 3.41) untuk mempermudah membedakan kedalaman diberikan warna untuk setiap kedalaman seperti pada Gambar 3.42 (warna kuning membatasi daerah kedalaman 3,75 cm dan warna merah membatasi daerah kedalaman 7,5 cm). Setelah tes tekan dilakukan (jangan sampai terlalu hancur), lalu beton dihancurkan kembali secara manual dengan pahat dan palu Gambar 3.43, dengan bantuan warna pada beton dan mistar maka diambil sampel beton per kedalaman lalu dimasukkan ke dalam plastic dan diberi kode Gambar 3.44.



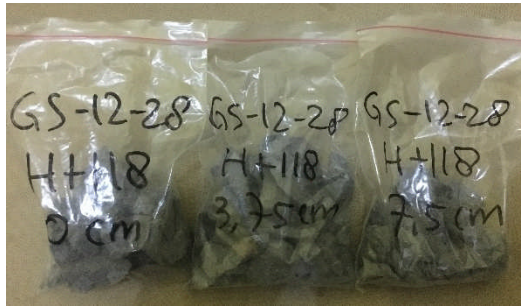
Gambar 3.41 Skema Pengambilan Sampel



Gambar 3.42 Pewarnaan Beton



Gambar 3.43 Sisa Beton yang Telah Dihancurkan dan Diambil Sampel Per Kedalaman



Gambar 3.44 Sampel Per Kedalaman Dimasukkan ke dalam Plastik dan Diberi Kode

Langkah-langkah pengujian porositas adalah sebagai berikut.

- Peralatan:
 - ❖ Timbangan.
 - ❖ Oven.
 - ❖ Piknometer.
 - ❖ Alat untuk merebus.
 - ❖ Ayakan No. 200.
- Bahan:
 - ❖ Potongan beton.
- Cara pengujian:
 - 1) Rebus benda uji selama 5 jam supaya semua pori yang berada di dalamnya terisi air.
 - 2) Dalam keadaan basah benda uji ditimbang dalam air (μ).
 - 3) Kemudian timbang benda uji dalam keadaan SSD (Mh).
 - 4) Masukkan badan uji ke dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam agar semua air di dalam benda uji keluar, dalam keadaan kering timbang beratnya (Mo).



Gambar 3.45 Benda Uji Dimasukkan ke Dalam Oven

- 5) Haluskan benda uji sampai lolos ayakan no.200 dan timbang beratnya (m_0).



Gambar 3.46 Benda Uji yang Telah Dihaluskan

- 6) Dengan alat piknometer diukur volumenya sesuai dengan hukum archimedes yang menyatakan bahwa volume air yang keluar = volume benda yang tercelup di dalamnya (V_0).
- Analisa:
- ❖ Kepadatan absolut (r) adalah perbandingan berat dan volume dalam keadaan halus.

$$r = \frac{m_0}{V_0} \dots\dots\dots (3.15)$$

- ❖ Kepadatan visual (α) adalah perbandingan contoh dalam keadaan kering (M_0) terhadap volume tampak ($M_h - \mu$).

$$\alpha = \frac{M_0}{M_h - \mu} \dots\dots\dots (3.16)$$

- ❖ Porositas total (P_t) dalam persen adalah perbandingan volume pori terhadap volume yang tampak.

$$P_t (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\alpha}{r}\right) \dots\dots\dots (3.17)$$

- ❖ Porositas terbuka (P_o) dalam persen adalah perbandingan volume porositas terbuka terhadap yang tampak.

$$P_o (\%) = 100 \times \frac{(M_h - M_0)}{(M_h - \mu)} \dots\dots\dots (3.18)$$

- ❖ Porositas tertutup (P_f) adalah perbandingan porositas tertutup terhadap volume yang tampak.

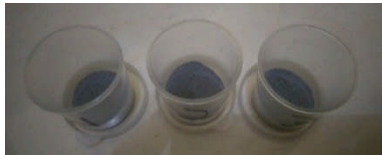
$$P_f (\%) = P_t - P_o \dots\dots\dots (3.19)$$

3.5.5 Derajat keasaman (pH) (SNI 06-6989.11-2004)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya derajat keasaman (pH) beton, semakin tinggi pH maka beton tahan terhadap korosi begitu juga sebaliknya. Metode pengambilan sampel sama seperti pada pengujian porositas yaitu pada permukaan beton (0 cm), kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm. Pengujian derajat keasaman beton dilakukan pada umur beton 28, 58, 88, dan 118 hari. Pengujian derajat keasaman (pH) menggunakan alat pH meter (Gambar 3.49). Metode pengukuran pH berdasarkan pengukuran aktifitas ion hidrogen secara potensiometri/elektrometri dengan menggunakan pH

meter. Pelaksanaan pengujian derajat keasaman (pH) dilakukan dengan cara sebagai berikut.

- Peralatan:
 - ❖ pH meter.
 - ❖ Wadah.
 - ❖ Stopwatch.
 - ❖ Timbangan.
 - ❖ Air suling.
- Bahan:
 - ❖ Potongan beton yang sudah dihaluskan.
- Cara pengujian:
 - 1) Timbang benda uji yang sudah dihaluskan sebanyak 5 gram.



Gambar 3.47 Benda Uji yang Telah Dihaluskan

- 2) Tambahkan air suling sebanyak 20 gram.
- 3) Aduk selama 5 menit.



Gambar 3.48 Benda Uji yang Telah Ditambah Air Suling dan Diaduk

- 4) Diamkan selama 30 menit.
- 5) Siapkan pH meter, lalu masukkan indikator pH meter ke dalam wadah, aduk selama 10 detik dan lakukan pembacaan menggunakan alat.

- Analisa:
Catat hasil yang tertera pada monitor pH meter.



Gambar 3.49 pH Meter

3.5.6 Penetrasi klorida (SNI 03-2854-1992)

Penentuan penetrasi klorida pada penelitian ini menggunakan bongkahan sampel beton kubus 15x15x15 cm yang diambil pada permukaan beton (0 cm), kedalaman 3,75 cm, dan 7,5 cm seperti pada pengujian porositas, dengan permukaan beton tidak dilapisi *waterproof material* untuk melihat seberapa banyak kandungan klorida yang menyerap ke dalam beton tersebut. Penetrasi klorida yang dimaksud pada metode ini adalah banyaknya klorida terikat dan bebas yang terdapat pada benda uji setelah dilakukan masa perawatan tertentu. Klorida bebas adalah klorida yang bebas bergerak di dalam beton yang didapat dari reaksi $\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HCl} + \text{H}^+$. Klorida total adalah total klorida yang terdapat di dalam beton yang didapat dari reaksi $\text{Cl}^- + \text{HNO}_3 \Rightarrow \text{HCl} + \text{NO}_3^-$. Dan klorida terikat adalah klorida yang terikat di dalam matriks beton yang didapat dari pengurangan klorida total dengan klorida bebas.

Pengujian penetrasi ion klorida dilakukan di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, FTSLK, ITS. Pengujian ini dilakukan pada umur beton 28, 58, 88, dan 118 hari. Untuk mengetahui penetrasi klorida digunakan persamaan sebagai berikut.

$$Cl_{terikat}^- = Cl_{terikat\ terukur}^- - Cl_{terikat\ awal}^- \dots\dots\dots (3.20)$$

$$Cl_{bebas}^- = Cl_{bebas\ terukur}^- - Cl_{bebas\ awal}^- \dots\dots\dots (3.21)$$

Keterangan:

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

Kadar klorida pada beton tidak boleh melebihi batas tertentu, karena dapat berakibat buruk terhadap kekuatan beton. Besarnya kandungan klorida yang diizinkan pada beton dapat dilihat pada Gambar 3.50.

JENIS KOMPONEN STRUKTUR BETON	JUMLAH MAKSIMUM ION KHLORIDA (CI YANG LARUT DALAM AIR) DALAM BETON DINYATAKAN DALAM % TERHADAP MASA SEMEN
Beton Pategang	0,06
Beton bertulang berhubungan dengan klorida	0,15
Beton bertulang yang selalu kering atau terlindung dari lembab	1,00
Beton polos	0,30

Gambar 3.50 (Tabel 3) Ketentuan Jumlah Ion Klorida Maksimum dalam Beton (SNI 03-2854-1992)

3.5.7 Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*)

Pengujian *X-ray powder diffraction* (XRD) adalah teknik analisa untuk mengidentifikasi fase dari kristal dari material, juga dapat memberikan informasi tentang prosentasi suatu senyawa dari material. Pengujian XRD dilakukan pada sampel beton pada kedalaman 7,5 cm (bagian tengah beton). Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, Bandung.



Gambar 3.51 Mesin XRD

3.5.8 Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*)

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang dapat menghasilkan gambar dari sebuah sampel dengan membaca focus dari sorotan sinar elektron. SEM dapat menghasilkan gambar dengan kualitas *very high-resolution* dari permukaan sampel, bahkan dapat melihat detail hingga ukuran kurang dari 1 nanometer dengan kedalaman gambar yang tinggi. Sehingga dapat mengetahui karakteristik struktur permukaan dari sebuah sampel. Pengujian XRD dilakukan pada sampel beton pada kedalaman 7,5 cm (bagian tengah beton). Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, Bandung.



Gambar 3.52 Mesin SEM

3.6 Analisa Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengujian material, beton geopolimer dan beton OPC yang telah dilakukan, dilakukan pencatatan dan pembahasan, sehingga dapat dilakukan analisa terhadap beton geopolimer jika digunakan sebagai *breakwater*. Analisa yang dibahas pada penelitian ini meliputi analisa kuat tekan, porositas, penetrasi ion klorida, derajat keasaman (pH), dan keausan paving.

3.7 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan dari seluruh percobaan yang dilakukan. Dan dapat ditentukan apakah beton geopolimer dapat digunakan sebagai *breakwater* beserta dengan data-data pendukungnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan analisa dan pembahasan dari pengujian yang telah dilakukan, dan akan diambil kesimpulan dari hasil analisa pengujian tersebut. Hasil pengujian meliputi hasil uji karakteristik material, pengujian terhadap benda uji berukuran kubus 15 x 15 x 15 cm yang meliputi kuat tekan, derajat keasaman (pH), porositas, dan penetrasi klorida, serta pengujian keausan pada paving 20 x 8 x 10 cm dengan metode perawatan *sea water curing* yang dilakukan di Pantai Kenjeran, Surabaya.

4.1 Uji Material

Pengujian-pengujian yang dilakukan terhadap material yang digunakan adalah sebagai berikut.

4.1.1 *Fly ash*

Pada material *fly ash* dilakukan uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan pengujian kandungan klorida mula-mula.

Berdasarkan pengujian XRF yang dilakukan di PT. Sucofindo didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.1. Pada tabel tersebut didapatkan data sebagai berikut:

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 78,72$ % wt (>70%)
- $\text{SO}_3 = 0,62$ % wt (<5%)
- $\text{LOI} = 11,13$ % wt (12%)

Maka berdasarkan data tersebut *fly ash* Suralaya kelas 1-4 diukur berdasarkan ASTM C618-05 seperti pada Tabel 3.1 dapat dikategorikan sebagai *fly ash* kelas F.

Tabel 4.1 Hasil Analisa XRF *Fly Ash* Suralaya Kelas 1-4

No.	Parameter	Unit	Test Result	Test Method
1	SiO ₂	% wt	44,83	Po - MOM - 01 for XRF
2	Al ₂ O ₃	% wt	29,23	Po - MOM - 01 for XRF
3	Fe ₂ O ₃	% wt	4,66	Po - MOM - 01 for XRF
4	TiO ₂	% wt	0,84	Po - MOM - 01 for XRF
5	CaO	% wt	4,47	Po - MOM - 01 for XRF
6	MgO	% wt	1,62	Po - MOM - 01 for XRF
7	Cr ₂ O ₃	% wt	0,01	Po - MOM - 01 for XRF
8	K ₂ O	% wt	0,68	Po - MOM - 01 for XRF
9	Na ₂ O	% wt	1,32	Po - MOM - 01 for XRF
10	SO ₃	% wt	0,62	Po - MOM - 01 for XRF
11	MnO ₂	% wt	0,09	Po - MOM - 01 for XRF
12	P ₂ O ₅	% wt	0,25	Po - MOM - 01 for XRF
13	LOI	% wt	11,13	Po - MOM - 01 for XRF

Berdasarkan pengujian klorida bebas dan terikat yang dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Klorida (Cl⁻) Bebas dan Terikat *Fly Ash* PLTU Suralaya 1-4

Jenis	Cl ⁻ Bebas (ppm)	Cl ⁻ Terikat (ppm)	Cl ⁻ Total (ppm)
Fly ash	10510	940	11450

Hasil dari tabel tersebut nantinya akan digunakan pada perhitungan klor bebas dan terikat dari benda uji.

4.1.2 Air laut

Pada air laut dilakukan pengujian klor bebas dan terikat. Hasil dari pengujian yang dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Klorida (Cl⁻) Bebas dan Terikat Air Laut Pantai Kenjeran

Jenis	Cl ⁻ Bebas (ppm)	Cl ⁻ Terikat (ppm)	Cl ⁻ Total (ppm)
Air laut	7,87	18800	18807,87

Hasil dari tabel tersebut nantinya akan digunakan pada perhitungan klor bebas dan terikat dari benda uji. Diketahui juga bahwa derajat keasaman (pH) air laut Pantai Kenjeran adalah 7,87.

4.1.3 Bottom ash

Pada *bottom ash* dilakukan pengujian klor bebas dan terikat. Hasil dari pengujian yang dilakukan di Laboratorium TAKI (Teknologi Air dan Konsultasi Industri) Departemen Teknik Kimia dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Klorida (Cl⁻) Bebas dan Terikat *Bottom Ash* PLTU Suralaya

Jenis	Cl ⁻ Bebas (ppm)	Cl ⁻ Terikat (ppm)	Cl ⁻ Total (ppm)
Bottom ash	15210	1410	16620

Hasil dari tabel tersebut nantinya akan digunakan pada perhitungan klor bebas dan terikat dari benda uji.

Pada *bottom ash* juga dilakukan pengujian berat jenis sesuai dengan (ASTM C128-01). Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 4.5. Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui berat jenis pasir yang digunakan adalah sebesar 2,175 gr/cm³.

Tabel 4.5 Berat Jenis *Bottom Ash* (BA)

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat labu + BA + air (W ₁)	1515	1520
Berat pasir SSD	500	500
Berat labu + air (W ₂)	1250	1245
Berat jenis BA (gr/cm ³) = 500 / (500 + W ₂ - W ₁)	2,128	2,222
Rata-rata (gr/cm³)	2,175	

Pada *bottom ash* juga dilakukan pengujian XRF, hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini. Berdasarkan tabel tersebut dapat dilihat bahwa *bottom ash* memiliki kandungan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, dan CaO yang dominan. Struktur penyusun *bottom ash* tidak terlalu jauh dengan *fly ash*, namun dengan kandungan kalsium yang lebih banyak.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian XRF Bottom Ash PLTU Suralaya

No.	Parameter	Unit	Test Result	Test Method
1	SiO ₂	% wt	47,25	Po - MOM - 01 for XRF
2	Al ₂ O ₃	% wt	17,64	Po - MOM - 01 for XRF
3	Fe ₂ O ₃	% wt	11,30	Po - MOM - 01 for XRF
4	TiO ₂	% wt	0,68	Po - MOM - 01 for XRF
5	CaO	% wt	9,46	Po - MOM - 01 for XRF
6	MgO	% wt	5,10	Po - MOM - 01 for XRF
7	Cr ₂ O ₃	% wt	0,02	Po - MOM - 01 for XRF
8	K ₂ O	% wt	0,92	Po - MOM - 01 for XRF
9	Na ₂ O	% wt	0,92	Po - MOM - 01 for XRF
10	SO ₃	% wt	0,37	Po - MOM - 01 for XRF
11	MnO ₂	% wt	2,49	Po - MOM - 01 for XRF
12	P ₂ O ₅	% wt	0,19	Po - MOM - 01 for XRF
13	LOI	% wt	3,49	Po - MOM - 01 for XRF

4.1.4 Pasir

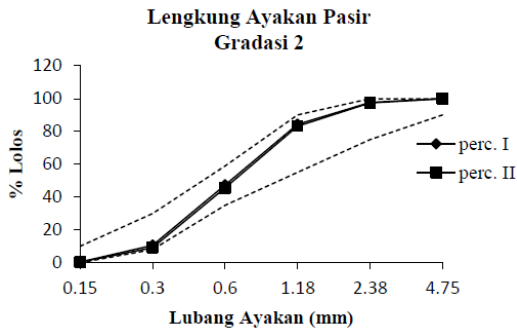
Pada pasir dilakukan beberapa pengujian sebagai berikut.

4.1.4.1 Analisa saringan

Hasil analisa saringan pasir dapat dilihat pada Tabel 4.7. Dari hasil yang didapat lalu digambarkan dalam bentuk grafik (Grafik 4.1). Dan dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa lengkung ayakan pasir berada pada zona 2 lengkung ayakan standar di dalam ASTM C136-01.

Tabel 4.7 Analisa Saringan Pasir

Lubang	Lolos	Percobaan I		Percobaan II		
		Lolos	Kumulatif	Lolos	Kumulatif	
No.	mm	Gram	%	E%	%	E%
4	4,76	0	0,0	100	0,0	100
8	2,38	12	2,4	97,6	2,6	97,4
16	1,19	66	13,3	84,3	14,2	83,2
30	0,59	184	36,9	47,4	37,6	45,6
50	0,297	183	36,7	10,6	36,4	9,2
100	0,149	51	10,2	0,4	8,8	0,4
Pan	Pan	2	0,4	0,0	0,4	0,0



Grafik 4.1 Analisa Saringan Pasir

4.1.4.2 Berat jenis

Hasil dari pengujian berat jenis pasir dapat dilihat pada Tabel 4.8. Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui berat jenis pasir yang digunakan adalah sebesar $2,681 \text{ gr/cm}^3$ dan hasil ini memenuhi syarat berdasarkan ASTM C128-01 yaitu sebesar $2,4\text{-}2,7 \text{ gr/cm}^3$.

Tabel 4.8 Berat Jenis Pasir

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat labu + pasir + air (W_1)	1565	1552
Berat pasir SSD	500	500
Berat labu + air (W_2)	1250	1240
Berat jenis pasir (gr/cm^3) = $500 / (500 + W_2 - W_1)$	2,703	2,660
Rata-rata (gr/cm^3)	2,681	

4.1.4.3 Air resapan

Hasil dari pengujian air resapan pada pasir dapat dilihat pada Tabel 4.9. Berdasarkan tabel tersebut didapatkan air resapan pasir sebesar 1,73%. Dapat disimpulkan bahwa pasir yang digunakan memiliki besar air resapan yang masih memenuhi syarat di dalam ASTM C128-01 yaitu sebesar 1-4%.

Tabel 4.9 Air Resapan Pasir

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat pasir SSD (W_1)	500	500
Berat pasir oven (W_2)	490	493
Air resapan (%) = $((W_1 - W_2) / W_2) \times 100\%$	2,041	1,420
Rata-rata (%)	1,730	

4.1.4.4 Kebersihan terhadap bahan organik

Hasil dari pengujian kebersihan pasir terhadap bahan organik dapat dilihat pada Tabel 4.10. Berdasarkan ASTM C40-04 warna hasil percobaan tidak boleh lebih tua dari warna zat

pembandingan yaitu NaOH. Dari hasil percobaan pada Tabel 4.10 didapatkan warna yang timbul adalah putih bening, sehingga pasir yang digunakan memenuhi syarat

Tabel 4.10 Kebersihan Pasir terhadap Bahan Organik

Analisa	Percobaan I	Percobaan II
Volume pasir (cc)	130	130
Larutan NaOH (cc)	70	70
Warna yang timbul	Putih bening	Putih bening

4.1.4.5 Kebersihan terhadap lumpur/pencucian

Hasil dari pengujian kebersihan pasir terhadap lumpur/pencucian dapat dilihat pada Tabel 4.11. Berdasarkan ASTM C117-03 batas maksimum kebersihan pasir terhadap material yang lebih halus dari ayakan No. 200 (75 μ m) untuk klasifikasi beton umum adalah sebesar 5% dari total sampel percobaan. Dari hasil pada Tabel 4.11 didapatkan kadar lumpur sebesar 2,6%, jadi pasir yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4.11 Kebersihan Pasir terhadap Lumpur/Pencucian

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat pasir kering (W_1)	500	500
Berat pasir bersih kering (W_2)	486	488
Kadar lumpur (%) = $((W_1 - W_2)/W_1) \times 100\%$	2,80	2,40
Rata-rata (%)	2,60	

4.1.4.6 Kelembapan

Hasil dari pengujian kelembapan pasir dapat dilihat pada Tabel 4.12. Berdasarkan ASTM C566-97 (Reapproved 2004) mengenai kelembapan pasir disebutkan bahwa pasir dinyatakan benar-benar kering kelembabannya jika mencapai angka kurang dari 0,1%. Dari hasil pada Tabel 4.12 didapatkan besar kelembapan pasir sebesar 0,9%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pasir masih belum benar-benar kering.

Tabel 4.12 Kelembapan Pasir

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat pasir asli (W_1)	500	500
Berat pasir kering oven (W_2)	495	496
Kelembapan pasir (%) = $((W_1 - W_2) / W_1) \times 100\%$	1,00	0,80
Rata-rata (%)	0,90	

4.1.5 Batu pecah

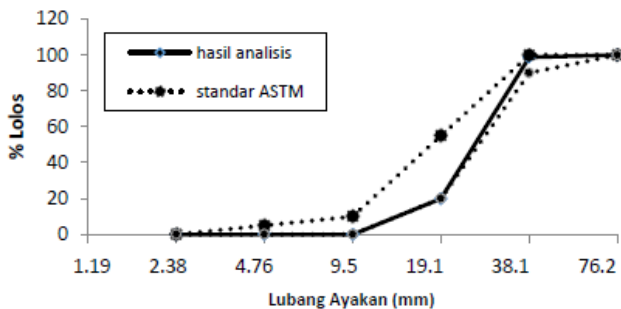
Pada batu pecah dilakukan beberapa pengujian sebagai berikut.

4.1.5.1 Analisa saringan

Hasil analisa saringan batu pecah dapat dilihat pada Tabel 4.13. Dari hasil yang didapat lalu digambarkan dalam bentuk grafik (Grafik 4.2). Dari hasil analisa saringan batu pecah pada tabel tersebut didapat nilai modulus kehalusan butir (MKB) sebesar 6,81, dan hasil ini memenuhi standar MKB agregat kasar sebesar 6,0-7,1 berdasarkan ASTM C136-01.

Tabel 4.13 Analisa Saringan Batu Pecah

Lubang Ayakan	Batu Pecah				
		Tertahan			Lolos
No.	mm	Gram	E%	Kumulatif E%	%
3"	76,2	-	-	-	100
3/2"	38,1	-	-	-	100
3/4"	19,1	60	1,2	1,2	98,8
3/8"	9,5	3945	78,9	80,1	19,9
No. 4	4,76	995	19,9	100	0
No. 8	2,38	0	0	100	0
No. 16	1,1	0	0	100	0
No. 30	0,59	0	0	100	0
No. 50	0,297	0	0	100	0
No. 100	0,149	0	0	100	0
Pan	Pan	0	0	-	-
Jumlah		5000	100	681,3	
		Fm kr =	6,81		



Grafik 4.2 Analisa Saringan Batu Pecah

4.1.5.2 Berat jenis

Hasil dari pengujian berat jenis batu pecah dapat dilihat pada Tabel 4.14. Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui

berat jenis batu pecah yang digunakan adalah sebesar 2,636 gr/cm^3 dan hasil ini memenuhi syarat berdasarkan ASTM C128-01 yaitu sebesar 2,4-2,7 gr/cm^3 .

Tabel 4.14 Berat Jenis Batu Pecah

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat batu pecah mula-mula (W_1)	3000	3000
Berat natu pecah di air (W_2)	1863	1861
Berat jenis batu pecah (gr/cm^3) = $W_1 / (W_1 - W_2)$	2,639	2,634
Rata-rata (gr/cm^3)	2,636	

4.1.5.3 Air resapan

Hasil dari pengujian air resapan pada pasir dapat dilihat pada Tabel 4.15. Berdasarkan tabel tersebut didapatkan air resapan batu pecah sebesar 1,266%. Dapat disimpulkan bahwa batu pecah yang digunakan memiliki besar air resapan yang masih memenuhi syarat di dalam ASTM C127-01 yaitu sebesar 1-2%.

Tabel 4.15 Air Resapan Batu Pecah

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat batu pecah SSD	3000	3000
Berat batu pecah oven (W)	2965	2960
Air resapan (%) = $((3000-W)/W) \times 100\%$	1,180	1,351
Rata-rata (%)	1,266	

4.1.5.4 Kebersihan terhadap lumpur/pencucian

Hasil dari pengujian kebersihan batu pecah terhadap lumpur/pencucian dapat dilihat pada Tabel 4.16. Berdasarkan ASTM C117-03 batas maksimum kebersihan batu pecah terhadap lumpur/pencucian adalah sebesar 1% dari total sampel percobaan. Dari hasil pada tabel tersebut didapatkan kadar lumpur sebesar 0,8%, jadi batu pecah yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4.16 Kebersihan Batu Pecah terhadap Lumpur/Pencucian

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat batu pecah kering (W_1)	1000	1000
Berat batu pecah bersih kering (W_2)	991	993
Kadar lumpur (%) = $((W_1 - W_2) / W_1) \times 100\%$	0,9	0,7
Rata-rata (%)	0,8	

4.1.5.5 Kelembapan

Hasil dari pengujian kelembapan pasir dapat dilihat pada Tabel 4.17. Berdasarkan ASTM C566-97 (Reapproved 2004) disebutkan bahwa batu pecah dinyatakan benar-benar kering kelembabannya jika mencapai angka kurang dari 0,1%. Dari hasil pada tabel tersebut didapatkan besar kelembapan pasir sebesar 0,8%, sehingga dapat disimpulkan bahwa batu pecah masih belum benar-benar kering.

Tabel 4.17 Kelembapan Batu Pecah

Analisa	Percobaan I (gram)	Percobaan II (gram)
Berat batu pecah asli (W_1)	3000	3000
Berat batu pecah kering oven (W_2)	2974	2978
Kelembapan pasir (%) = $((W_1 - W_2) / W_1) \times 100\%$	0,87	0,73
Rata-rata (%)	0,80	

4.2 Sea Water Curing

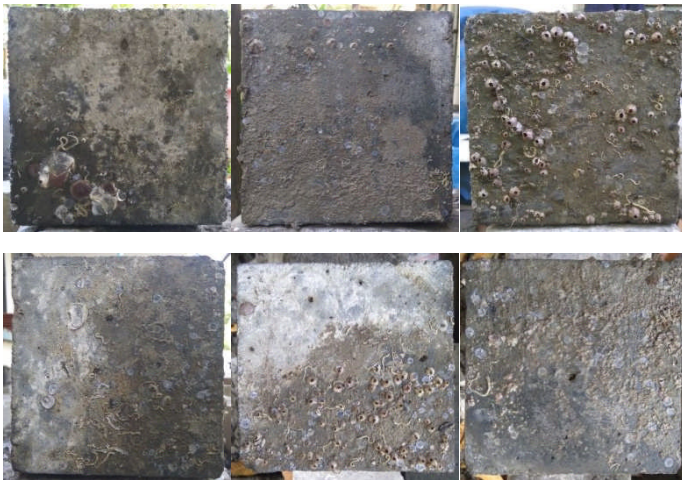
Metode perawatan *sea water curing* dilakukan di pesisir pantai kenjeran, tepatnya berada di pesisir pantai yang berada pada perumahan warga RW 03 Nambangan Perak seperti pada Gambar 4.1.



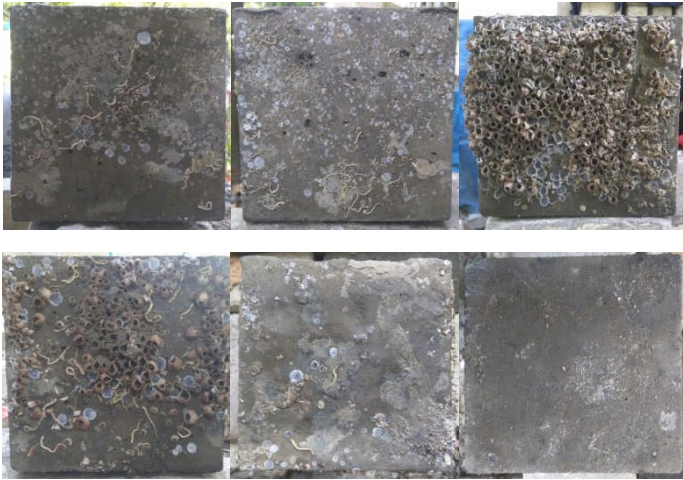
Gambar 4.1 Lokasi Sea Water Curing

Setelah direndam di dalam air laut ternyata terdapat makhluk hidup berupa kerang-kerangan yang menempel pada permukaan beton yang terus bertambah seiring dengan lamanya perendaman beton di dalam air laut tersebut. Berikut merupakan

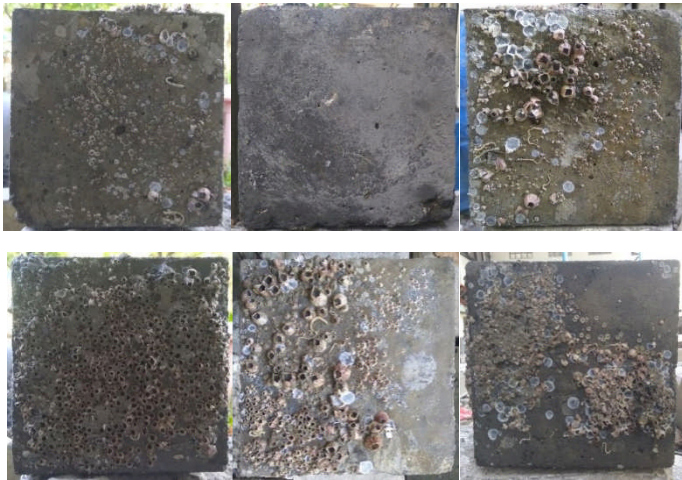
gambar-gambar dari masing-masing beton setelah direndam dengan total umur 118 hari di air laut.



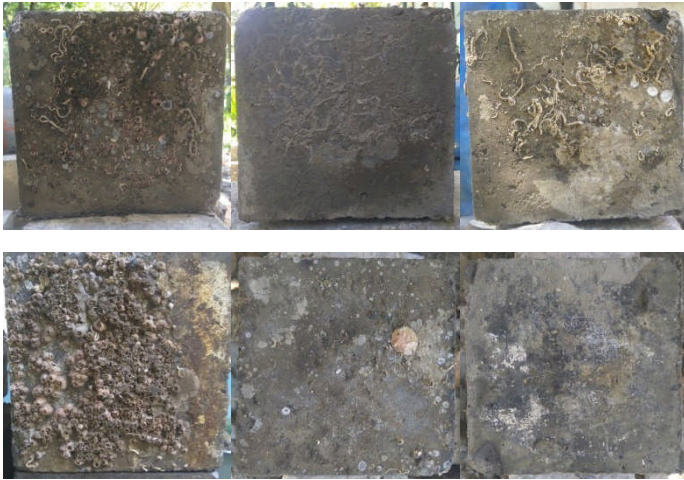
Gambar 4.2 PN-28 (*Moist* Curing - 90 Hari Perendaman)



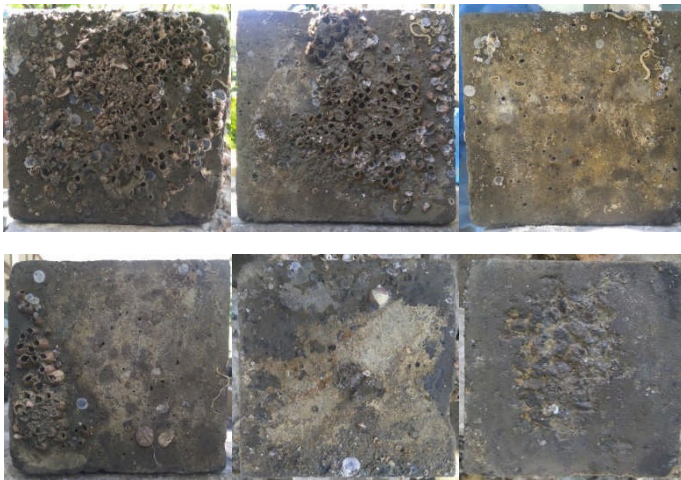
Gambar 4.3 GN-12-28 (*Moist Curing* - 90 Hari Perendaman)



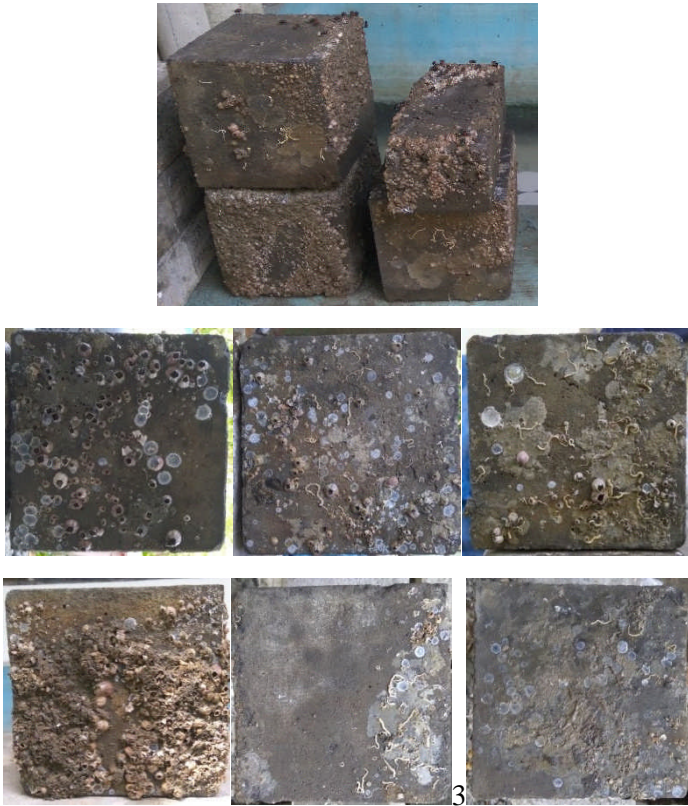
Gambar 4.4 GN-12-1 (118 Hari Perendaman)



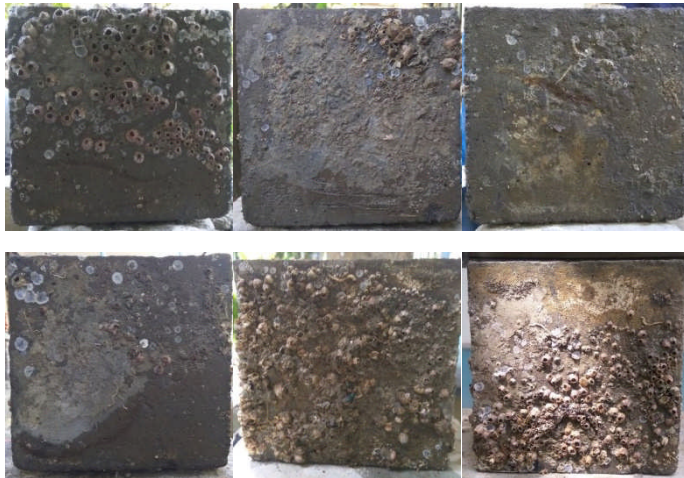
Gambar 4.5 GS-12-28 (*Moist Curing* - 90 Hari Perendaman)



Gambar 4.6 GS-12-1 (118 Hari Perendaman)



Gambar 4.7 GN-10-28 (*Moist Curing* - 90 Hari Perendaman)



Gambar 4.8 GN-10-1 (118 Hari Perendaman)



Gambar 4.9 GS-10-28 (*Moist Curing* - 90 Hari Perendaman)



Gambar 4.10 GS-10-1 (118 Hari Perendaman)

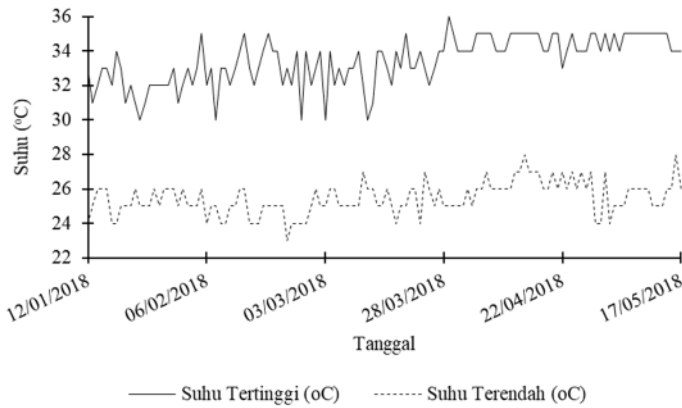
Berdasarkan Gambar 4.2 sampai Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa beton dihinggapi dengan makhluk hidup teritip (*barnacle*) yang disebut dengan peristiwa *biofouling*. Namun terdapat beberapa permukaan yang tidak dihinggapi, hal ini disebabkan karena beton dibungkus dengan waring saat ditaruh di air laut sehingga dapat menghalangi makhluk hidup yang ingin masuk menghinggapi beton. Peristiwa *biofouling* ini merugikan pada beton, karena dapat membuat beton menjadi keropos (Hartono dkk., 2012). Namun peristiwa beton

geopolimer yang dihinggapi oleh makhluk hidup menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat menjadi rumah bagi makhluk hidup laut khususnya jenis kerang-kerangan, yang juga mengartikan bahwa beton geopolimer tidak beracun dan berbahaya bagi biota laut.

Pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.10 dapat dilihat juga bahwa jumlah *barnacle* lebih banyak terdapat pada permukaan beton geopolimer daripada beton OPC. Peristiwa beton geopolimer yang dihinggapi oleh makhluk hidup menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat menjadi rumah bagi makhluk hidup laut khususnya jenis kerang-kerangan, yang juga mengartikan bahwa beton geopolimer tidak beracun dan berbahaya bagi biota laut, serta berpotensi juga digunakan sebagai terumbu karang buatan.

4.2.1 Suhu selama *sea water curing*

Pada perawatan di pantai kenjeran memiliki suhu yang berbeda setiap harinya. Suhu selama penelitian ini yang berlangsung dari 12 Januari 2018 sampai 17 Mei 2018 dapat dilihat pada Gambar 4.11. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa beton dirawat pada suhu tertinggi yaitu 36°C dan paling rendah pada suhu 23°C, dengan rata-rata suhu perawatan berkisar antara 25°C sampai 33°C.



Gambar 4.11 Suhu Selama Masa Perawatan (Sumber: AccuWeather)

4.3 Pengujian Beton

Hasil dari pengujian terhadap beton dibahas dalam subbab-subbab berikut ini.

4.3.1 Analisa pengujian slump

Analisa dari pengujian slump dapat dilihat pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 4.12 Pengujian Slump Beton OPC

Berdasarkan Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa slump beton OPC dengan campuran 25% *bottom ash* dari agregat halus adalah sebesar 15 cm.



Gambar 4.13 Pengujian Slump Beton Geopolimer 12M Air Suling

Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa slump beton geopolimer 12M dengan air suling adalah sebesar 19 cm.



Gambar 4.14 Pengujian Slump Beton Geopolimer 12M Air Laut

Berdasarkan Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa slump beton geopolimer 12M dengan air laut adalah sebesar 23,5 cm.



Gambar 4.15 Pengujian Slump Beton Geopolimer 10M Air Suling

Berdasarkan Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa slump beton geopolimer 10M dengan air suling adalah sebesar 23 cm.



Gambar 4.16 Pengujian Slump Beton Geopolimer 10M Air Laut

Berdasarkan Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa slump beton geopolimer 10M dengan air laut adalah sebesar 27 cm.

Secara keseluruhan berdasarkan Gambar 4.12 sampai Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa penggunaan air laut pada beton geopolimer memberikan nilai slump yang lebih besar daripada beton geopolimer dengan air suling.

4.3.2 Analisa kuat tekan

Hasil dari pengujian kuat tekan dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.18 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton (a)

PN-28				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	33,172	37,032	42,340	39,445
Standar Deviasi (MPa)	0,553	1,106	1,880	0,957
Kategori	Terbaik	Terbaik	Baik	Terbaik

GN-12-28				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	33,293	35,464	41,978	39,927
Standar Deviasi (MPa)	0,957	1,577	1,305	0,209
Kategori	Terbaik	Sangat Baik	Terbaik	Terbaik

GN-12-1				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	33,052	33,956	37,394	35,585
Standar Deviasi (MPa)	0,553	1,451	1,370	1,710
Kategori	Terbaik	Sangat Baik	Terbaik	Sangat Baik

GS-12-28				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	28,649	33,775	37,877	36,188
Standar Deviasi (MPa)	0,997	1,045	0,418	0,627
Kategori	Terbaik	Terbaik	Terbaik	Terbaik

GS-12-1				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	27,322	31,845	33,172	31,604
Standar Deviasi (MPa)	1,007	1,448	1,045	0,836
Kategori	Terbaik	Sangat Baik	Terbaik	Terbaik

GN-10-28				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	22,798	27,985	29,312	26,900
Standar Deviasi (MPa)	0,362	1,507	0,724	0,836
Kategori	Terbaik	Sangat Baik	Terbaik	Terbaik

GN-10-1				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	22,075	27,081	27,624	22,678
Standar Deviasi (MPa)	0,627	0,997	1,671	0,836
Kategori	Terbaik	Terbaik	Sangat Baik	Terbaik

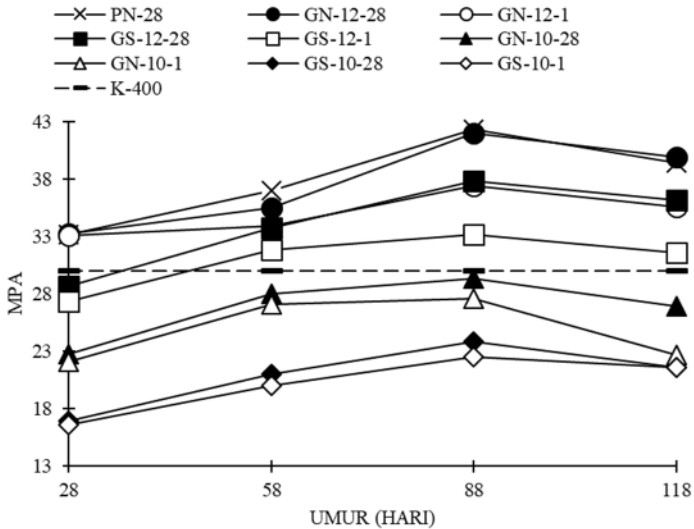
GS-10-28				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	16,948	21,049	23,884	21,592
Standar Deviasi (MPa)	0,635	0,377	0,362	1,106
Kategori	Terbaik	Terbaik	Terbaik	Terbaik

GS-10-1				
Analisa	Umur			
	28 Hari	58 Hari	88 Hari	118 Hari
Tekan (Mpa)	16,646	20,024	22,557	21,592
Standar Deviasi (MPa)	0,362	0,418	0,753	1,271
Kategori	Terbaik	Terbaik	Terbaik	Terbaik

Tabel 4.19 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton (b)

No.	Tipe	Tekan (MPa)			
		28	58	88	118
1	PN-28	33,2	37,0	42,3	39,4
2	GN-12-28	33,3	35,5	42,0	39,9
3	GN-12-1	33,1	34,0	37,4	35,6
4	GS-12-28	28,6	33,8	37,9	36,2
5	GS-12-1	27,3	31,8	33,2	31,6
6	GN-10-28	22,8	28,0	29,3	26,9
7	GN-10-1	22,1	27,1	27,6	22,7
8	GS-10-28	16,9	21,0	23,9	21,6
9	GS-10-1	16,6	20,0	22,6	21,6

Dari hasil pada Tabel 4.19 dapat dibentuk grafik menjadi grafik berikut ini.



Grafik 4.3 Hasil Analisa Kuat Tekan Beton

Berdasarkan Grafik 4.3 dapat dilihat bahwa kuat tekan beton meningkat sampai umur 88 hari dan menurun sampai umur 118 hari. Penurunan kuat tekan ini disebabkan oleh kalsium oksida dalam *fly ash* akan bereaksi dengan NaCl untuk membentuk kalsium silikat klorida ($\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2$) (Halim dkk, 2017). Pada umur 28 hari kuat tekan tertinggi terdapat pada beton GN-12-28 yaitu sebesar 33,3 MPa, pada umur 58 hari kuat tekan tertinggi terdapat pada beton PN-28 sebesar 37,0 MPa, pada umur 88 hari kuat tekan tertinggi terdapat pada beton PN-28 sebesar 42,3 MPa, dan pada umur 118 hari kuat tekan tertinggi terdapat pada beton GN-12-28 yaitu sebesar 39,9 MPa. Kuat tekan terendah untuk setiap umur terdapat pada GS-10-1 yaitu 16,6 MPa (28 hari); 20,0 MPa (58 hari); 22,6 MPa (88 hari); dan 21,6 MPa (118 hari). Dan beton yang memenuhi

persyaratan mutu mendekati mutu K-400 pada umur 28 hari terdapat pada PN-28, GN-12-28, dan GN-12-1; dan pada umur 58 hari sampai 118 hari terdapat pada PN-28, GN-12-28, GN-12-1, GS-12-28, dan GS-12-1.

Disimpulkan pada Grafik 4.3 bahwa beton getopolimer 12M baik dengan air suling maupun air laut memiliki kuat tekan lebih tinggi dari beton geopolimer 10M baik dengan air suling maupun air laut, hasil ini dikarenakan beton geopolimer dengan molaritas yang lebih tinggi menghasilkan kuat tekan yang tinggi juga (Fansuri dkk, 2012; Ekaputri dan Triwulan, 2013) dan hasil ini berlaku juga untuk beton geopolimer yang dibuat dengan air laut pada campurannya. Kuat tekan yang tinggi pada molaritas yang lebih tinggi disebabkan oleh tingkat disolusi (melarut) lebih cepat dan lebih tinggi dari silikat dan aluminat di dalam *fly ash*. Selama proses geopolimerisasi, silikat dan aluminat dalam *fly ash* dilarutkan oleh NaOH dan membentuk produk geopolimerisasi natrium-alumina-silikat yang berkontribusi pada kekuatan dari matriks geopolimer (Fansuri dkk, 2012).

Kuat tekan tertinggi untuk masing-masing tipe beton dicapai pada umur 88 hari. Perlakuan *moist curing* menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dari beton yang direndam di air laut pada umur 1 hari, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Halim dkk (2017). Penggunaan air laut pada campuran beton geopolimer memberikan kuat tekan yang lebih rendah dari beton geopolimer dengan air suling. Beton yang memenuhi persyaratan mendekati mutu K-400 terdapat pada beton OPC dan beton geopolimer air suling 12M pada umur 28 hari; dan pada umur 58 hari beton geopolimer air laut 12M mampu mencapai mutu ini.

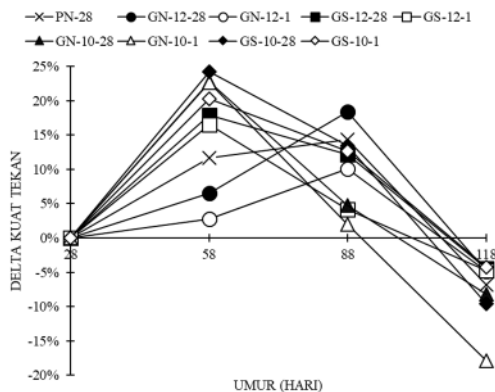
4.3.2.1 Analisa peningkatan kuat tekan

Dilakukan juga analisa terhadap peningkatan kuat tekan dari masing-masing tipe beton untuk mengetahui seberapa besar kenaikan dan penurunan untuk setiap umur dari masing-masing beton. Hasil peningkatan kuat tekan dari tiap-tiap beton dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Peningkatan Kuat Tekan beton

No.	Tipe	Tekan (MPa)			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,0%	11,6%	14,3%	-6,8%
2	GN-12-28	0,0%	6,5%	18,4%	-4,9%
3	GN-12-1	0,0%	2,7%	10,1%	-4,8%
4	GS-12-28	0,0%	17,9%	12,1%	-4,5%
5	GS-12-1	0,0%	16,6%	4,2%	-4,7%
6	GN-10-28	0,0%	22,8%	4,7%	-8,2%
7	GN-10-1	0,0%	22,7%	2,0%	-17,9%
8	GS-10-28	0,0%	24,2%	13,5%	-9,6%
9	GS-10-1	0,0%	20,3%	12,7%	-4,3%

Berdasarkan tabel tersebut maka dapat dibentuk grafik seperti grafik berikut ini.



