



TESIS - RC185401

**INVESTIGASI EFEK PENGGUNAAN *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* DAN *SUPPLEMENTARY MATERIAL* PADA BETON TERHADAP *DURABILITY PROPERTIES* DAN *TIME TO CORROSION INDUCED CRACK***

**GABRIEL JOSE POSENTI GHEWA**  
03111750020010

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Ir. PRIYO SUPROBO, MS., PhD  
Dr. Ir. DJOKO IRAWAN, MS.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Gabriel Jose Posenti Ghewa**

NRP:

03111750020010

Tanggal ujian : 6 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.  
NIP: 19590911 198403 1 001

2. Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.  
NIP: 19590213 198701 1 001

Penguji:

1. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.  
NIP: 19630605 198903 1 004

2. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA  
NIP: 19500403 197603 1 003

Kepala Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember



**Dr. techn. I Lasminto, ST., M.Sc.**  
NIP: 19675202 199802 1 001

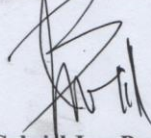
*“Halaman sengaja dikosongkan”*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

**Tesis** yang berjudul: “**Investigasi Efek Penggunaan *Engineered Cementitious Composite* Dan *Supplementary Material* Pada Beton Terhadap *Durability Properties* Dan *Time To Corrosion Induced Crack*” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tuliskan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tuliskan yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tuliskan orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka. Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiaris di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.**

Surabaya, Januari 2020



**Gabriel Jose Posenti Ghewa**

**NRP: 03111750020010**

*“Halaman sengaja dikosongkan”*

# **INVESTIGASI EFEK PENGGUNAAN *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* DAN *SUPPLEMENTARY MATERIAL* PADA BETON TERHADAP *DURABILITY PROPERTIES* DAN *TIME TO CORROSION INDUCED CRACK***

Nama Mahasiswa : Gabriel Jose Posenti Ghewa  
NRP : 03111750020010  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph. D.  
2. Dr. Ir. Djoko Irawan, MS

## **ABSTRAK**

Keretakan yang diakibatkan korosi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur beton bertulang. Lingkungan laut merupakan lingkungan yang agresif terhadap beton, karena mengandung klorida dan sulfat. Klorida yang menginfiltrasi masuk ke dalam badan beton mengakibatkan tulangan dalam beton mengalami korosi sehingga menekan bagian dalam beton hingga menimbulkan retak sampai permukaan beton. Keretakan ini jika dibiarkan akan membuat kekuatan beton bertulang berkurang.

Penelitian ini akan menginvestigasi efek penambahan *supplementary material* pada beton normal dan beton dari material *Engineered Cementitious Composite* (ECC) ditinjau dari *durability* (ketahanan) beton dan *time to corrosion induced crack* ( retak akibat induksi korosi). Properti *durability* yang diuji dalam penelitian ini adalah nilai sorptivity dan difusi klorida. *Supplementary material* seperti *fly ash* tipe F dan *silica fume*, serta ECC memiliki sifat permeabilitas yang rendah, sehingga dianggap dapat memberikan ketahanan lebih terhadap penetrasi klorida pada beton.

Pengujian percepatan korosi pada penelitian ini menggunakan metode galvanostatik. Beton akan diposisikan berada pada kondisi terendam sebagian di dalam larutan NaCl. Jenis beton yang digunakan dalam penelitian ini sebagai pembandingan terhadap beton normal (NC) adalah beton dengan *fly ash* 15% (FA), beton dengan *silica fume* 5% (SF), beton dengan gabungan *fly ash* 10% dan *silica fume* 5% (SF+FA), dan ECC.

Hasil penelitian menunjukkan ECC menjadi material yang memiliki durabilitas terbaik, ditinjau dari nilai sorptivitas, koefisien difusi dan *corrosion rate*. ECC memiliki *corrosion rate* 46% lebih kecil dari beton normal, sementara FA, SF, dan SF+