Grafik 4.4 Peningkatan Kuat Tekan Beton

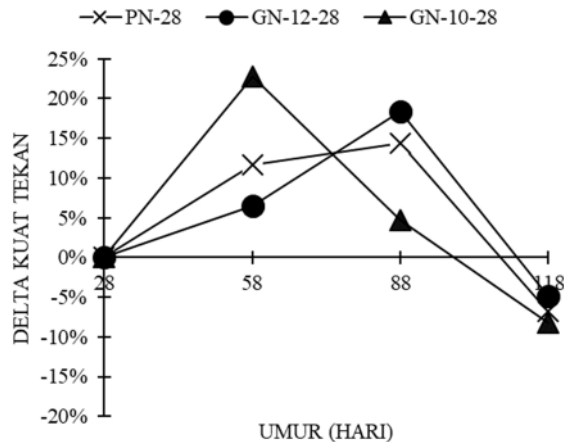
Berdasarkan Grafik 4.4 dapat dilihat bahwa peningkatan kuat tekan tertinggi dari umur 28 hari ke umur 58 hari terdapat pada beton GS-10-28 sebesar 24,2% dan dari umur 58 hari ke umur 88 hari terdapat pada beton GN-12-28 sebesar 18,4%. Sementara itu penurunan terkecil dari umur 88 hari ke umur 118 hari terdapat pada beton GS-10-1 sebesar 4,3%. Berdasarkan grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa beton OPC dan beton geopolimer 12M mencapai peningkatan kuat tekannya pada umur 88 hari, sementara beton lainnya mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari.

4.3.2.2 Pengaruh metode *curing* terhadap peningkatan kuat tekan

Berdasarkan Grafik 4.4 tersebut dapat dilakukan analisis pengaruh dari metode *curing* sebagai berikut.

a) PN dengan GN-MOIST

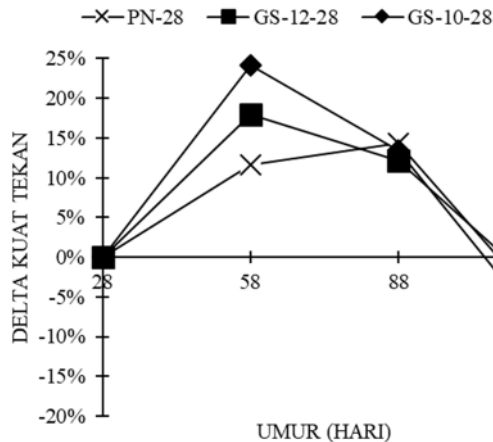
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton OPC dengan beton geopolimer air suling dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.5. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer GN-12-28 mencapai peningkatan tertingginya pada umur ke 88 hari yaitu sebesar 18,4% yang sama juga dengan beton OPC yang mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari sebesar 14,3%. Sementara itu beton geopolimer GN-10-28 mencapai peningkatan tertingginya pada umur ke 58 hari yaitu sebesar 24,2%. Penurunan terbanyak pada umur 118 hari terdapat pada beton geopolimer GN-10-28 yaitu sebesar 8,2%. Secara keseluruhan peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GN-10-28 pada umur 58 hari sebesar 22,8%.



Grafik 4.5 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Suling (*Moist Curing*)

b) PN dengan GS-MOIST

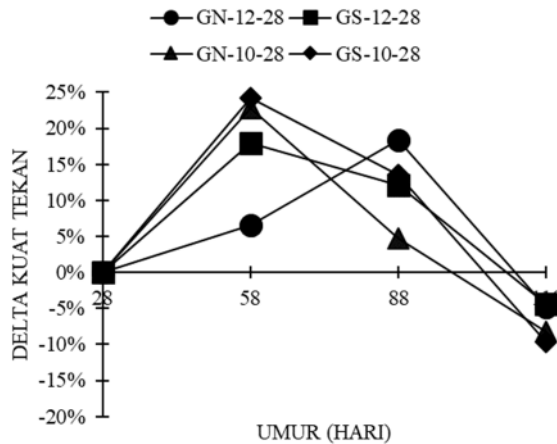
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton OPC dengan beton geopolimer air laut dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.6. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa kedua beton ini mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur ke 58 hari, yaitu sebesar 17,9% untuk GS-12-28 dan 24,2% untuk GS-10-28; serta penurunan terbanyak pada umur 118 hari terdapat pada beton geopolimer GS-10-28 yaitu sebesar 9,6%. Dapat dilihat juga bahwa kedua beton ini memiliki pola kenaikan dan penurunan yang sama. Sementara itu beton OPC mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari sebesar 14,3%. Secara keseluruhan peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GS-10-28 pada umur 58 hari sebesar 24,2%.



Grafik 4.6 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Laut (*Moist Curing*)

c) GN-MOIST dengan GS-MOIST

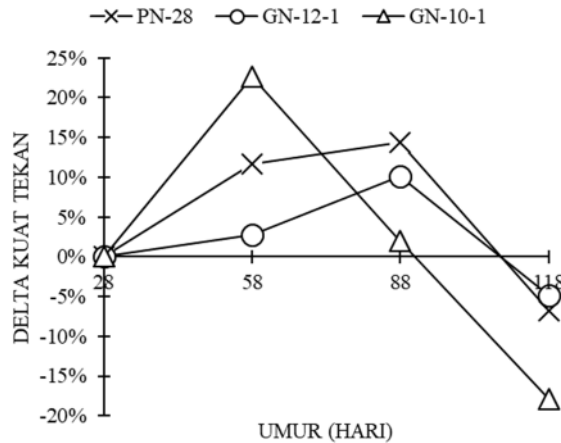
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton geopolimer air suling dan air laut dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.7. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer air laut mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari dan beton geopolimer air suling mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari (10M) dan 88 hari (12M). Namun secara keseluruhan pada bagian ini peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GS-10-28 pada umur 28 hari sebesar 24,2%.



Grafik 4.7 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut (*Moist Curing*)

d) PN dengan GN-1SWC

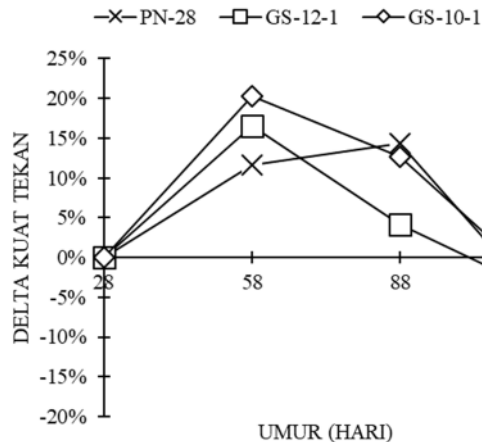
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton OPC dengan beton geopolimer air suling dengan perlakuan pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.8. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer GN-12-1 mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari sebesar 10,1% yang sama juga dengan beton OPC mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari sebesar 14,3%, beton GN-10-1 mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari sebesar 22,7%, serta penurunan terbesar pada umur 118 hari terdapat pada beton geopolimer GN-10-1 sebesar 17,9%. Secara keseluruhan peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GN-10-1 pada umur 58 hari sebesar 22,7%.



Grafik 4.8 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Normal Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

e) PN dengan GS-1SWC

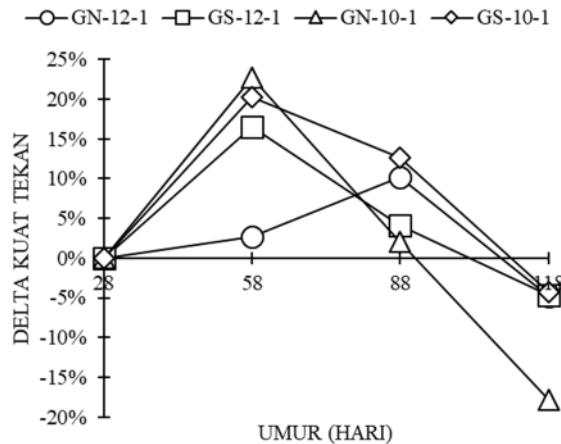
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton OPC dengan beton geopolimer air laut dengan perlakuan pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.9. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer GS-12-1 memiliki peningkatan kuat tekan tertinggi pada umur 58 hari sebesar 16,6% dan beton geopolimer GS-10-1 juga mencapai kenaikan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari sebesar 20,3%; serta penurunan terbesar pada umur 118 hari terdapat pada beton OPC sebesar 6,8%. Dapat dilihat juga bahwa kedua beton ini memiliki sifat kenaikan dan penurunan kuat tekan yang sama. Secara keseluruhan pada bagian ini peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GS-10-1 sebesar 20,3% pada umur 58 hari.



Grafik 4.9 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton OPC dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

f) GN-1SWC dengan GS-1SWC

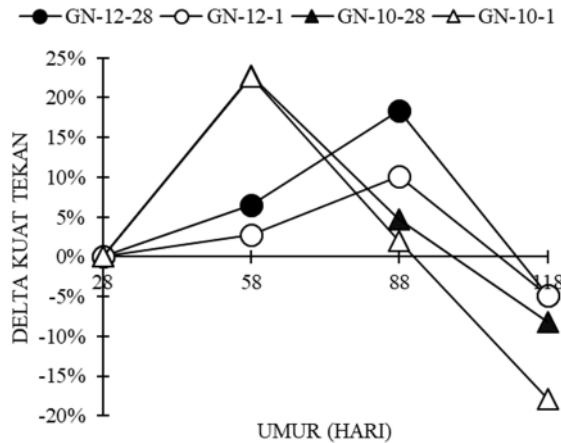
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton geopolimer air suling dan air laut yang direndam di air laut pada umur 1 hari. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.10. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer air laut mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari dan beton geopolimer air suling mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari (10M) dan 88 hari (12M). Namun secara keseluruhan pada bagian ini peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GN-10-1 pada umur 58 hari sebesar 22,7%.



Grafik 4.10 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut Diredam di Laut pada Umur 1 Hari

g) GN-MOIST dengan GN-1SWC

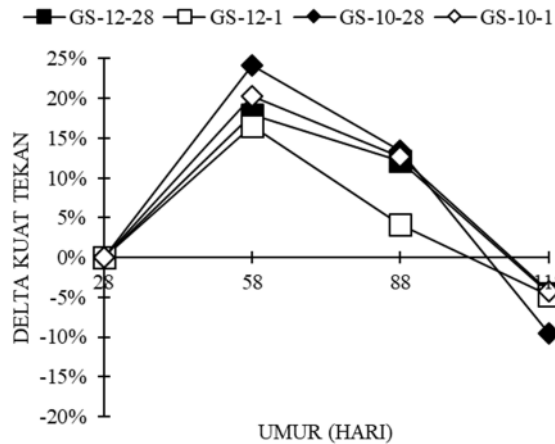
Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton geopolimer air suling dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu diredam di air laut dan yang pada umur 1 hari langsung diredam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.11. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer 10M mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 58 hari dan beton geopolimer 12 M mencapai peningkatan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari. Perlakuan *moist curing* dan perendaman di laut pada umur 1 hari tidak teralu berpengaruh pada peningkatan kuat tekan. Secara keseluruhan peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GN-10-28 sebesar 22,8% pada umur 58 hari.



Grafik 4.11 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Suling dengan *Moist Curing* dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

h) GS-MOIST dengan GS-1SWC

Analisa berikut merupakan perbandingan dari beton geopolimer air laut dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut dan yang pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Perbedaan peningkatan kuat tekan dari analisa ini dapat dilihat pada Grafik 4.12. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa beton geopolimer air laut mencapai peningkatan kuat tekant tertingginya pada umur 58 hari. Perlakuan *moist curing* dan perendaman di laut pada umur 1 hari tidak terlalu memberikan perbedaan yang signifikan. Peningkatan kuat tekan tertinggi dimiliki oleh GS-10-28 sebesar 24,2% pada umur 58 hari.



Grafik 4.12 Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Geopolimer Air Laut dengan *Moist Curing* dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

Berdasarkan Grafik 4.5 sampai Grafik 4.12 dapat disimpulkan bahwa perlakuan *moist curing* di awal dengan direndam di air laut pada umur 1 hari tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada peningkatan kuat tekan dari masing-masing variasi beton, namun menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Secara umum kenaikan kuat tekan yang terbesar terdapat pada umur 58 hari, namun hanya berbeda dengan beton geopolimer air suling 12M dan beton OPC yang mencapai kenaikan kuat tekan tertingginya pada umur 88 hari. Beton geopolimer dengan air laut dan perendaman yang lebih awal di air laut memberikan peningkatan kuat tekan yang lebih tinggi, hal ini karena kandungan klorida pada air laut menaikkan kuat tekan beton pada masa-masa awal perendaman (Hartono dkk, 2012).

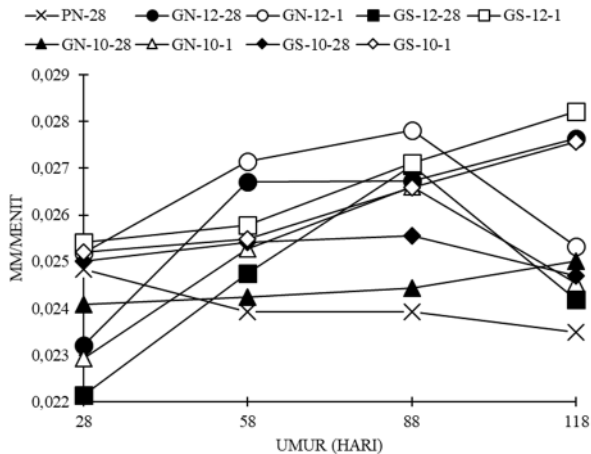
4.3.3 Analisa keausan

Hasil dari pengujian keausan paving dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.21 Hasil Pengujian Keausan Paving

No.	Tipe	Aus (mm/menit)			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,0248	0,0239	0,0239	0,0235
2	GN-12-28	0,0232	0,0267	0,0267	0,0276
3	GN-12-1	0,0252	0,0272	0,0278	0,0253
4	GS-12-28	0,0221	0,0247	0,0271	0,0242
5	GS-12-1	0,0254	0,0258	0,0271	0,0282
6	GN-10-28	0,0241	0,0242	0,0244	0,0250
7	GN-10-1	0,0229	0,0253	0,0266	0,0245
8	GS-10-28	0,0250	0,0254	0,0256	0,0247
9	GS-10-1	0,0252	0,0255	0,0266	0,0276

Berdasarkan tabel tersebut maka dapat dibuat grafik sebagai berikut.



Grafik 4.13 Hasil Pengujian Keausan Paving

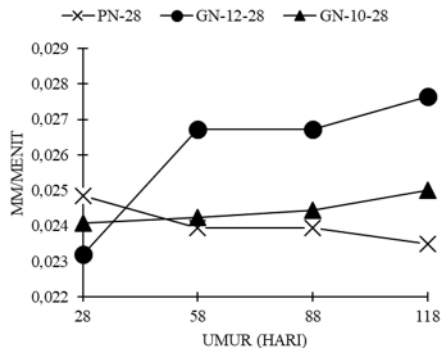
Berdasarkan Grafik 4.13 dapat dilihat bahwa keausan terbesar terdapat pada beton geopolimer air laut GS-12-1 pada umur 118 hari yaitu sebesar 0,0282 mm/menit, serta keausan terkecil pada umur 118 hari dimiliki oleh beton OPC PN-28.

4.3.3.1 Pengaruh metode *curing* terhadap keausan paving

Berdasarkan Grafik 4.13 dapat dilakukan analisis terhadap pengaruh metode *curing* terhadap keausan paving sebagai berikut.

a) PN dengan GN-MOIST

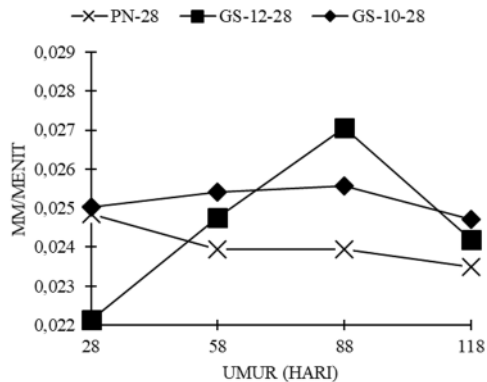
Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving OPC dengan paving geopolimer air suling dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.14. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa keausan paving geopolimer air suling GN-12-28 dan GN-10-28 terus meningkat sampai umur 118 hari; keausan terbesar terdapat pada GN-12-28 yaitu sebesar 0,0276 mm/menit.



Grafik 4.14 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Suling (*Moist Curing*)

b) PN dengan GS-MOIST

Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving OPC dengan beton geopolimer air laut dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.15. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa keausan paving geopolimer air laut meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun pada umur 118 hari. Keausan paving terbesar terdapat pada paving GS-12-28 yaitu sebesar 0,0271 mm/menit, serta pada umur 118 hari keausan paving terkecil terdapat pada PN-28 juga yaitu sebesar 0,0242 mm/menit.

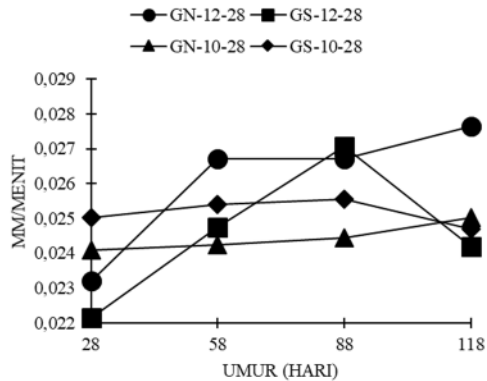


Grafik 4.15 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Laut (*Moist Curing*)

c) GN-MOIST dengan GS-MOIST

Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving geopolimer air suling dan air laut dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.16. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perlakuan *moist curing* di awal mengakibatkan beton geopolimer dengan air suling (GN-12-28 dan GN-10-28)

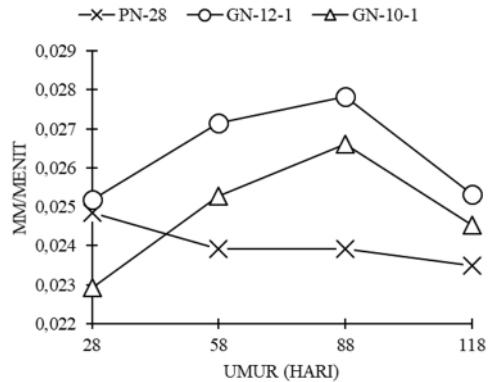
terus meningkat sampai umur 118 hari dan beton geopolimer dengan air laut (GS-12-28 dan GS-10-28) meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari.



Grafik 4.16 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut (*Moist Curing*)

d) PN dengan GN-1SWC

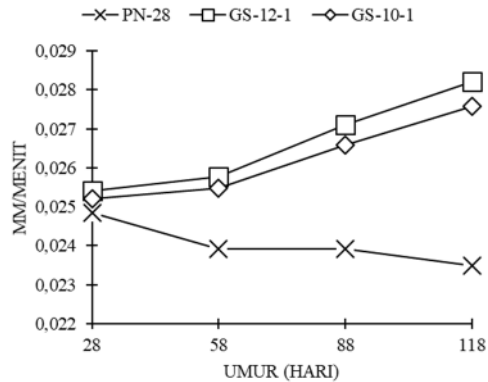
Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving OPC dengan paving geopolimer air suling dengan perlakuan pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.17. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa keausan paving geopolimer air suling GN-12-1 dan GN-10-1 terus meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari. Keausan terbesar pada umur 88 hari terdapat pada GN-12-1 sebesar 0,0278 mm/menit dan keausan terkecil pada umur 118 hari terdapat pada GN-10-1 sebesar 0,0245 mm/menit.



Grafik 4.17 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Suling Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

e) PN dengan GS-1SWC

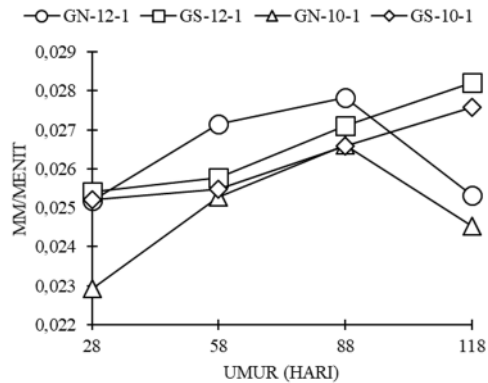
Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving OPC dengan paving geopolimer air laut dan pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.18. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa keausan paving geopolimer GS-12-1 dan GS-10-1 terus meningkat sampai umur 118 hari; dengan keausan terbesar pada umur 118 hari terdapat pada GS-12-1 sebesar 0,0282 mm/menit.



Grafik 4.18 Perbandingan Keausan Paving OPC dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

f) GN-1SWC dengan GS-1SWC

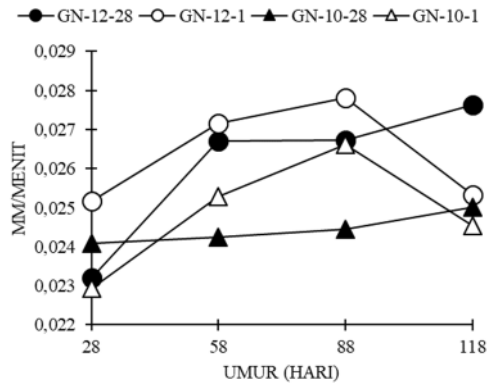
Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving geopolimer air suling dan air laut yang direndam di air laut pada umur 1 hari. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.19. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di air laut pada umur 1 hari mengakibatkan keausan paving geopolimer air laut (GS-12-1 dan GS-10-1) terus meningkat sampai umur 118 hari; namun keausan paving geopolimer air suling (GN-12-1 dan GN-10-1) meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari.



Grafik 4.19 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan Geopolimer Air Laut Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

g) GN-MOIST dengan GN-1SWC

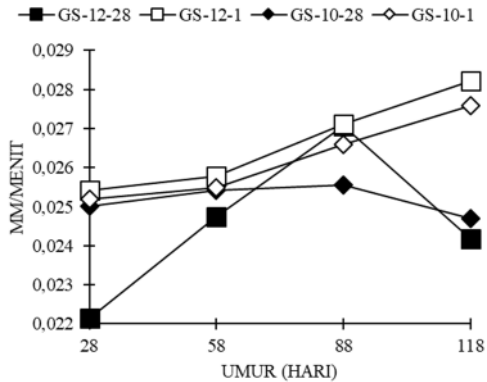
Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving geopolimer air suling dengan perlakuan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut dan yang pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.20. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perlakuan *moist curing* di awal mengakibatkan keausan paving geopolimer air suling (GN-12-28 dan GN-10-28) meningkat terus sampai umur 118 hari; sementara itu perlakuan perendaman di air pada umur 1 hari mengakibatkan keausan paving geopolimer air suling (GN-12-1 dan GN-10-1) meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari.



Grafik 4.20 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Suling dengan *Moist Curing* dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

h) GS-MOIST dengan GS-1SWC

Analisa berikut merupakan perbandingan dari paving geopolimer dengan air laut dengan *moist curing* selama 28 hari lalu direndam di air laut dan yang pada umur 1 hari langsung direndam di air laut. Hasil pengujian paving dapat dilihat pada Grafik 4.21. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perlakuan *moist curing* di awal mengakibatkan keausan paving geopolimer air laut (GS-12-28 dan GS-10-28) meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari; sementara itu perlakuan perendaman di air pada umur 1 hari mengakibatkan keausan paving geopolimer air laut (GS-12-1 dan GS-10-1) meningkat sampai umur 118 hari.



Grafik 4.21 Perbandingan Keausan Paving Geopolimer Air Laut dengan Moist Curing dan Direndam di Laut pada Umur 1 Hari

Berdasarkan Grafik 4.14 sampai Grafik 4.21 dapat disimpulkan bahwa perlakuan *moist curing* di awal dengan perendaman di air laut pada umur 1 hari memberikan pengaruh yang berbanding terbalik dari paving geopolimer air suling dengan geopolimer air laut. Pada paving geopolimer air suling perlakuan *moist curing* di awal mengakibatkan keausan meningkat terus sampai umur 118 hari dan pada paving geopolimer air laut keausan paving meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari; sementara itu perlakuan perendaman pada air laut pada umur 1 hari mengakibatkan keausan paving geopolimer air suling meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari dan pada paving geopolimer air laut keausan paving meningkat terus sampai umur 118 hari.

Keberadaan teritip pada permukaan beton memberikan pengaruh terhadap keausan beton, karena keberadaan teritip ini menghasilkan chitin yang bersifat keras yang dapat memperkecil keausan paving, namun ketika teritip ini terlepas dari

permukaan beton karena gelombang ombak akan menyisahkan rongga yang dapat membuat permukaan beton menjadi keropos dan memperbesar nilai keausan (Hartono dkk, 2012).

Secara keseluruhan nilai keausan paving sampai umur 118 hari masih masuk ke dalam mutu A berdasarkan (SNI 03-0691-1996) yang dapat dilihat pada Gambar 3.40. Dimana nilai maksimum mutu A sebesar 0,103 mm/menit, sehingga setiap paving dikategorikan baik dan memenuhi persyaratan sebagai perkerasan jalan.

4.3.4 Analisa porositas

Pengujian porositas dilakukan pada kedalaman beton dari permukaan yaitu pada kedalaman 0 cm (permukaan), 3,75 cm, dan 7,5 cm (bagian tengah beton). Hasil dari pengujian porositas akan di analisa dan dibandingkan terhadap kuat tekan dan keausan paving. Hasil dari pengujian porositas beton dapat dilihat pada tabel-tabel berikut ini.

Tabel 4.22 Hasil Pengujian Porositas PN-28

Parameter	Satuan	Umur 28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	22,6	25,1	28,1	25,3
Dalam Air (μ)	gram	13,6	15,1	17,0	15,2
SSD (Mh)	gram	23,4	26,1	29,2	26,2
Kering (Mo)	gram	21,8	24,3	27,2	24,4
Halus (mo)	gram	21,6	23,4	24,2	23,1
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,6	396,7	397,3	396,5
Volume (Vo)	cm ³	7,8	8,5	8,7	8,3
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	19,67%	19,76%	19,85%	19,76%
Porositas Terbuka (Po)	%	16,33%	16,36%	16,39%	16,36%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,34%	3,39%	3,45%	3,40%
Kuat Tekan (fc')	MPa	33,2			

Parameter	Satuan	Umur 58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,3	25,4	24,6	25,1
Dalam Air (μ)	gram	15,0	14,9	14,4	14,8
SSD (Mh)	gram	26,7	26,7	25,8	26,4
Kering (Mo)	gram	24,7	24,7	23,9	24,4
Halus (mo)	gram	23,5	23,4	22,6	23,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,5	396,4	395,9	396,3
Volume (Vo)	cm ³	8,8	8,8	8,5	8,7
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,95%	21,28%	21,15%	21,13%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,09%	16,95%	16,67%	16,90%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,85%	4,33%	4,48%	4,22%
Kuat Tekan (fc')	MPa	37,0			

Parameter	Satuan	Umur 88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,1	24,3	24,9	24,8
Dalam Air (μ)	gram	14,7	14,2	14,6	14,5
SSD (Mh)	gram	26,8	25,2	26,5	26,2
Kering (Mo)	gram	24,7	23,3	24,5	24,2
Halus (mo)	gram	23,6	22,2	23,1	23,0
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,3	395,9	396,2	396,1
Volume (Vo)	cm ³	9,1	8,1	8,7	8,6
Kepadatan Absolut (r)		2,6	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,0	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,29%	22,71%	22,46%	22,15%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,36%	17,27%	16,81%	17,14%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,93%	5,44%	5,65%	5,01%
Kuat Tekan (fc')	MPa	42,3			

Parameter	Satuan	Umur 118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	23,7	24,3	24,6	24,2
Dalam Air (μ)	gram	14,6	14,8	15,0	14,8
SSD (Mh)	gram	24,8	25,7	25,6	25,4
Kering (Mo)	gram	23,0	23,8	23,8	23,5
Halus (mo)	gram	22,3	23,0	21,8	22,4
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,4	396,6	396,0	396,3
Volume (Vo)	cm ³	7,7	8,2	7,6	7,8
Kepadatan Absolut (r)		2,9	2,8	2,9	2,9
Kepadatan Visual (α)		2,3	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	22,14%	22,15%	21,72%	22,01%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,65%	17,43%	16,98%	17,35%
Porositas Tertutup (Pf)	%	4,49%	4,72%	4,74%	4,65%
Kuat Tekan (fc')	MPa	39,4			

Tabel 4.23 Hasil Pengujian Porositas GN-12-28

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,0	26,0	25,0	25,3
Dalam Air (μ)	gram	14,8	15,5	15,1	15,1
SSD (Mh)	gram	26,9	27,6	26,6	27,0
Kering (Mo)	gram	24,9	25,6	24,7	25,1
Halus (mo)	gram	23,4	24,6	23,1	23,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,1	397,1	396,3	396,5
Volume (Vo)	cm ³	9,1	9,3	8,6	9,0
Kepadatan Absolut (r)		2,6	2,6	2,7	2,6
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	19,97%	20,02%	20,04%	20,01%
Porositas Terbuka (Po)	%	16,53%	16,53%	16,52%	16,53%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,44%	3,49%	3,52%	3,48%
Kuat Tekan (fc')	MPa	33,3			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,7	24,0	24,4	24,4
Dalam Air (μ)	gram	14,9	14,9	14,4	14,7
SSD (Mh)	gram	25,7	24,7	25,4	25,3
Kering (Mo)	gram	23,8	23,0	23,5	23,4
Halus (mo)	gram	22,0	21,0	22,7	21,9
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,9	395,8	396,2	396,0
Volume (Vo)	cm ³	7,9	7,0	8,3	7,7
Kepadatan Absolut (r)		2,8	3,0	2,7	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,3	2,1	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,87%	21,77%	21,89%	21,51%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,59%	17,35%	17,27%	17,40%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,27%	4,42%	4,61%	4,10%
Kuat Tekan (fc')	MPa	35,5			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,4	24,0	23,7	24,0
Dalam Air (μ)	gram	14,1	14,0	13,7	13,9
SSD (Mh)	gram	25,0	24,5	23,9	24,5
Kering (Mo)	gram	23,0	22,6	22,1	22,6
Halus (mo)	gram	22,3	21,8	21,5	21,9
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,8	395,9	395,7	395,8
Volume (Vo)	cm ³	8,3	7,7	7,6	7,9
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,2	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,46%	23,98%	23,41%	22,95%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,35%	18,10%	17,65%	18,03%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,11%	5,88%	5,76%	4,92%
Kuat Tekan (fc')	MPa	42,0			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,3	23,7	22,3	23,4
Dalam Air (μ)	gram	14,6	14,2	14,0	14,3
SSD (Mh)	gram	25,7	24,5	24,0	24,7
Kering (Mo)	gram	23,6	22,6	22,2	22,8
Halus (mo)	gram	22,2	21,4	21,6	21,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,8	395,8	396,0	395,9
Volume (Vo)	cm ³	8,2	7,4	7,4	7,7
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,9	2,9	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	21,47%	24,13%	23,94%	23,18%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,92%	18,45%	18,00%	18,46%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,55%	5,68%	5,94%	4,72%
Kuat Tekan (fc')	MPa	39,9			

Tabel 4.24 Hasil Pengujian Porositas GN-12-1

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,3	25,8	25,2	25,1
Dalam Air (μ)	gram	15,0	15,4	15,1	15,2
SSD (Mh)	gram	25,9	26,7	26,0	26,2
Kering (Mo)	gram	24,0	24,8	24,2	24,3
Halus (mo)	gram	22,1	21,5	23,4	22,3
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,9	395,5	396,8	396,1
Volume (Vo)	cm ³	8,0	7,8	8,4	8,1
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,30%	20,38%	20,30%	20,33%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,43%	16,81%	16,51%	16,92%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,86%	3,56%	3,79%	3,41%
Kuat Tekan (fc')	MPa	33,1			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,0	25,1	24,0	24,7
Dalam Air (μ)	gram	15,0	15,1	15,5	15,2
SSD (Mh)	gram	26,0	25,7	26,2	26,0
Kering (Mo)	gram	24,0	23,8	24,3	24,0
Halus (mo)	gram	22,3	21,9	21,0	21,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,0	396,1	395,6	395,9
Volume (Vo)	cm ³	8,1	7,6	7,2	7,6
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,9	2,9	2,9
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,3	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,75%	22,08%	22,14%	21,66%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,18%	17,92%	17,76%	17,95%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,57%	4,16%	4,38%	3,70%
Kuat Tekan (fc')	MPa	34,0			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,9	25,5	25,0	25,1
Dalam Air (μ)	gram	14,6	15,0	14,8	14,8
SSD (Mh)	gram	25,6	25,8	25,8	25,7
Kering (Mo)	gram	23,5	23,8	23,8	23,7
Halus (mo)	gram	22,8	22,7	22,0	22,5
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,2	396,6	396,0	396,3
Volume (Vo)	cm ³	8,4	7,9	7,8	8,0
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,9	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	21,29%	23,31%	23,29%	22,63%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,09%	18,52%	18,18%	18,60%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,20%	4,79%	5,11%	4,03%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	37,4			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,1	24,7	24,8	24,5
Dalam Air (μ)	gram	14,2	14,6	14,7	14,5
SSD (Mh)	gram	25,5	26,2	26,1	25,9
Kering (Mo)	gram	23,3	24,0	24,0	23,8
Halus (mo)	gram	22,3	22,6	21,6	22,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,7	396,0	395,5	395,7
Volume (Vo)	cm ³	8,4	8,4	7,9	8,2
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	22,33%	23,10%	23,00%	22,81%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,47%	18,97%	18,42%	18,95%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,86%	4,13%	4,58%	3,86%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	35,6			

Tabel 4.25 Hasil Pengujian GS-12-28

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,5	23,2	24,0	24,2
Dalam Air (μ)	gram	15,6	14,2	14,4	14,7
SSD (Mh)	gram	26,8	24,2	24,4	25,1
Kering (Mo)	gram	24,9	22,5	22,7	23,4
Halus (mo)	gram	22,7	21,1	21,6	21,8
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,3	395,4	395,8	395,8
Volume (Vo)	cm ³	8,2	7,5	7,6	7,8
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,3	2,3	2,2
Porositas Total (Pt)	%	19,69%	20,02%	20,13%	19,95%
Porositas Terbuka (Po)	%	16,96%	17,00%	17,00%	16,99%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,73%	3,02%	3,13%	2,96%
Kuat Tekan (fc')	MPa	28,6			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,3	23,9	25,7	24,6
Dalam Air (μ)	gram	14,5	14,3	15,0	14,6
SSD (Mh)	gram	25,6	24,9	26,5	25,7
Kering (Mo)	gram	23,6	23,0	24,5	23,7
Halus (mo)	gram	22,2	20,6	22,7	21,8
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,7	395,0	396,2	395,6
Volume (Vo)	cm ³	8,3	7,4	8,3	8,0
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,8	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,51%	22,06%	22,10%	21,56%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,02%	17,92%	17,39%	17,78%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,49%	4,13%	4,71%	3,78%
Kuat Tekan (fc')	MPa	33,8			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,1	23,9	23,2	23,7
Dalam Air (μ)	gram	14,3	14,1	14,0	14,1
SSD (Mh)	gram	25,0	25,0	25,0	25,0
Kering (Mo)	gram	23,0	23,0	23,0	23,0
Halus (mo)	gram	22,0	20,8	21,7	21,5
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,7	395,1	395,6	395,5
Volume (Vo)	cm ³	8,1	7,5	7,9	7,8
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,8	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,86%	23,91%	23,88%	22,88%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,69%	18,35%	18,18%	18,41%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,17%	5,57%	5,70%	4,48%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	37,9			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,5	24,3	24,5	24,8
Dalam Air (μ)	gram	15,1	14,3	14,5	14,6
SSD (Mh)	gram	27,0	25,8	26,4	26,4
Kering (Mo)	gram	24,7	23,6	24,2	24,2
Halus (mo)	gram	22,3	21,7	23,2	22,4
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,8	395,4	396,2	395,8
Volume (Vo)	cm ³	8,3	8,1	8,8	8,4
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,7	2,6	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,0	2,1
Porositas Total (Pt)	%	22,75%	23,40%	22,86%	23,00%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,33%	19,13%	18,49%	18,98%
Porositas Tertutup (Pf)	%	3,42%	4,27%	4,38%	4,02%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	36,2			

Tabel 4.26 Hasil Pengujian Porisitas GS-12-1

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,7	26,0	26,2	25,6
Dalam Air (μ)	gram	14,7	15,4	15,2	15,1
SSD (Mh)	gram	25,4	26,2	26,9	26,2
Kering (Mo)	gram	23,5	24,3	24,9	24,2
Halus (mo)	gram	22,6	23,4	23,7	23,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,2	396,9	396,6	396,6
Volume (Vo)	cm ³	8,2	8,3	8,9	8,5
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,8	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,3	2,1	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,31%	20,19%	20,08%	20,19%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,76%	17,59%	17,09%	17,48%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,56%	2,60%	2,99%	2,71%
Kuat Tekan (fc')	MPa	27,3			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,9	24,0	23,9	24,6
Dalam Air (μ)	gram	15,6	14,7	14,7	15,0
SSD (Mh)	gram	27,4	26,0	25,9	26,4
Kering (Mo)	gram	25,2	23,9	23,9	24,3
Halus (mo)	gram	23,2	21,4	21,3	22,0
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,4	395,3	395,3	395,7
Volume (Vo)	cm ³	8,6	7,9	7,8	8,1
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,84%	21,92%	21,86%	21,54%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,64%	18,58%	17,86%	18,36%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,19%	3,34%	4,00%	3,18%
Kuat Tekan (fc')	MPa	31,8			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,8	24,0	24,9	24,9
Dalam Air (μ)	gram	15,8	14,4	15,0	15,1
SSD (Mh)	gram	27,3	25,5	26,9	26,6
Kering (Mo)	gram	25,1	23,4	24,7	24,4
Halus (mo)	gram	23,2	21,9	21,2	22,1
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,6	395,7	395,2	395,8
Volume (Vo)	cm ³	8,4	8,0	7,8	8,1
Kepadatan Absolut (ρ)		2,8	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,97%	22,99%	23,63%	22,53%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,13%	18,92%	18,49%	18,85%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,84%	4,07%	5,15%	3,69%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	33,2			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	23,5	24,0	24,4	24,0
Dalam Air (μ)	gram	14,0	14,7	14,7	14,5
SSD (Mh)	gram	26,0	25,9	25,8	25,9
Kering (Mo)	gram	23,6	23,7	23,7	23,7
Halus (mo)	gram	23,1	21,4	21,2	21,9
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,7	395,4	395,4	395,5
Volume (Vo)	cm ³	9,2	7,8	7,6	8,2
Kepadatan Absolut (ρ)		2,5	2,7	2,8	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,0	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,67%	22,87%	23,46%	22,67%
Porositas Terbuka (Po)	%	20,00%	19,64%	18,92%	19,52%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,67%	3,23%	4,54%	3,15%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	31,6			

Tabel 4.27 Hasil Pengujian Porositas GN-10-28

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,5	26,0	24,2	24,9
Dalam Air (μ)	gram	14,7	15,3	14,3	14,8
SSD (Mh)	gram	25,5	26,7	24,5	25,6
Kering (Mo)	gram	23,6	24,7	22,7	23,7
Halus (mo)	gram	22,9	25,4	21,7	23,3
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,3	397,8	395,7	396,6
Volume (Vo)	cm ³	8,4	9,4	7,8	8,5
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,7	2,8	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	19,84%	19,82%	20,01%	19,89%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,59%	17,54%	17,65%	17,59%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,25%	2,27%	2,36%	2,29%
Kuat Tekan (fc')	MPa	22,8			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,4	25,5	25,4	25,1
Dalam Air (μ)	gram	14,5	15,0	15,0	14,8
SSD (Mh)	gram	24,8	25,9	25,5	25,4
Kering (Mo)	gram	22,9	23,9	23,6	23,5
Halus (mo)	gram	22,0	22,4	22,4	22,3
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,9	396,2	396,4	396,2
Volume (Vo)	cm ³	7,9	8,0	7,8	7,9
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,8	2,9	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,16%	21,69%	21,73%	21,20%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,45%	18,35%	18,10%	18,30%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,72%	3,34%	3,64%	2,90%
Kuat Tekan (fc')	MPa	28,0			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	22,6	23,7	25,3	23,9
Dalam Air (μ)	gram	13,5	13,9	15,2	14,2
SSD (Mh)	gram	23,3	24,4	26,0	24,6
Kering (Mo)	gram	21,4	22,4	24,0	22,6
Halus (mo)	gram	21,0	21,3	22,7	21,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,2	395,4	396,6	395,7
Volume (Vo)	cm ³	7,6	7,7	7,9	7,7
Kepadatan Absolut (ρ)		2,8	2,8	2,9	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,1	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,97%	22,88%	22,66%	22,17%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,39%	19,05%	18,52%	18,98%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,58%	3,83%	4,14%	3,19%
Kuat Tekan (fc')	MPa	29,3			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,3	24,1	24,1	24,5
Dalam Air (μ)	gram	15,5	14,8	14,8	15,0
SSD (Mh)	gram	26,6	25,6	25,9	26,0
Kering (Mo)	gram	24,4	23,5	23,8	23,9
Halus (mo)	gram	21,7	22,2	22,7	22,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,7	396,1	396,3	396,0
Volume (Vo)	cm ³	7,8	7,9	8,2	8,0
Kepadatan Absolut (ρ)		2,8	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,1	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,99%	22,57%	22,55%	22,03%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,82%	19,44%	18,92%	19,39%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,17%	3,12%	3,63%	2,64%
Kuat Tekan (fc')	MPa	26,9			

Tabel 4.28 Hasil Pengujian Porositas GN-10-1

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,1	25,0	26,7	25,3
Dalam Air (μ)	gram	14,5	15,0	15,8	15,1
SSD (Mh)	gram	25,3	26,1	27,7	26,4
Kering (Mo)	gram	23,3	24,1	25,6	24,3
Halus (mo)	gram	22,8	23,7	24,5	23,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,2	396,8	397,2	396,7
Volume (Vo)	cm ³	8,4	8,7	9,1	8,7
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,52%	20,30%	20,10%	20,30%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,52%	18,02%	17,65%	18,06%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,00%	2,28%	2,45%	2,24%
Kuat Tekan (fc')	MPa	22,1			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	26,5	26,7	26,6	26,6
Dalam Air (μ)	gram	15,3	15,4	15,4	15,4
SSD (Mh)	gram	26,9	26,6	26,7	26,7
Kering (Mo)	gram	24,7	24,5	24,6	24,6
Halus (mo)	gram	22,8	22,1	22,0	22,3
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,1	396,0	395,9	396,0
Volume (Vo)	cm ³	8,5	7,9	7,9	8,1
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,62%	21,80%	21,83%	21,42%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,97%	18,75%	18,58%	18,77%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,65%	3,05%	3,24%	2,65%
Kuat Tekan (fc')	MPa	27,1			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,4	25,0	25,3	24,9
Dalam Air (μ)	gram	14,2	14,8	14,2	14,4
SSD (Mh)	gram	25,3	25,1	25,8	25,4
Kering (Mo)	gram	23,1	23,1	23,6	23,3
Halus (mo)	gram	22,5	22,4	22,6	22,5
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,8	396,5	395,8	396,0
Volume (Vo)	cm ³	8,5	7,7	8,6	8,3
Kepadatan Absolut (ρ)		2,6	2,9	2,6	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,0	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,38%	22,91%	22,58%	22,29%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,82%	19,42%	18,97%	19,40%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,56%	3,49%	3,62%	2,89%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	27,6			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,7	24,4	24,4	24,5
Dalam Air (μ)	gram	15,3	15,1	15,0	15,1
SSD (Mh)	gram	26,0	26,1	25,8	26,0
Kering (Mo)	gram	23,8	23,9	23,7	23,8
Halus (mo)	gram	21,9	21,8	21,6	21,8
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,1	395,8	395,7	395,9
Volume (Vo)	cm ³	7,6	7,8	7,7	7,7
Kepadatan Absolut (ρ)		2,9	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	22,81%	22,26%	21,77%	22,28%
Porositas Terbuka (Po)	%	20,56%	20,00%	19,44%	20,00%
Porositas Tertutup (Pf)	%	2,25%	2,26%	2,33%	2,28%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	22,7			

Tabel 4.29 Hasil Pengujian Porositas GS-10-28

Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,9	28,0	23,5	25,8
Dalam Air (μ)	gram	14,8	16,5	14,3	15,2
SSD (Mh)	gram	26,5	28,7	23,7	26,3
Kering (Mo)	gram	24,4	26,5	22,0	24,3
Halus (mo)	gram	23,1	25,4	21,0	23,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,0	397,8	395,6	396,5
Volume (Vo)	cm ³	8,9	9,4	7,2	8,5
Kepadatan Absolut (r)		2,6	2,7	2,9	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,3	2,2
Porositas Total (Pt)	%	19,65%	19,61%	19,76%	19,67%
Porositas Terbuka (Po)	%	17,95%	18,03%	18,09%	18,02%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,70%	1,58%	1,67%	1,65%
Kuat Tekan (fc')	MPa	16,9			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,7	26,3	25,9	25,6
Dalam Air (μ)	gram	14,4	15,3	15,3	15,0
SSD (Mh)	gram	24,9	26,4	26,2	25,8
Kering (Mo)	gram	22,9	24,3	24,2	23,8
Halus (mo)	gram	21,4	23,1	22,2	22,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,4	396,6	396,1	396,0
Volume (Vo)	cm ³	7,8	8,3	7,9	8,0
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,8	2,8	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,51%	21,34%	20,99%	20,95%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,05%	18,92%	18,35%	18,77%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,46%	2,42%	2,64%	2,18%
Kuat Tekan (fc')	MPa	21,0			

Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	23,9	24,9	25,0	24,6
Dalam Air (μ)	gram	13,8	14,8	14,5	14,4
SSD (Mh)	gram	24,5	25,1	25,5	25,0
Kering (Mo)	gram	22,4	23,1	23,4	23,0
Halus (mo)	gram	22,7	22,3	23,0	22,7
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,9	396,4	396,4	396,2
Volume (Vo)	cm ³	8,6	7,7	8,4	8,2
Kepadatan Absolut (ρ)		2,6	2,9	2,7	2,8
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,2	2,1	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,69%	22,56%	22,31%	21,85%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,63%	19,42%	19,09%	19,38%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,06%	3,14%	3,22%	2,47%
Kuat Tekan (fc')	MPa	23,9			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,5	24,1	25,1	24,6
Dalam Air (μ)	gram	14,6	14,5	15,1	14,7
SSD (Mh)	gram	25,4	26,0	26,4	25,9
Kering (Mo)	gram	23,2	23,7	24,2	23,7
Halus (mo)	gram	21,5	22,3	22,8	22,2
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	395,5	395,7	396,3	395,8
Volume (Vo)	cm ³	7,8	8,4	8,3	8,2
Kepadatan Absolut (ρ)		2,8	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	22,07%	22,37%	22,04%	22,16%
Porositas Terbuka (Po)	%	20,37%	20,00%	19,47%	19,95%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,70%	2,37%	2,57%	2,21%
Kuat Tekan (fc')	MPa	21,6			

Tabel 4.30 Hasil Pengujian Porositas GS-10-1

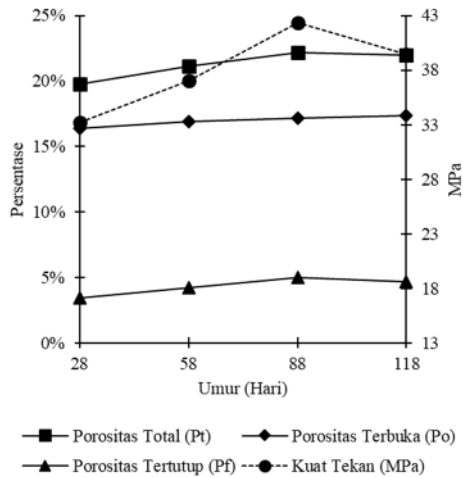
Parameter	Satuan	Umur			
		28			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	24,6	25,8	25,9	25,4
Dalam Air (μ)	gram	15,0	15,3	15,8	15,4
SSD (Mh)	gram	25,6	26,7	27,4	26,6
Kering (Mo)	gram	23,6	24,6	25,3	24,5
Halus (mo)	gram	23,5	24,0	24,5	24,0
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,9	396,9	397,3	397,0
Volume (Vo)	cm ³	8,4	8,9	9,0	8,8
Kepadatan Absolut (r)		2,8	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,2	2,2
Porositas Total (Pt)	%	20,42%	19,98%	19,88%	20,09%
Porositas Terbuka (Po)	%	18,87%	18,42%	18,10%	18,46%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,55%	1,56%	1,78%	1,63%
Kuat Tekan (fc')	MPa	16,6			

Parameter	Satuan	Umur			
		58			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	26,6	26,3	25,2	26,0
Dalam Air (μ)	gram	15,6	15,3	14,4	15,1
SSD (Mh)	gram	27,3	27,1	25,6	26,7
Kering (Mo)	gram	25,0	24,8	23,5	24,4
Halus (mo)	gram	23,8	23,1	22,1	23,0
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,8	396,3	395,6	396,2
Volume (Vo)	cm ³	8,8	8,6	8,3	8,6
Kepadatan Absolut (r)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,1	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	20,99%	21,76%	21,20%	21,32%
Porositas Terbuka (Po)	%	19,66%	19,49%	18,75%	19,30%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,34%	2,26%	2,45%	2,02%
Kuat Tekan (fc')	MPa	20,0			

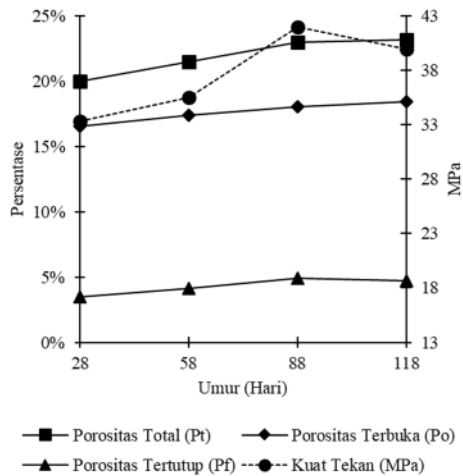
Parameter	Satuan	Umur			
		88			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,6	25,1	24,8	25,2
Dalam Air (μ)	gram	14,8	14,6	14,3	14,6
SSD (Mh)	gram	25,7	25,2	25,6	25,5
Kering (Mo)	gram	23,5	23,1	23,4	23,3
Halus (mo)	gram	23,6	22,5	23,0	23,0
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,8	396,3	396,2	396,4
Volume (Vo)	cm ³	8,6	8,0	8,6	8,4
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,8	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,2	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,44%	22,52%	22,57%	22,17%
Porositas Terbuka (Po)	%	20,18%	19,81%	19,47%	19,82%
Porositas Tertutup (Pf)	%	1,25%	2,70%	3,10%	2,35%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	22,6			

Parameter	Satuan	Umur			
		118			
		0 cm	3,75 cm	7,5 cm	Rata-rata
Mula-mula	gram	25,6	24,5	24,9	25,0
Dalam Air (μ)	gram	15,8	14,9	15,1	15,3
SSD (Mh)	gram	27,4	26,6	26,7	26,9
Kering (Mo)	gram	25,0	24,2	24,4	24,5
Halus (mo)	gram	23,1	23,4	21,8	22,8
Pikno + Air	gram	381,8	381,8	381,8	381,8
Pikno + Sampel + Air	gram	396,5	396,5	395,6	396,2
Volume (Vo)	cm ³	8,4	8,7	8,0	8,4
Kepadatan Absolut (ρ)		2,7	2,7	2,7	2,7
Kepadatan Visual (α)		2,2	2,1	2,1	2,1
Porositas Total (Pt)	%	21,63%	23,10%	22,81%	22,51%
Porositas Terbuka (Po)	%	20,69%	20,51%	19,83%	20,34%
Porositas Tertutup (Pf)	%	0,94%	2,59%	2,98%	2,17%
Kuat Tekan (f_c')	MPa	21,6			

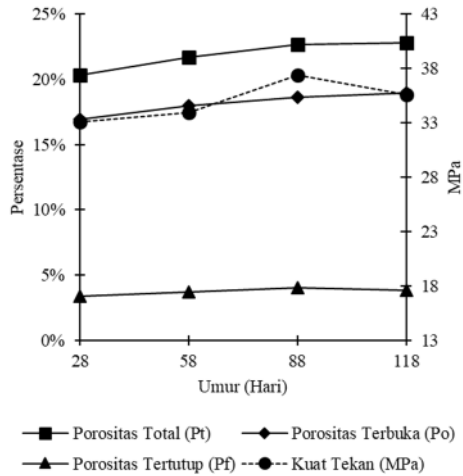
Sehingga berdasarkan tabel-tabel di atas dapat dibentuk grafik-grafik dari rata-rata porositas dengan kuat tekan sebagai berikut.



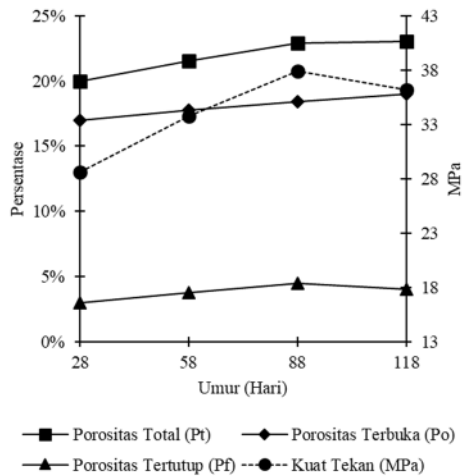
Grafik 4.22 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton PN-28



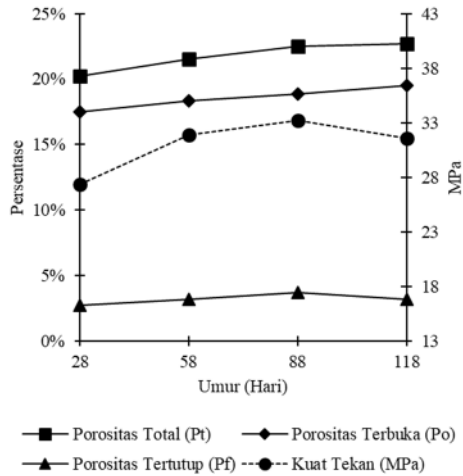
Grafik 4.23 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-12-28



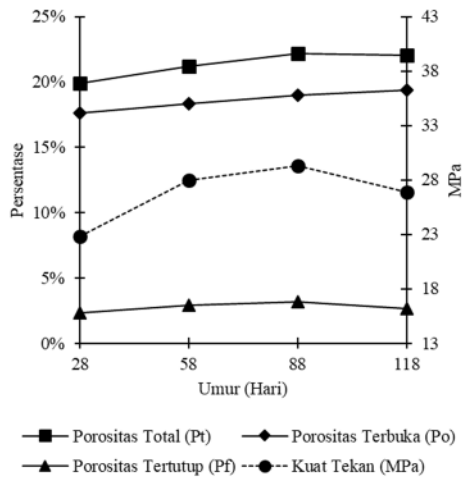
Grafik 4.24 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-12-1



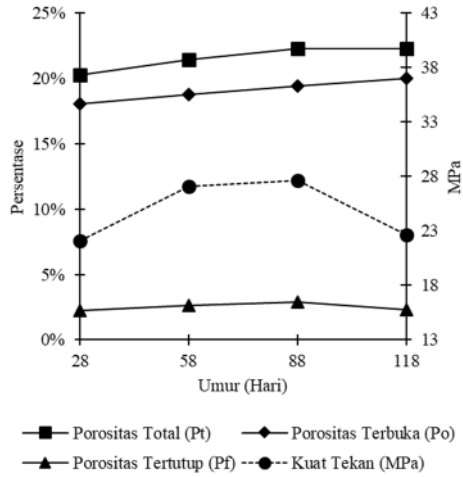
Grafik 4.25 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-12-28



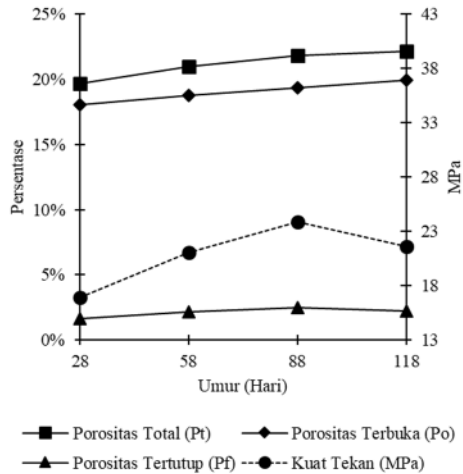
Grafik 4.26 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-12-1



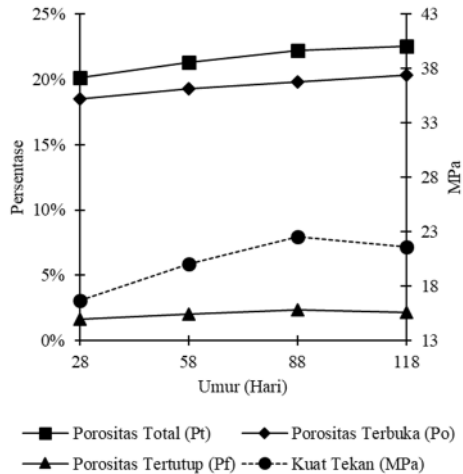
Grafik 4.27 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-10-28



Grafik 4.28 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GN-10-1



Grafik 4.29 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-10-28

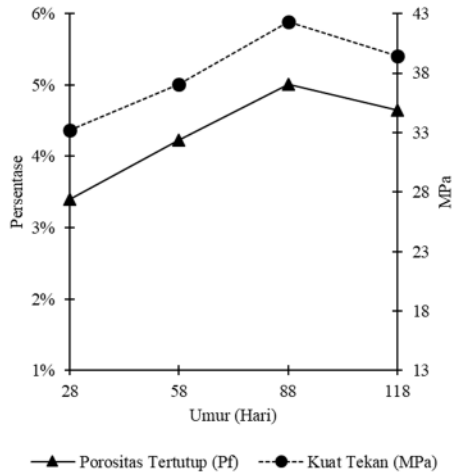


Grafik 4.30 Perbandingan Porositas Rata-rata dengan Kuat Tekan Beton GS-10-1

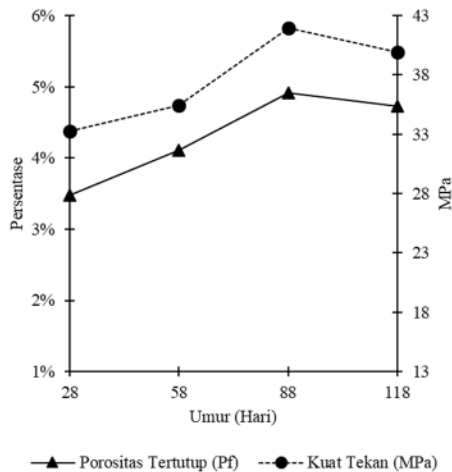
Dari Grafik 4.22 sampai Grafik 4.30 dapat dilihat bahwa porositas total dan porositas terbuka terus meningkat sampai umur 118 hari, sementara itu porositas tertutup meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari.

4.3.4.1 Pengaruh porositas tertutup terhadap kuat tekan beton

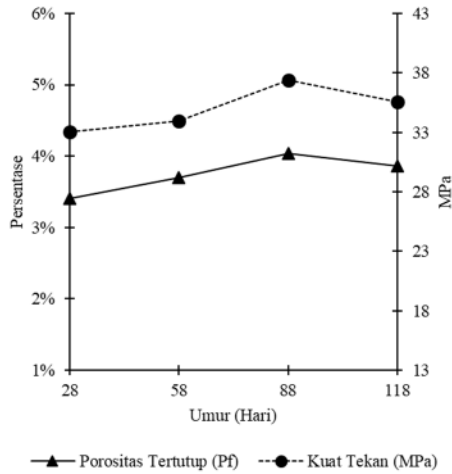
Berdasarkan Grafik 4.22 sampai Grafik 4.30 dapat dilihat bahwa porositas tertutup memiliki pola yang sama dengan kuat tekan beton. Kenaikan dan penurunan kuat tekan dan porositas tertutup secara lebih jelas dapat dilihat pada grafik-grafik berikut ini.



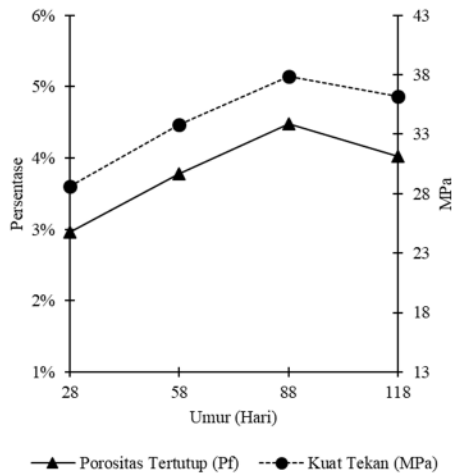
Grafik 4.31 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton PN-28



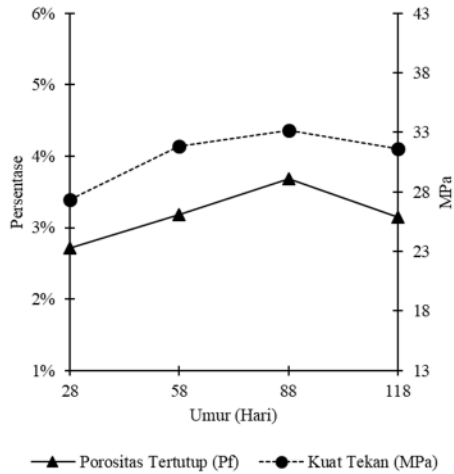
Grafik 4.32 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-12-28



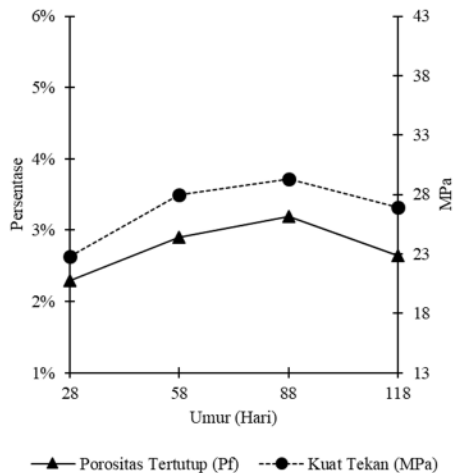
Grafik 4.33 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-12-1



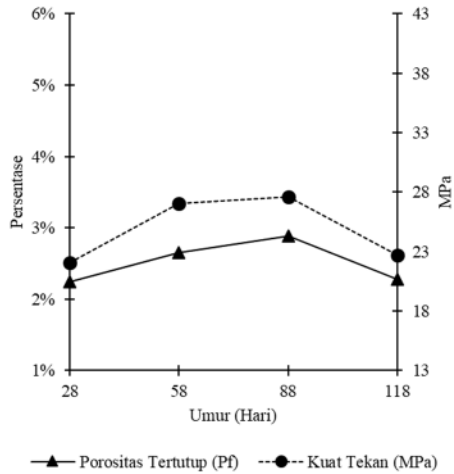
Grafik 4.34 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-12-28



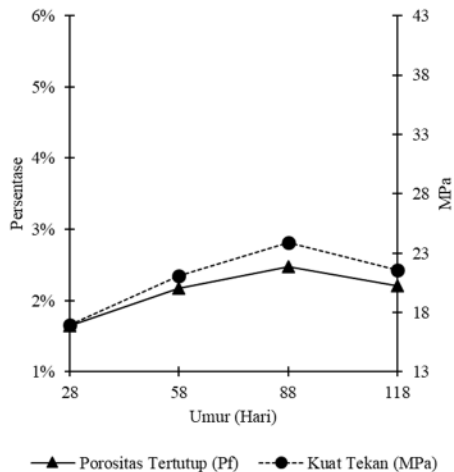
Grafik 4.35 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-12-1



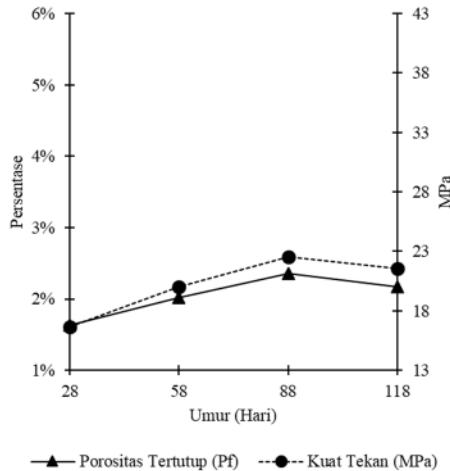
Grafik 4.36 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-10-28



Grafik 4.37 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GN-10-1



Grafik 4.38 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-10-28



Grafik 4.39 Perbandingan Porositas Tertutup dengan Kuat Tekan Beton GS-10-1

Berdasarkan Grafik 4.31 sampai Grafik 4.39 dapat dilihat bahwa kenaikan porositas tertutup menyebabkan kenaikan kuat tekan beton dan penurunan porositas tertutup menurunkan kuat tekan beton, hasil ini sama dengan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya oleh Ekaputri dan Triwulan (2013), dalam penelitiannya disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah pori tertutup dalam beton, dan semakin sedikit jumlah pori terbukanya, maka semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan.

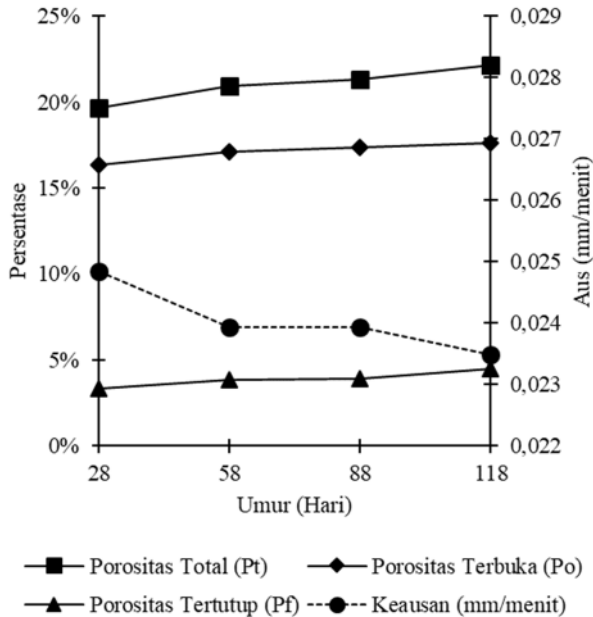
4.3.4.2 Pengaruh porositas tertutup permukaan terhadap keausan paving

Berdasarkan Tabel 4.22 sampai Tabel 4.30 besar porositas permukaan berbeda untuk setiap umur. Ternyata hasil ini memberikan pengaruh terhadap besar keausan paving.

Hubungan porositas permukaan dengan keausan paving dapat dilihat pada tabel-tabel dan grafik-grafik berikut ini.

Tabel 4.31 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton PN-28

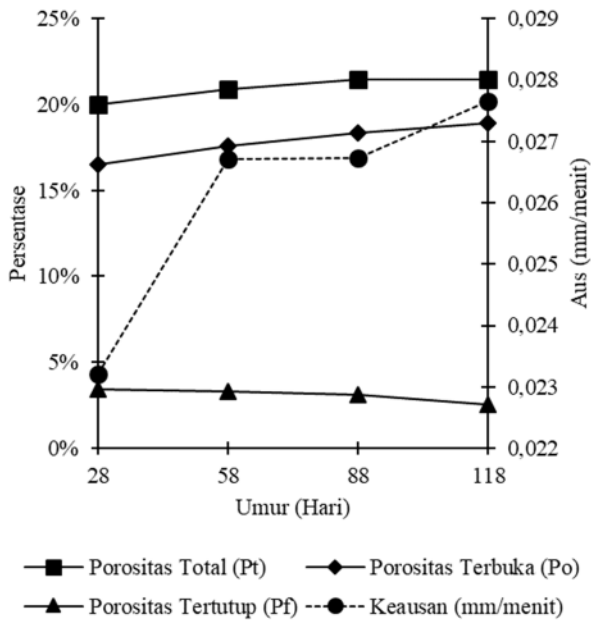
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	19,67%	20,95%	21,29%	22,14%
Porositas Terbuka (Po)	16,33%	17,09%	17,36%	17,65%
Porositas Tertutup (Pf)	3,34%	3,85%	3,93%	4,49%
Keausan (mm/menit)	0,0248	0,0239	0,0239	0,0235



Grafik 4.40 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton PN-28

Tabel 4.32 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-28

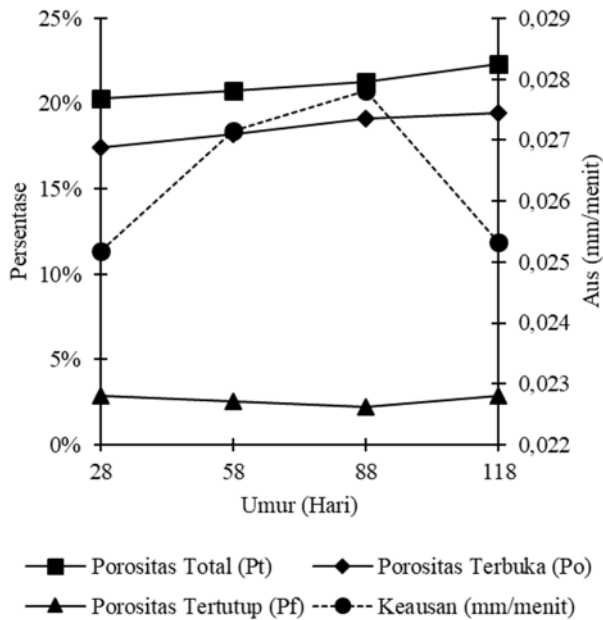
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	19,97%	20,87%	21,46%	21,47%
Porositas Terbuka (Po)	16,53%	17,59%	18,35%	18,92%
Porositas Tertutup (Pf)	3,44%	3,27%	3,11%	2,55%
Keausan (mm/menit)	0,0232	0,0267	0,0267	0,0276



Grafik 4.41 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-28

Tabel 4.33 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-1

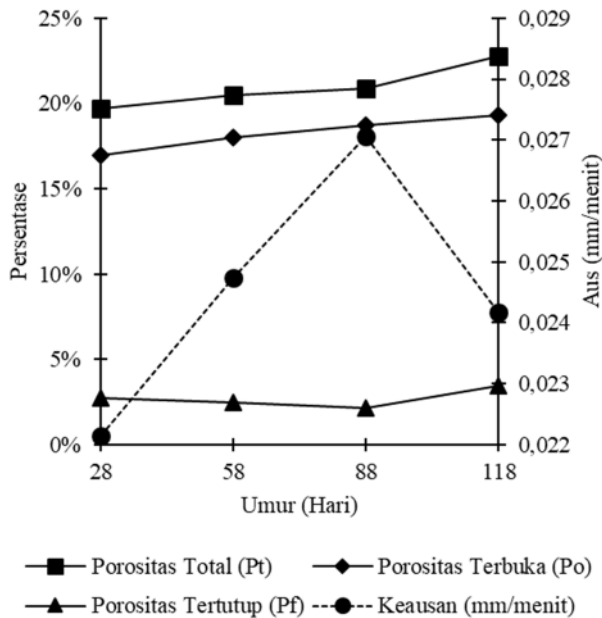
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	20,30%	20,75%	21,29%	22,33%
Porositas Terbuka (Po)	17,43%	18,18%	19,09%	19,47%
Porositas Tertutup (Pf)	2,86%	2,57%	2,20%	2,86%
Keausan (mm/menit)	0,0252	0,0272	0,0278	0,0253



Grafik 4.42 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-12-1

Tabel 4.34 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-28

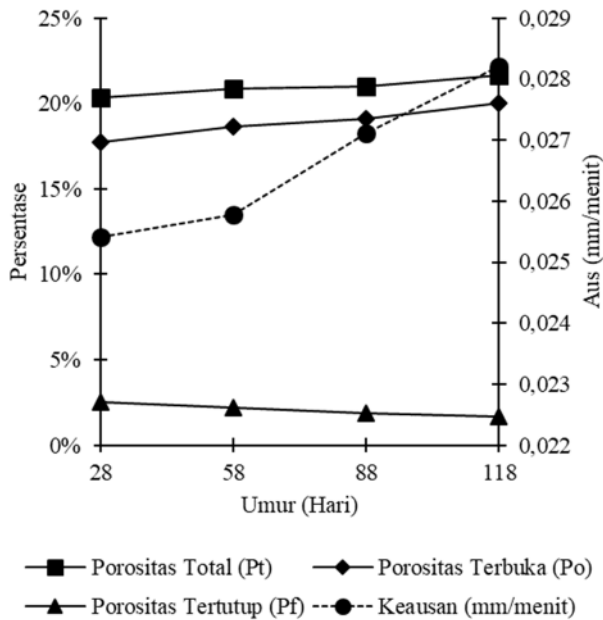
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	19,69%	20,51%	20,86%	22,75%
Porositas Terbuka (Po)	16,96%	18,02%	18,69%	19,33%
Porositas Tertutup (Pf)	2,73%	2,49%	2,17%	3,42%
Keausan (mm/menit)	0,0221	0,0247	0,0271	0,0242



Grafik 4.43 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-28

Tabel 4.35 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-1

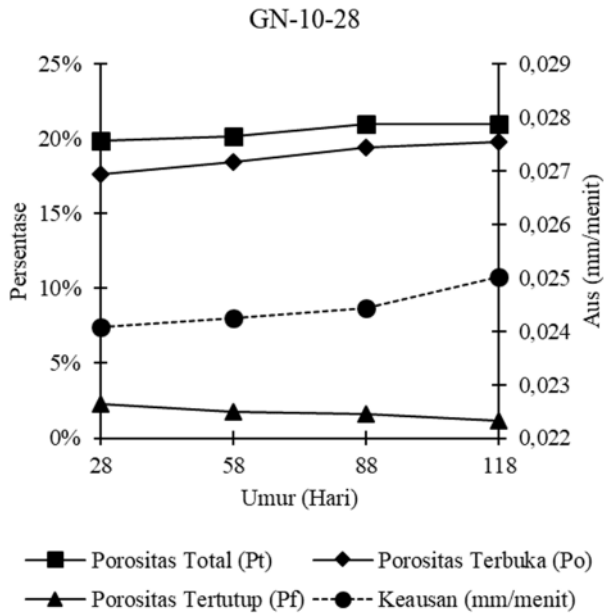
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	20,31%	20,84%	20,97%	21,67%
Porositas Terbuka (Po)	17,76%	18,64%	19,13%	20,00%
Porositas Tertutup (Pf)	2,56%	2,19%	1,84%	1,67%
Keausan (mm/menit)	0,0254	0,0258	0,0271	0,0282



Grafik 4.44 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-12-1

Tabel 4.36 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-28

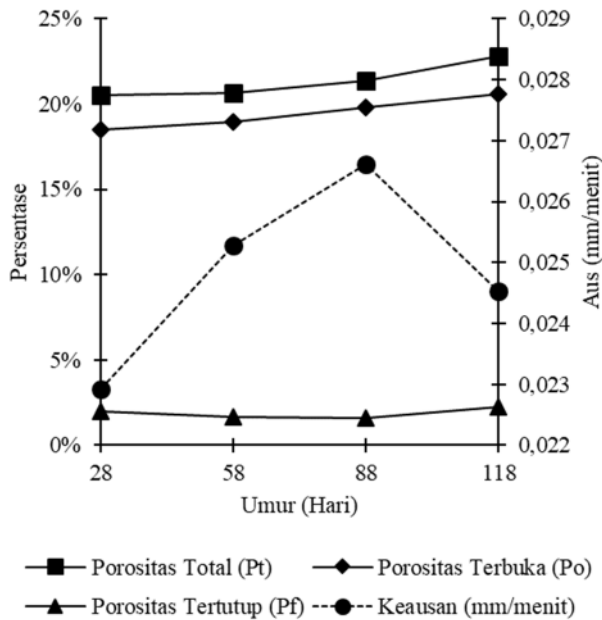
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	19,84%	20,16%	20,97%	20,99%
Porositas Terbuka (Po)	17,59%	18,45%	19,39%	19,82%
Porositas Tertutup (Pf)	2,25%	1,72%	1,58%	1,17%
Keausan (mm/menit)	0,0241	0,0242	0,0244	0,0250



Grafik 4.45 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-28

Tabel 4.37 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-1

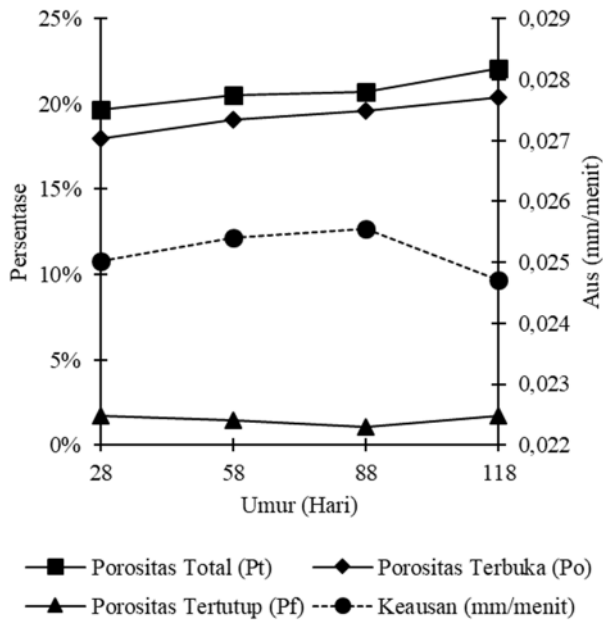
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	20,52%	20,62%	21,38%	22,81%
Porositas Terbuka (Po)	18,52%	18,97%	19,82%	20,56%
Porositas Tertutup (Pf)	2,00%	1,65%	1,56%	2,25%
Keausan (mm/menit)	0,0229	0,0253	0,0266	0,0245



Grafik 4.46 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GN-10-1

Tabel 4.38 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-28

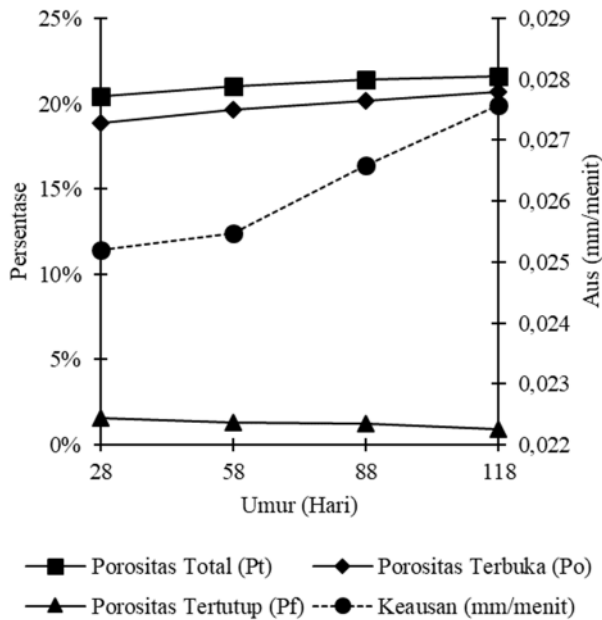
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	19,65%	20,51%	20,69%	22,07%
Porositas Terbuka (Po)	17,95%	19,05%	19,63%	20,37%
Porositas Tertutup (Pf)	1,70%	1,46%	1,06%	1,70%
Keausan (mm/menit)	0,0250	0,0254	0,0256	0,0247



Grafik 4.47 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-28

Tabel 4.39 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-1

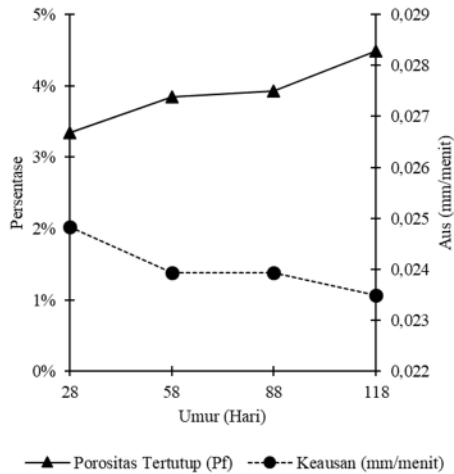
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Porositas Total (Pt)	20,42%	20,99%	21,44%	21,63%
Porositas Terbuka (Po)	18,87%	19,66%	20,18%	20,69%
Porositas Tertutup (Pf)	1,55%	1,34%	1,25%	0,94%
Keausan (mm/menit)	0,0252	0,0255	0,0266	0,0276



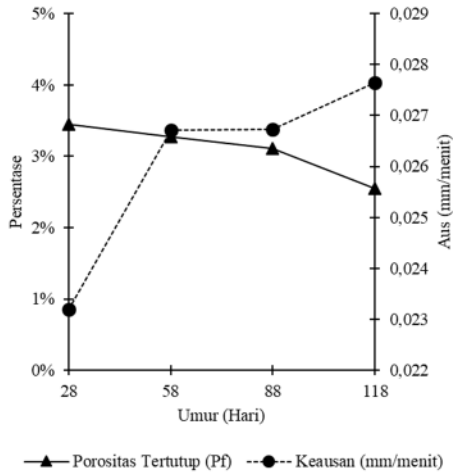
Grafik 4.48 Hubungan Porositas Permukaan dengan Keausan Paving Beton GS-10-1

Berdasarkan Grafik 4.40 sampai Grafik 4.48 dapat dilihat bahwa porositas terbuka permukaan semakin meningkat sampai umur 118 hari, porositas total cenderung meningkat sampai

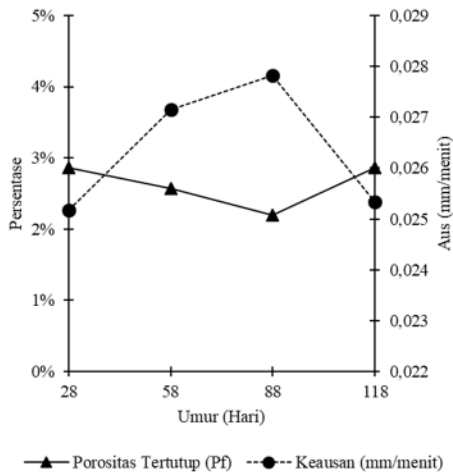
umur 118 hari, dan porositas tertutup berbanding terbalik dengan kenaikan dan penurunan keausan paving. Perbedaan kenaikan dan penurunan dari porositas tertutup permukaan beton dan keausan paving dapat dilihat pada grafik-grafik berikut ini.



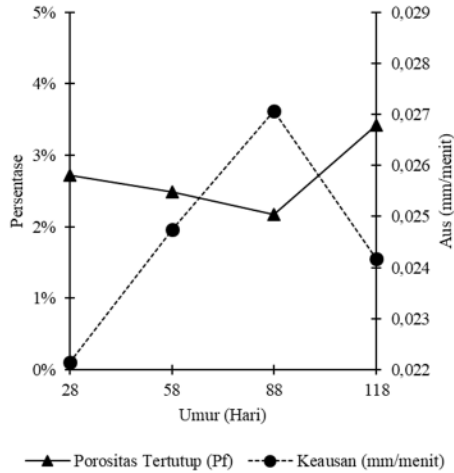
Grafik 4.49 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving PN-28



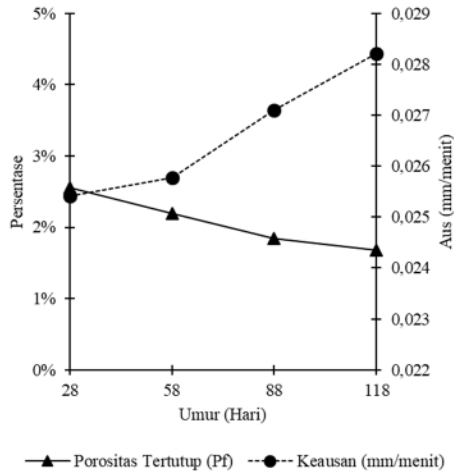
Grafik 4.50 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-12-28



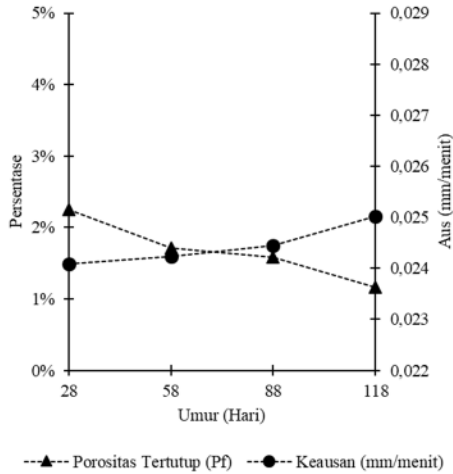
Grafik 4.51 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-12-1



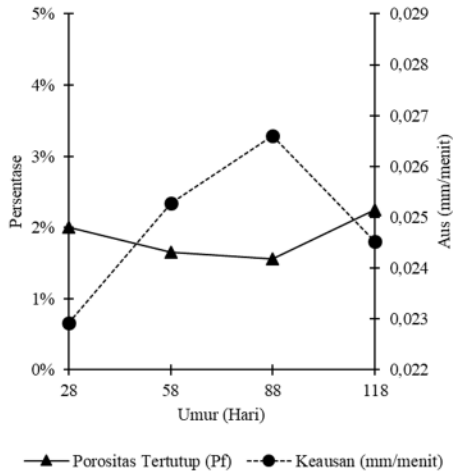
Grafik 4.52 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-12-28



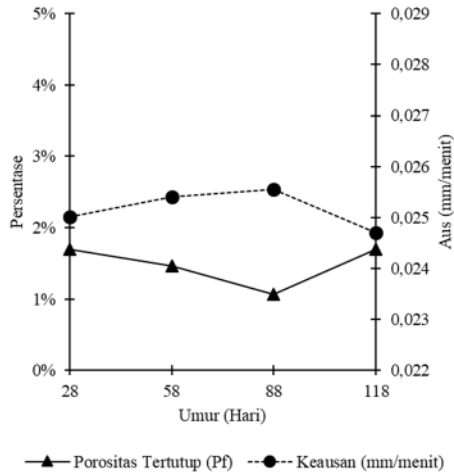
Grafik 4.53 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-12-1



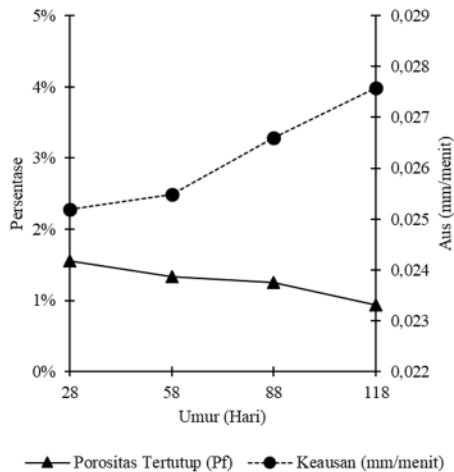
Grafik 4.54 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-10-28



Grafik 4.55 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GN-10-1



Grafik 4.56 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-10-28



Grafik 4.57 Hubungan Porositas Tertutup Permukaan Beton dengan Keausan Paving GS-10-1

Berdasarkan Grafik 4.49 sampai Grafik 4.57 dapat dilihat bahwa kenaikan porositas tertutup menurunkan keausan paving dan penurunan porositas tertutup menaikkan keausan paving. Porositas tertutup yang meningkat dan menurun pada permukaan paving diakibatkan oleh biota laut (teritip) yang menempel pada permukaan (Hartono dkk, 2012) yang di mana makhluk hidup ini menempel pada beton dan menghasilkan senyawa chitin yang bersifat keras sehingga meningkatkan jumlah porositas tertutup dan menurunkan keausan paving, namun jika makhluk hidup ini terlepas dari permukaan karena ombak maka akan meninggalkan lubang yang dapat menurunkan jumlah porositas tertutup dan menaikkan keausan paving.

4.3.4.3 Pengaruh metode *curing* terhadap porositas rata-rata beton

Berdasarkan Tabel 4.22 sampai Tabel 4.30 dapat dilakukan analisa dari metode *curing* terhadap porositas rata-rata dari setiap kedalaman beton sebagai berikut.

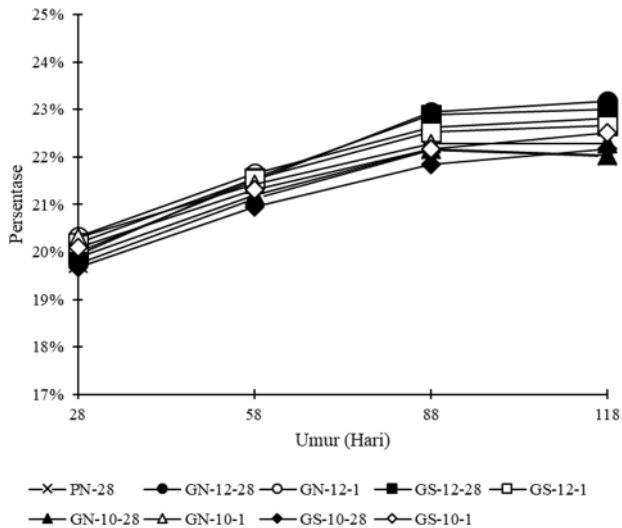
a) Porositas total rata-rata

Porositas total rata-rata dari setiap kedalaman untuk setiap variasi beton dapat dilihat pada Tabel 4.40 dan Grafik 4.58. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa besar porositas total rata-rata beton secara keseluruhan meningkat sampai umur 118 hari dan berkisar antara 19,67% sampai 23,18%. Dengan porositas total rata-rata terbesar terdapat pada GN-12-1 (28 hari = 20,33%), GN-12-1 (58 hari = 21,66%), GN-12-28 (88 hari = 22,95%), dan GN-12-28 (118 hari = 23,18%). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman pada air laut pada umur 1 hari menghasilkan porositas total rata-rata beton geopolimer 12M baik air suling dan air laut lebih besar dari beton

geopolimer 10M baik air suling dan air laut. Dan penggunaan air laut pada beton geopolimer tidak memberikan perbedaan yang besar terhadap porositas total rata-rata.

Tabel 4.40 Porositas Total Rata-rata

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	19,76%	21,13%	22,15%	22,01%
2	GN-12-28	20,01%	21,51%	22,95%	23,18%
3	GN-12-1	20,33%	21,66%	22,63%	22,81%
4	GS-12-28	19,95%	21,56%	22,88%	23,00%
5	GS-12-1	20,19%	21,54%	22,53%	22,67%
6	GN-10-28	19,89%	21,20%	22,17%	22,03%
7	GN-10-1	20,30%	21,42%	22,29%	22,28%
8	GS-10-28	19,67%	20,95%	21,85%	22,16%
9	GS-10-1	20,09%	21,32%	22,17%	22,51%



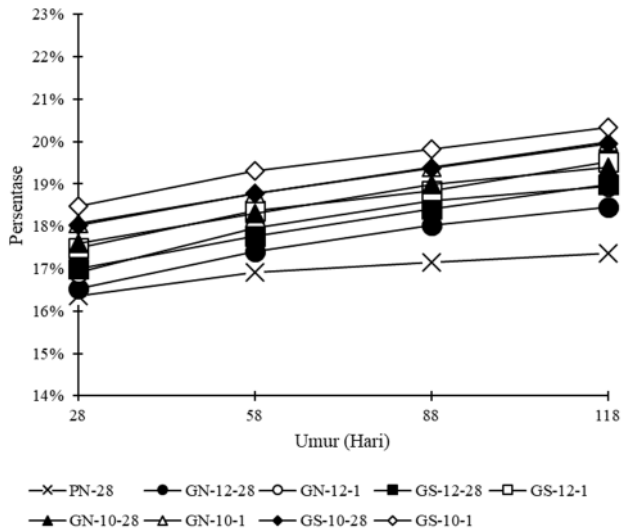
Grafik 4.58 Porositas Total Rata-rata

b) Porositas terbuka rata-rata

Porositas terbuka rata-rata dari setiap kedalaman untuk setiap variasi beton dapat dilihat pada Tabel 4.41 dan Grafik 4.59. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa besar porositas terbuka rata-rata beton meningkat sampai umur 118 hari dan berkisar antara 16,36% sampai 20,34%. Dengan porositas terbuka rata-rata terbesar terdapat pada GS-10-1 untuk setiap umur, yaitu 18,46% (28 hari); 19,30% (58 hari); 19,82% (88 hari); dan 20,34% (118 hari). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman pada air laut pada umur 1 hari menghasilkan porositas terbuka rata-rata beton geopolimer 10M baik air suling dan air laut lebih besar dari beton geopolimer 12M baik air suling dan air laut. Dan penggunaan air laut pada beton geopolimer menghasilkan porositas terbuka yang lebih besar dari beton geopolimer air suling.

Tabel 4.41 Porositas Terbuka Rata-rata

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	16,36%	16,90%	17,14%	17,35%
2	GN-12-28	16,53%	17,40%	18,03%	18,46%
3	GN-12-1	16,92%	17,95%	18,60%	18,95%
4	GS-12-28	16,99%	17,78%	18,41%	18,98%
5	GS-12-1	17,48%	18,36%	18,85%	19,52%
6	GN-10-28	17,59%	18,30%	18,98%	19,39%
7	GN-10-1	18,06%	18,77%	19,40%	20,00%
8	GS-10-28	18,02%	18,77%	19,38%	19,95%
9	GS-10-1	18,46%	19,30%	19,82%	20,34%



Grafik 4.59 Porositas Terbuka Rata-rata

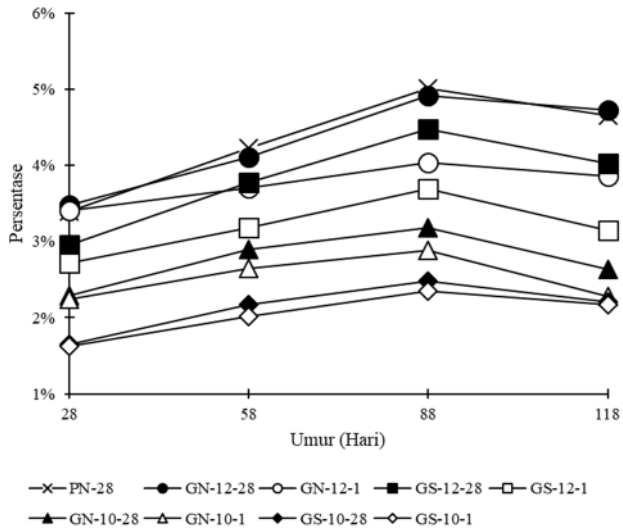
c) Porositas tertutup rata-rata

Porositas tertutup rata-rata dari setiap kedalaman untuk setiap variasi beton dapat dilihat pada Tabel 4.42 dan Grafik 4.60. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa besar porositas tertutup rata-rata beton meningkat sampai umur 88 hari dan menurun sampai umur 118 hari serta berkisar antara 1,63% sampai 4,72%. Dengan porositas tertutup rata-rata terbesar terdapat pada GN-12-28 (28 hari = 3,48%), PN-28 (58 hari = 4,22%), PN-28 (88 hari = 5,01%), dan GN-12-28 (118 hari = 4,72%). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman pada air laut pada umur 1 hari menghasilkan porositas tertutup rata-rata beton geopolimer 12M baik air suling dan air laut lebih besar dari beton geopolimer 10M baik air suling dan air laut. Dan penggunaan air laut pada beton geopolimer

menghasilkan porositas tertutup yang lebih kecil dari beton geopolimer air suling.

Tabel 4.42 Porositas Tertutup Rata-rata

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	3,40%	4,22%	5,01%	4,65%
2	GN-12-28	3,48%	4,10%	4,92%	4,72%
3	GN-12-1	3,41%	3,70%	4,03%	3,86%
4	GS-12-28	2,96%	3,78%	4,48%	4,02%
5	GS-12-1	2,71%	3,18%	3,69%	3,15%
6	GN-10-28	2,29%	2,90%	3,19%	2,64%
7	GN-10-1	2,24%	2,65%	2,89%	2,28%
8	GS-10-28	1,65%	2,18%	2,47%	2,21%
9	GS-10-1	1,63%	2,02%	2,35%	2,17%



Grafik 4.60 Porositas Tertutup Rata-rata

Berdasarkan analisa di atas dapat disimpulkan bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman pada umur 1 hari di air laut memberikan porositas total rata-rata pada beton geopolimer 12M air suling dan air laut lebih besar dari beton geopolimer 10M air suling dan air laut, porositas terbuka rata-rata beton geopolimer 12M air suling dan air laut lebih kecil dari beton geopolimer 10M air suling dan air laut, serta porositas tertutup rata-rata beton geopolimer 12M air suling dan air laut lebih besar dari beton geopolimer 10M air suling dan air laut. Hal ini berhubungan dengan penggunaan molaritas 12M yang lebih tinggi dari 10M, di mana semakin tinggi molaritas jumlah pori tertutup semakin kecil tetapi pori tertutup semakin besar (Ekaputri dan Triwulan, 2013), karena kandungan air pada beton geopolimer 12M lebih sedikit dari 10M sehingga dari hasil penguapan air yang terjadi memberikan rongga yang lebih banyak pada beton geopolimer 10M.

Penggunaan air laut di dalam campuran beton geopolimer 12M dan 10M menghasilkan porositas total rata-rata yang tidak terlalu berbeda dengan beton geopolimer air suling 12M dan 10M, namun menghasilkan porositas terbuka yang lebih besar dan porositas tertutup yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena beton geopolimer dengan air laut di dalam campurannya, mengandung NaCl yang bila bereaksi dengan kalsium di dalam beton akan membentuk kalsium klorida yang kemudian bereaksi dengan aluminat di dalam beton dan membentuk garam Friedle yang mengisi pori-pori (Ishida dkk, 2008). Garam Friedle ini mempunyai kemampuan mengembang yang dapat membuat pori beton semakin besar (Islam dkk, 2010).

4.3.5 Analisa derajat keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) diukur menggunakan pH meter dan diukur pada kedalaman 0 cm (permukaan), 3,75 cm, dan 7,5 cm (bagian tengah beton). Hasil dari pengujian pH dapat dilihat pada Tabel 4.43.

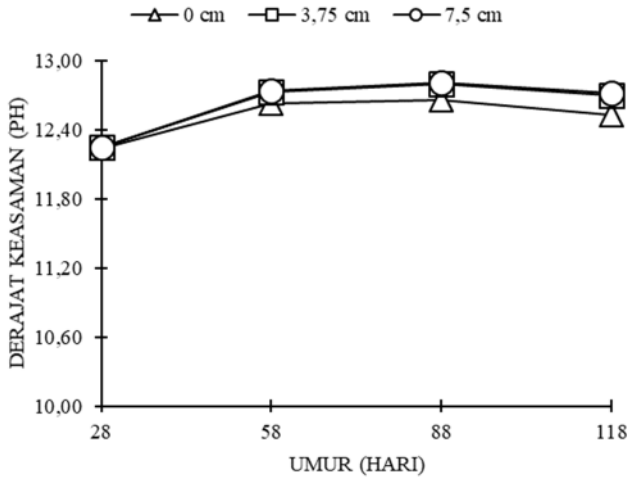


Gambar 4.17 Pengujian pH Menggunakan pH Meter

Tabel 4.43 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH)

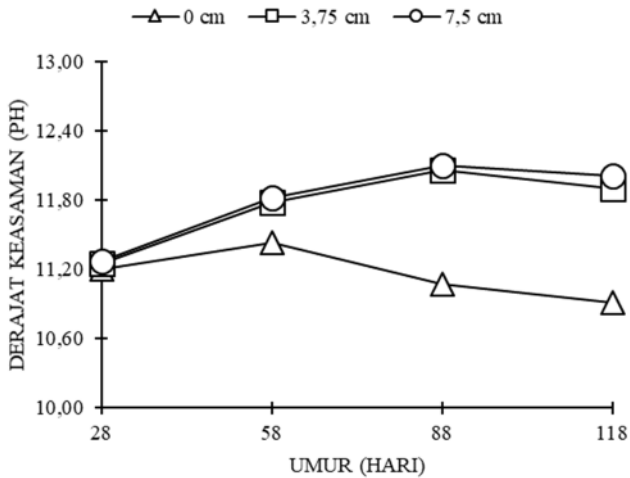
No.	Kode	Kedalaman	Umur			
			28	58	88	118
1	PN-28	0 cm	12,24	12,63	12,66	12,53
		3,75 cm	12,25	12,73	12,80	12,70
		7,5 cm	12,25	12,74	12,81	12,72
2	GN-12-28	0 cm	11,20	11,43	11,07	10,91
		3,75 cm	11,25	11,78	12,06	11,90
		7,5 cm	11,27	11,82	12,10	12,01
3	GN-12-1	0 cm	10,96	11,26	10,97	10,62
		3,75 cm	11,21	11,76	11,95	11,62
		7,5 cm	11,32	11,84	12,01	11,80
4	GS-12-28	0 cm	11,22	11,56	11,28	10,94
		3,75 cm	11,39	11,97	11,99	11,96
		7,5 cm	11,41	12,02	12,03	12,00
5	GS-12-1	0 cm	10,81	10,94	10,33	10,07
		3,75 cm	11,23	11,62	11,88	11,66
		7,5 cm	11,32	11,70	12,08	11,85
6	GN-10-28	0 cm	11,03	11,40	11,35	10,85
		3,75 cm	11,17	11,90	11,95	11,78
		7,5 cm	11,36	11,96	11,98	11,89
7	GN-10-1	0 cm	10,70	11,48	10,56	10,07
		3,75 cm	11,33	11,79	11,89	11,64
		7,5 cm	11,42	11,83	11,94	11,83
8	GS-10-28	0 cm	11,30	11,58	11,15	10,76
		3,75 cm	11,31	11,90	12,00	11,70
		7,5 cm	11,32	11,92	12,02	11,76
9	GS-10-1	0 cm	10,72	11,08	11,01	10,08
		3,75 cm	11,34	11,87	11,77	11,45
		7,5 cm	11,46	11,97	11,93	11,71

Berdasarkan Tabel 4.43 maka dapat dibentuk grafik derajat keasaman (pH) untuk masing-masing tipe beton sebagai berikut.



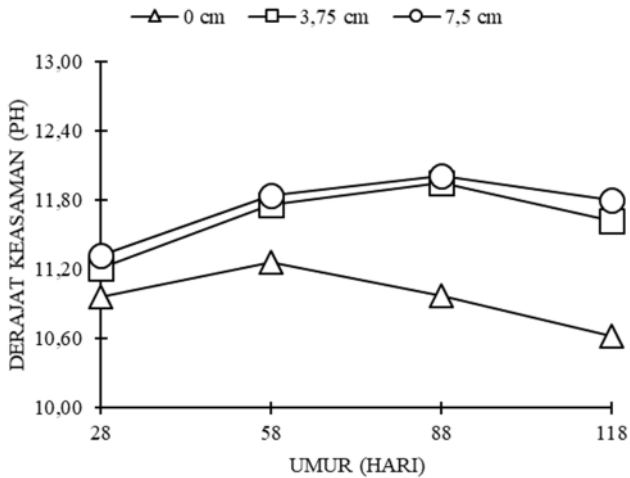
Grafik 4.61 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton OPC

Berdasarkan Grafik 4.61 dapat dilihat bahwa pH beton OPC meningkat sampai umur 88 hari dan mulai turun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi terdapat pada umur 88 hari yaitu sebesar 12,81 pada kedalaman 7,5 cm. Namun perbedaan pH beton untuk masing-masing kedalaman tidak terlalu berbeda. Beton OPC mampu mempertahankan pH dengan baik. Efek dari *moist curing* dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang sama.



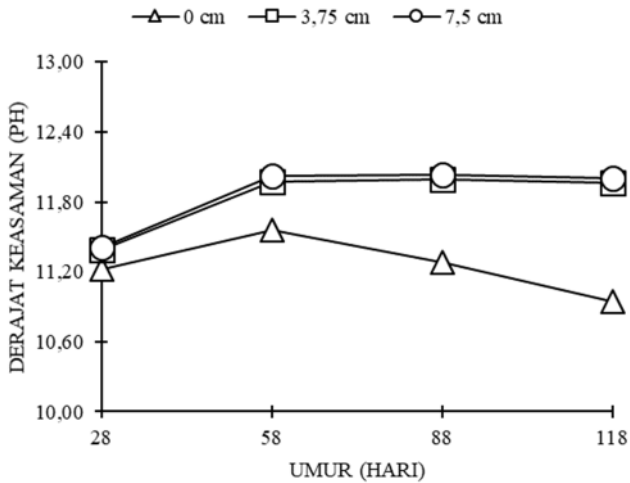
Grafik 4.62 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-12-28

Berdasarkan Grafik 4.62 dapat dilihat bahwa pH beton GN-12-28 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 12,10 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm; serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 88 hari dan mulai berbeda saat di umur 118 hari. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,43. Efek dari *moist curing* dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang sama.



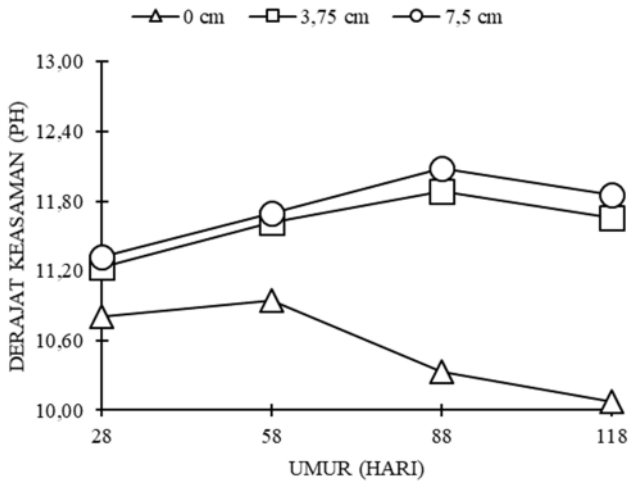
Grafik 4.63 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-12-1

Berdasarkan Grafik 4.63 dapat dilihat bahwa pH beton GN-12-1 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 12,01 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,26. Efek dari perendaman di air laut pada umur 1 hari dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang berbeda.



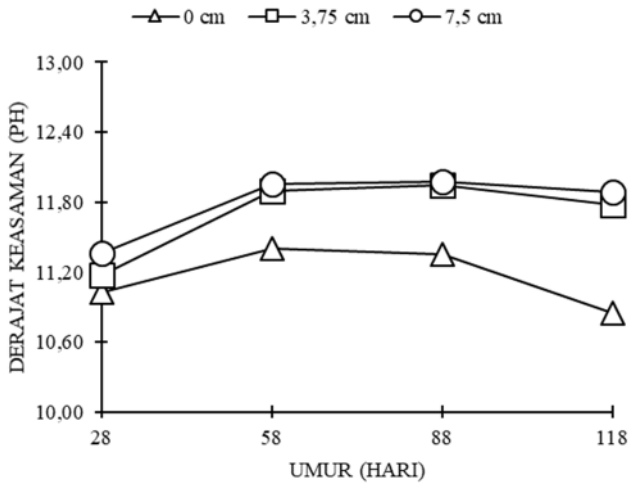
Grafik 4.64 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-12-28

Berdasarkan Grafik 4.64 dapat dilihat bahwa pH beton GS-12-28 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 12,03 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,56. Efek dari *moist curing* dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang sama.



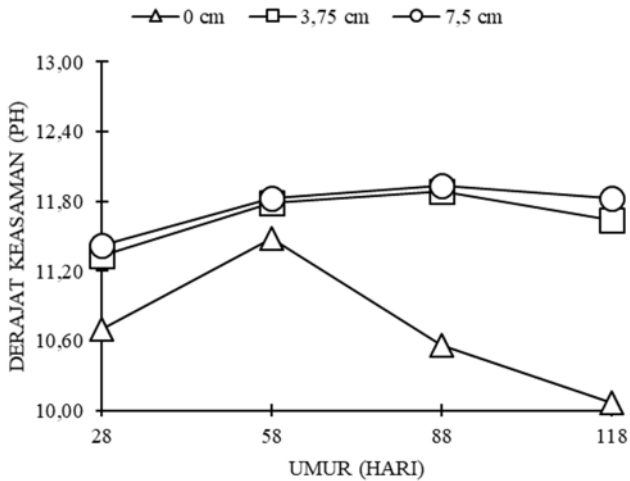
Grafik 4.65 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-12-1

Berdasarkan Grafik 4.65 dapat dilihat bahwa pH beton GS-12-1 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 12,08 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 10,94. Efek dari perendaman di air laut pada umur 1 hari dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang berbeda.



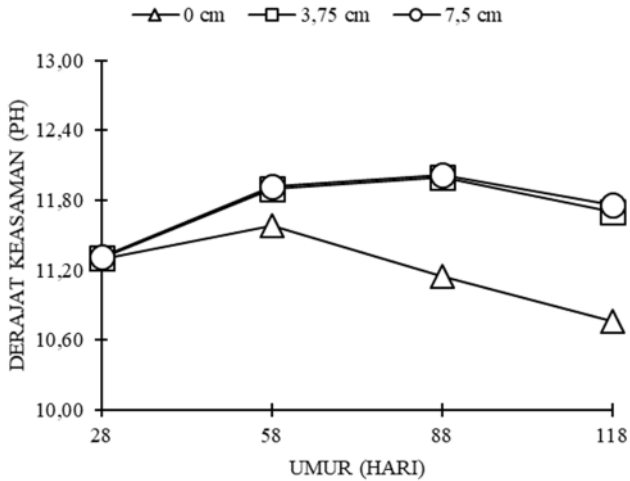
Grafik 4.66 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-10-28

Berdasarkan Grafik 4.66 dapat dilihat bahwa pH beton GN-10-28 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,98 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,40. Efek dari *moist curing* dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang sama.



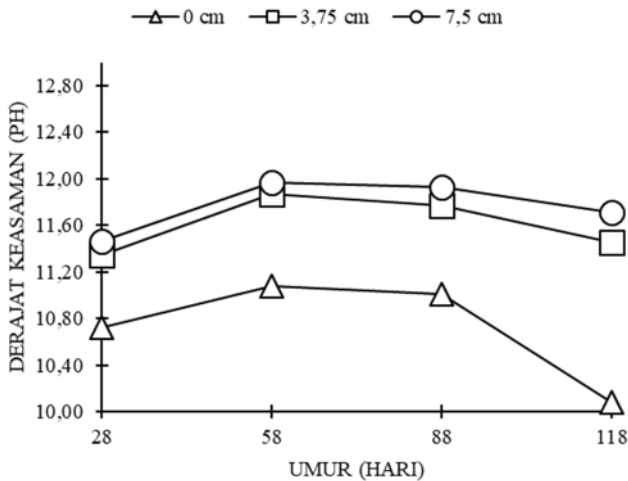
Grafik 4.67 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GN-10-1

Berdasarkan Grafik 4.67 dapat dilihat bahwa pH beton GN-10-1 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,94 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,48. Efek dari perendaman di air laut pada umur 1 hari dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang berbeda.



Grafik 4.68 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-10-28

Berdasarkan Grafik 4.68 dapat dilihat bahwa pH beton GS-10-28 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 12,02 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,58. Efek dari *moist curing* dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang sama.



Grafik 4.69 Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Beton GS-10-1

Berdasarkan Grafik 4.69 dapat dilihat bahwa pH beton GS-10-1 meningkat sampai umur 88 hari untuk kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm dan mulai turun sampai umur 118 hari, serta besar pH tidak terlalu berbeda sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,93 pada umur 88 hari di kedalaman 7,5 cm. Untuk permukaan beton (0 cm) meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari, dengan pH tertinggi sebesar 11,08. Efek dari perendaman di air laut pada umur 1 hari dapat dilihat dari pH mula-mula beton yang berbeda.

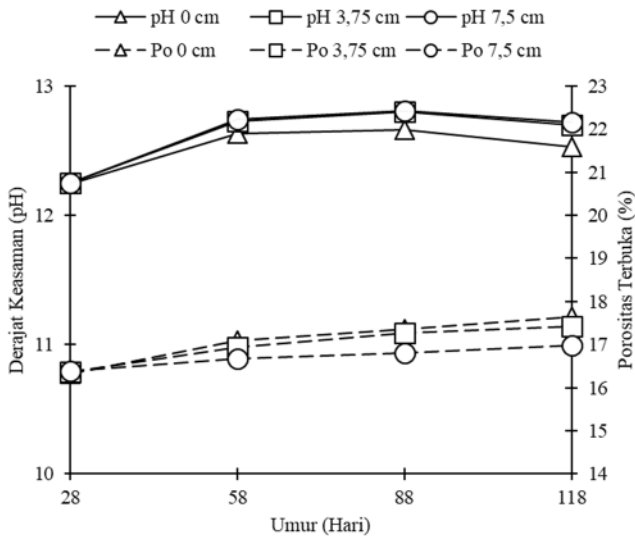
Secara keseluruhan berdasarkan Grafik 4.61 sampai Grafik 4.69 disimpulkan bahwa pH beton pada kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm tidak memiliki perbedaan yang terlalu besar, perbedaan yang terbesar terdapat pada permukaan beton (0 cm) setelah direndam di air laut.

4.3.5.1 Pengaruh pH dari porositas terbuka

Pada umumnya beton geopolimer memiliki pH yang tinggi karena reaksi yang terjadi ketika *fly ash* dicampur dengan larutan alkali. Setelah direndam di air garam, pH beton geopolimer lebih kecil dari beton OPC. Nilai pH dipengaruhi oleh porositas. Semakin besar total porositas maka semakin banyak natrium yang keluar dari dalam beton akibat perendaman dengan air garam (NaCl) (Halim dkk, 2017). Porositas terbuka yang bersifat permeable (dapat ditembus, baik oleh udara ataupun air) (Ekaputri dan Triwulan, 2013) hal ini memberikan kesempatan pada klorida (Cl^-) yang terdapat pada air laut untuk masuk ke dalam beton. Pengaruh dari klorida yang bersifat asam ini dapat menurunkan derajat keasaman (pH) beton. Hubungan porositas terbuka dengan derajat keasaman (pH) dapat dilihat pada Tabel 4.44 sampai Tabel 4.52 dan Grafik 4.70 sampai Grafik 4.78. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan porositas terbuka (P_o) yang terus meningkat mengakibatkan menurunnya derajat keasaman (pH) beton pada umur-umur tertentu, penurunan terbesar terdapat pada permukaan beton-beton geopolimer yang sudah turun pada umur 58 hari.

Tabel 4.44 Hubungan Porositas Terbuka (P_o) terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC

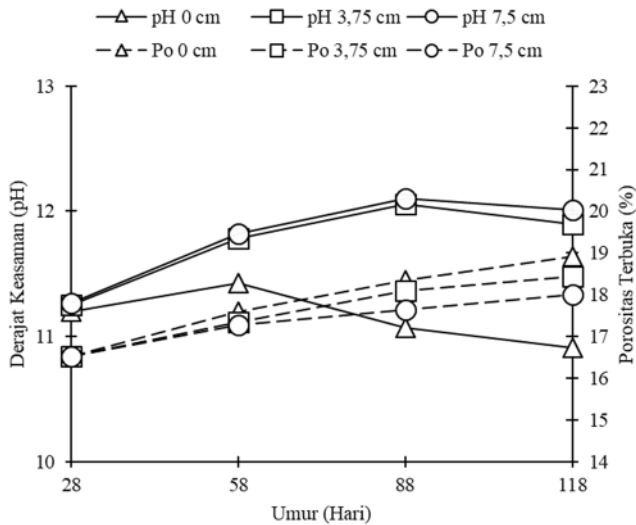
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	12,24	12,63	12,66	12,53
pH 3,75 cm	12,25	12,73	12,80	12,70
pH 7,5 cm	12,25	12,74	12,81	12,72
Po 0 cm (%)	16,33	17,09	17,36	17,65
Po 3,75 cm (%)	16,36	16,95	17,27	17,43
Po 7,5 cm (%)	16,39	16,67	16,81	16,98



Grafik 4.70 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC

Tabel 4.45 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28

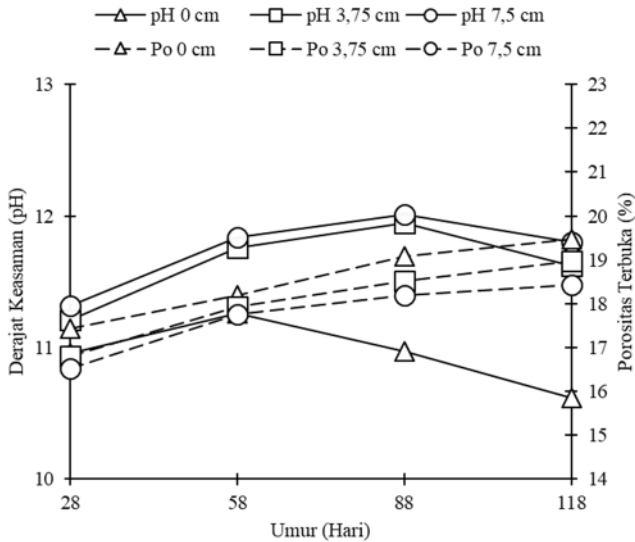
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,20	11,43	11,07	10,91
pH 3,75 cm	11,25	11,78	12,06	11,90
pH 7,5 cm	11,27	11,82	12,10	12,01
Po 0 cm (%)	16,53	17,59	18,35	18,92
Po 3,75 cm (%)	16,53	17,35	18,10	18,45
Po 7,5 cm (%)	16,52	17,27	17,65	18,00



Grafik 4.71 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28

Tabel 4.46 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1

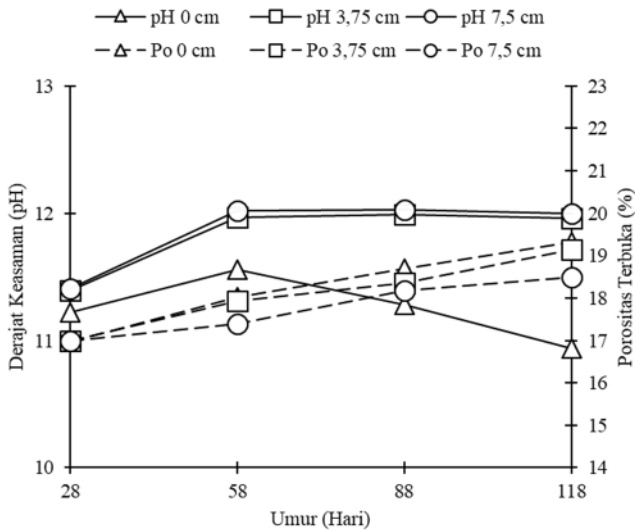
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,96	11,26	10,97	10,62
pH 3,75 cm	11,21	11,76	11,95	11,62
pH 7,5 cm	11,32	11,84	12,01	11,80
Po 0 cm (%)	17,43	18,18	19,09	19,47
Po 3,75 cm (%)	16,81	17,92	18,52	18,97
Po 7,5 cm (%)	16,51	17,76	18,18	18,42



Grafik 4.72 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1

Tabel 4.47 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28

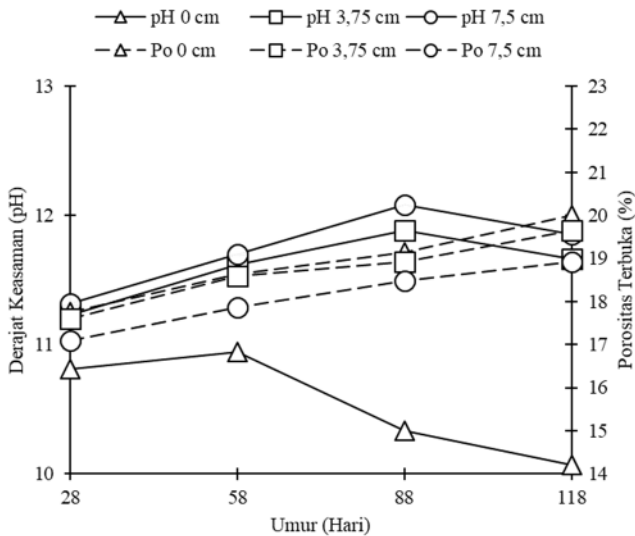
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,22	11,56	11,28	10,94
pH 3,75 cm	11,39	11,97	11,99	11,96
pH 7,5 cm	11,41	12,02	12,03	12,00
Po 0 cm (%)	16,96	18,02	18,69	19,33
Po 3,75 cm (%)	17,00	17,92	18,35	19,13
Po 7,5 cm (%)	17,00	17,39	18,18	18,49



Grafik 4.73 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28

Tabel 4.48 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1

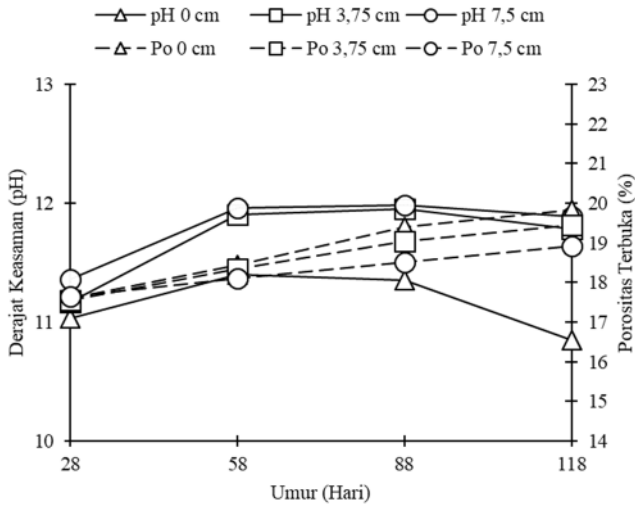
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,81	10,94	10,33	10,07
pH 3,75 cm	11,23	11,62	11,88	11,66
pH 7,5 cm	11,32	11,70	12,08	11,85
Po 0 cm (%)	17,76	18,64	19,13	20,00
Po 3,75 cm (%)	17,59	18,58	18,92	19,64
Po 7,5 cm (%)	17,09	17,86	18,49	18,92



Grafik 4.74 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1

Tabel 4.49 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28

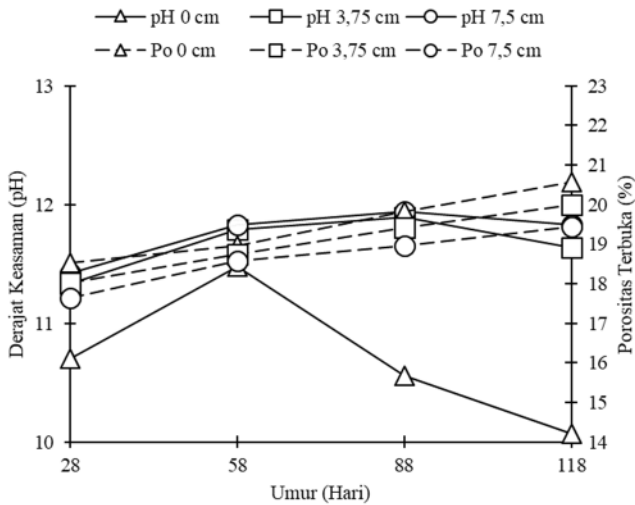
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,03	11,40	11,35	10,85
pH 3,75 cm	11,17	11,90	11,95	11,78
pH 7,5 cm	11,36	11,96	11,98	11,89
Po 0 cm (%)	17,59	18,45	19,39	19,82
Po 3,75 cm (%)	17,54	18,35	19,05	19,44
Po 7,5 cm (%)	17,65	18,10	18,52	18,92



Grafik 4.75 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28

Tabel 4.50 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1

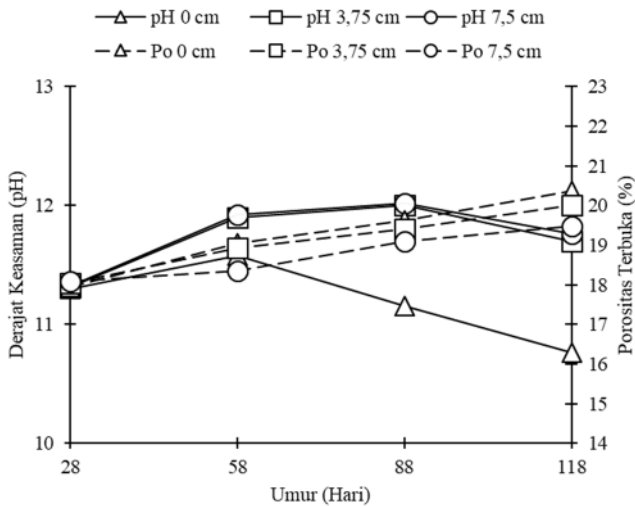
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,70	11,48	10,56	10,07
pH 3,75 cm	11,33	11,79	11,89	11,64
pH 7,5 cm	11,42	11,83	11,94	11,83
Po 0 cm (%)	18,52	18,97	19,82	20,56
Po 3,75 cm (%)	18,02	18,75	19,42	20,00
Po 7,5 cm (%)	17,65	18,58	18,97	19,44



Grafik 4.76 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1

Tabel 4.51 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28

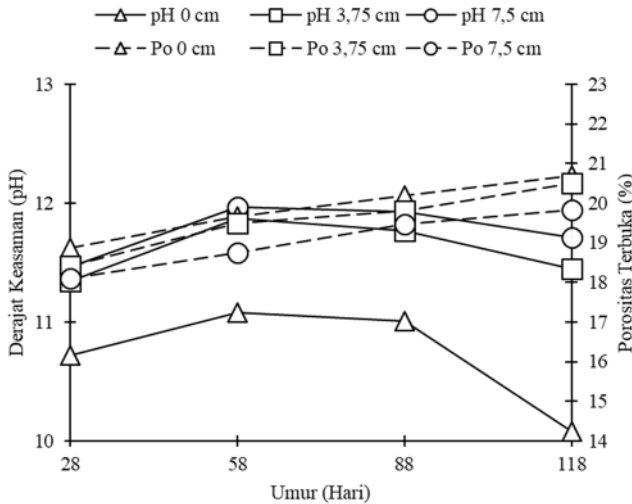
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,30	11,58	11,15	10,76
pH 3,75 cm	11,31	11,90	12,00	11,70
pH 7,5 cm	11,32	11,92	12,02	11,76
Po 0 cm (%)	17,95	19,05	19,63	20,37
Po 3,75 cm (%)	18,03	18,92	19,42	20,00
Po 7,5 cm (%)	18,09	18,35	19,09	19,47



Grafik 4.77 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28

Tabel 4.52 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1

Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,72	11,08	11,01	10,08
pH 3,75 cm	11,34	11,87	11,77	11,45
pH 7,5 cm	11,46	11,97	11,93	11,71
Po 0 cm (%)	18,87	19,66	20,18	20,69
Po 3,75 cm (%)	18,42	19,49	19,81	20,51
Po 7,5 cm (%)	18,10	18,75	19,47	19,83



Grafik 4.78 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1

4.3.5.2 Pengaruh metode *curing* terhadap derajat keasaman (pH)

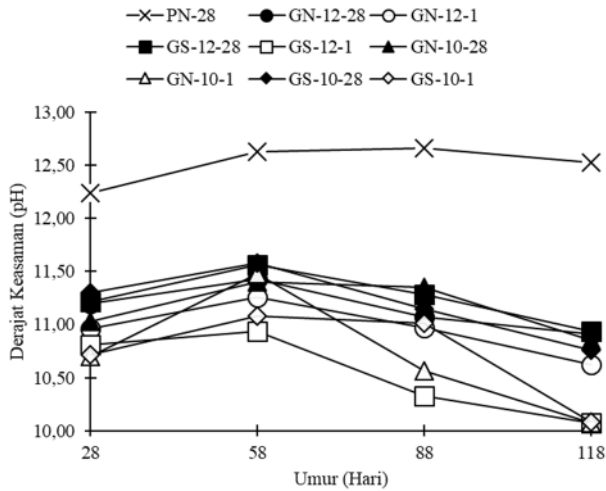
Berdasarkan Tabel 4.44 sampai Tabel 4.52 dapat dilakukan analisa dari metode *curing* terhadap derajat keasaman (pH) beton pada setiap kedalaman beton sebagai berikut.

- a) Permukaan beton (0 cm)
Derajat keasaman (pH) beton pada permukaan beton (0 cm) dapat dilihat pada Tabel 4.53 dan Grafik 4.79. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa pH beton OPC pada permukaan beton (0 cm) lebih tinggi dari beton geopolimer. Kisaran pH beton geopolimer pada permukaan beton adalah dari 10,07 sampai 11,58. pH terkecil terdapat pada GN-10-1 (28 hari = 10,70), GS-

12-1 (58 hari = 10,94), GS-12-1 (88 hari = 10,33), dan GS-12-1 (118 hari = 10,07). Secara keseluruhan pH pada permukaan beton meningkat sampai umur 58 hari lalu menurun sampai umur 118 hari. Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* pada beton geopolimer air suling dan air laut tidak memberikan perbedaan pH yang besar, perendaman di air laut pada umur 1 hari terhadap beton geopolimer air suling dan air laut juga tidak memberikan perbedaan pH yang besar pada permukaan beton. Namun perlakuan perendaman pada umur 1 hari pada beton geopolimer air suling jika dibandingkan dengan *moist curing* menghasilkan nilai pH yang lebih rendah pada permukaan beton, begitu juga dengan beton geopolimer air laut. pH beton geopolimer 12M air suling dan air laut dengan perlakuan *moist curing* tidak memberikan perbedaan nilai pH yang besar.

Tabel 4.53 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Permukaan Beton (0 cm)

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	12,24	12,63	12,66	12,53
2	GN-12-28	11,20	11,43	11,07	10,91
3	GN-12-1	10,96	11,26	10,97	10,62
4	GS-12-28	11,22	11,56	11,28	10,94
5	GS-12-1	10,81	10,94	10,33	10,07
6	GN-10-28	11,03	11,40	11,35	10,85
7	GN-10-1	10,70	11,48	10,56	10,07
8	GS-10-28	11,30	11,58	11,15	10,76
9	GS-10-1	10,72	11,08	11,01	10,08



Grafik 4.79 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Permukaan Beton (0 cm)

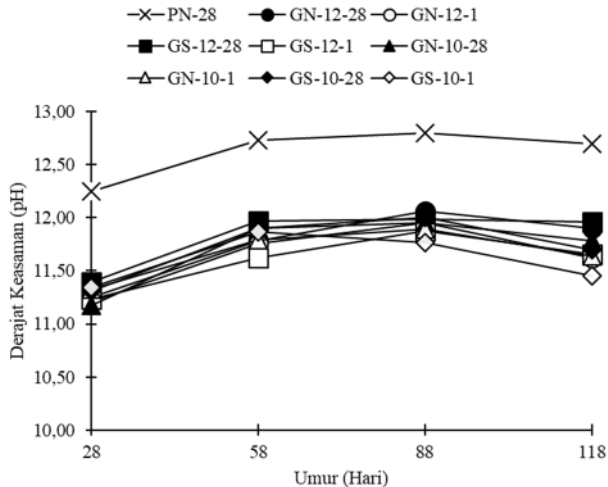
b) Kedalaman beton 3,75 cm

Derajat keasaman (pH) beton pada kedalaman 3,75 cm dapat dilihat pada Tabel 4.54 dan Grafik 4.80. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa pH beton OPC pada kedalaman 3,75 cm lebih tinggi dari beton geopolimer. Kisaran pH beton geopolimer pada kedalaman 3,75 cm adalah dari 11,17 sampai 12,06. pH terkecil terdapat pada GN-10-28 (28 hari = 11,17), GS-12-1 (58 hari = 11,62), GS-10-1 (88 hari = 11,77), dan GS-10-1 (118 hari = 11,45). Secara keseluruhan pH pada kedalaman 3,75 cm meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari. Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman di air laut pada umur 1 hari terhadap beton geopolimer air suling dan air laut tidak memberikan perbedaan pH yang besar, dan

antara molaritas 12M dan 10M tidak memberikan perbedaan nilai pH yang besar pada kedalaman 3,75 cm.

Tabel 4.54 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 3,75 cm

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	12,25	12,73	12,80	12,70
2	GN-12-28	11,25	11,78	12,06	11,90
3	GN-12-1	11,21	11,76	11,95	11,62
4	GS-12-28	11,39	11,97	11,99	11,96
5	GS-12-1	11,23	11,62	11,88	11,66
6	GN-10-28	11,17	11,90	11,95	11,78
7	GN-10-1	11,33	11,79	11,89	11,64
8	GS-10-28	11,31	11,90	12,00	11,70
9	GS-10-1	11,34	11,87	11,77	11,45

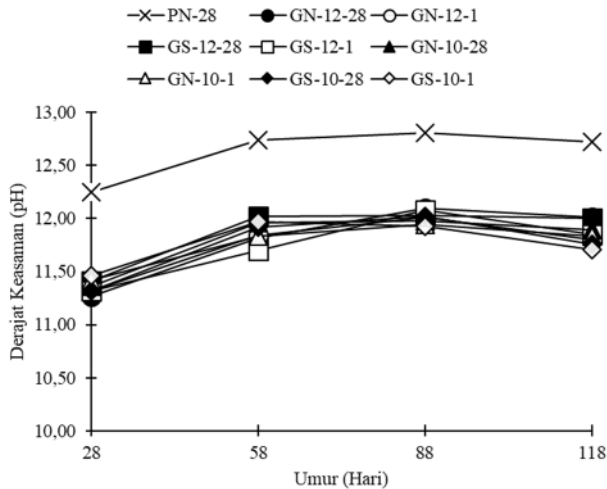


Grafik 4.80 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 3,75 cm

- c) Kedalaman beton 7,5 cm
 Derajat keasaman (pH) beton pada kedalaman 7,5 cm dapat dilihat pada Tabel 4.55 dan Grafik 4.81. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa pH beton OPC pada kedalaman 7,5 cm lebih tinggi dari beton geopolimer. Kisaran pH beton geopolimer pada kedalaman 7,5 cm adalah dari 11,27 sampai 12,10. pH terkecil terdapat pada GN-12-28 (28 hari = 11,27), GS-12-1 (58 hari = 11,70), GS-10-1 (88 hari = 11,93), dan GS-10-1 (118 hari = 11,71). Secara keseluruhan pH pada kedalaman 7,5 cm meningkat sampai umur 88 hari lalu menurun sampai umur 118 hari. Dapat dilihat juga bahwa perlakuan *moist curing* dan perendaman di air laut pada umur 1 hari terhadap beton geopolimer air suling dan air laut tidak memberikan perbedaan pH yang besar, dan antara molaritas 12M dan 10M tidak memberikan perbedaan nilai pH yang besar pada kedalaman 7,5 cm

Tabel 4.55 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 7,5 cm

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	12,25	12,74	12,81	12,72
2	GN-12-28	11,27	11,82	12,10	12,01
3	GN-12-1	11,32	11,84	12,01	11,80
4	GS-12-28	11,41	12,02	12,03	12,00
5	GS-12-1	11,32	11,70	12,08	11,85
6	GN-10-28	11,36	11,96	11,98	11,89
7	GN-10-1	11,42	11,83	11,94	11,83
8	GS-10-28	11,32	11,92	12,02	11,76
9	GS-10-1	11,46	11,97	11,93	11,71



Grafik 4.81 Derajat Keasaman (pH) Beton pada Kedalaman 7,5 cm

Secara keseluruhan berdasarkan Tabel 4.53 sampai Tabel 4.55 dan Grafik 4.79 sampai Grafik 4.81 disimpulkan bahwa perendaman sampai umur 118 hari berpengaruh pada permukaan beton (0 cm) dan belum mempengaruhi kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm. Hal ini dapat dilihat dari pH pada permukaan beton memiliki perbedaan jauh dengan kedalaman 3,75 cm dan 7,5 cm. pH beton geopolimer yang lebih rendah dari beton OPC disebabkan oleh natrium dari dalam beton geopolimer keluar dan bereaksi dengan klorida pada air laut, namun nilai pH beton geopolimer secara keseluruhan berkisar antara 10,07 sampai 12,10 yang masih bersifat basa kuat dan bagus untuk ketahanan terhadap korosi (Halim dkk, 2017). Perlakuan *moist curing* menghasilkan nilai pH yang lebih tinggi dari beton yang direndam di air laut pada umur 1 hari. Dan penggunaan air laut di dalam campuran beton geopolimer menghasilkan nilai pH yang lebih rendah dari beton geopolimer

dengan air suling, hal ini disebabkan oleh kandungan klorida pada air laut yang dapat menurunkan pH beton geopolimer.

4.3.6 Analisa penetrasi klorida

Penetrasi klorida diukur pada kedalaman 0 cm (permukaan), 3,75 cm, dan 7,5 cm (bagian tengah beton). Hasil dari pengujian penetrasi klorida meliputi klorida bebas, terikat dan total. Klorida total merupakan jumlah dari klorida bebas dan terikat. Dan hasil dari klorida bebas dan terikat sudah dikurangi dengan klorida bebas dan terikat mula-mula yang dimiliki oleh *fly ash* dan *bottom ash*. Hasil dari pengujian penetrasi klorida dapat dilihat pada Tabel 4.56 sampai Tabel 4.58.

Tabel 4.56 Hasil Analisa Klorida Bebas

No.	Kode	Kedalaman	Umur			
			28	58	88	118
1	PN-28	0 cm	0,009	0,000	0,088	0,085
		3,75 cm	0,009	0,000	0,066	0,076
		7,5 cm	0,009	0,025	0,069	0,032
2	GN-12-28	0 cm	0,000	0,000	0,012	0,009
		3,75 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
		7,5 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
3	GN-12-1	0 cm	0,000	0,000	0,000	0,127
		3,75 cm	0,000	0,000	0,000	0,121
		7,5 cm	0,000	0,000	0,018	0,000
4	GS-12-28	0 cm	0,000	0,000	0,040	0,050
		3,75 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
		7,5 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
5	GS-12-1	0 cm	0,031	0,017	0,083	0,174
		3,75 cm	0,000	0,000	0,017	0,111
		7,5 cm	0,000	0,000	0,000	0,001
6	GN-10-28	0 cm	0,000	0,000	0,025	0,000
		3,75 cm	0,000	0,081	0,000	0,000
		7,5 cm	0,000	0,037	0,078	0,021
7	GN-10-1	0 cm	0,000	0,139	0,000	0,000
		3,75 cm	0,018	0,048	0,099	0,000
		7,5 cm	0,006	0,000	0,153	0,000
8	GS-10-28	0 cm	0,000	0,000	0,068	0,028
		3,75 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
		7,5 cm	0,000	0,000	0,000	0,000
9	GS-10-1	0 cm	0,000	0,000	0,086	0,099
		3,75 cm	0,000	0,000	0,141	0,091
		7,5 cm	0,000	0,000	0,000	0,013

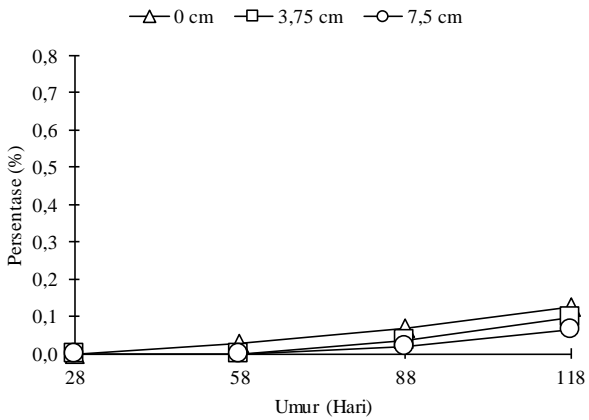
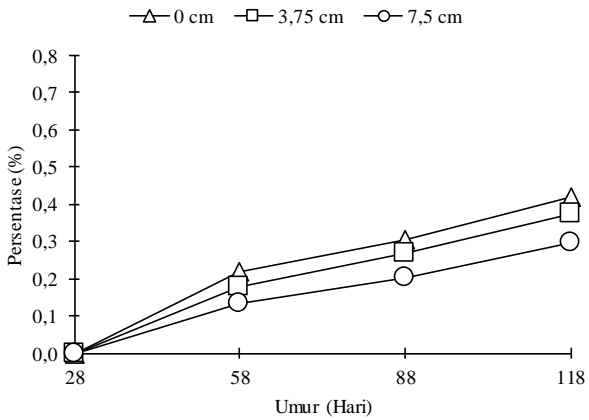
Tabel 4.57 Hasil Analisa Klorida Terikat

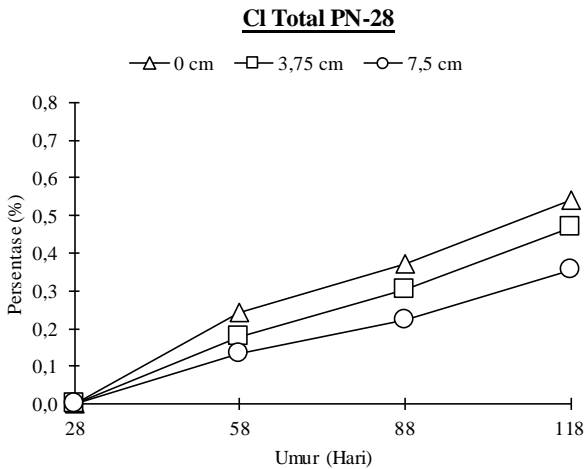
No.	Kode	Kedalaman	Umur			
			28	58	88	118
1	PN-28	0 cm	0,001	0,347	0,295	0,337
		3,75 cm	0,001	0,277	0,278	0,294
		7,5 cm	0,001	0,235	0,234	0,295
2	GN-12-28	0 cm	0,002	0,135	0,244	0,574
		3,75 cm	0,002	0,197	0,313	0,372
		7,5 cm	0,002	0,192	0,187	0,351
3	GN-12-1	0 cm	0,330	0,445	0,483	0,362
		3,75 cm	0,254	0,408	0,479	0,294
		7,5 cm	0,152	0,197	0,219	0,338
4	GS-12-28	0 cm	0,394	0,494	0,531	0,590
		3,75 cm	0,394	0,400	0,516	0,530
		7,5 cm	0,394	0,379	0,400	0,386
5	GS-12-1	0 cm	0,376	0,478	0,563	0,525
		3,75 cm	0,389	0,455	0,455	0,449
		7,5 cm	0,375	0,430	0,414	0,417
6	GN-10-28	0 cm	0,010	0,348	0,412	0,618
		3,75 cm	0,010	0,199	0,461	0,510
		7,5 cm	0,010	0,214	0,259	0,353
7	GN-10-1	0 cm	0,264	0,190	0,493	0,573
		3,75 cm	0,142	0,262	0,282	0,550
		7,5 cm	0,145	0,293	0,161	0,476
8	GS-10-28	0 cm	0,389	0,517	0,478	0,582
		3,75 cm	0,389	0,517	0,419	0,523
		7,5 cm	0,389	0,442	0,442	0,469
9	GS-10-1	0 cm	0,462	0,542	0,507	0,558
		3,75 cm	0,401	0,454	0,384	0,510
		7,5 cm	0,317	0,433	0,410	0,469

Tabel 4.58 Hasil Analisa Klorida Total

No.	Kode	Kedalaman	Umur			
			28	58	88	118
1	PN-28	0 cm	0,011	0,347	0,384	0,422
		3,75 cm	0,011	0,277	0,344	0,370
		7,5 cm	0,011	0,259	0,303	0,327
2	GN-12-28	0 cm	0,002	0,135	0,256	0,583
		3,75 cm	0,002	0,197	0,313	0,372
		7,5 cm	0,002	0,192	0,187	0,351
3	GN-12-1	0 cm	0,330	0,445	0,483	0,489
		3,75 cm	0,254	0,408	0,479	0,414
		7,5 cm	0,152	0,197	0,237	0,338
4	GS-12-28	0 cm	0,394	0,494	0,571	0,639
		3,75 cm	0,394	0,400	0,516	0,530
		7,5 cm	0,394	0,379	0,400	0,386
5	GS-12-1	0 cm	0,407	0,495	0,646	0,700
		3,75 cm	0,389	0,455	0,472	0,560
		7,5 cm	0,375	0,430	0,414	0,418
6	GN-10-28	0 cm	0,010	0,348	0,437	0,618
		3,75 cm	0,010	0,280	0,461	0,510
		7,5 cm	0,010	0,251	0,337	0,374
7	GN-10-1	0 cm	0,264	0,328	0,493	0,573
		3,75 cm	0,160	0,311	0,382	0,550
		7,5 cm	0,150	0,293	0,314	0,476
8	GS-10-28	0 cm	0,389	0,517	0,546	0,610
		3,75 cm	0,389	0,517	0,419	0,523
		7,5 cm	0,389	0,442	0,442	0,469
9	GS-10-1	0 cm	0,462	0,542	0,592	0,657
		3,75 cm	0,401	0,454	0,525	0,601
		7,5 cm	0,317	0,433	0,410	0,482

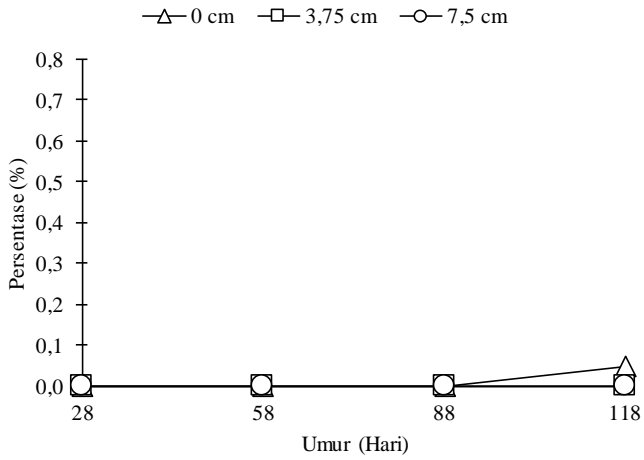
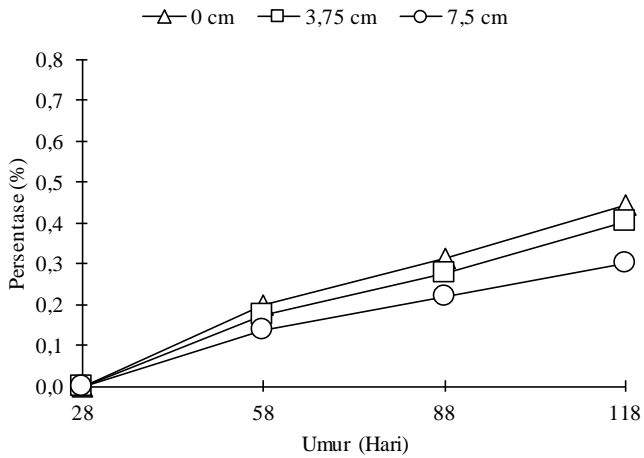
Berdasarkan Tabel 4.56 sampai Tabel 4.58 dapat dibentuk grafik berdasarkan tipe-tipe beton seperti pada grafik-grafik berikut ini.

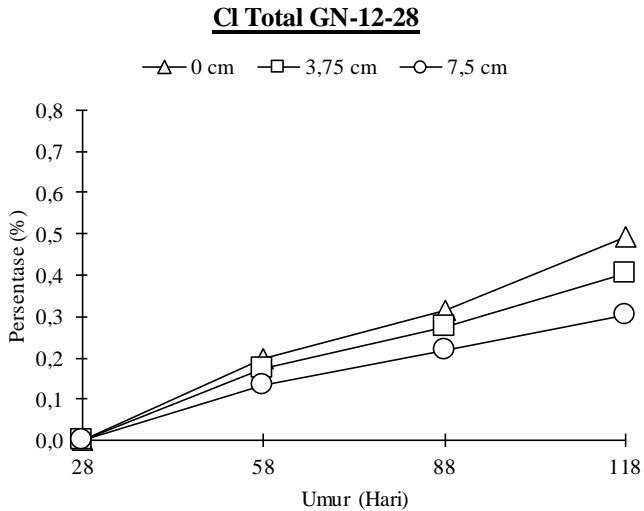
CI Bebas PN-28**CI Terikat PN-28**



Grafik 4.82 Penetrasi Klorida PN-28

Berdasarkan Grafik 4.82 dapat dilihat bahwa beton OPC PN-28 memiliki besar klorida bebas yang baru terlihat pada umur 58 hari dengan CI bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,125%; besar CI terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan CI terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,417%; besar CI total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan CI total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,542%.

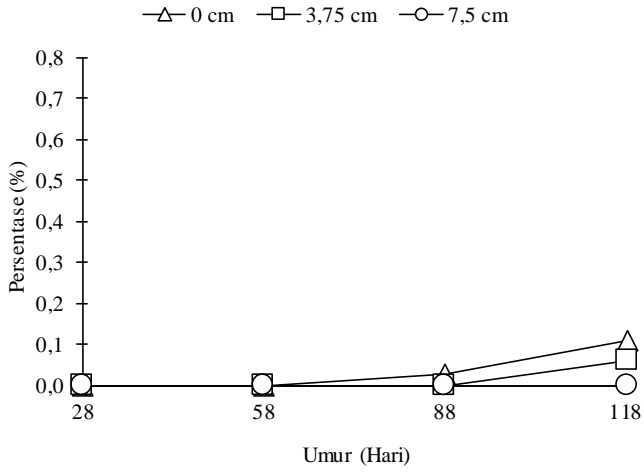
Cl Bebas GN-12-28**Cl Terikat GN-12-28**



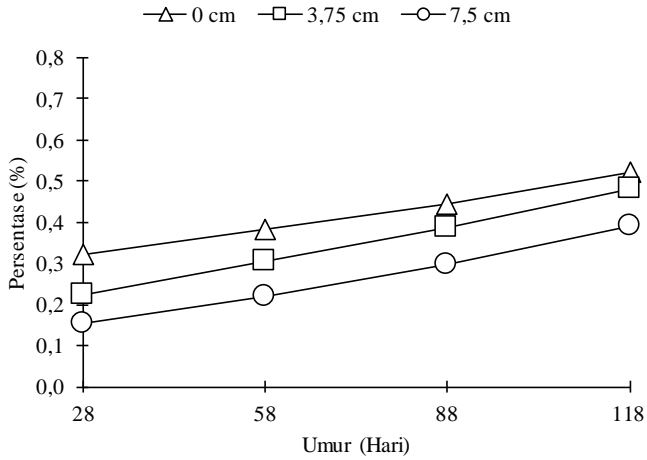
Grafik 4.83 Penetrasi Klorida GN-12-28

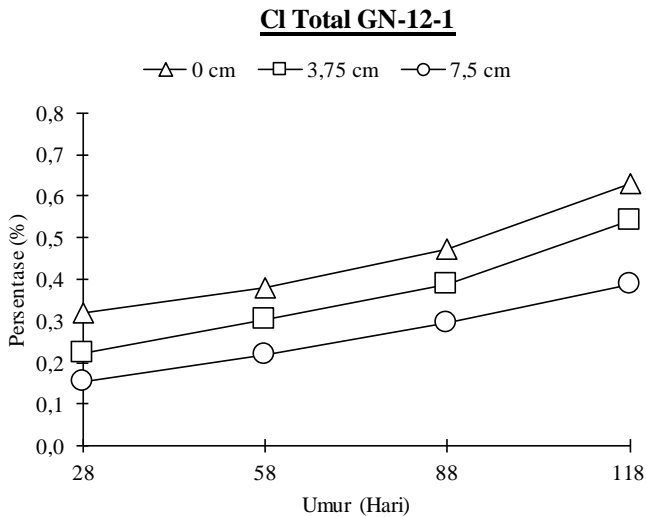
Berdasarkan Grafik 4.83 dapat dilihat bahwa beton GN-12-28 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat dari pada umur 118 hari sebesar 0,049%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,444%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,493%.

Cl Bebas GN-12-1



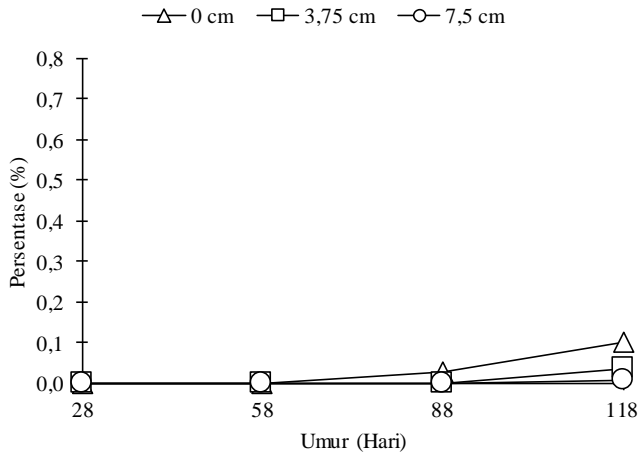
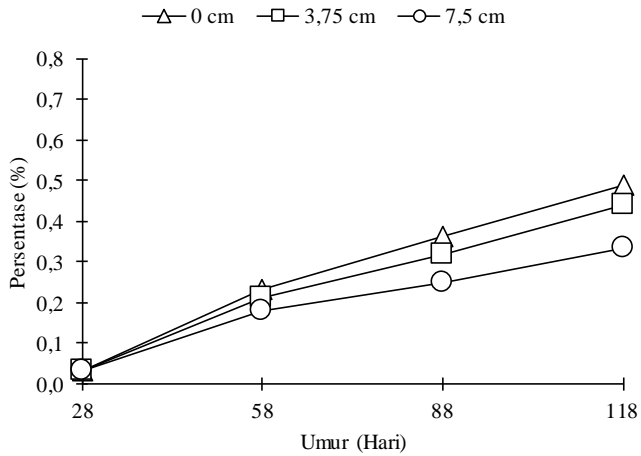
Cl Terikat GN-12-1

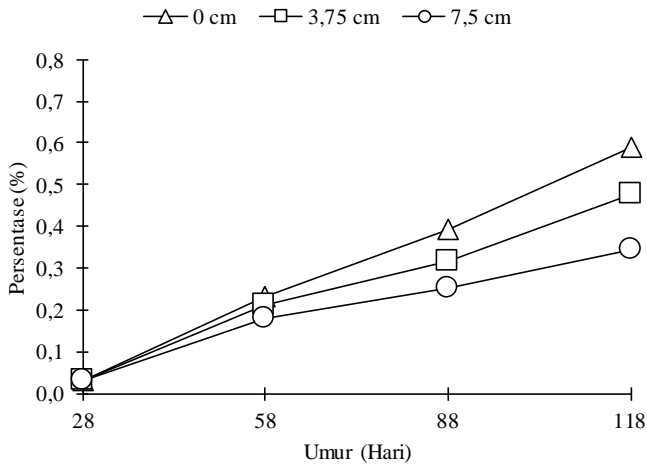




Grafik 4.84 Penetrasi Klorida GN-12-1

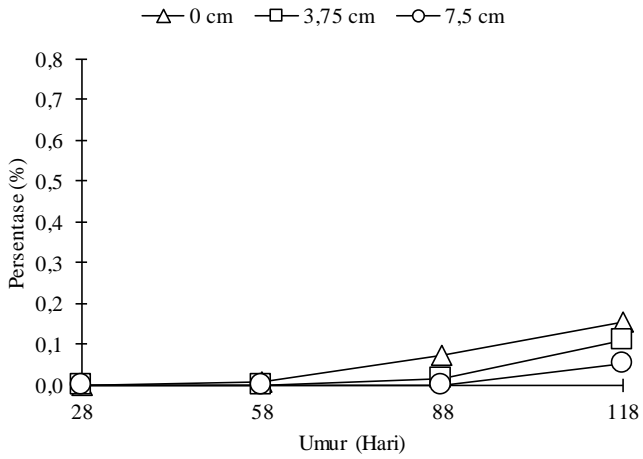
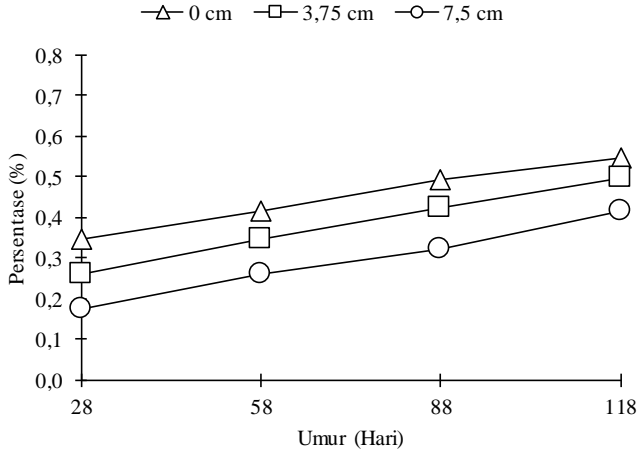
Berdasarkan Grafik 4.84 dapat dilihat bahwa beton GN-12-1 memiliki besar CI bebas yang baru terlihat pada umur 88 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan CI bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,107%; besar CI terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan CI terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 88 hari sebesar 0,523%; besar CI total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan CI total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,631%.

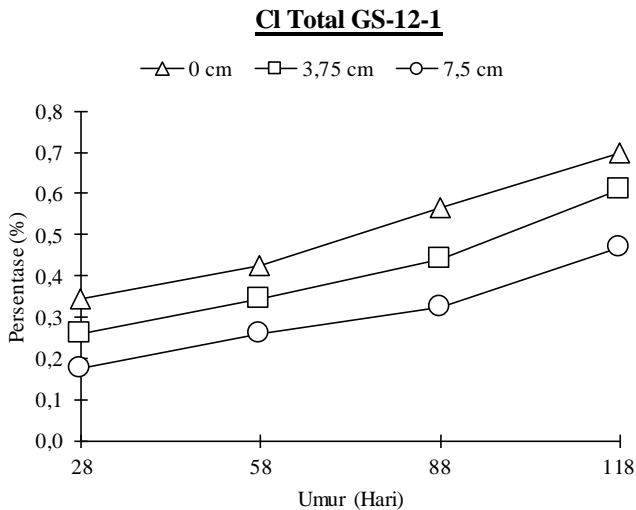
CI Bebas GS-12-28**CI Terikat GS-12-28**

Cl Total GS-12-28

Grafik 4.85 Penetrasi Klorida GS-12-28

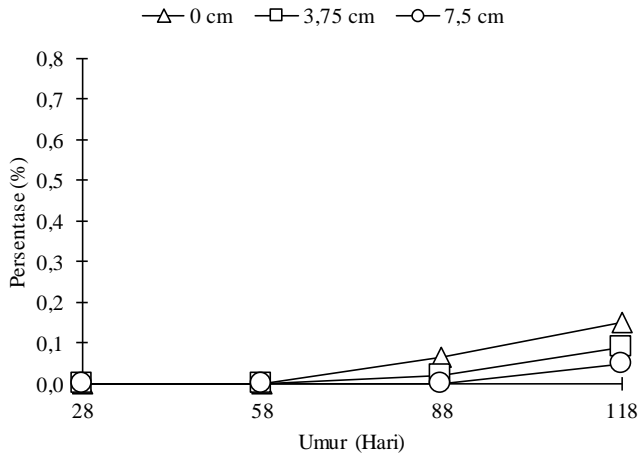
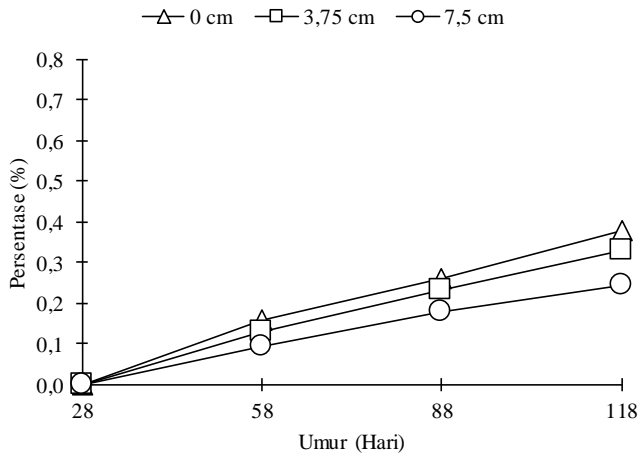
Berdasarkan Grafik 4.85 dapat dilihat bahwa beton GS-12-28 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat pada umur 88 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari yaitu sebesar 0,100%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,490%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,589%.

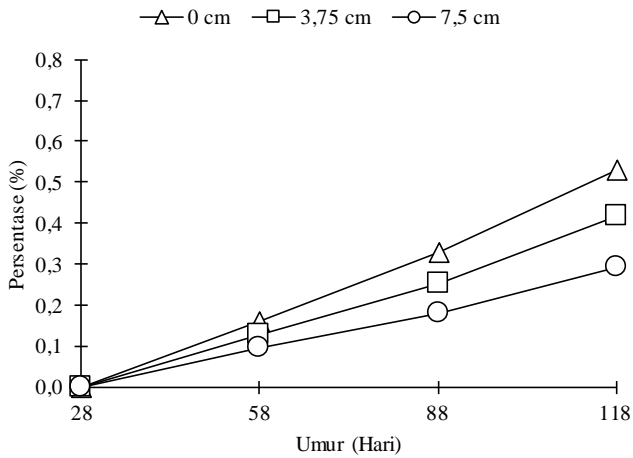
CI Bebas GS-12-1**CI Terikat GS-12-1**



Grafik 4.86 Penetrasi Klorida GS-12-1

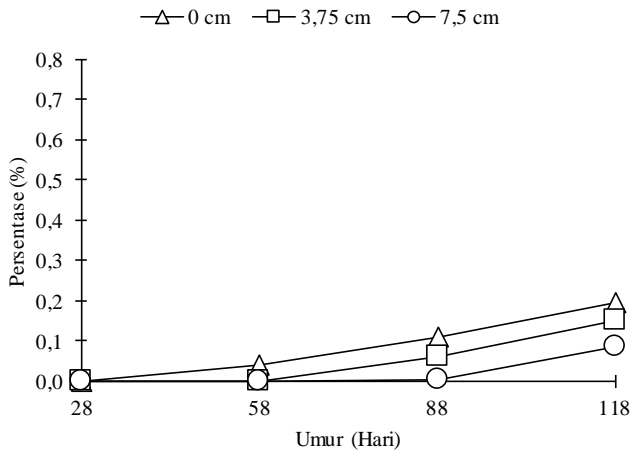
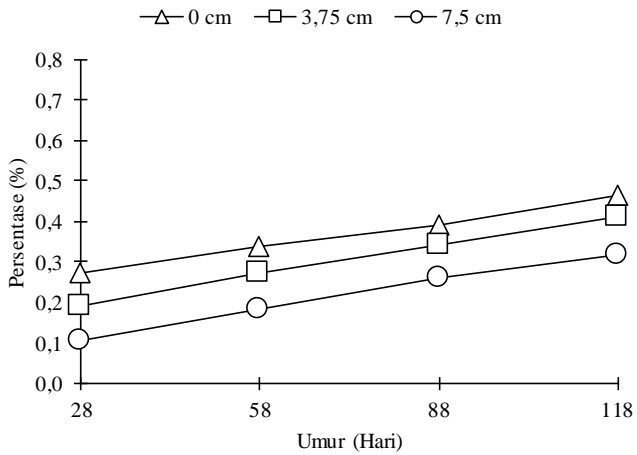
Berdasarkan Grafik 4.86 dapat dilihat bahwa beton GS-12-1 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat pada umur 58 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,154%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,545%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari yaitu sebesar 0,700%.

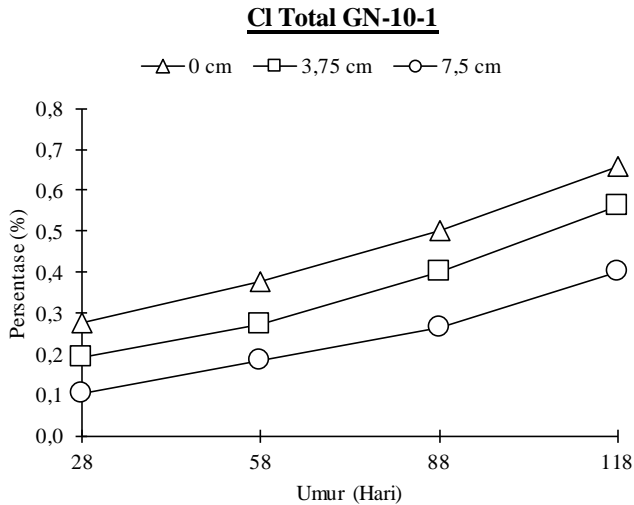
CI Bebas GN-10-28**CI Terikat GN-10-28**

Cl Total GN-10-28

Grafik 4.87 Penetrasi Klorida GN-10-28

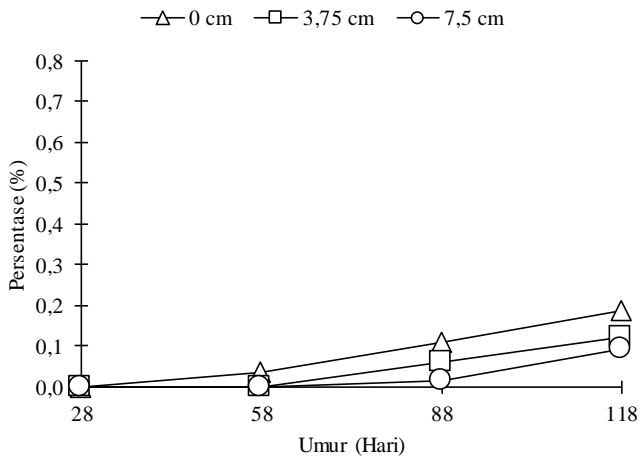
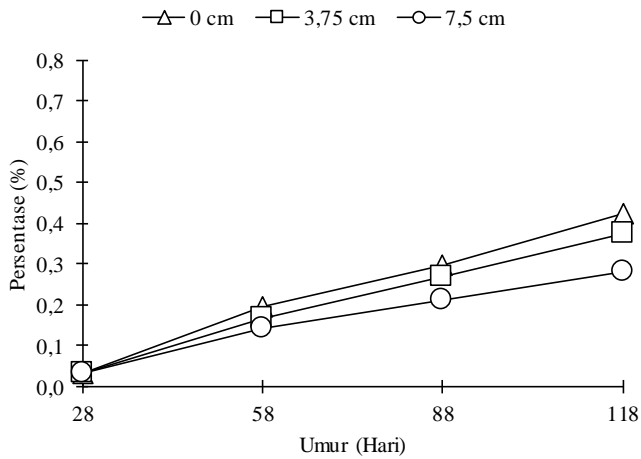
Berdasarkan Grafik 4.87 dapat dilihat bahwa beton GN-10-28 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat pada umur 88 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,153%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,378%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,530%.

CI Bebas GN-10-1**CI Terikat GN-10-1**

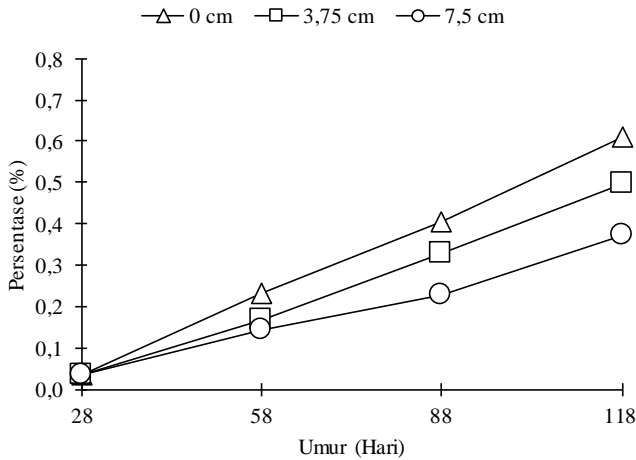


Grafik 4.88 Penetrasi Klorida GN-10-1

Berdasarkan Grafik 4.88 dapat dilihat bahwa beton GN-10-1 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat pada umur 58 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,195%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,463%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,658%.

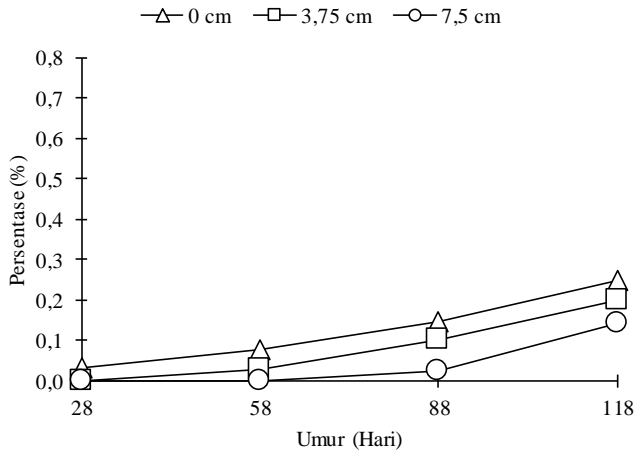
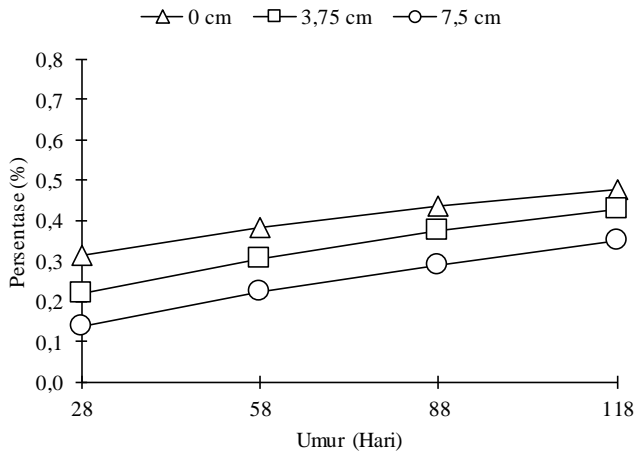
CI Bebas GS-10-28**CI Terikat GS-10-28**

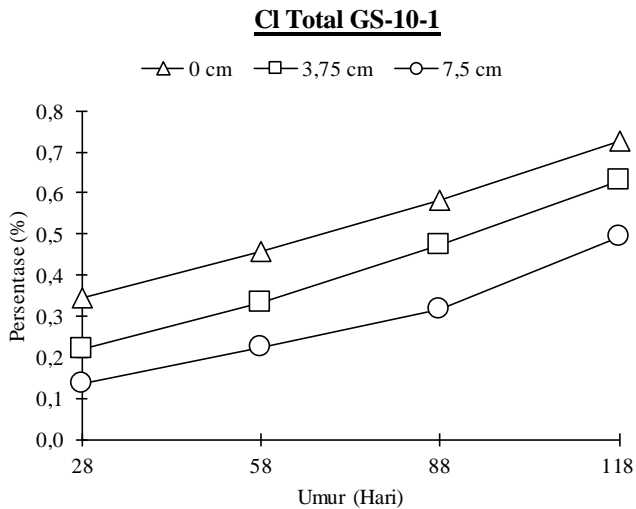
Cl Total GS-10-28



Grafik 4.89 Penetrasi Klorida GS-10-28

Berdasarkan Grafik 4.89 dapat dilihat bahwa beton GS-10-28 memiliki besar Cl bebas yang baru terlihat pada umur 58 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,188%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,422%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari yaitu sebesar 0,610%.

CI Bebas GS-10-1**CI Terikat GS-10-1**



Grafik 4.90 Penetrasi Klorida GS-10-1

Berdasarkan Grafik 4.90 dapat dilihat bahwa beton GS-10-1 memiliki besar Cl bebas yang sudah terlihat pada umur 28 hari dan meningkat sampai umur 118 hari dengan Cl bebas terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari sebesar 0,249%; besar Cl terikat juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl terikat terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari yaitu sebesar 0,478%; besar Cl total juga mengalami peningkatan sampai umur 118 hari dengan Cl total terbesar terdapat pada permukaan beton di umur 118 hari yaitu sebesar 0,727%.

Berdasarkan Grafik 4.82 sampai Grafik 4.90 dapat dilihat bahwa Cl bebas, terikat, dan total untuk setiap variasi beton terus meningkat sampai umur 118 hari. Dan berdasarkan kandungan klorida bebas yang terdapat dalam SNI 03-2854-1992, beton-beton tersebut dapat dikategorikan menjadi jenis

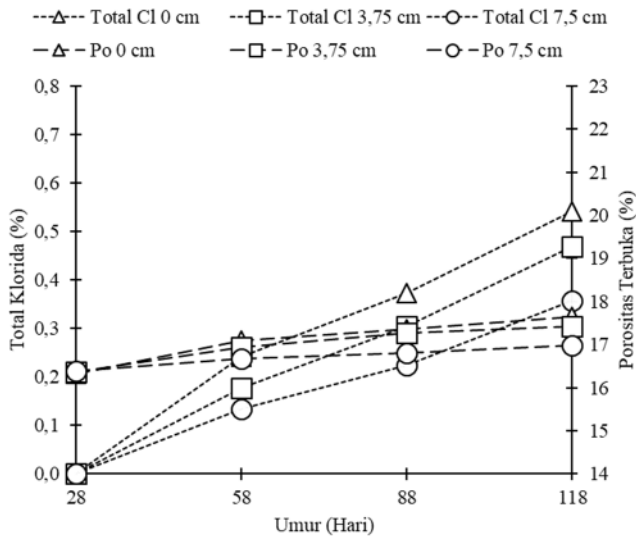
komponen struktur beton bertulang berhubungan dengan klorida dengan batas klorida bebas yang diizinkan sebesar 0,15% terdiri dari PN-28, GN-12-28, GN-12-1, dan GS-12-28; dan kategori jenis komponen struktur beton polos dengan batas klorida bebas yang diizinkan sebesar 0,30% terdiri dari GS-12-1, GN-10-28, GN-10-1, GS-10-28, dan GS-10-1.

4.3.6.1 Pengaruh klorida dari porositas terbuka (Po)

Porositas yang lebih besar meningkatkan penetrasi klorida pada beton geopolimer (Halim dkk, 2017). Hubungan dari porositas terbuka dengan klorida total dapat dilihat pada Tabel 4.59 sampai Tabel 4.67 dan Grafik 4.91 sampai Grafik 4.99. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut dapat dilihat bahwa hubungan porositas terbuka (Po) dengan klorida total adalah dengan semakin membesarnya nilai porositas terbuka maka akan menghasilkan nilai klorida total yang besar juga.

Tabel 4.59 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Klorida (Cl⁻) Total Beton OPC

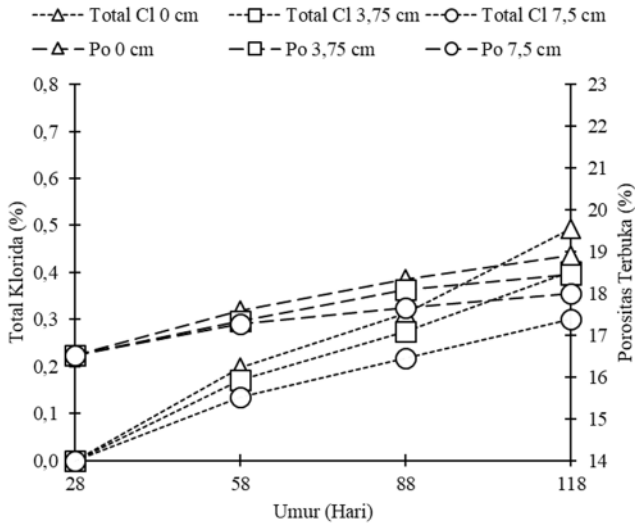
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,24	0,37	0,54
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,18	0,30	0,47
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,13	0,22	0,36
Po 0 cm (%)	16,33	17,09	17,36	17,65
Po 3,75 cm (%)	16,36	16,95	17,27	17,43
Po 7,5 cm (%)	16,39	16,67	16,81	16,98



Grafik 4.91 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) Beton OPC

Tabel 4.60 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GN-12-28

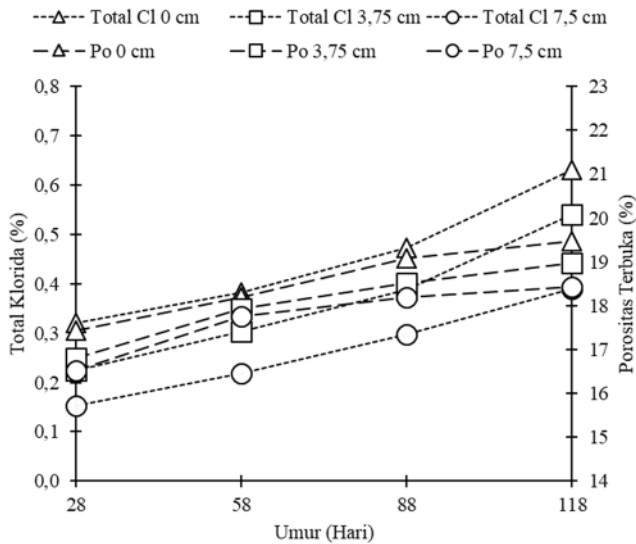
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,20	0,31	0,49
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,17	0,27	0,40
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,14	0,22	0,30
Po 0 cm (%)	16,53	17,59	18,35	18,92
Po 3,75 cm (%)	16,53	17,35	18,10	18,45
Po 7,5 cm (%)	16,52	17,27	17,65	18,00



Grafik 4.92 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GN-12-28

Tabel 4.61 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GN-12-1

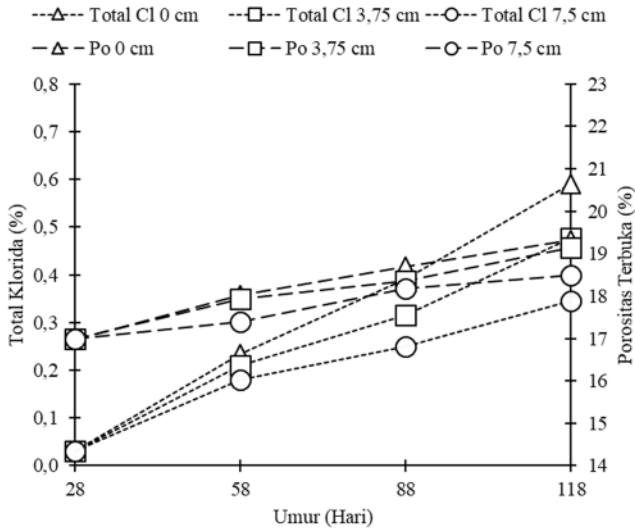
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,32	0,38	0,47	0,63
Total Cl 3,75 cm (%)	0,22	0,30	0,39	0,54
Total Cl 7,5 cm (%)	0,15	0,22	0,30	0,39
Po 0 cm (%)	17,43	18,18	19,09	19,47
Po 3,75 cm (%)	16,81	17,92	18,52	18,97
Po 7,5 cm (%)	16,51	17,76	18,18	18,42



Grafik 4.93 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl⁻) GN-12-1

Tabel 4.62 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl⁻) GS-12-28

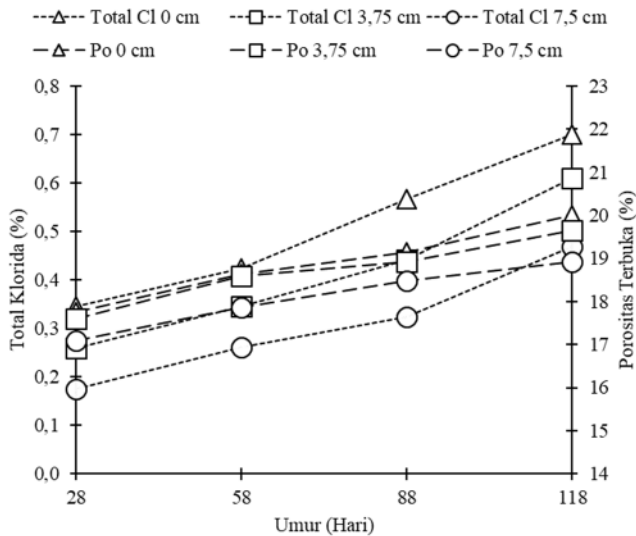
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,03	0,23	0,39	0,59
Total Cl 3,75 cm (%)	0,03	0,21	0,32	0,48
Total Cl 7,5 cm (%)	0,03	0,18	0,25	0,34
Po 0 cm (%)	16,96	18,02	18,69	19,33
Po 3,75 cm (%)	17,00	17,92	18,35	19,13
Po 7,5 cm (%)	17,00	17,39	18,18	18,49



Grafik 4.94 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-12-28

Tabel 4.63 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-12-1

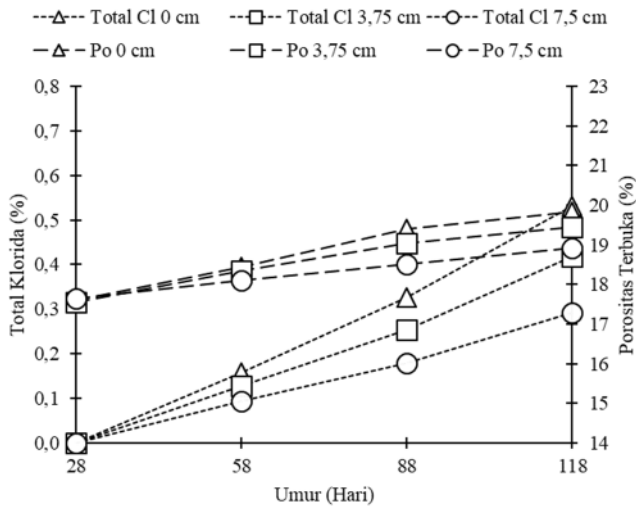
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,35	0,42	0,57	0,70
Total Cl 3,75 cm (%)	0,26	0,34	0,44	0,61
Total Cl 7,5 cm (%)	0,17	0,26	0,32	0,47
Po 0 cm (%)	17,76	18,64	19,13	20,00
Po 3,75 cm (%)	17,59	18,58	18,92	19,64
Po 7,5 cm (%)	17,09	17,86	18,49	18,92



Grafik 4.95 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-12-1

Tabel 4.64 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GN-10-28

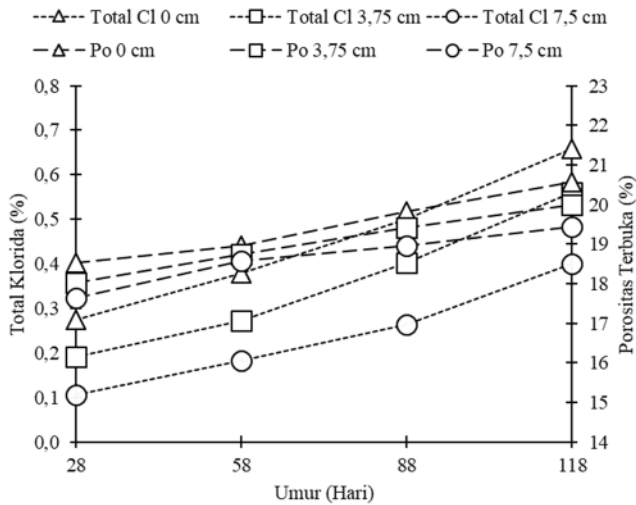
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,16	0,33	0,53
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,13	0,25	0,42
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,09	0,18	0,29
Po 0 cm (%)	17,59	18,45	19,39	19,82
Po 3,75 cm (%)	17,54	18,35	19,05	19,44
Po 7,5 cm (%)	17,65	18,10	18,52	18,92



Grafik 4.96 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl) GN-10-28

Tabel 4.65 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl) GN-10-1

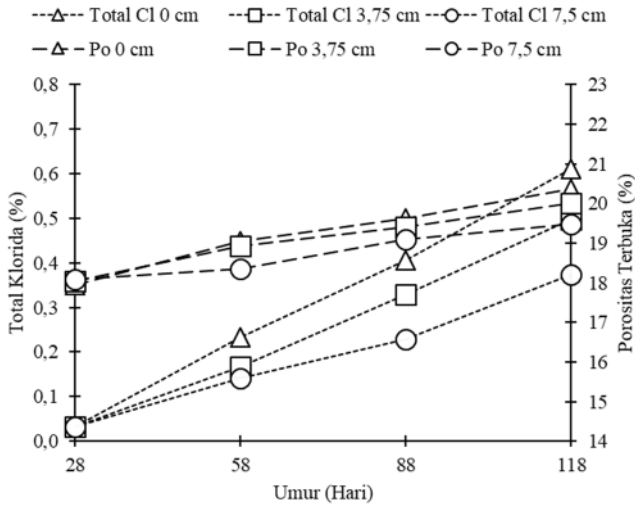
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,27	0,38	0,50	0,66
Total Cl 3,75 cm (%)	0,19	0,27	0,40	0,56
Total Cl 7,5 cm (%)	0,10	0,18	0,26	0,40
Po 0 cm (%)	18,52	18,97	19,82	20,56
Po 3,75 cm (%)	18,02	18,75	19,42	20,00
Po 7,5 cm (%)	17,65	18,58	18,97	19,44



Grafik 4.97 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GN-10-1

Tabel 4.66 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-10-28

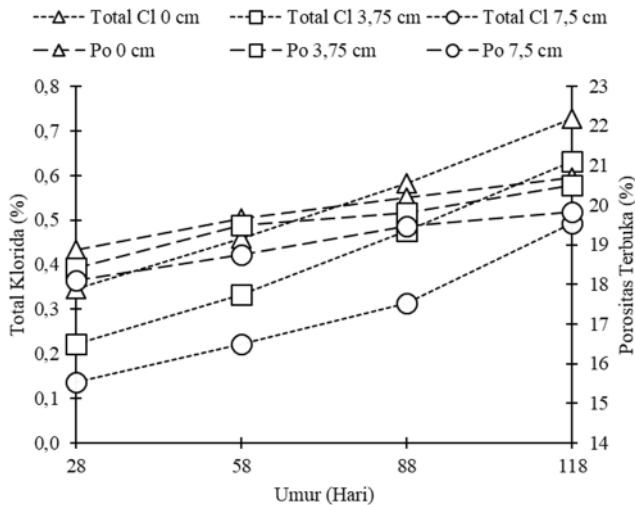
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,03	0,23	0,41	0,61
Total Cl 3,75 cm (%)	0,03	0,17	0,33	0,50
Total Cl 7,5 cm (%)	0,03	0,14	0,23	0,37
Po 0 cm (%)	17,95	19,05	19,63	20,37
Po 3,75 cm (%)	18,03	18,92	19,42	20,00
Po 7,5 cm (%)	18,09	18,35	19,09	19,47



Grafik 4.98 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-10-28

Tabel 4.67 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-10-1

Analisa	Umur			
	28	58	88	118
Total Cl 0 cm (%)	0,35	0,46	0,58	0,73
Total Cl 3,75 cm (%)	0,22	0,33	0,48	0,63
Total Cl 7,5 cm (%)	0,14	0,22	0,31	0,49
Po 0 cm (%)	18,87	19,66	20,18	20,69
Po 3,75 cm (%)	18,42	19,49	19,81	20,51
Po 7,5 cm (%)	18,10	18,75	19,47	19,83



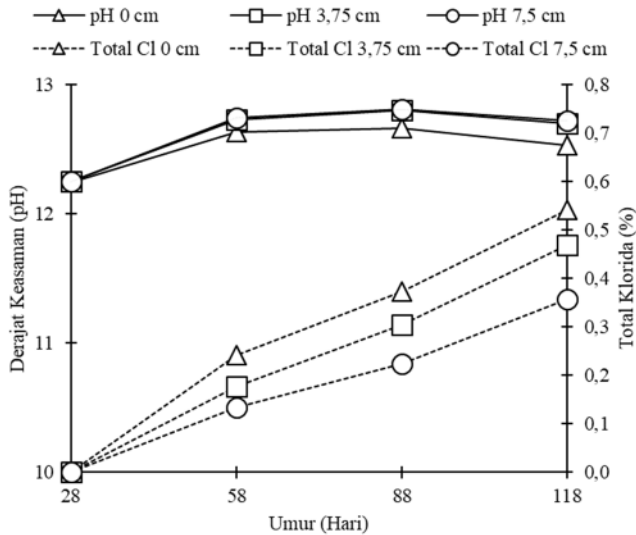
Grafik 4.99 Hubungan Porositas Terbuka (Po) terhadap Penetrasi Klorida (Cl^-) GS-10-1

4.3.6.2 Pengaruh penetrasi klorida terhadap derajat keasaman (pH)

Porositas terbuka yang bersifat permeable (dapat ditembus, baik oleh udara ataupun air) (Ekaputri dan Triwulan, 2013) memberikan kesempatan pada klorida (Cl^-) yang terdapat pada air laut untuk masuk ke dalam beton. Hubungan dari klorida total di dalam beton terhadap nilai derajat keasaman (pH) dapat dilihat pada Tabel 4.68 sampai Tabel 4.76 dan Grafik 4.100 sampai Grafik 4.108. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin banyak kandungan klorida di dalam beton maka akan menurunkan besar derajat keasaman (pH) beton.

Tabel 4.68 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC

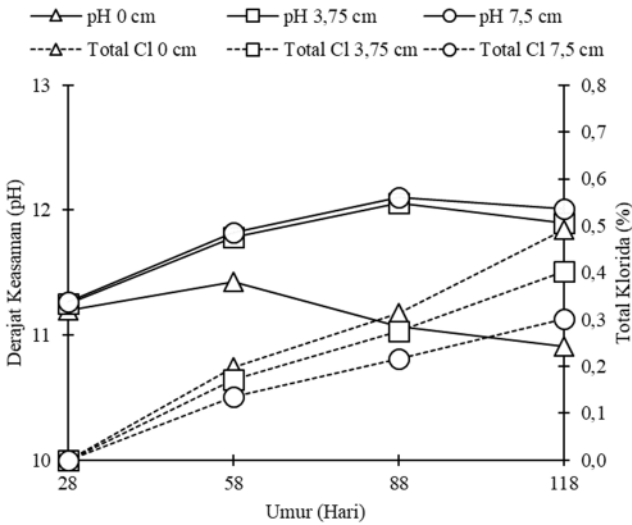
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	12,24	12,63	12,66	12,53
pH 3,75 cm	12,25	12,73	12,80	12,70
pH 7,5 cm	12,25	12,74	12,81	12,72
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,24	0,37	0,54
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,18	0,30	0,47
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,13	0,22	0,36



Grafik 4.100 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) Beton OPC

Tabel 4.69 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28

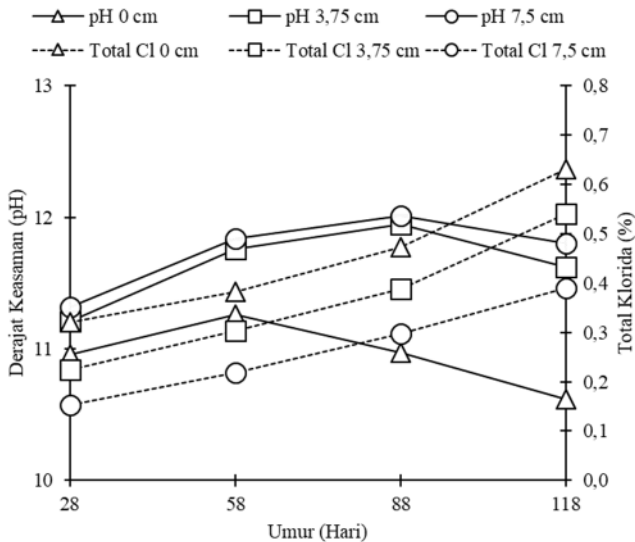
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,20	11,43	11,07	10,91
pH 3,75 cm	11,25	11,78	12,06	11,90
pH 7,5 cm	11,27	11,82	12,10	12,01
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,20	0,31	0,49
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,17	0,27	0,40
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,14	0,22	0,30



Grafik 4.101 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-28

Tabel 4.70 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1

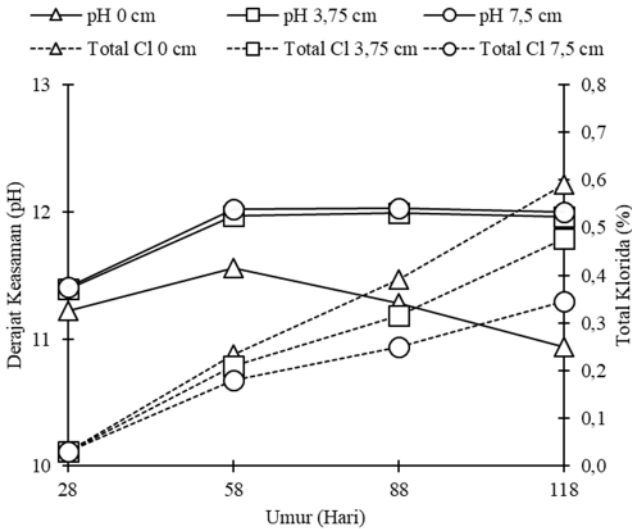
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,96	11,26	10,97	10,62
pH 3,75 cm	11,21	11,76	11,95	11,62
pH 7,5 cm	11,32	11,84	12,01	11,80
Total Cl 0 cm (%)	0,32	0,38	0,47	0,63
Total Cl 3,75 cm (%)	0,22	0,30	0,39	0,54
Total Cl 7,5 cm (%)	0,15	0,22	0,30	0,39



Grafik 4.102 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-12-1

Tabel 4.71 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28

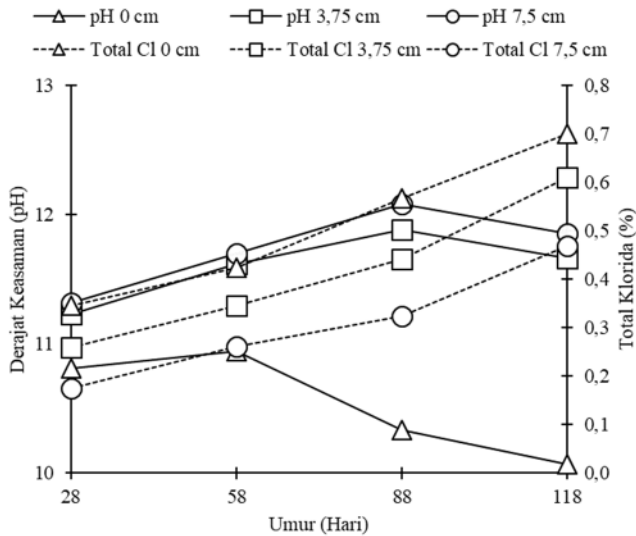
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,22	11,56	11,28	10,94
pH 3,75 cm	11,39	11,97	11,99	11,96
pH 7,5 cm	11,41	12,02	12,03	12,00
Total Cl 0 cm (%)	0,03	0,23	0,39	0,59
Total Cl 3,75 cm (%)	0,03	0,21	0,32	0,48
Total Cl 7,5 cm (%)	0,03	0,18	0,25	0,34



Grafik 4.103 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-28

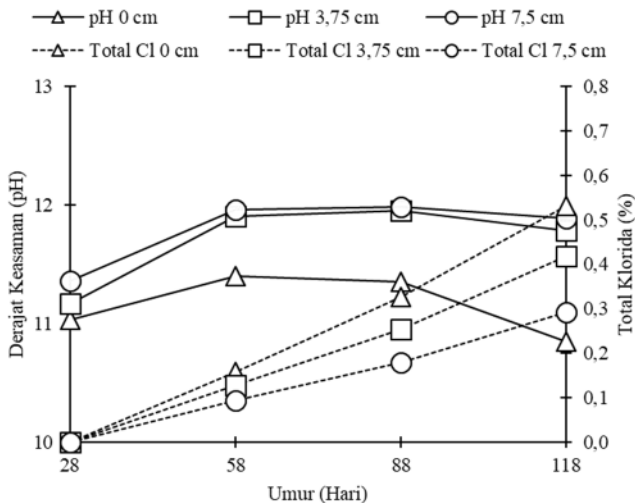
Tabel 4.72 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1

Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,81	10,94	10,33	10,07
pH 3,75 cm	11,23	11,62	11,88	11,66
pH 7,5 cm	11,32	11,70	12,08	11,85
Total Cl 0 cm (%)	0,35	0,42	0,57	0,70
Total Cl 3,75 cm (%)	0,26	0,34	0,44	0,61
Total Cl 7,5 cm (%)	0,17	0,26	0,32	0,47

Grafik 4.104 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-12-1

Tabel 4.73 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28

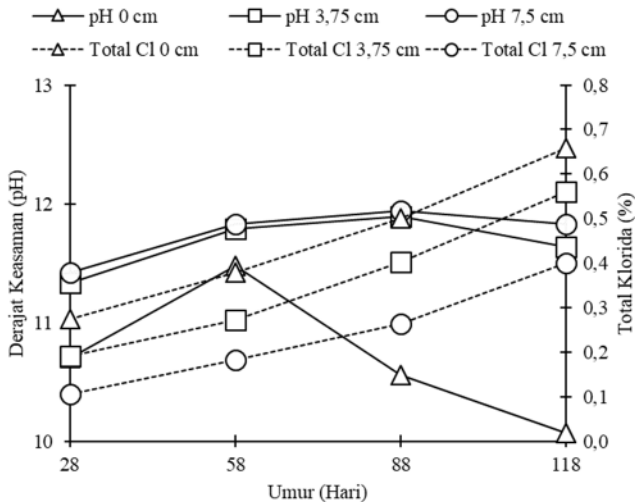
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,03	11,40	11,35	10,85
pH 3,75 cm	11,17	11,90	11,95	11,78
pH 7,5 cm	11,36	11,96	11,98	11,89
Total Cl 0 cm (%)	0,00	0,16	0,33	0,53
Total Cl 3,75 cm (%)	0,00	0,13	0,25	0,42
Total Cl 7,5 cm (%)	0,00	0,09	0,18	0,29



Grafik 4.105 Hubungan Klorida (Cl^-) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-28

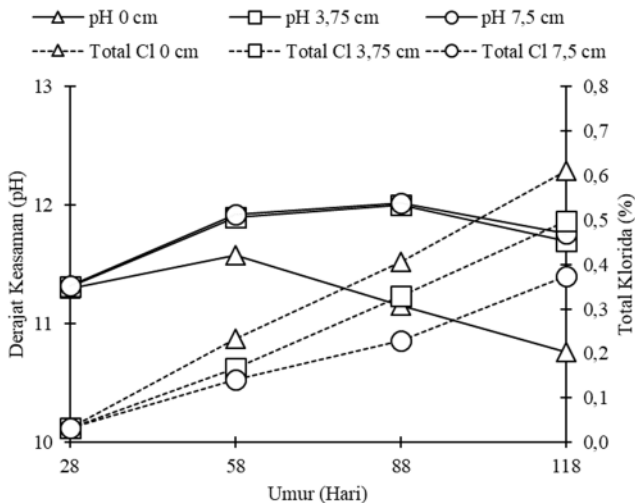
Tabel 4.74 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1

Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,70	11,48	10,56	10,07
pH 3,75 cm	11,33	11,79	11,89	11,64
pH 7,5 cm	11,42	11,83	11,94	11,83
Total Cl 0 cm (%)	0,27	0,38	0,50	0,66
Total Cl 3,75 cm (%)	0,19	0,27	0,40	0,56
Total Cl 7,5 cm (%)	0,10	0,18	0,26	0,40

Grafik 4.106 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GN-10-1

Tabel 4.75 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28

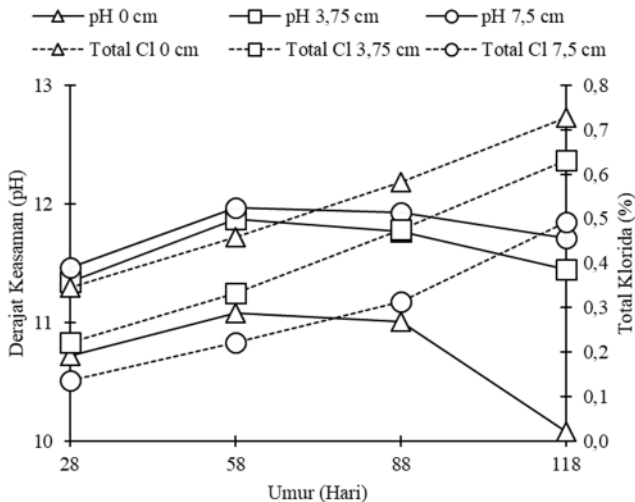
Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	11,30	11,58	11,15	10,76
pH 3,75 cm	11,31	11,90	12,00	11,70
pH 7,5 cm	11,32	11,92	12,02	11,76
Total Cl 0 cm (%)	0,03	0,23	0,41	0,61
Total Cl 3,75 cm (%)	0,03	0,17	0,33	0,50
Total Cl 7,5 cm (%)	0,03	0,14	0,23	0,37



Grafik 4.107 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-28

Tabel 4.76 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1

Analisa	Umur			
	28	58	88	118
pH 0 cm	10,72	11,08	11,01	10,08
pH 3,75 cm	11,34	11,87	11,77	11,45
pH 7,5 cm	11,46	11,97	11,93	11,71
Total Cl 0 cm (%)	0,35	0,46	0,58	0,73
Total Cl 3,75 cm (%)	0,22	0,33	0,48	0,63
Total Cl 7,5 cm (%)	0,14	0,22	0,31	0,49

Grafik 4.108 Hubungan Klorida (Cl⁻) Total terhadap Derajat Keasaman (pH) GS-10-1

4.3.6.3 Pengaruh metode *curing* terhadap penetrasi klorida

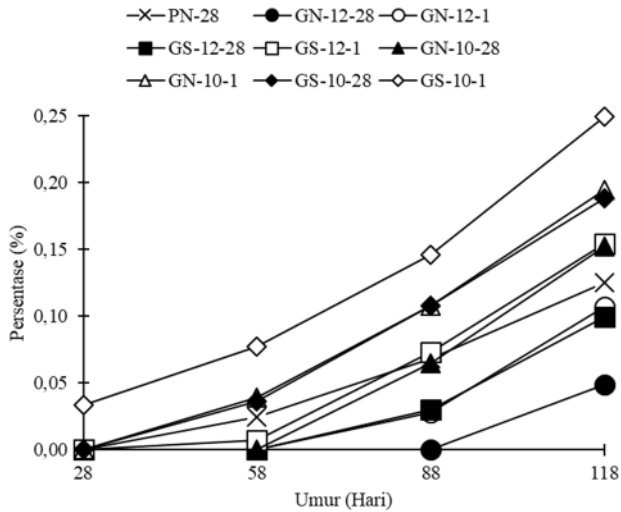
Berdasarkan Tabel 4.56 sampai Tabel 4.58 maka dapat dilakukan analisa dari metode *curing* terhadap penetrasi klorida beton sebagai berikut.

a) Klorida bebas

Klorida bebas untuk setiap kedalaman beton dapat dilihat pada Tabel 4.77 sampai Tabel 4.79 dan Grafik 4.109 sampai Grafik 4.111. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut dapat dilihat bahwa klorida bebas meningkat sampai umur 118 hari untuk setiap kedalaman dan variasi beton dengan klorida bebas terbesar untuk setiap kedalaman terdapat pada beton geopolimer air laut dengan perendaman di air laut pada umur 1 hari (GS-10-1). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan perendaman pada umur 1 hari pada air laut untuk beton geopolimer air suling dan air laut memberikan nilai klorida bebas yang lebih besar dari beton geopolimer dengan perlakuan *moist curing*, dan beton geopolimer dengan molaritas 12M memiliki kandungan klorida bebas yang lebih kecil dari beton geopolimer dengan molaritas 10M baik dengan air suling maupun air laut. Serta penggunaan air laut pada beton geopolimer memberikan kandungan klorida bebas yang lebih besar dari beton geopolimer dengan air suling.

Tabel 4.77 Klorida Bebas pada Permukaan Beton (0 cm)
(%)

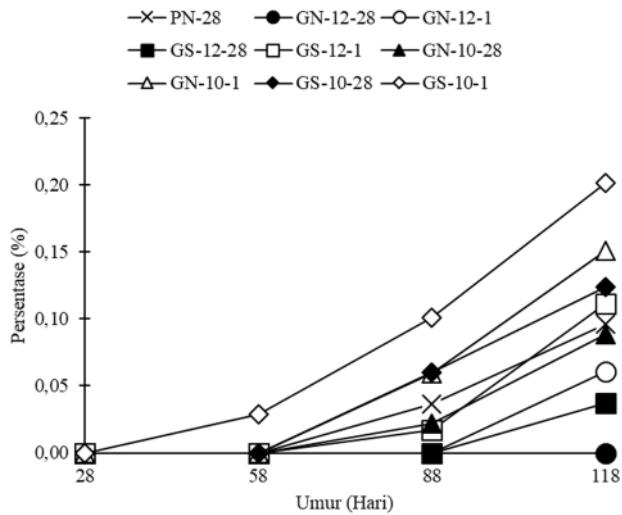
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,025	0,068	0,125
2	GN-12-28	0,000	0,000	0,000	0,049
3	GN-12-1	0,000	0,000	0,028	0,107
4	GS-12-28	0,000	0,000	0,030	0,100
5	GS-12-1	0,000	0,007	0,073	0,154
6	GN-10-28	0,000	0,000	0,065	0,153
7	GN-10-1	0,000	0,039	0,108	0,195
8	GS-10-28	0,000	0,036	0,108	0,188
9	GS-10-1	0,034	0,078	0,146	0,249



Grafik 4.109 Klorida Bebas pada Permukaan Beton (0 cm)

Tabel 4.78 Klorida Bebas pada Kedalaman 3,75 cm (%)

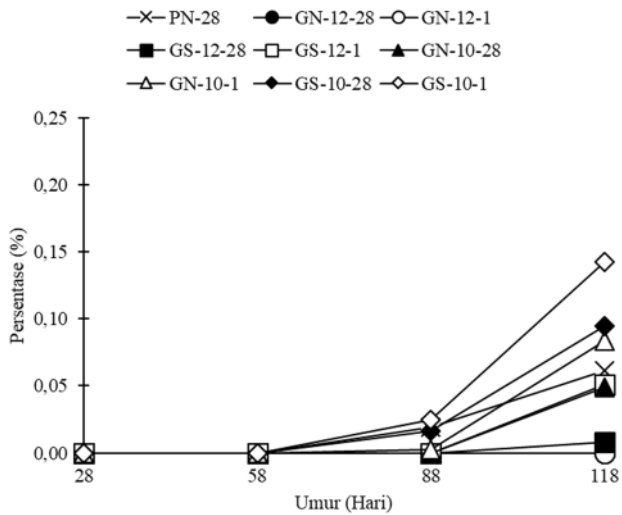
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,000	0,036	0,096
2	GN-12-28	0,000	0,000	0,000	0,000
3	GN-12-1	0,000	0,000	0,000	0,061
4	GS-12-28	0,000	0,000	0,000	0,037
5	GS-12-1	0,000	0,000	0,017	0,111
6	GN-10-28	0,000	0,000	0,022	0,088
7	GN-10-1	0,000	0,000	0,059	0,151
8	GS-10-28	0,000	0,000	0,060	0,124
9	GS-10-1	0,000	0,029	0,101	0,201



Grafik 4.110 Klorida Bebas pada Kedalaman 3,75 cm

Tabel 4.79 Klorida Bebas pada Kedalaman 7,5 cm (%)

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,000	0,019	0,062
2	GN-12-28	0,000	0,000	0,000	0,000
3	GN-12-1	0,000	0,000	0,000	0,000
4	GS-12-28	0,000	0,000	0,000	0,008
5	GS-12-1	0,000	0,000	0,000	0,051
6	GN-10-28	0,000	0,000	0,000	0,049
7	GN-10-1	0,000	0,000	0,003	0,084
8	GS-10-28	0,000	0,000	0,016	0,095
9	GS-10-1	0,000	0,000	0,024	0,143



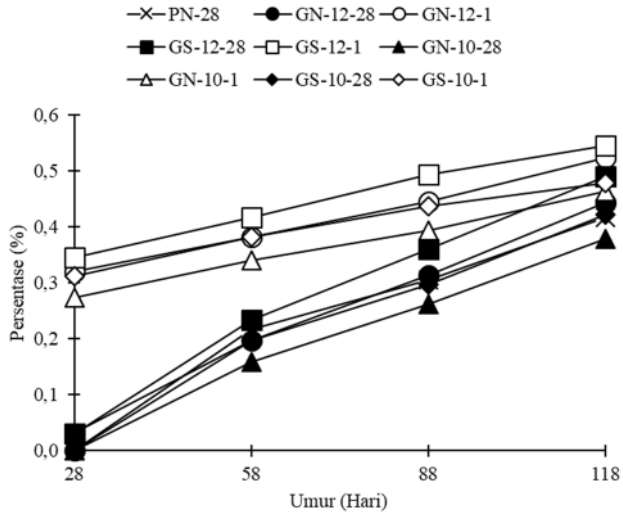
Grafik 4.111 Klorida Bebas pada Kedalaman 7,5 cm

b) Klorida terikat

Klorida terikat untuk setiap kedalaman beton dapat dilihat pada Tabel 4.80 sampai Tabel 4.82 dan Grafik 4.112 sampai Grafik 4.114. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut dapat dilihat bahwa klorida terikat meningkat sampai umur 118 hari untuk setiap kedalaman dan variasi beton dengan klorida terikat terbesar untuk setiap kedalaman terdapat pada beton geopolimer air laut dengan perendaman di air laut pada umur 1 hari (GS-12-1). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan perendaman pada umur 1 hari pada air laut untuk beton geopolimer air suling dan air laut memberikan nilai klorida terikat yang lebih besar dari beton geopolimer dengan perlakuan *moist curing*, dan beton geopolimer dengan molaritas 12M memiliki kandungan klorida terikat yang lebih besar dari beton geopolimer dengan molaritas 10M baik dengan air suling maupun air laut. Serta penggunaan air laut pada beton geopolimer memberikan kandungan klorida terikat yang lebih besar dari beton geopolimer dengan air suling.

Tabel 4.80 Klorida Terikat pada Permukaan Beton (0 cm) (%)

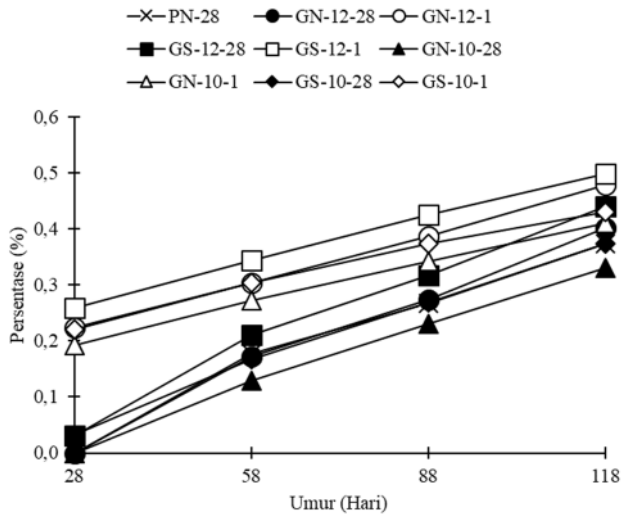
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,217	0,305	0,417
2	GN-12-28	0,000	0,197	0,313	0,444
3	GN-12-1	0,320	0,382	0,445	0,523
4	GS-12-28	0,031	0,234	0,361	0,490
5	GS-12-1	0,346	0,418	0,493	0,545
6	GN-10-28	0,000	0,158	0,262	0,378
7	GN-10-1	0,274	0,340	0,393	0,463
8	GS-10-28	0,033	0,197	0,298	0,422
9	GS-10-1	0,312	0,382	0,437	0,478



Grafik 4.112 Klorida Terikat pada Permukaan Beton (0 cm)

Tabel 4.81 Klorida Terikat pada Kedalaman 3,75 cm (%)

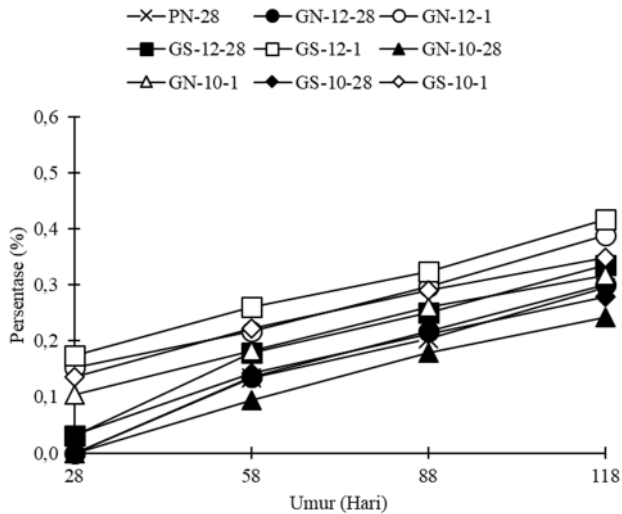
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,177	0,268	0,374
2	GN-12-28	0,000	0,172	0,274	0,402
3	GN-12-1	0,224	0,304	0,388	0,479
4	GS-12-28	0,031	0,210	0,316	0,440
5	GS-12-1	0,259	0,345	0,425	0,499
6	GN-10-28	0,000	0,129	0,231	0,330
7	GN-10-1	0,192	0,272	0,342	0,410
8	GS-10-28	0,033	0,167	0,269	0,373
9	GS-10-1	0,221	0,304	0,374	0,430



Grafik 4.113 Klorida Terikat pada Kedalaman 3,75 cm

Tabel 4.82 Klorida Terikat pada Kedalaman 7,5 cm (%)

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,135	0,204	0,295
2	GN-12-28	0,000	0,135	0,217	0,301
3	GN-12-1	0,152	0,218	0,297	0,389
4	GS-12-28	0,031	0,179	0,250	0,336
5	GS-12-1	0,175	0,260	0,324	0,417
6	GN-10-28	0,000	0,094	0,179	0,243
7	GN-10-1	0,105	0,183	0,261	0,316
8	GS-10-28	0,033	0,142	0,212	0,279
9	GS-10-1	0,137	0,223	0,290	0,349



Grafik 4.114 Klorida Terikat pada Kedalaman 7,5 cm

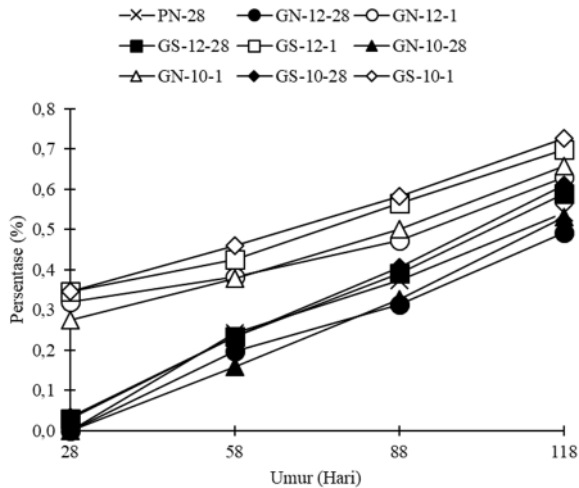
c) Klorida total

Klorida total untuk setiap kedalaman beton dapat dilihat pada Tabel 4.83 sampai Tabel 4.85 dan Grafik 4.115 sampai Grafik 4.117. Berdasarkan tabel-tabel dan grafik-grafik tersebut dapat dilihat bahwa klorida total meningkat sampai umur 118 hari untuk setiap kedalaman dan variasi beton dengan klorida total terbesar untuk setiap kedalaman terdapat pada beton geopolimer air laut dengan perendaman di air laut pada umur 1 hari (GS-12-1 dan GS-10-1). Dapat dilihat juga bahwa perlakuan perendaman pada umur 1 hari pada air laut untuk beton geopolimer air suling dan air laut memberikan nilai klorida total yang lebih besar dari beton geopolimer dengan perlakuan *moist curing*, dan beton geopolimer dengan molaritas 12M memiliki kandungan klorida total yang tidak terlalu berbeda dari beton geopolimer dengan molaritas 10M baik dengan air suling maupun air laut.

Serta penggunaan air laut pada beton geopolimer memberikan kandungan klorida total yang lebih besar dari beton geopolimer dengan air suling.

Tabel 4.83 Klorida Total pada Permukaan Beton (0 cm)
(%)

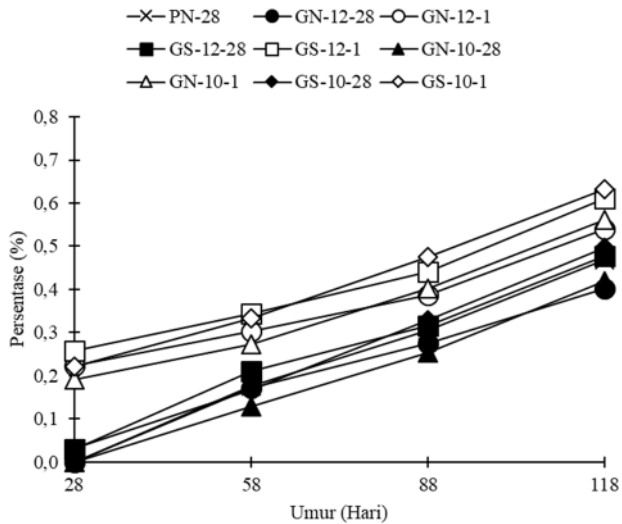
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,242	0,374	0,542
2	GN-12-28	0,000	0,197	0,313	0,493
3	GN-12-1	0,320	0,382	0,473	0,631
4	GS-12-28	0,031	0,234	0,391	0,589
5	GS-12-1	0,346	0,425	0,566	0,700
6	GN-10-28	0,000	0,158	0,327	0,530
7	GN-10-1	0,274	0,378	0,501	0,658
8	GS-10-28	0,033	0,233	0,406	0,610
9	GS-10-1	0,345	0,459	0,582	0,727



Grafik 4.115 Klorida Total pada Permukaan Beton (0 cm)

Tabel 4.84 Klorida Total pada Kedalaman 3,75 cm (%)

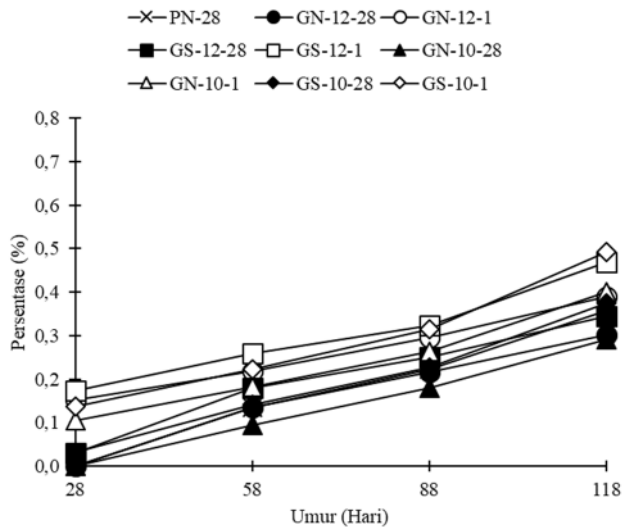
No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,177	0,304	0,470
2	GN-12-28	0,000	0,172	0,274	0,402
3	GN-12-1	0,224	0,304	0,388	0,539
4	GS-12-28	0,031	0,210	0,316	0,477
5	GS-12-1	0,259	0,345	0,442	0,610
6	GN-10-28	0,000	0,129	0,253	0,419
7	GN-10-1	0,192	0,272	0,402	0,560
8	GS-10-28	0,033	0,167	0,330	0,497
9	GS-10-1	0,221	0,333	0,475	0,631



Grafik 4.116 Klorida Total pada Kedalaman 3,75 cm

Tabel 4.85 Klorida Total pada Kedalaman 7,5 cm (%)

No.	Kode	Umur			
		28	58	88	118
1	PN-28	0,000	0,135	0,223	0,357
2	GN-12-28	0,000	0,135	0,217	0,301
3	GN-12-1	0,152	0,218	0,297	0,389
4	GS-12-28	0,031	0,179	0,250	0,345
5	GS-12-1	0,175	0,260	0,324	0,468
6	GN-10-28	0,000	0,094	0,179	0,292
7	GN-10-1	0,105	0,183	0,264	0,400
8	GS-10-28	0,033	0,142	0,228	0,374
9	GS-10-1	0,137	0,223	0,314	0,492



Grafik 4.117 Klorida Total pada Kedalaman 7,5 cm

Berdasarkan Tabel 4.77 sampai Tabel 4.85 dan Grafik 4.109 sampai Grafik 4.117 pada pembahasan ini dapat

disimpulkan bahwa perlakuan perendaman di air laut pada beton geopolimer baik air suling ataupun air laut memberikan nilai klorida bebas, terikat, dan total yang lebih besar dari beton geopolimer dengan perlakuan *moist curing*, hal ini disebabkan karena perendaman di air laut pada umur 1 hari memberikan kesempatan pada klorida untuk masuk ke dalam beton lebih awal daripada beton dengan perlakuan *moist curing* yang harus menunggu 28 hari baru bersentuhan dengan klorida pada air laut.

Beton geopolimer air suling dan air laut dengan molaritas 12M memberikan nilai klorida bebas yang lebih kecil dari beton geopolimer dengan molaritas 10M, hal ini disebabkan karena beton geopolimer dengan molaritas 10M memiliki lebih banyak kandungan air yang jika terjadi penguapan maka akan meninggalkan rongga yang lebih banyak dari beton geopolimer dengan molaritas 12M, rongga ini akan mempermudah klorida untuk masuk ke dalam beton (Ekaputri dan Triwulan, 2013).

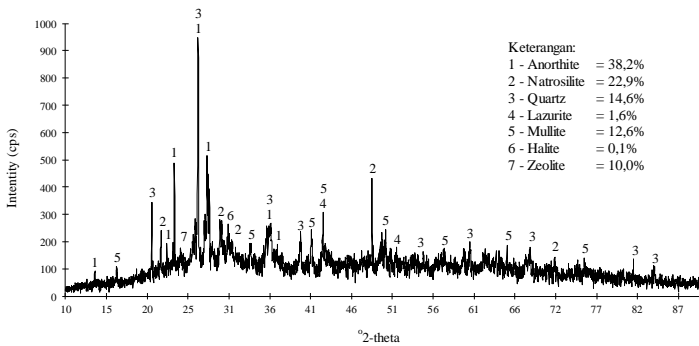
Didapatkan juga beton geopolimer air suling dan air laut dengan molaritas 12M memberikan nilai klorida terikat yang lebih besar dari beton geopolimer dengan molaritas 10M, hal ini disebabkan oleh beton geopolimer dengan molaritas 12M memiliki lebih banyak kandungan natrium dari pembuatan larutan NaOH yang memungkinkan beton untuk mengikat lebih banyak klorida (Shaikh, 2014).

4.3.7 Analisa XRD

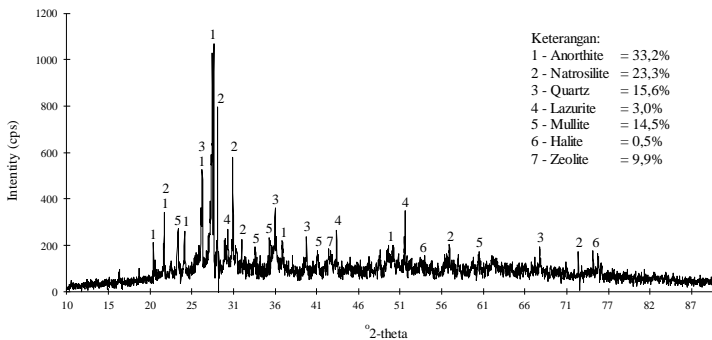
Pengujian XRD dilakukan pada beberapa sampel beton. Hasil pengujian XRD dapat dilihat pada tabel dan gambar-gambar berikut ini.

Tabel 4.86 Hasil Pengujian XRD Beton Geopolimer (%)

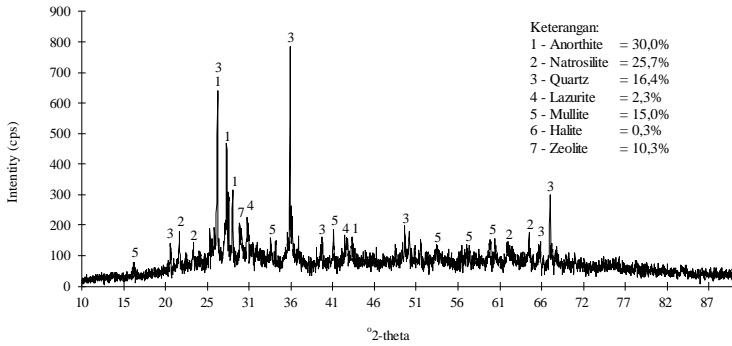
Kode	Anorthite	Natrosilite	Quartz	Lazurite	Mullite	Halite	Zeolite
GN-12-28 H+28	38,2	22,9	14,6	1,6	12,6	0,1	10,0
GN-12-1 H+118	33,2	23,3	15,6	3,0	14,5	0,5	9,9
GN-12-28 H+118	30,0	25,7	16,4	2,3	15,0	0,3	10,3
GS-12-1 H+118	35,0	19,9	13,3	4,7	13,2	1,0	12,9
GS-12-28 H+118	34,7	19,7	14,2	4,2	14,1	0,7	12,4
GN-10-28 H+28	39,0	22,2	13,2	2,3	12,1	0,2	11,0
GN-10-1 H+118	39,1	19,8	11,5	5,5	12,4	1,5	10,2
GN-10-28 H+118	37,5	20,2	11,9	5,0	13,1	1,2	11,1
GS-10-1 H+118	38,8	16,8	6,7	7,9	11,7	2,5	15,6
GS-10-28 H+118	39,4	18,0	7,7	6,2	12,2	1,8	14,7



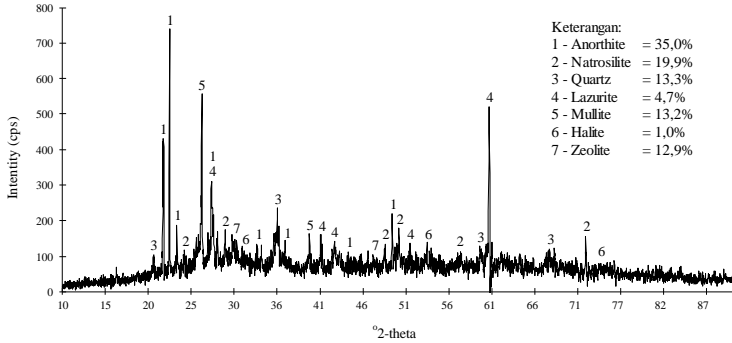
Gambar 4.18 XRD GN-12-28-H+28



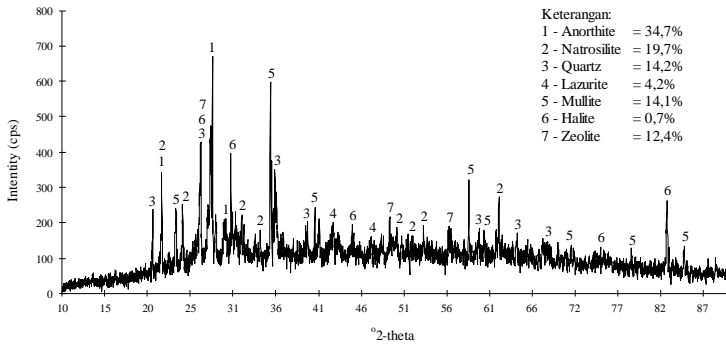
Gambar 4.19 XRD GN-12-1-H+118



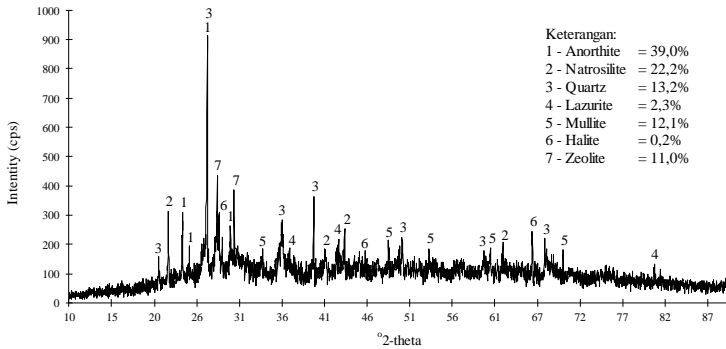
Gambar 4.20 XRD GN-12-28-H+118



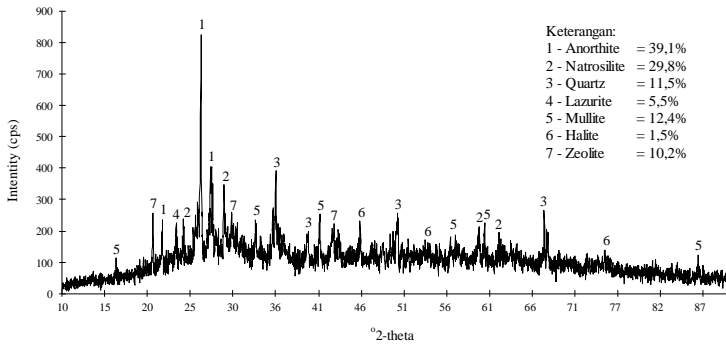
Gambar 4.21 XRD GS-12-1-H+118



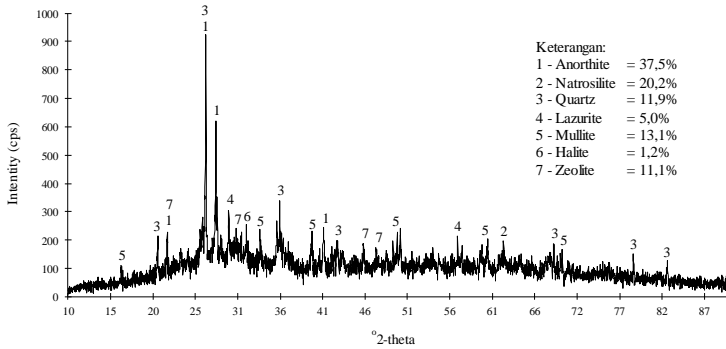
Gambar 4.22 XRD GS-12-28-H+118



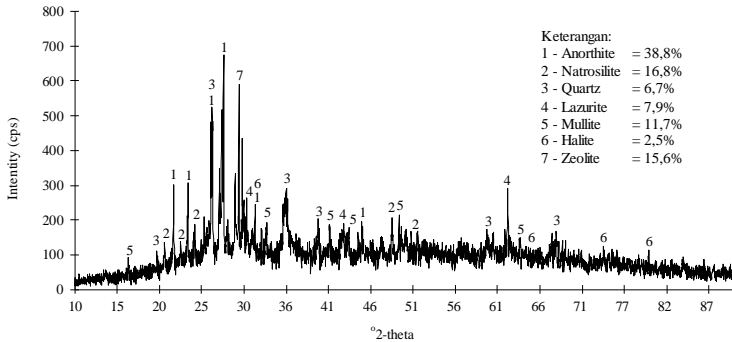
Gambar 4.23 XRD GN-10-28-H+28



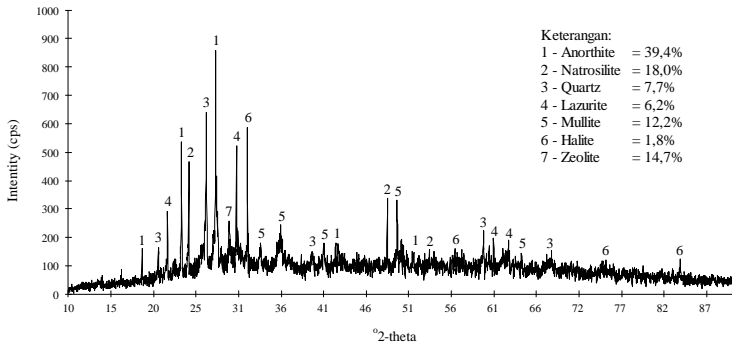
Gambar 4.24 XRD GN-10-1-H+118



Gambar 4.25 XRD GN-10-28-H+118



Gambar 4.26 XRD GS-10-1-H+118



Gambar 4.27 XRD GS-10-28-H+118

Berdasarkan Tabel 4.86 beton geopolimer memiliki kandungan anorthite yang dominan. Mineral anorthite ini pada umumnya terdapat pada batuan. Kemunculan mineral ini terjadi karena pengujian XRD dilakukan pada bongkahan sampel yang masih mengandung agregat kasar, sehingga mineral ini terbaca pada pengujian XRD.

Dapat dilihat juga berdasarkan Tabel 4.86 mineral natrosilite, quartz, dan mullite terbanyak pada umur 118 hari dimiliki oleh beton geopolimer air suling 12M dengan

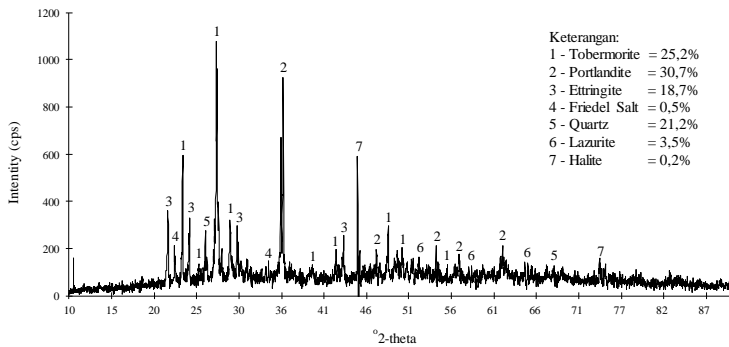
perlakuan *moist curing* (GN-12-28 H+118). Mineral-mineral ini berbentuk kristal yang cukup padat dan keras. Jika dilihat juga berdasarkan kuat tekan dan pori, beton ini memiliki kuat tekan tertinggi dan pori terbuka yang lebih kecil dari beton lainnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa mineral-mineral ini turut mengambil bagian di dalam kuat tekan dan pori yang dihasilkan oleh beton ini. Dapat dilihat juga bahwa beton ini memiliki kandungan mineral lazurite dan halite yang rendah. Di mana pada mineral lazurite dan halite tersusun atas unsur klorida, sehingga dengan rendahnya kandungan ini menunjukkan bahwa pada umur 118 hari beton ini memiliki kandungan klorida yang rendah.

Sementara itu kandungan mineral natrosilite, quartz, dan mullite terkecil pada umur 118 hari dimiliki oleh beton geopolimer air laut 10M yang pada umur 1 hari langsung direndam di air laut (GS-10-1 H+118). Rendahnya kandungan mineral ini menunjukkan bahwa beton tidak terlalu padat dan memiliki pori yang besar, hal ini dapat dilihat juga dari hasil kuat tekan yang rendah dan porositas terbuka yang cukup besar dengan porositas tertutup yang kecil dari beton ini. Kandungan mineral lazurite dan halite ditemukan pada beton ini adalah yang paling besar. Hal ini menunjukkan bahwa beton ini mengandung banyak klorida yang berakibat juga terhadap rendahnya pH yang dihasilkan. Pada umur 28 hari pada beton geopolimer terdapat kandungan lazurite dan halite. Mineral ini timbul karena pada *fly ash* dan *bottom ash* memiliki kandungan klorida di dalamnya.

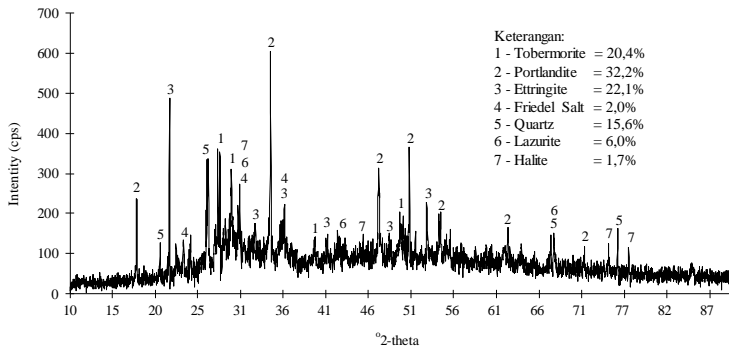
Hasil pengujian XRD beton OPC dapat dilihat pada tabel dan gambar-gambar berikut ini.

Tabel 4.87 Hasil Pengujian Beton OPC (%)

Nama Mineral	Rumus Kimia	PN-28 H+28	PN-28 H+118
Tobermorite	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ atau $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O}, \text{OH})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,2	20,4
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	30,7	32,2
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	18,7	22,1
Friedel Salt	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,5	2
Quartz	SiO_2	21,2	15,6
Lazurite	$(\text{Na}, \text{Ca})_8 [(\text{S}, \text{Cl}, \text{SO}_4, \text{OH})_2 [(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})]]$	3,5	6
Halite	NaCl	0,2	1,7



Gambar 4.28 XRD PN-28-H+28



Gambar 4.29 XRD PN-28-H+118

Berdasarkan Tabel 4.87 dapat dilihat bahwa kandungan beton OPC didominasi oleh tobermorite, portlandite, ettringite, dan quartz. Pada umur 28 hari beton mengandung ettringite, garam friedel, lazurite, dan halite. Mineral ini muncul karena pada campuran beton OPC terdapat penggunaan *bottom ash* yang mengandung klorida. Mineral ini terus bertambah sampai umur 118 hari akibat pengaruh air laut yang memiliki banyak klorida dan sulfur. Pertambahan mineral ini menunjukkan bahwa kandungan klorida beton OPC meningkat. Peningkatan ettringite dan garam friedel di dalam beton OPC menyebabkan pori beton semakin besar karena sifat dari kedua mineral ini yaitu dapat memperbesar volumenya sehingga mendesak beton dari dalam dan membuat beton menjadi retak, serta mempermudah klorida untuk masuk ke dalam beton.

Sampai umur 118 hari portlandite bertambah banyak, namun tobermorite menurun. Hal ini menyebabkan penurunan kuat tekan pada umur 118 hari dari umur 88 hari, namun penurunan ini tidak terlalu besar karena masih ada proses hidrasi yang berlangsung dari portlandite.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa perendaman di air laut menyebabkan munculnya mineral-mineral dengan kandungan klorida di dalamnya yang memiliki pengaruh yang buruk terhadap beton. Perlakuan *moist curing* membentuk lebih banyak mineral yang padat daripada perendaman pada umur 1 hari di air laut yang membentuk beton menjadi lebih padat dan memiliki kuat tekan yang lebih tinggi. Penggunaan air laut di dalam campuran beton mengakibatkan presentase mineral dengan kandungan unsur klorida lebih banyak terdapat di dalam beton, yang menyebabkan beton tidak terlalu padat sehingga kuat tekan tidak terlalu tinggi, lebih berpori, dan juga memiliki pH yang rendah.

4.3.8 Analisa SEM

Analisa SEM dilakukan terhadap beton geopolimer dan beton OPC dengan umur 118 hari dengan perlakuan *moist curing*, yaitu beton geopolimer air laut 12M (GS-12-28-H+118); beton geopolimer air suling 10M (GN-10-28-H+118); dan beton OPC (PN-28-H+118). Hasil dari analisa SEM dapat dilihat pada lampiran.

4.4 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Terdapat beberapa penelitian yang sudah dilakukan dan memiliki metode dan komposisi yang sama. Beberapa penelitian itu adalah sebagai berikut.

4.4.1 Penelitian Inne Syabrina Mutiara

Penelitian ini berjudul “*The Effect of Steam Curing on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete*” diterbitkan pada tahun 2017. Detail dan analisa dari penelitian Mutiara (2017) adalah sebagai berikut.

1. Digunakan *fly ash* kelas F dari PLTU Gresik, Indonesia.

Table 1. Composition of chemical content of fly ash (% by mass)

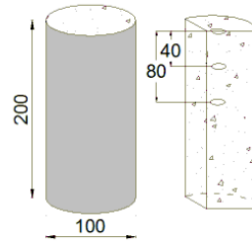
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Mn ₂ O ₃
48.47	26.05	12.54	0.92	5.18	2.77	0.02	1.66	0.47	1.05	0.19

2. NaOH 8M.
3. Na₂SiO₃ : NaOH = 2,5 : 1,0
4. Digunakan SP poly-carboxylate sebesar 2% dari berat *fly ash*.
5. Digunakan komposisi sebagai berikut.

Table 2. Composition of mixtures (Kg per m³)

Code	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fly ash	OPC	NaOH	Water	Na ₂ SiO ₃	SP	Curing Temperature
GN	720	1080	390	-	60	-	150	7.8	Room temp.
G40	720	1080	390	-	60	-	150	7.8	40°C
G60	720	1080	390	-	60	-	150	7.8	60°C
G80	720	1080	390	-	60	-	150	7.8	80°C
OPC	666	999	-	440	-	220	-	-	Room temp.

6. Curing pada suhu 40⁰C, 60⁰C, 80⁰C, dan suhu ruangan selama 24 jam saat pencetakan.
7. Setelah 24 jam, beton dikeluarkan dari cetakan lalu direndam pada air tawar selama 28 hari.
8. Setelah 28 hari direndam pada larutan air garam (NaCl 3,5%) selama 30, 60, dan 90 hari.
9. Metode pengambilan uji sampel per titik untuk porositas dan penetrasi klorida. Yaitu pada permukaan, kedalaman 3,75 cm, dan kedalaman 7,5 cm. Pada bagian samping dan bawah diberi lapisan *coating* yang mencegah air untuk masuk ke dalam beton, sehingga pada beton hanya terdapat bagian atas untuk air masuk ke dalam beton.



Hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kuat tekan

Table 2. Compressive strength of cylindrical specimens.

Age (days)	28	60	90	120
Immersion time (days)		30	60	90
Code	Compressive strength (MPa)			
GN	51.1	64.7	67.5	69.5
G40	63.3	60.2	63.5	70.9
G60	59.3	62.5	68.0	66.2
G80	78.7	78.9	80.5	74.5
OPC	46.6	52.3	60.1	58.1

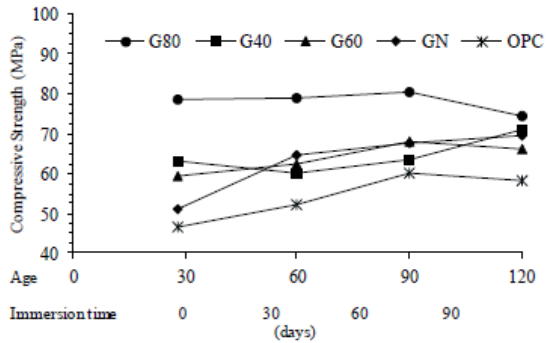


Fig. 2. Compressive strength of specimens curing in salt water

- Suhu yang meningkat, meningkatkan kuat tekan beton geopolimer.
- Beton geopolimer pada suhu ruangan mencapai kuat tekan 51,1 MPa pada umur 28 hari dan 69,5 MPa pada umur 120 hari (90 hari perendaman).
- Beton OPC mencapai kuat tekan 46,6 MPa pada umur 28 hari, mencapai puncak pada umur 90 hari (60 hari perendaman) sebesar 60,1 MPa, lalu turun menjadi 58,1 MPa pada umur 120 hari (90 hari perendaman).

2. Porositas

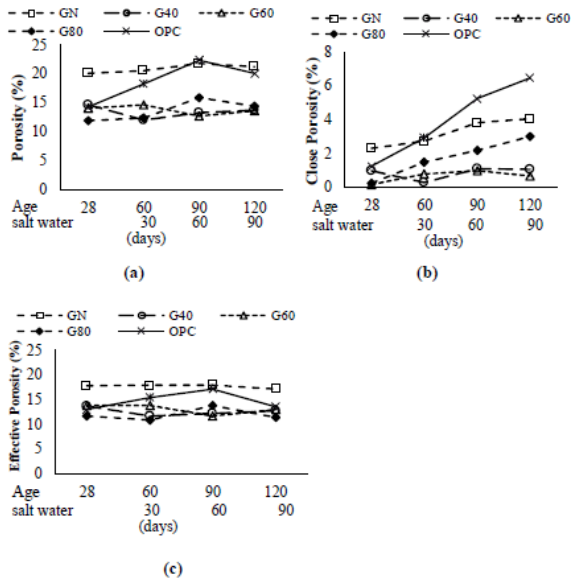


Fig. 3. Porosity test results: (a) Total porosity, (b) closed porosity, and (c) effective porosity

- Beton dengan steam curing memiliki porositas yang lebih kecil dari beton dengan curing pada suhu ruangan.
- Beton GN, pori total (meningkat) = $\pm 20\%$, pori terbuka (menurun) = $17\%-18\%$, dan pori tertutup (meningkat) = $2\%-3\%$ pada umur 28 hari sampai 120 hari.
- Beton OPC pori total (meningkat sampai 90 hari lalu menurun sampai umur 120 hari) = $15\%-21\%$, pori terbuka (meningkat sampai 90 hari lalu menurun sampai umur 120 hari) = $12\%-16\%$, dan pori tertutup (meningkat sampai umur 120 hari) = $1\%-6\%$.

3. Penetrasi klorida

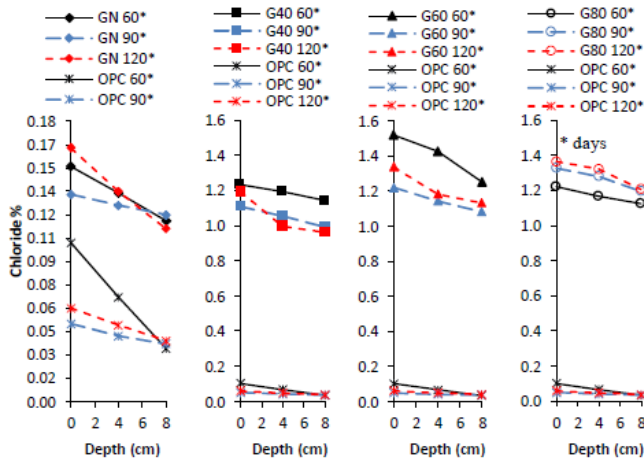


Fig. 4. Chloride ion penetration at several distances from the concrete surface

- Pada beton dengan *steam curing* terjadi pembentukan ikatan geopolimer lebih awal (24 jam) atau reaksi pendewasaan awal yang menyebabkan berkurangnya mekanika pengikatan dari sistem gel sodium-aluminosilicate (N-A-S-H). Sehingga menimbulkan kandungan klorida yang lebih tinggi dari beton dengan perlakuan *curing* pada suhu ruangan.
- Klorida GN per kedalaman meningkat sampai umur 120 hari. Kedalaman 0 cm = 0,14%-0,17%; kedalaman 4 cm = 0,13%-0,14%; dan kedalaman 8 cm = 0,115%-0,12%.
- Klorida beton OPC per kedalaman meningkat sampai umur 120 hari. Kedalaman 0 cm = 0,05%-0,11%; kedalaman 4 cm = 0,05%-0,07%; dan kedalaman 8 cm = 0,04%-0,05%.

4. Derajat Keasaman (pH)

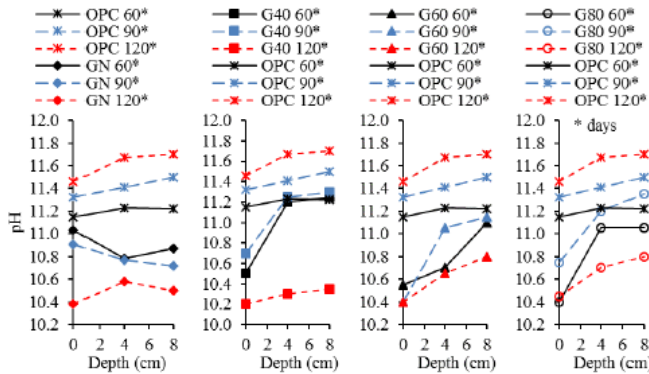


Fig. 5. pH measurement

- pH geopolimer lebih kecil dari OPC karena curing di air tawar.
- Perendaman di air garam mengakibatkan pH menurun.
- pH beton GN menurun sampai umur 120 hari. Kedalaman 0 cm = 11,0-10,4; kedalaman 4 cm = 10,8-10,6; kedalaman 8 cm = 10,9-10,5.
- pH beton OPC meningkat sampai umur 120 hari. Kedalaman 0 cm = 11,2-11,4; kedalaman 4 cm = 11,2-11,7; kedalaman 8 cm = 11,2-11,7.

4.4.2 Penelitian Like Novia Halim

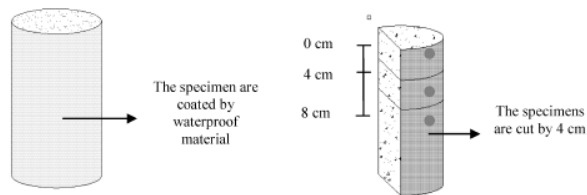
Penelitian ini berjudul “*The Influence of Salt Water on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete*” diterbitkan pada tahun 2017. Detail dan analisa dari penelitian Halim (2017) adalah sebagai berikut.

1. Digunakan *fly ash* kelas F dari PT. Petrokimia Gresik, Indonesia.

Table 1. Chemical composition of fly ash (%) by XRF.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Mn ₂ O ₃
48.47	26.05	12.54	0.92	5.18	2.77	0.02	1.66	0.47	1.05	0.19

- NaOH 8M.
- Na₂SiO₃ : NaOH = 2,5 : 1,0
- Digunakan SP *polycarbonic Acid Salts* dari PT. Sika Indonesia sebesar 2% dari berat *fly ash*.
- Setelah beton dikeluarkan dari cetakan, beton direndam di air tawar selama 28 hari.
- Setelah 28 hari direndam pada larutan air garam (NaCl 3,5%) dan tetap di air tawar selama 30, 60, 90, dan 120 hari.
- Metode pengambilan uji sampel per titik untuk porositas dan penetrasi klorida. Yaitu pada permukaan, kedalaman 3,75 cm, dan kedalaman 7,5 cm. Pada bagian samping dan bawah diberi lapisan *coating* yang mencegah air untuk masuk ke dalam beton, sehingga pada beton hanya terdapat bagian atas untuk air masuk ke dalam beton.

**Fig. 2.** The model of sample for chloride penetration and pH measurement.

Hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kuat tekan

Table 2. The comparison for compressive strength in geopolymers concrete and OPC concrete.

Type of Concrete	Curing (days) Age (days)	Compressive Strength				
		0	30	60	90	120
Geopolymer	Salt water	51.42	65.49	68.33	70.39	65.19
	Tap water	51.42	57.76	68.07	66.27	65.66
OPC	Salt water	46.61	52.28	60.14	59.99	45.21
	Tap water	46.61	48.35	57.76	55.69	52.64

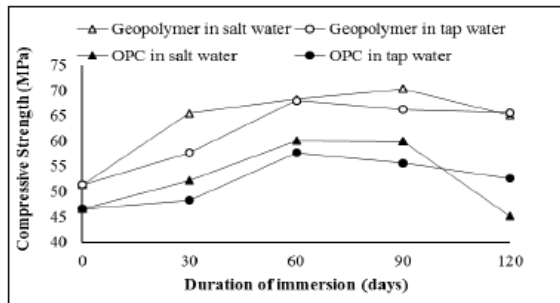


Fig. 3. The comparison for compressive strength in geopolymer and OPC concrete.

- Beton geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dari beton OPC pada air garam dan air tawar.
- Kuat tekan beton geopolimer menurun pada perendaman di air garam saat umur 148 hari (120 hari perendaman).
- Kuat tekan beton OPC menurun pada perendaman di air garam saat umur 118 hari (90 hari perendaman).
- Kuat tekan beton geopolimer dengan perendaman di air garam pada umur 28 hari sebesar 51,42 MPa lalu mencapai puncak pada umur 118 hari (90 hari perendaman) sebesar 70,39 MPa. dan menurun pada umur 148 hari (120 hari perendaman) sebesar 65,19 MPa.
- Beton OPC mencapai kuat tekan 46,61 MPa pada umur 28 hari, mencapai puncak pada umur 88 hari (60 hari perendaman) sebesar 60,14 MPa, lalu turun menjadi 45,21 MPa pada umur 148 hari (120 hari perendaman) pada perendaman di air garam.

2. Porositas

Table 3. Porosity test of geopolymer concrete and OPC concrete

Type of Concrete	Curing (days)	Total Porosity Pt (%)				
		0	30	60	90	120
Geopolymer	Age (days)	28	58	88	118	148
	Salt water	20.10	20.56	21.71	21.19	20.67
	Tap water	20.10	20.40	23.94	22.38	23.58
	Salt water	14.20	18.27	22.38	20.00	21.15
OPC	Tap water	14.20	22.83	20.42	22.28	20.48

- Porositas beton geopolimer lebih besar dari beton OPC pada perendaman di air garam.
- Porositas total beton geopolimer pada umur 28 hari sebesar 20,10% lalu meningkat sampai umur 88 hari (60 hari perendaman) sebesar 21,71% lalu menurun sampai umur 148 hari (120 hari perendaman) sebesar 20,67% pada perendaman di air garam.
- Porositas total beton OPC pada umur 28 hari sebesar 14,20% lalu meningkat sampai umur 88 hari (60 hari perendaman) sebesar 20,42% lalu menurun sampai umur 148 hari (120 hari perendaman) sebesar 20,48%.

3. Penetrasi klorida

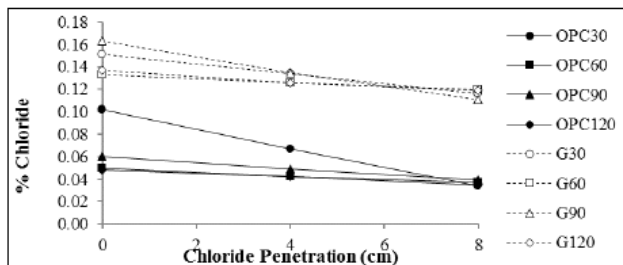


Fig. 4. Chloride penetration in geopolymer and OPC concrete.

- Penetrasi klorida beton geopolimer lebih besar dari beton OPC.
- Klorida beton geopolimer per kedalaman meningkat sampai umur 148 hari. Kedalaman 0 cm = 0,14%-0,16%; kedalaman 4 cm = 0,13%-0,14%; dan kedalaman 8 cm = 0,12%-0,13%.
- Klorida beton OPC per kedalaman meningkat sampai umur 148 hari. Kedalaman 0 cm = 0,05%-0,10%; kedalaman 4 cm = 0,05%-0,08%; dan kedalaman 8 cm = 0,04%-0,045%.

4. Derajat Keasaman (pH)

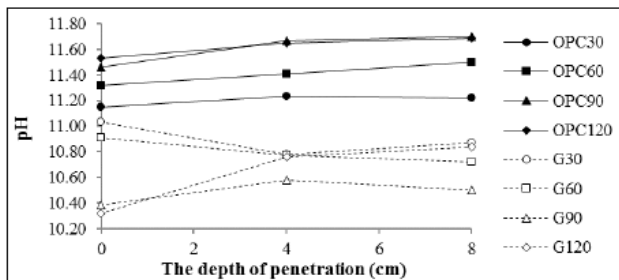


Fig. 5. pH measurement in geopolimer concrete and OPC concrete.

- pH geopolimer lebih kecil dari OPC karena curing di air tawar yang mengakibatkan natrium keluar dari beton.
- Perendaman di air garam mengakibatkan pH menurun.
- pH beton geopolimer menurun sampai umur 148 hari (120 hari perendaman). Kedalaman 0 cm = 11,0-10,35; kedalaman 4 cm = 10,8-10,6; kedalaman 8 cm = 10,8-10,5.
- pH beton OPC meningkat sampai umur 148 hari. Kedalaman 0 cm = 11,2-11,5; kedalaman 4 cm = 11,2-11,6; kedalaman 8 cm = 11,2-11,6.

4.4.3 Penelitian Ruceh Simanjuntak

Penelitian ini berjudul “*Pengaruh Konsentrasi Alkali terhadap Penetrasi Ion Klorida pada Beton Geopolimer*” yang merupakan tugas akhir (skripsi) yang selesai pada tahun 2016. Detail dan analisa dari penelitian Simanjuntak (2016) adalah sebagai berikut.

1. Digunakan *fly ash* kelas F dari PT. Petrokimia Gresik, Indonesia.

Table 1. Chemical composition of fly ash (%) by XRF.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Mn ₂ O ₃
48.47	26.05	12.54	0.92	5.18	2.77	0.02	1.66	0.47	1.05	0.19

2. NaOH 10M dan 12M.
3. Na₂SiO₃ : NaOH = 2,5 : 1,0
4. Setelah 28 hari, beton direndam pada larutan air garam (NaCl 3,5%) dan tetap di air tawar selama 30, 60, dan 90 hari.

Hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

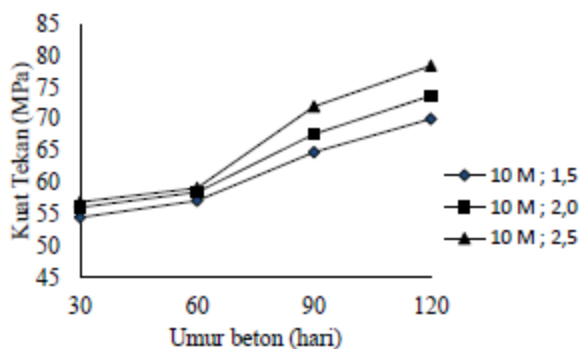
1. Kuat tekan

Tabel 4.22 Uji Tekan Beton Geopolimer

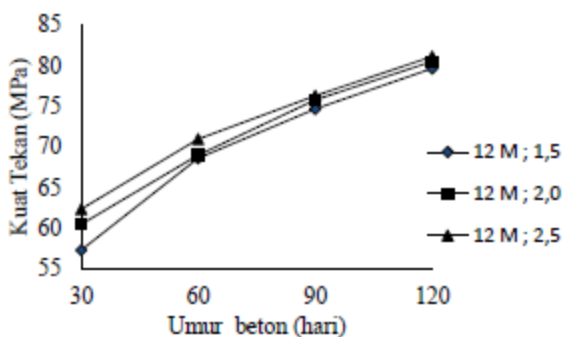
Variasi Beton	Kuat tekan rata-rata (Mpa)			
	30hari	60hari	90hari	120hari
8 M : 1,5	50.99	54.42	60.26	67.66
8 M : 2	52.54	61.95	68.76	71.42
8 M : 2,5	55.85	62.66	69.8	74.21
10 M : 1,5	54.49	57.15	64.8	70.06
10 M : 2	56.11	58.51	67.66	73.76
10 M : 2,5	56.95	59.16	72.05	78.49
12 M : 1,5	57.34	68.63	74.66	79.66
12 M : 2	60.52	69.02	75.77	80.5
12 M : 2,5	62.4	70.97	76.29	81.09

Tabel 4.25 Uji Tekan Beton OPC di Air Garam

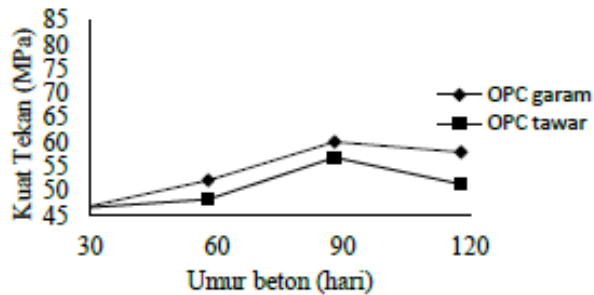
	Kuat tekan rata-rata (Mpa) perendaman hari ke-			
	30	60	90	120
OPC	46.61	52.27	60.14	58.06



Gambar 4.11 Grafik hubungan kuat tekan beton 10 M dengan rasio alkali 1,5 ; 2 ; 2,5



Gambar 4.12 Grafik hubungan kuat tekan beton 12 M dengan rasio alkali 1,5 ; 2 ; 2,5



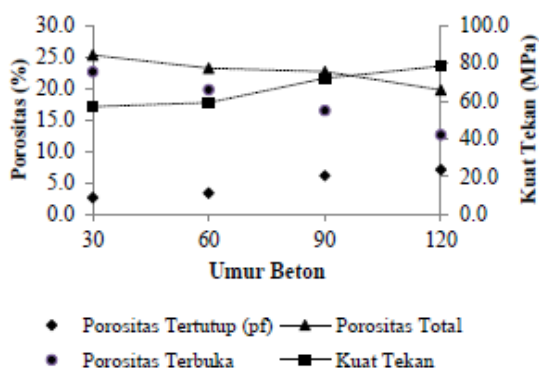
Gambar 4.14 Grafik hubungan kuat tekan beton OPC dengan perendaman di air tawar dan air garam

- Beton geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dari beton OPC pada perendaman di air garam.
- Kuat tekan beton geopolimer terus meningkat sampai umur 120 hari.
- Kuat tekan beton OPC meningkat sampai umur 90 hari lalu menurun pada umur 120 hari
- Kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari sebesar 56,95 MPa (10M) dan 62,4 MPa (12M) lalu meningkat sampai umur 120 hari sebesar 78,49 MPa (10M) dan 81,09 MPa (12M).
- Kuat tekan beton OPC dengan perendaman di air garam pada umur 28 hari sebesar 46,61 MPa lalu meningkat sampai umur 90 hari sebesar 56,98 MPa dan menurun pada umur 120 hari menjadi 51,48 MPa.

2. Porositas

Tabel 4.32 Hasil uji porositas beton geopolimer 10M ; 2,5

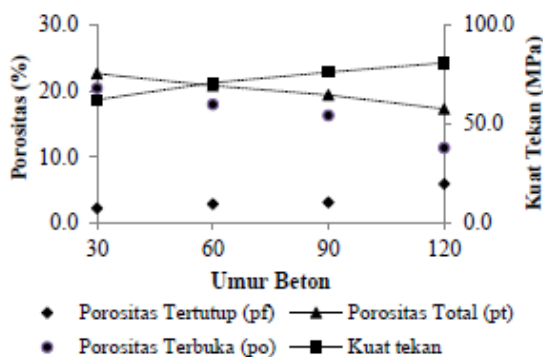
Parameter Porositas	Kuat tekan Satuan	Kuat tekan			
		56.95	59.16	72.05	78.49
		30	60	90	120
Awal	gr	22.30	23	23	22
Dalam Air (μ)	gr	13.50	13.4	14.9	13.3
SSD (M_h)	gr	25.00	23.7	24	22.57
Kering Oven (M_o)	gr	22.40	21.66	22.5	21.4
Kondisi Halus (m_o)	gr	22.40	21.61	22.26	21.5
Pikno+air+benda uji	gr	400.41	396.41	403.037	400.625
Pikno + air	gr	386.60	382.69	387.74	386.6
Volume	cm ³	8.59	7.89	6.963	7.475
Kepadatan Absolut ($\bar{\rho}$)		2.61	2.74	3.20	2.88
Kepadatan Visual (α)		1.95	2.10	2.47	2.31
Porositas Total (p_t)	%	25.28	23.18	22.66	19.74
Porositas Terbuka (p_o)	%	22.61	19.81	16.48	12.62
Porositas Tertutup (p_f)	%	2.67	3.38	6.18	7.12



Gambar 4.20 Grafik hubungan antara kuat tekan dengan porositas beton geopolimer 10M ; 2,5

Tabel 4.35 Hasil uji porositas beton geopolimer 12M ; 2,5

Parameter Porositas	Kuat tekan Satuan	62.4	70.97	76.29	81.09
		30	60	90	120
Awal	gr	24	24	24	24
Dalam Air (μ)	gr	15.7	14.4	14.4	15.7
SSD (M_h)	gr	24.5	24.4	24.2	23.6
Kering Oven (M_o)	gr	22.7	22.6	22.6	22.7
Kondisi Halus (m_o)	gr	23.4	20.81	20.81	23.4
Pikno+air+benda uji	gr	404.124	661	661.04	404.405
Pikno + air	gr	387.74	647.48	647.50	387.74
Volume	cm ³	7.016	7.29	7.27	6.735
Kepadatan Absolut (r)		3.34	2.85	2.86	3.47
Kepadatan Visual (α)		2.58	2.26	2.31	2.87
Porositas Total (p_t)	%	22.66	20.83	19.44	17.30
Porositas Terbuka (p_o)	%	20.45	18.00	16.33	11.39
Porositas Tertutup (p_f)	%	2.20	2.83	3.11	5.90



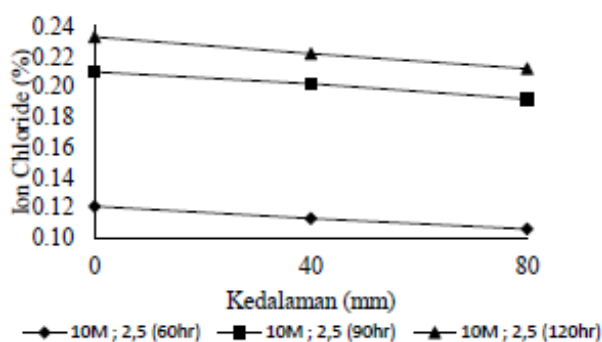
Gambar 4.23 Grafik hubungan antara kuat tekan dengan porositas beton geopolimer 12M ; 2

- Beton geopolimer 10M
 - Umur 28 hari:
 - ✓ Pori total : 25,28%
 - ✓ Pori terbuka : 22,61%
 - ✓ Pori tertutup: 2,67%
 - Umur 120 hari:
 - ✓ Pori total : 19,74% (menurun)
 - ✓ Pori terbuka : 12,62% (menurun)
 - ✓ Pori tertutup : 7,12% (meningkat)
- Beton geopolimer 12M
 - Umur 28 hari:
 - ✓ Pori total : 22,66%
 - ✓ Pori terbuka : 20,45%
 - ✓ Pori tertutup : 2,20%
 - Umur 120 hari:
 - ✓ Pori total : 17,30% (menurun)
 - ✓ Pori terbuka : 11,39% (menurun)
 - ✓ Pori tertutup : 5,90% (meningkat)
- Pori total dan terbuka beton menurun sampai umur 120 hari, namun pori tertutup beton meningkat sampai umur 120 hari.

3. Penetrasi klorida

Tabel 4.44 Penetrasi ion chloride (%) pada variasi 10 M ; 2,5

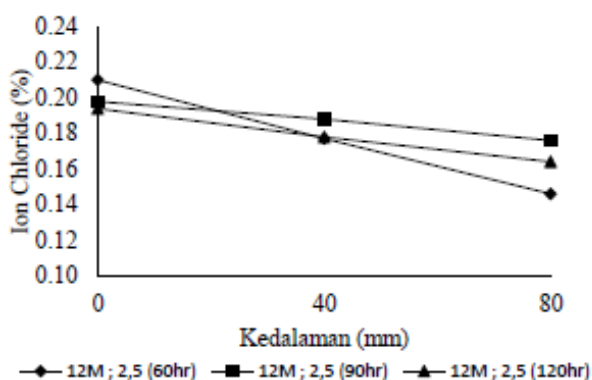
Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
10M ; 2,5 (60hr)	0.121	0.113	0.106
10M ; 2,5 (90hr)	0.21	0.202	0.192
10M ; 2,5 (120hr)	0.233	0.222	0.212



Gambar 4.33 Grafik hubungan penetrasi ion chlor terhadap kedalaman beton geopolimer variasi 10 M ; 2,5

Tabel 4.46 Penetrasi ion chloride (%) pada variasi 12 M ; 2,5

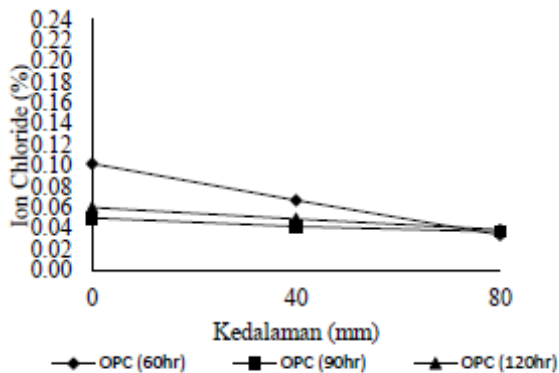
Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
12M ; 2,5 (60hr)	0.21	0.177	0.146
12M ; 2,5 (90hr)	0.198	0.188	0.176
12M ; 2,5 (120hr)	0.194	0.178	0.164



Gambar 4.35 Grafik hubungan penetrasi ion chlor terhadap kedalaman beton geopolimer variasi 12 M ; 2,5

Tabel 4.47 Penetrasi ion chloride (%) pada beton OPC

Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
OPC (60hr)	0.102	0.067	0.034
OPC (90hr)	0.05	0.042	0.037
OPC (120hr)	0.06	0.049	0.039



Gambar 4.36 Grafik hubungan penetrasi ion chlor terhadap kedalaman beton OPC

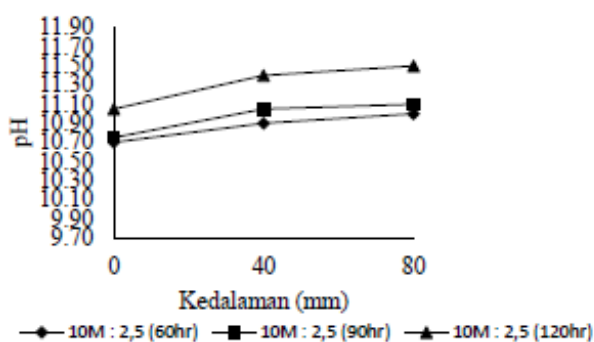
- Penetrasi klorida beton geopolimer lebih besar dari beton OPC.
- Beton geopolimer 10M
 - Umur 60 hari:
 - ✓ 0 cm : 0,121%
 - ✓ 4 cm : 0,113%
 - ✓ 8 cm : 0,106%
 - Umur 120 hari:
 - ✓ 0 cm : 0,223% (meningkat)
 - ✓ 4 cm : 0,222% (meningkat)
 - ✓ 8 cm : 0,212% (meningkat)
- Beton geopolimer 12M
 - Umur 60 hari:

- ✓ 0 cm : 0,210%
 - ✓ 4 cm : 0,177%
 - ✓ 8 cm : 0,146%
- Umur 120 hari:
- ✓ 0 cm : 0,194% (menurun)
 - ✓ 4 cm : 0,178% (meningkat)
 - ✓ 8 cm : 0,164% (meningkat)
- Beton OPC
- Umur 60 hari:
- ✓ 0 cm : 0,102%
 - ✓ 4 cm : 0,067%
 - ✓ 8 cm : 0,034%
- Umur 120 hari:
- ✓ 0 cm : 0,060% (menurun)
 - ✓ 4 cm : 0,049% (menurun)
 - ✓ 8 cm : 0,039% (meningkat)

4. Derajat Keasaman (pH)

Tabel 4.52 Nilai pH pada variasi 10 M ; 2,5

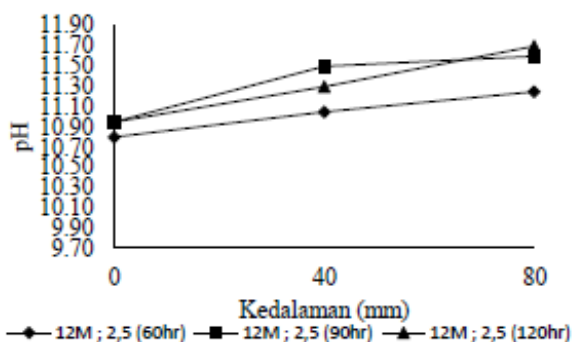
Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
10M : 2,5 (60hr)	10.7	10.9	11
10M : 2,5 (90hr)	10.75	11.05	11.1
10M : 2,5 (120hr)	11.05	11.4	11.5



Gambar 4.41 Grafik hubungan nilai pH terhadap kedalaman beton geopolimer variasi 10M ; 2,5

Tabel 4.54 Nilai pH pada variasi 12M; 2,5

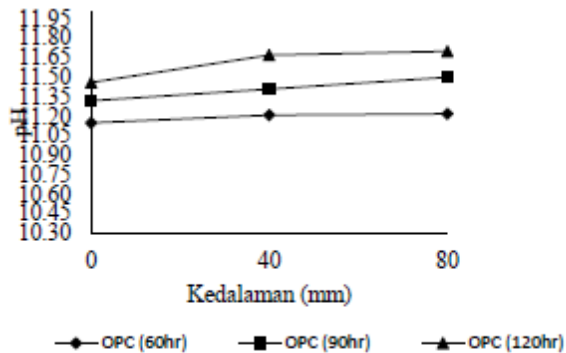
Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
12M ; 2,5 (60hr)	10.8	11.05	11.25
12M ; 2,5 (90hr)	10.95	11.5	11.6
12M ; 2,5 (120hr)	10.95	11.3	11.7



Gambar 4.43 Grafik hubungan nilai pH terhadap kedalaman beton geopolimer variasi 12M ; 2,5

Tabel 4.55 Nilai pH pada beton OPC

Variasi beton dan umur beton	Kedalaman (mm)		
	0	40	80
OPC (60hr)	11.15	11.21	11.22
OPC (90hr)	11.32	11.41	11.5
OPC (120hr)	11.46	11.67	11.7



Gambar 4.44 Grafik hubungan nilai pH terhadap kedalaman beton OPC

- pH geopolimer lebih kecil dari OPC.
- pH beton geopolimer dan OPC meningkat sampai umur 120 hari.
- Semakin ke dalam maka semakin tinggi nilai pH.
- Beton geopolimer 10M
 - Umur 60 hari:
 - ✓ 0 cm : 10,7
 - ✓ 4 cm : 10,9
 - ✓ 8 cm : 11,0
 - Umur 120 hari:
 - ✓ 0 cm : 11,05 (meningkat)
 - ✓ 4 cm : 11,4 (meningkat)
 - ✓ 8 cm : 11,5 (meningkat)
- Beton geopolimer 12M

Umur 60 hari:

- ✓ 0 cm : 10,8
- ✓ 4 cm : 11,05
- ✓ 8 cm : 11,25

Umur 120 hari:

- ✓ 0 cm : 10,95 (meningkat)
- ✓ 4 cm : 11,3 (meningkat)
- ✓ 8 cm : 11,7 (meningkat)

➤ Beton OPC

Umur 60 hari:

- ✓ 0 cm : 11,15
- ✓ 4 cm : 11,21
- ✓ 8 cm : 11,22

Umur 120 hari:

- ✓ 0 cm : 11,46 (meningkat)
- ✓ 4 cm : 11,67 (meningkat)
- ✓ 8 cm : 11,7 (meningkat)

4.4.4 Perbandingan dengan G-BLOCK

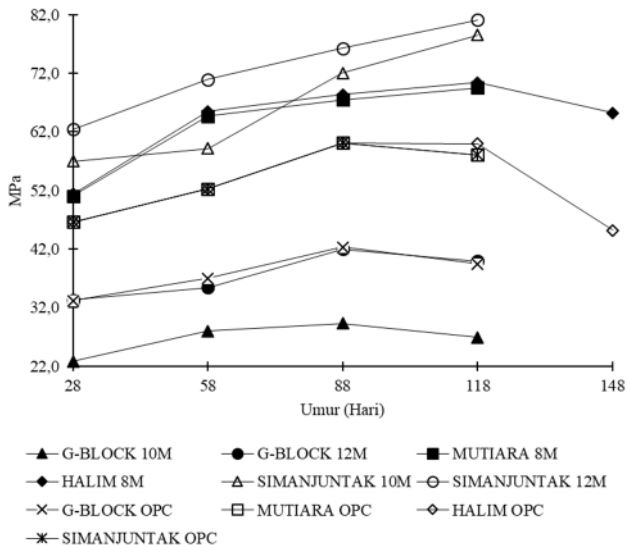
Berdasarkan poin-poin di atas dan hasil yang didapatkan pada penelitian G-BLOCK, maka dapat dibandingkan beberapa poin sebagai berikut.

1. Kuat tekan

Perbandingan dari kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 4.88 dan Grafik 4.118. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di lauratan air garam memberikan hasil kuat tekan yang lebih tinggi dari perendaman di laut. Serta sumber *fly ash* juga memberikan pengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan hasil yang berbeda.

Tabel 4.88 Perbandingan Kuat Tekan

TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	22,8	28,0	29,3	26,9	
G-BLOCK 12M	33,3	35,5	42,0	39,9	
MUTIARA 8M	51,1	64,7	67,5	69,5	
HALIM 8M	51,4	65,5	68,3	70,4	65,2
SIMANJUNTAK 10M	57,0	59,2	72,1	78,5	
SIMANJUNTAK 12M	62,4	71,0	76,3	81,1	
G-BLOCK OPC	33,2	37,0	42,3	39,4	
MUTIARA OPC	46,61	52,27	60,14	58,06	
HALIM OPC	46,61	52,28	60,14	59,99	45,21
SIMANJUNTAK OPC	46,61	52,27	60,14	58,06	



Grafik 4.118 Perbandingan Kuat Tekan

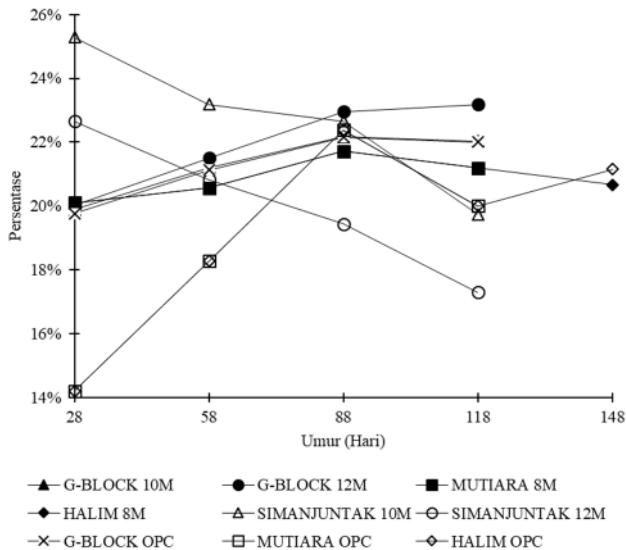
2. Porositas total

Perbandingan dari porositas total dapat dilihat pada Tabel 4.89 dan Grafik 4.119. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di lauratan air

garam memberikan hasil porositas total yang tidak terlalu berbeda daripada perendaman di laut. Dengan kecenderungan porositas total yang turun pada umur-umur yang sudah lama.

Tabel 4.89 Perbandingan Porositas Total

TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	19,89%	21,20%	22,17%	22,03%	
G-BLOCK 12M	20,01%	21,51%	22,95%	23,18%	
MUTIARA 8M	20,10%	20,56%	21,71%	21,19%	20,67%
HALIM 8M	20,10%	20,56%	21,71%	21,19%	20,67%
SIMANJUNTAK 10M	25,28%	23,18%	22,66%	19,74%	
SIMANJUNTAK 12M	22,66%	20,83%	19,44%	17,30%	
G-BLOCK OPC	19,76%	21,13%	22,15%	22,01%	
MUTIARA OPC	14,20%	18,27%	22,38%	20,00%	21,15%
HALIM OPC	14,20%	18,27%	22,38%	20,00%	21,15%
SIMANJUNTAK OPC					

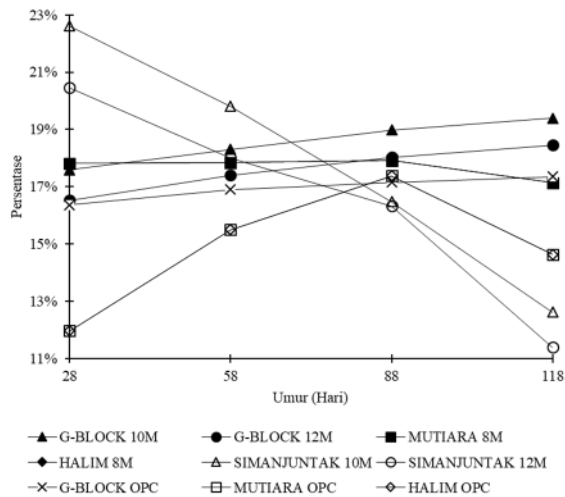


Grafik 4.119 Perbandingan Porositas Total

3. Perbandingan porositas terbuka
 Perbandingan dari porositas terbuka dapat dilihat pada Tabel 4.90 dan Grafik 4.120. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di air laut memberikan hasil porositas terbuka yang terus meningkat daripada perendaman di larutan air garam.

Tabel 4.90 Perbandingan Porositas Terbuka

TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	17,59%	18,30%	18,98%	19,39%	
G-BLOCK 12M	16,53%	17,40%	18,03%	18,46%	
MUTIARA 8M	17,82%	17,84%	17,92%	17,14%	
HALIM 8M	17,82%	17,84%	17,92%	17,14%	
SIMANJUNTAK 10M	22,61%	19,81%	16,48%	12,62%	
SIMANJUNTAK 12M	20,45%	18,00%	16,33%	11,39%	
G-BLOCK OPC	16,36%	16,90%	17,14%	17,35%	
MUTIARA OPC	11,97%	15,50%	17,37%	14,63%	
HALIM OPC	11,97%	15,50%	17,37%	14,63%	
SIMANJUNTAK OPC					



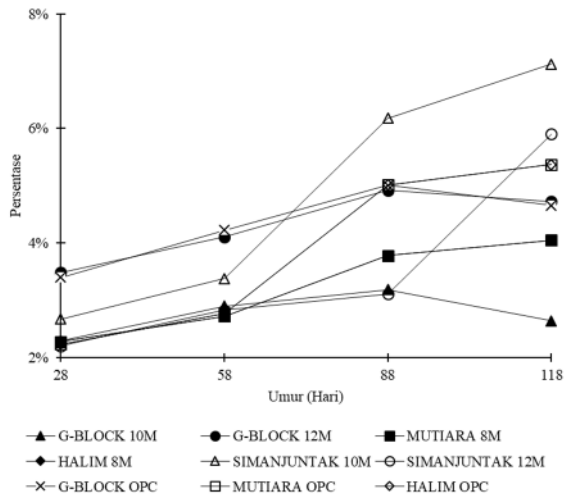
Grafik 4.120 Perbandingan Porositas Terbuka

4. Perbandingan porositas tertutup

Perbandingan dari porositas tertutup dapat dilihat pada Tabel 4.91 dan Grafik 4.121. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di air laut memberikan hasil porositas tertutup yang tidak terlalu berbeda dengan perendaman di larutan air garam.

Tabel 4.91 Perbandingan Porositas Tertutup

TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	2,29%	2,90%	3,19%	2,64%	
G-BLOCK 12M	3,48%	4,10%	4,92%	4,72%	
MUTIARA 8M	2,28%	2,72%	3,78%	4,05%	
HALIM 8M	2,28%	2,72%	3,78%	4,05%	
SIMANJUNTAK 10M	2,67%	3,38%	6,18%	7,12%	
SIMANJUNTAK 12M	2,20%	2,83%	3,11%	5,90%	
G-BLOCK OPC	3,40%	4,22%	5,01%	4,65%	
MUTIARA OPC	2,23%	2,77%	5,01%	5,37%	
HALIM OPC	2,23%	2,77%	5,01%	5,37%	
SIMANJUNTAK OPC					



Grafik 4.121 Perbandingan Porositas Tertutup

5. Klorida total

Klorida pada analisa ini sudah dikurangi dengan kandungan klorida yang terkandung di dalam *fly ash* sebesar 0,19%. Perbandingan dari klorida total dapat dilihat pada Tabel 4.92 sampai Tabel 4.94 dan Grafik 4.122 sampai Grafik 4.124. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di air laut memberikan klorida total yang lebih besar daripada perendaman di larutan air garam.

Tabel 4.92 Perbandingan Klorida Total Permukaan (0 cm)

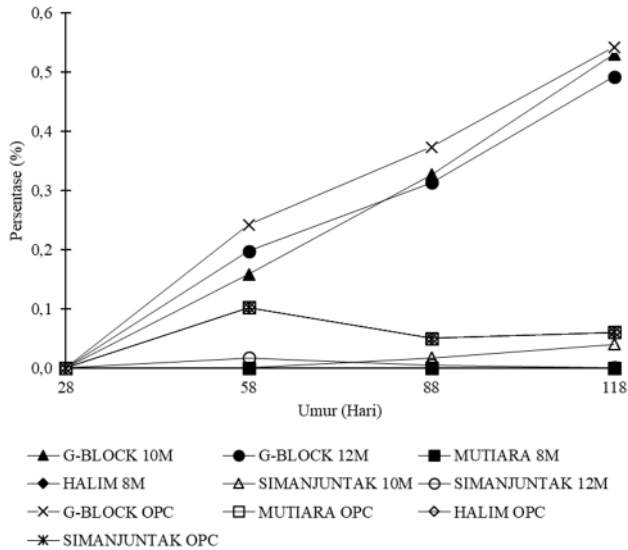
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	0,00	0,16	0,33	0,53	
G-BLOCK 12M	0,00	0,20	0,31	0,49	
MUTIARA 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
HALIM 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
SIMANJUNTAK 10M	0,00	0,00	0,02	0,04	
SIMANJUNTAK 12M	0,00	0,02	0,00	0,00	
G-BLOCK OPC	0,00	0,24	0,37	0,54	
MUTIARA OPC	0,00	0,10	0,05	0,06	
HALIM OPC	0,00	0,10	0,05	0,06	
SIMANJUNTAK OPC	0,00	0,10	0,05	0,06	

Tabel 4.93 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 4 cm

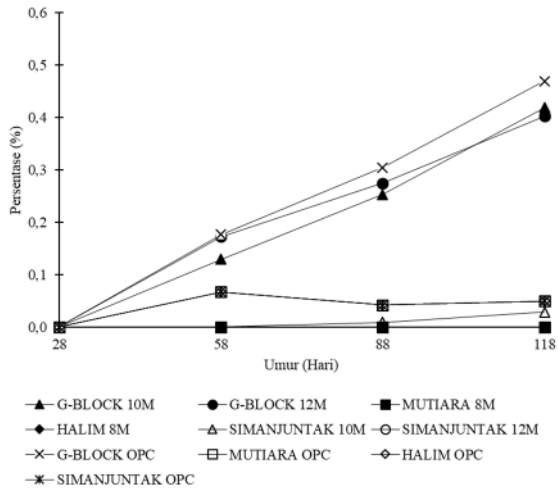
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	0,00	0,13	0,25	0,42	
G-BLOCK 12M	0,00	0,17	0,27	0,40	
MUTIARA 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
HALIM 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
SIMANJUNTAK 10M	0,00	0,00	0,01	0,03	
SIMANJUNTAK 12M	0,00	0,00	0,00	0,00	
G-BLOCK OPC	0,00	0,18	0,30	0,47	
MUTIARA OPC	0,00	0,07	0,04	0,05	
HALIM OPC	0,00	0,07	0,04	0,05	
SIMANJUNTAK OPC	0,00	0,07	0,04	0,05	

Tabel 4.94 Klorida Total Kedalaman 8 cm

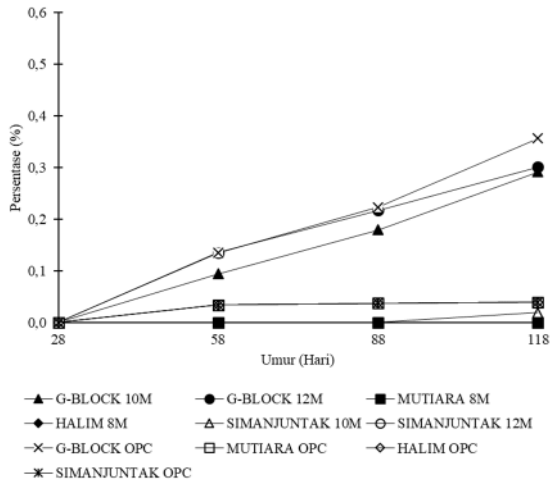
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	0,00	0,09	0,18	0,29	
G-BLOCK 12M	0,00	0,14	0,22	0,30	
MUTIARA 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
HALIM 8M	0,00	0,00	0,00	0,00	
SIMANJUNTAK 10M	0,00	0,00	0,00	0,02	
SIMANJUNTAK 12M	0,00	0,00	0,00	0,00	
G-BLOCK OPC	0,00	0,13	0,22	0,36	
MUTIARA OPC	0,00	0,03	0,04	0,04	
HALIM OPC	0,00	0,03	0,04	0,04	
SIMANJUNTAK OPC	0,00	0,03	0,04	0,04	



Grafik 4.122 Perbandingan Klorida Total Permukaan (0 cm)



Grafik 4.123 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 4 cm



Grafik 4.124 Perbandingan Klorida Total Kedalaman 8 cm

6. Derajat keasaman (pH)

Perbandingan dari derajat keasaman (pH) dapat dilihat pada Tabel 4.95 sampai Tabel 4.97 dan Grafik 4.125 sampai Grafik 4.127. Berdasarkan tabel dan grafik tersebut dapat dilihat bahwa perendaman di air laut memberikan pH yang lebih besar daripada perendaman di larutan air garam.

Tabel 4.95 Perbandingan pH Permukaan (0 cm)

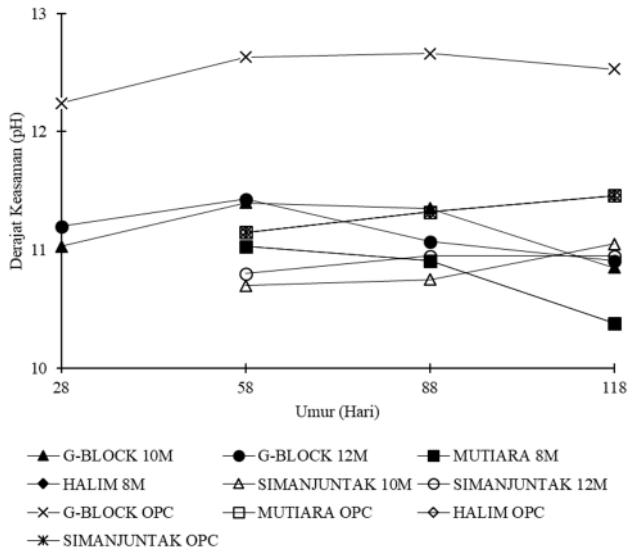
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	11,03	11,40	11,35	10,85	
G-BLOCK 12M	11,20	11,43	11,07	10,91	
MUTIARA 8M		11,03	10,91	10,38	
HALIM 8M		11,03	10,91	10,38	
SIMANJUNTAK 10M		10,70	10,75	11,05	
SIMANJUNTAK 12M		10,80	10,95	10,95	
G-BLOCK OPC	12,24	12,63	12,66	12,53	
MUTIARA OPC		11,15	11,32	11,46	
HALIM OPC		11,15	11,32	11,46	
SIMANJUNTAK OPC		11,15	11,32	11,46	

Tabel 4.96 Perbandingan pH Kedalaman 4 cm

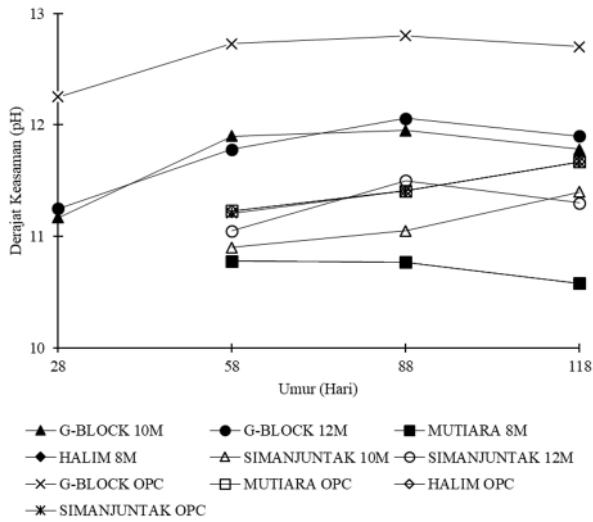
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	11,17	11,90	11,95	11,78	
G-BLOCK 12M	11,25	11,78	12,06	11,90	
MUTIARA 8M		10,78	10,77	10,58	
HALIM 8M		10,78	10,77	10,58	
SIMANJUNTAK 10M		10,90	11,05	11,40	
SIMANJUNTAK 12M		11,05	11,50	11,30	
G-BLOCK OPC	12,25	12,73	12,80	12,70	
MUTIARA OPC		11,23	11,41	11,67	
HALIM OPC		11,23	11,41	11,67	
SIMANJUNTAK OPC		11,21	11,41	11,67	

Tabel 4.97 Perbandingan pH Kedalaman 8 cm

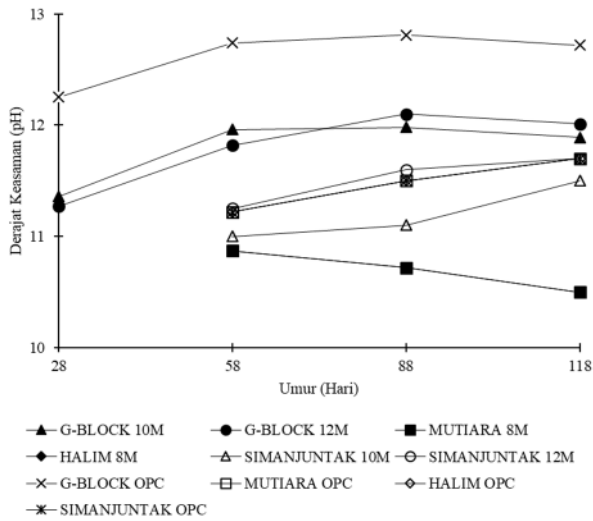
TIPE	UMUR				
	28	58	88	118	148
G-BLOCK 10M	11,36	11,96	11,98	11,89	
G-BLOCK 12M	11,27	11,82	12,10	12,01	
MUTIARA 8M		10,87	10,72	10,50	
HALIM 8M		10,87	10,72	10,50	
SIMANJUNTAK 10M		11,00	11,10	11,50	
SIMANJUNTAK 12M		11,25	11,60	11,70	
G-BLOCK OPC	12,25	12,74	12,81	12,72	
MUTIARA OPC		11,22	11,50	11,70	
HALIM OPC		11,22	11,50	11,70	
SIMANJUNTAK OPC		11,22	11,50	11,70	



Grafik 4.125 Perbandingan pH Permukaan (0 cm)



Grafik 4.126 Perbandingan pH kedalaman 4 cm



Grafik 4.127 Perbandingan pH Kedalaman 8 cm

Secara keseluruhan pada tabel-tabel dan grafik-grafik perbandingan di atas dapat dilihat bahwa penggunaan media *curing* di air garam kurang mempresentasikan kondisi dari air laut yang sesungguhnya. Karena pada air laut tidak hanya mengandung klorida saja, namun juga terdapat unsur-unsur lain yang mempengaruhi sifat dan karakteristik beton. Serta penggunaan kadar NaCl sebesar 3,5% tidak bisa mewakili kondisi air laut, karena menurut Hidayat (2011) air laut hanya mengandung 3,5% garam-garam yang terdiri dari 55% klorida dengan kata lain kandungan klorida di air laut adalah sebesar 55% dari 3,5%, yaitu sebesar 1,9%. Dan berdasarkan pengujian klorida terhadap air laut Pantai Kenjeran didapatkan besar kandungan klorida sebesar 1,88%, nilai ini jauh lebih kecil dari besar klorida yang digunakan pada penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan di atas dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

- 1) Perendaman beton di air laut (*sea water curing*) yang berlokasi di pantai kenjeran memberikan dampak terhadap beton, yaitu beton dihindangi oleh makhluk hidup teritip yang menyebabkan permukaan beton dapat mengeras ataupun menjadi keropos yang menyebabkan klorida lebih mudah masuk ke dalam beton. Namun peristiwa menempelnya makhluk hidup ini menunjukkan bahwa beton geopolimer tidak berbahaya bagi tempat tinggal biota laut.
- 2) Perlakuan *moist curing* pada beton geopolimer dengan air suling maupun air laut memberikan pengaruh yang lebih baik daripada perendaman pada umur 1 hari di air laut, yaitu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, pori yang lebih kecil, derajat keasaman yang lebih tinggi, serta kandungan klorida yang lebih sedikit.
- 3) Penggunaan air laut di dalam campuran beton geopolimer memberikan dampak yang kurang baik, yaitu dapat menurunkan kuat tekan, memperbesar pori, menghasilkan pH yang lebih rendah, dan kandungan klorida yang lebih banyak.
- 4) Berdasarkan analisa yang dilakukan maka direkomendasikan beton untuk bangunan pemecah gelombang (*breakwater*) adalah geopolimer air suling 12M dengan perlakuan *moist curing* (GN-12-28) ataupun langsung direndam di air laut (GN-12-1) dengan pertimbangan bahwa beton ini mampu memenuhi target

mutu K-400 pada umur 28 hari serta dengan kandungan klorida yang baru muncul pada umur 88 hari (GN-12-1) dan 118 hari (GN-12-28) serta mampu mengikat klorida sampai sebesar 0,444% (GN-12-28) dan 0,523% (GN-12-1) sampai umur 118 hari. Namun Untuk daerah yang kesulitan mendapatkan air suling dapat digunakan beton geopolimer air laut 12M dengan perlakuan *moist curing* (GS-12-28) sebagai bangunan pemecah gelombang (*breakwater*), dengan pertimbangan beton ini mampu mencapai mutu K-400 pada umur 58 hari dan kandungan klorida bebas yang baru muncul pada umur 88 hari (GS-12-28) serta mampu mengikat klorida sebesar 0,490% sampai umur 118 hari.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka terdapat saran yang dianjurkan penulis kepada peneliti yang ingin meneruskan penelitian ini, yaitu perlu dilakukan pengujian yang lebih lama terhadap beton geopolimer dengan variasi molaritas yang lebih banyak untuk mengetahui seberapa besar penambahan teritip yang menempel pada permukaan beton serta pengaruhnya terhadap sifat dan karakteristik beton geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, D. and Hidjan, A. G. (2012) 'Efek Perawatan Terhadap Karakteristik Beton Geopolymer', *Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta*, 11(1), pp. 79–86.
- ASTM C117-03 (2003) 'Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0117-13.2.
- ASTM C127-01 (2001) 'Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0127-12.1.
- ASTM C128-01 (2001) 'Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0127-12.1.
- ASTM C136-01 (2001) 'Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0136.
- ASTM C143/C143M-15 (2015) 'Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0143.
- ASTM C40-04 (2004) 'Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C1585-13.2.
- ASTM C566-97 (Reapproved 2004) (2004) 'Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0566-97R04.2.
- ASTM C618-05 (2005) 'Standard Specification for Coal Fly

- Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete', *ASTM International*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0618.
- ASTM C642-06 (2006) 'Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete'. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0642-13.5.
- Bambang (2009) 'Garis Pantai RI Terpanjang Keempat di Dunia', *ANTARA News*, 24 February. Available at: <http://www.antaranews.com/berita/133679/garis-pantai-ri-terpanjang-keempat-di-dunia>.
- Binici, H. *et al.* (2009) 'Microstructure of Red Brick Dust and Ground Basaltic Pumice Blended Cement Mortars Exposed to Magnesium Sulphate Solutions', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(11), pp. 1784–1793. doi: 10.1139/L09-103.
- Casasola, R., Rincón, J. M. and Romero, M. (2012) 'Glass-Ceramic Glazes for Ceramic Tiles: A Review', *Journal of Materials Science*, 47(2), pp. 553–582. doi: 10.1007/s10853-011-5981-y.
- Chambers, L. D. *et al.* (2006) 'Modern approaches to marine antifouling coatings', *Surface and Coatings Technology*, 201(6), pp. 3642–3652. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.129.
- Das, S. K., Mohapatra, A. K. and Rath, K. (2014) 'Geopolymer Concrete - Green Concrete for the Future - A Review', 5(1), pp. 21–28.
- Davidovits, J. (1994) 'Properties of Geopolymer Cements', *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, pp. 131–149.
- Davidovits, J. (1997) 'Geopolymers - Inorganic polymeric new materials', *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), pp. 1633–1656. doi: 10.1007/BF01912193.
- Davidovits, J. (2013) 'Geopolymer Cement', *Rev. Geopolymer Inst*, pp. 1–11.
- Davidovits, J. (2015) *Geopolymer: Chemistry and*

- Applications*. 4th edn, *Geopolymer Institute*. 4th edn. France.
- Direktorat Bina Marga Program Jalan (1992) ‘Perencanaan Beton Struktural’, in *Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan*. Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga, pp. 21–23.
- Ekaputri, J. J. *et al.* (2017) ‘The Effect of Steam Curing on Penetration in Geopolymer Concrete Chloride’, *EACEF*. Seoul, Korea.
- 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.
- Fansuri, H. *et al.* (2012) ‘The Effect of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide on the Strength of Aggregates Made from Coal Fly Ash using the Geopolymerisation Method’, *ASIA-PACIFIC JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING*, 7, pp. 73–79. doi: 10.1002/apj.
- Favaro, M. *et al.* (2012) ‘Characterization of Lapis Lazuli and Corresponding Purified Pigments for a Provenance Study of Ultramarine Pigments Used in Works of Art’, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(6), pp. 2195–2208. doi: 10.1007/s00216-011-5645-4.
- Halim, L. N., Ekaputri, J. J. and Triwulan (2017) ‘The Influence of Salt Water on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete The Influence of Salt Water on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete’, 1002(February). doi: 10.1051/mateconf/20179701002.
- Hardjito, D. and Rangan, B. V. (2005) *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, *Research report GCI*. Perth. Available at: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf.
- Hartono, H. *et al.* (2012) *Analisis Penempelan Biota Laut pada Beton dan Diffusivitas Air Laut pada Beton*, *Symposium*

Nasional RAPI XI FT UMS.

- Hidayat, R. R. (2011) *Rancang Bangun Alat Pemisah Garam dan Air Tawar Dengan Menggunakan Energi Matahari, Skripsi*. Institut Pertanian Bogor.
- Hunggurami, E., Utomo, S. and Wadu, A. (2014) 'Pengaruh Masa Perawatan (Curing) Menggunakan Air Laut Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton', *Jurnal Teknik Sipil*, III(2), pp. 103–110.
- Ishida, T., Miyahara, S. and Maruya, T. (2008) 'Chloride Binding Capacity of Mortars Made with Various Portland Cements and Mineral Admixtures', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), pp. 287–301. doi: 10.3151/jact.6.287.
- Islam, M. M. *et al.* (2010) 'Strength Behavior of Concrete using Slag with Cement in Sea Water Environment', *Journal of Civil Engineering*. Bangladesh, 38(2), pp. 129–140.
- Jackson, N. L. *et al.* (2015) 'Beach morphologies induced by breakwaters with different orientations', *Geomorphology*. Elsevier B.V., 239, pp. 48–57. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.03.010.
- Joseph, B. and Mathew, G. (2012) 'Influence of Aggregate Content on the Behavior of Fly Ash Based Geopolymer Concrete', *Sci. Iran.*, 19(5), pp. 1188–1194.
- Joshi, S. V. and Kadu, M. S. (2012) 'Role of Alkaline Activator in Development of Eco-friendly Fly Ash Based Geo Polymer Concrete', *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, 3(5), pp. 417–421.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. and Panerese, W. C. (2002) *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th edn, EB001.14. 14th edn. Illinois, USA: Portland Cement Association. Available at: <http://www.cement.org/bookstore/supporting/cd100/EB001Frt.pdf>.
- Li, J., Dong, Z. and Yang, E. H. (2017) 'Strain Hardening Cementitious Composites Incorporating High Volumes

- of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 146, pp. 183–191. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.098.
- Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y. (2004) *Development of Sustainable Cementitious Materials, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. Kowloon, Hong Kong.
- Liu, S. *et al.* (2014) 'Structure Formation Process, Heat-Insulation Property and Cyclic Compression-Resilience Performance of Mullite Fibres/Whiskers Frameworks', *RSC Advances*, 4(19), pp. 9451–9456. doi: 10.1039/c3ra47394e.
- Mahuri, W., Pratomo, A. and Idris, F. (2014) 'Laju Penempelan Teritip Pada Jenis Bahan Tiang Dermaga Yang Berbeda', *ANZDOC*, pp. 1–10. Available at: <https://anzdoc.com/laju-penempelan-teritip-pada-jenis-bahan-tiang-dermaga-yang-.html>.
- Mehta, P. K. (1991) *Concrete in Marine Environment, Elsevier Science Publisher LTD*. England.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006) *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Third, *Concrete*. Third. The McGraw-Hill Companies, Inc. doi: 10.1036/0071462899.
- Mocioiu, O. C. *et al.* (2014) 'Study of Crystallization Process of Soda Lead Silicate Glasses by Thermal and Spectroscopic Methods', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117(1), pp. 131–139. doi: 10.1007/s10973-014-3652-3.
- Mostafa, N. Y. *et al.* (2009) 'Hydrothermal Synthesis and Characterization of Aluminium and Sulfate Substituted 1.1 nm Tobermorites', *Journal of Alloys and Compounds*, 467(1–2), pp. 332–337. doi: 10.1016/j.jallcom.2007.11.130.
- Motorwala, A. *et al.* (2013) 'ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete', *International Journal of*

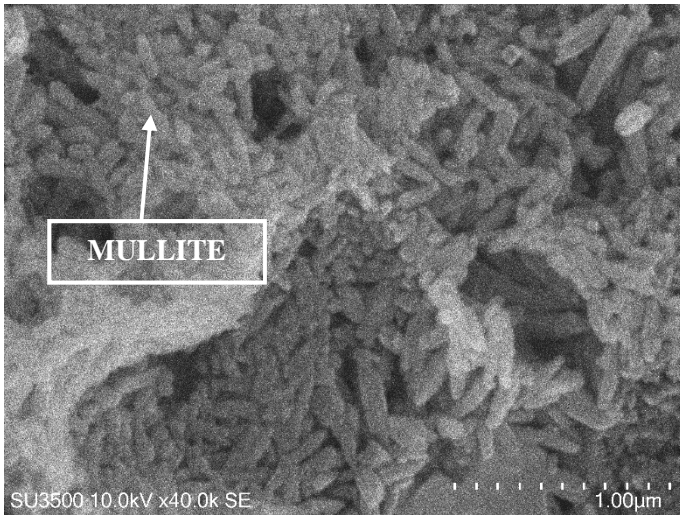
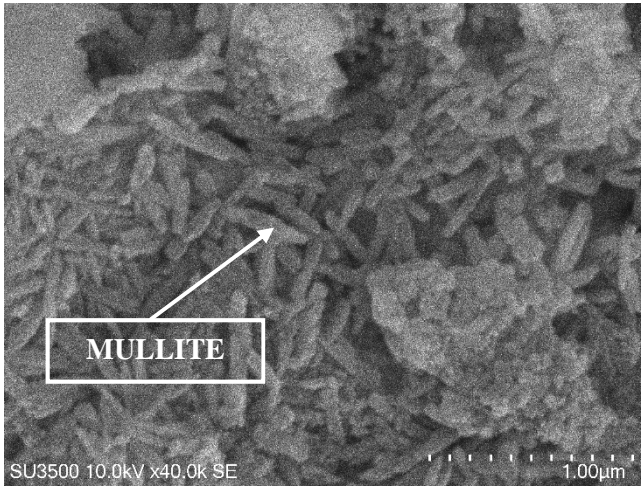
- Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), pp. 159–166. Available at: www.ijetae.com.
- National Ready Mixed Association (NRMCA) (2014) ‘CIP 15 - Chemical Admixtures for Concrete’, *Technical Information*.
- Nikolov, A. and Rostovsky, I. (2017) ‘Sodium-Silicate Geopolymers Based on Natural Zeolite – Clinoptilolite’, *CHIMIE*. Bulgaria.
- Olivia, M. and Nikraz, H. (2011) ‘Durability of Fly Ash Geopolymer Concrete in a Seawater Environment’, *Proceedings of the CONCRETE 2011 Conference*. Perth, Western Australia: Curtin Research Publications. Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/11351>.
- Olivia, M. and Nikraz, H. (2013) ‘Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater’, *The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, pp. 1–8. Available at: <http://hdl.handle.net/2115/54335>.
- Rangan, B. V. (2010) ‘Fly Ash-Based Geopolymer Concrete’, in *Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*. Mumbai, India: Allied Publishers Private Limited, pp. 68–106.
- Ristinah *et al.* (2012) ‘Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Sebagai Pengganti Semen Pada Campuran Batako Terhadap Kuat Tekan Batako’, *Rekayasa Sipil*, 6(3), pp. 264–271.
- Ruslan, A. F. (2014) *Kepadatan dan Keragaman Macrobiofouling pada Dermaga Beton dan Dermaga Kayu di Pulau Balanglombo. Kec. Mattiro Sompe. Kab. Pangkep, Skripsi*. Makassar.
- Sathar, S. *et al.* (2012) ‘The Effect of Oil Saturation On the Mechanism of Compaction In Granular Materials: Higher Oil Saturations Lead To More Grain Fracturing and Less Pressure Solution’, *Journal of Sedimentary Research*, 82(8), pp. 571–584. doi: 10.2110/jsr.2012.44.

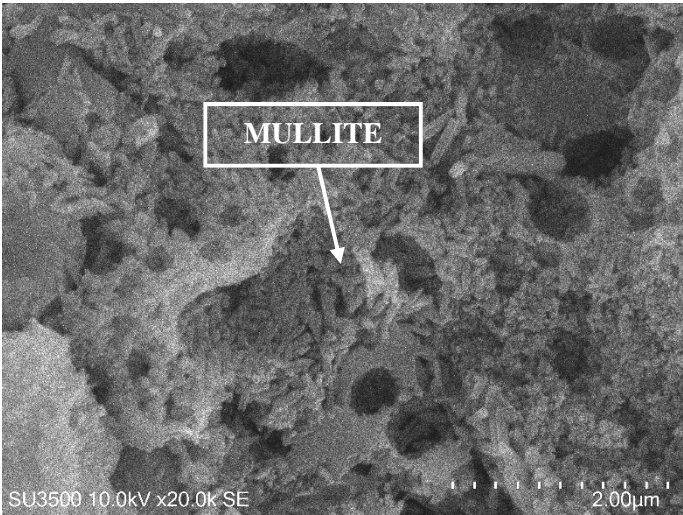
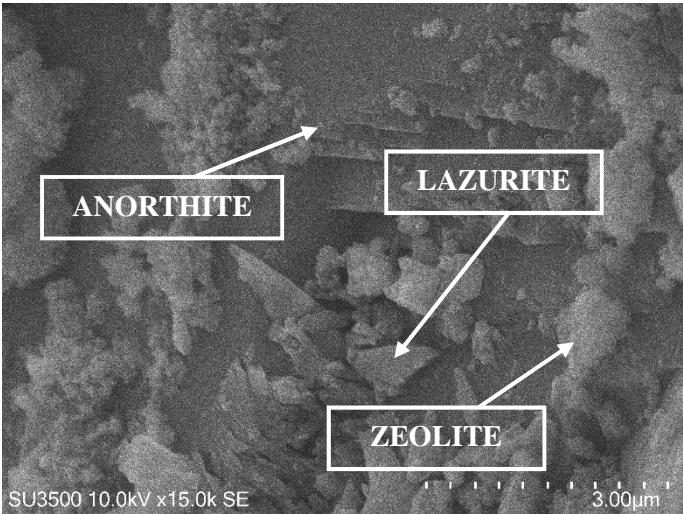
- Sekretariat Kabinet RI (2017) *PBB Verifikasi 16.056 Nama Pulau Indonesia*. Available at: <http://setkab.go.id/pbb-verifikasi-16-056-nama-pulau-indonesia/> (Accessed: 30 October 2017).
- Shaikh, F. U. A. (2014) 'Effects of Alkali Solutions on Corrosion Durability of Geopolymer Concrete', *Advances in Concrete Construction*, 2(2), pp. 109–123. doi: 10.12989/acc.2014.2.2.109.
- Simanjuntak, R. (2016) *Pengaruh Konsentrasi Alkali terhadap Penetrasi Ion Klorida pada Beton Geopolimer*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- SNI 03-0691-1996 (1996) 'Paving Block', *Balitbang PU*. Indonesia.
- SNI 03-1974-1990 (1990) 'Metode Pengujian Kuat Tekan Beton', *Balitbang PU*. Indonesia.
- SNI 03-2834-2000 (2000) 'Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal', *Balitbang PU*. Indonesia.
- SNI 03-2854-1992 (1992) 'Spesifikasi Kadar Ion Klorida dalam Beton', *Balitbang PU*. Indonesia.
- SNI 03-6815-2002 (2002) 'Tata Cara Mengevaluasi Hasil Uji Kekuatan Beton', *Balitbang PU*. Indonesia.
- SNI 06-6989.11-2004 (2004) 'Air dan Air Limbah – Bagian 11: Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan Alat pH Meter', *Balitbang PU*. Indonesia.
- Subekti, S. (2012) 'Analisis Proporsi Limbah Fly Ash Paiton dan Tjiwi Kimia Terhadap Kuat Tekan Pasta Geopolimer', in *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW)*. Surabaya, Indonesia, pp. 11–30.
- Wahyudin, B. (2009) 'Susunan Kubus Beton Untuk Pemecah Gelombang'. Indonesia: IDP0023145.
- Yuan, M. rong, Lu, J. tang and Kong, G. (2010) 'Effect of SiO₂:Na₂O Molar Ratio of Sodium Silicate on the Corrosion Resistance of Silicate Conversion Coatings', *Surface and Coatings Technology*. Elsevier B.V., 204(8),

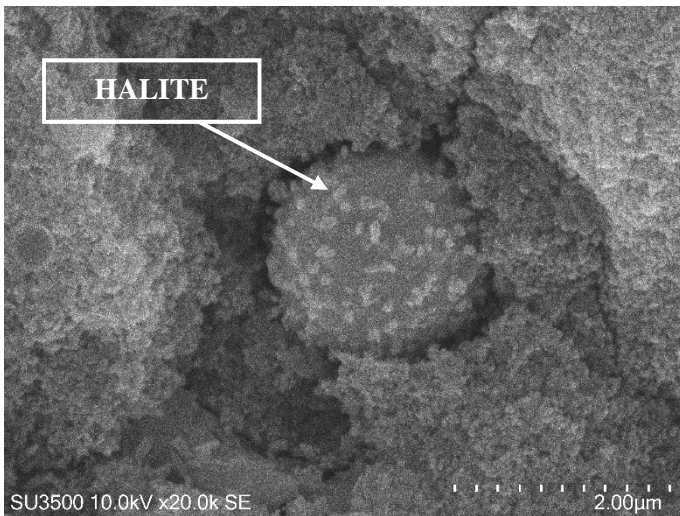
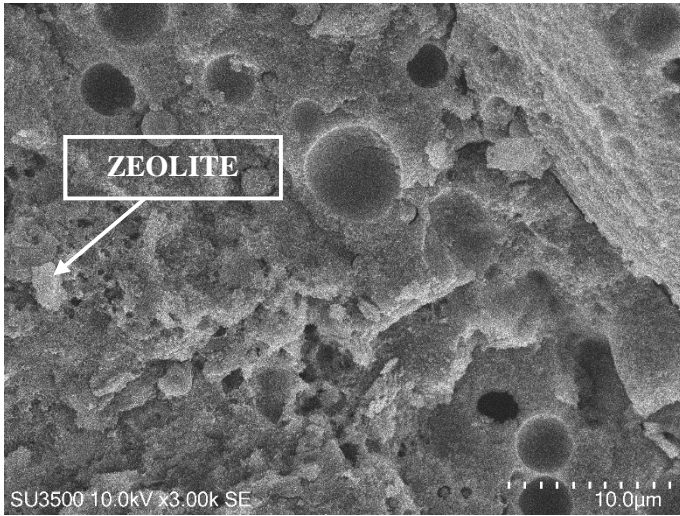
pp. 1229–1235. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.10.024.
Zerfu, K. and Ekaputri, J. J. (2016) 'Review on Alkali-Activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete', *Materials Science Forum*, 841(March), pp. 162–169. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.162.

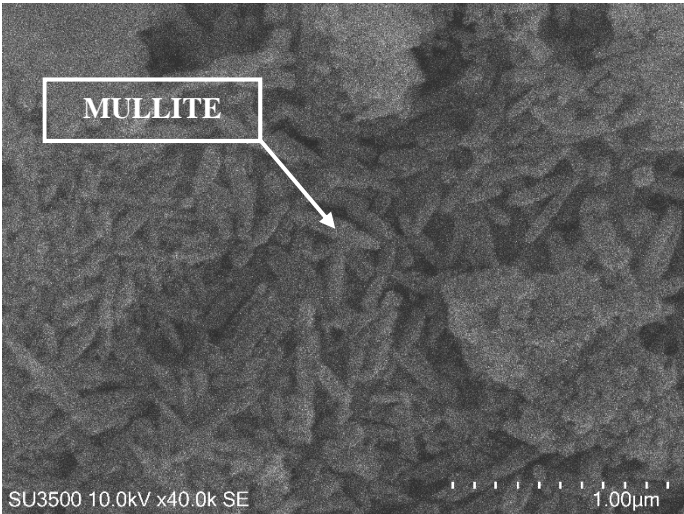
LAMPIRAN

SEM GS-12-28-H+118

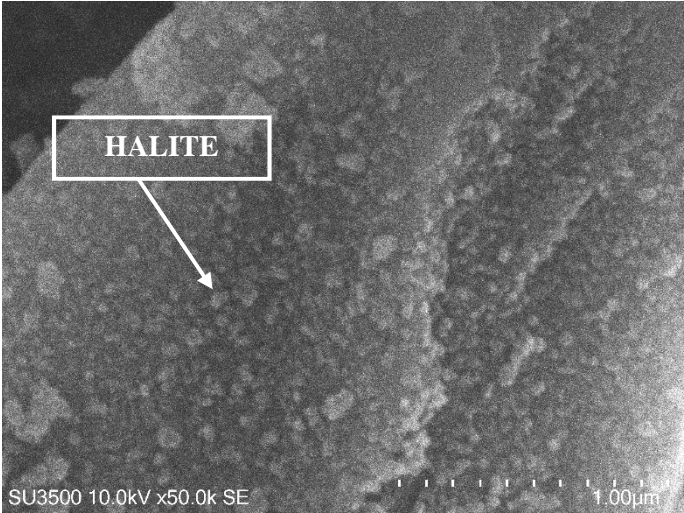


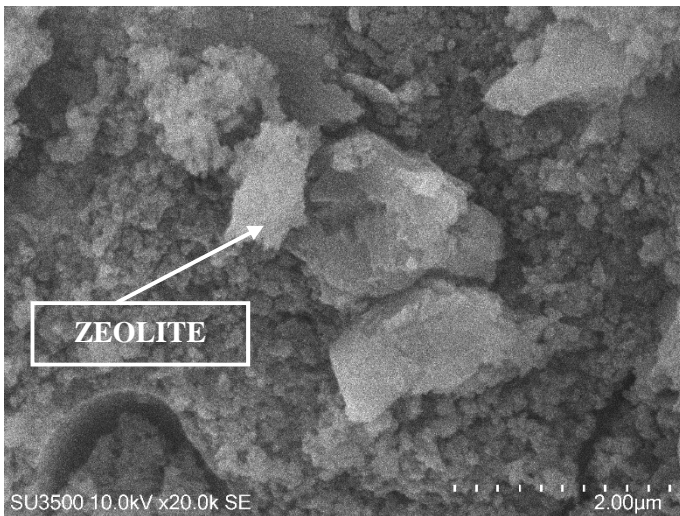
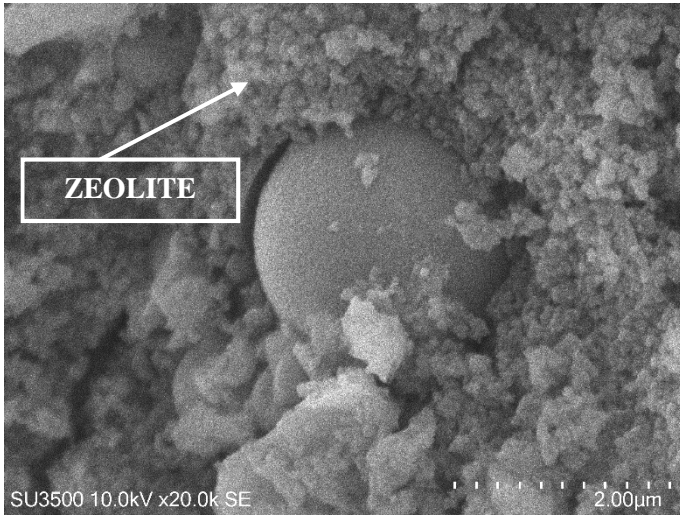


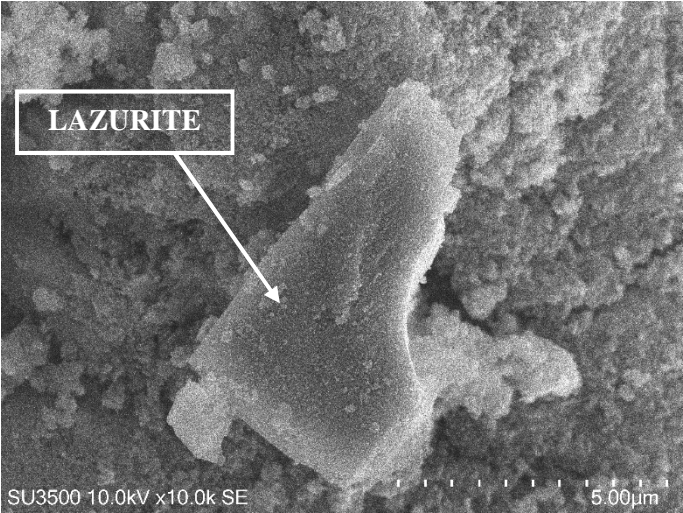
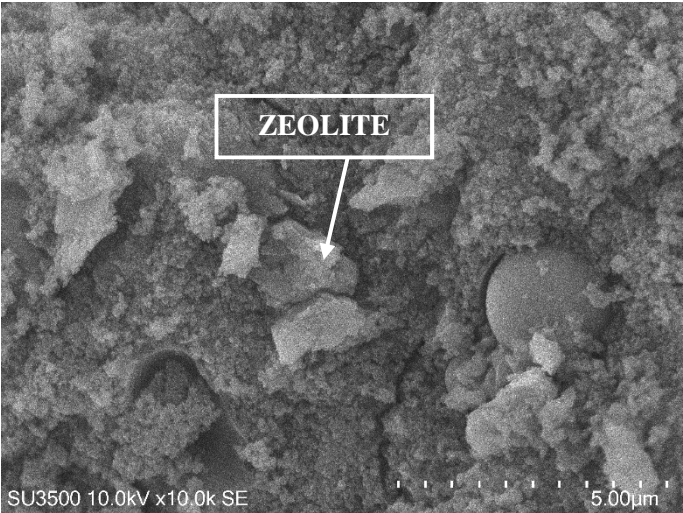


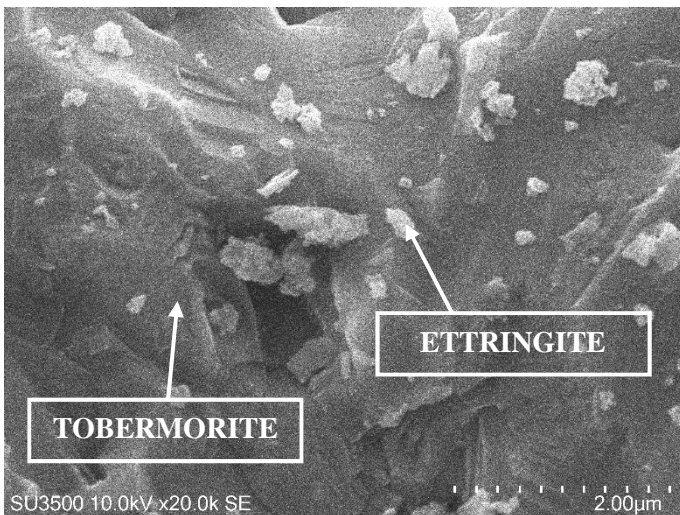
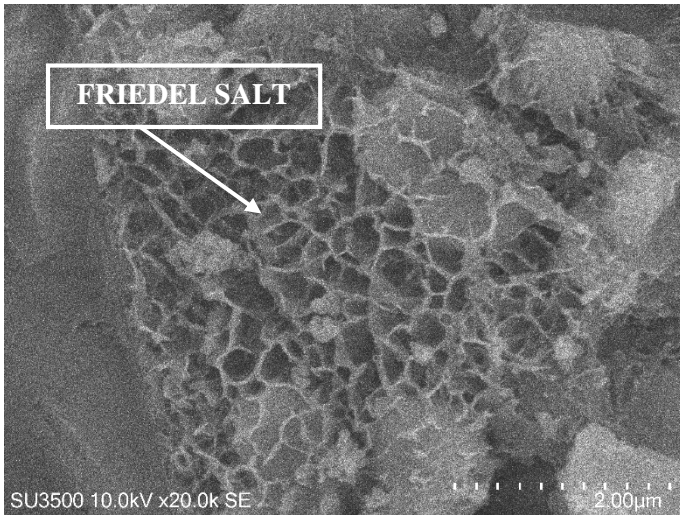


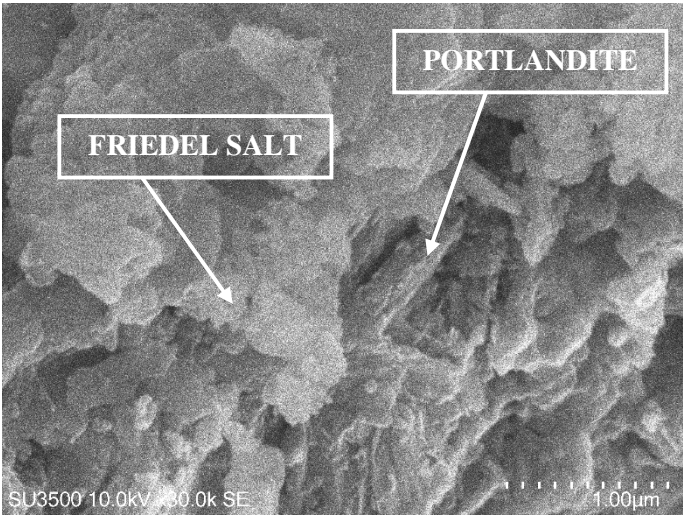
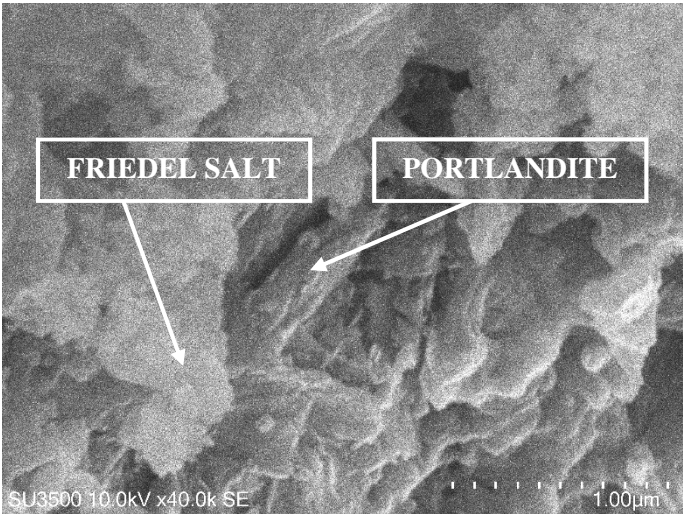
SEM GN-10-28-H+118

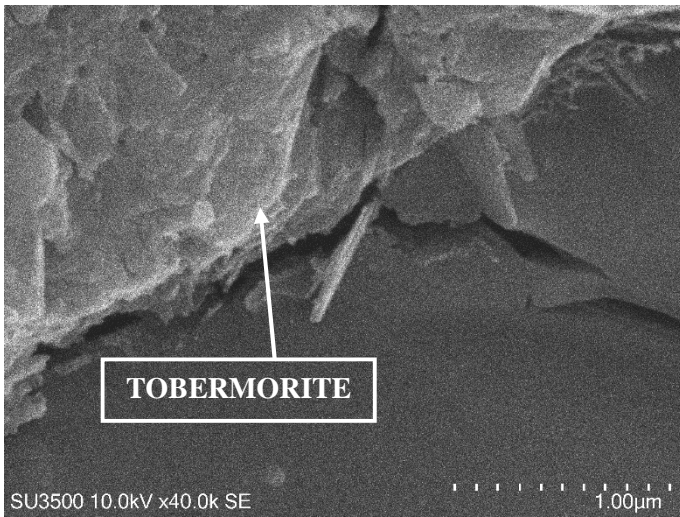
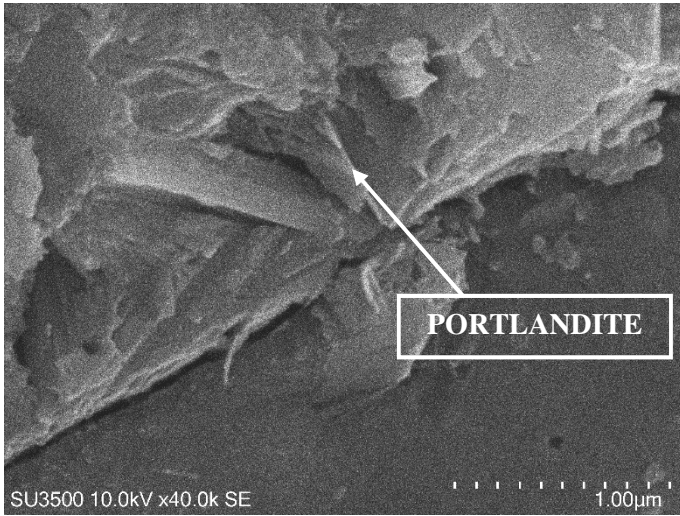


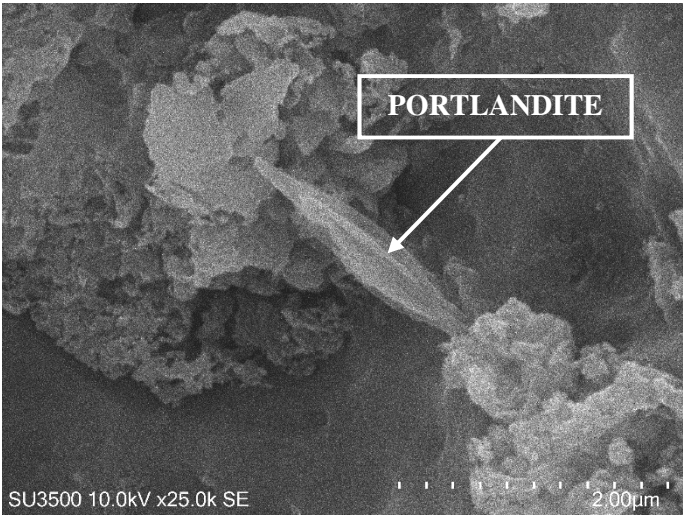
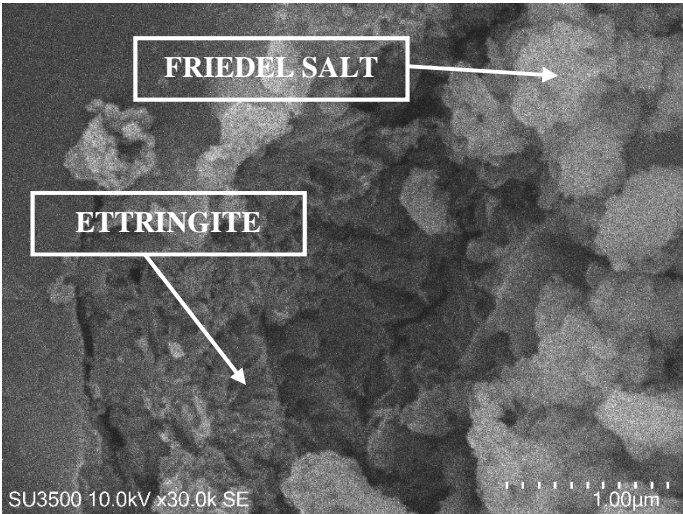


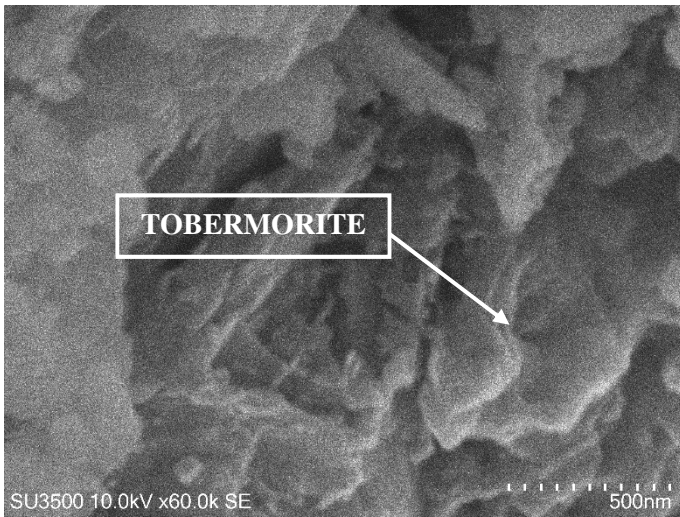
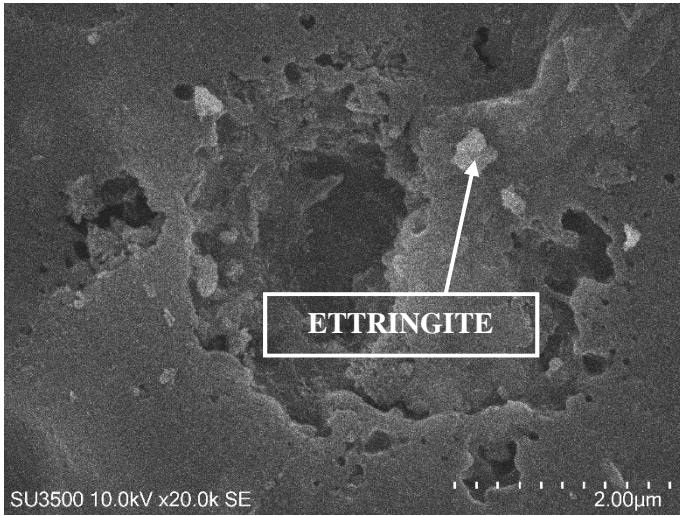


SEM PN-28-H+118









“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Jonathan Febryan,
Penulis dilahirkan di Jakarta, 29 Februari 1996, merupakan anak kedua dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Surya Insan (Tangerang Selatan), SDN Joglo 10 Pagi (Jakarta Barat), SMP Negeri 19 (Jakarta Selatan), SMA Negeri 47 (Jakarta Selatan). Setelah lulus dari SMA Negeri 47 Jakarta Selatan tahun 2014, penulis mengikuti jalur SNMPTN dan diterima di Jurusan

Teknik Sipil FTSP-ITS pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 3114 100 058. Di jurusan teknik sipil ini penulis mengambil bidang studi Struktur khususnya pada material beton. Penulis aktif dalam beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh kampus ITS, aktif di dalam kepanitiaan beberapa organisasi ke-mahasiswaan, serta aktif di dalam perlombaan ke-teknik sipilan selama menjadi mahasiswa.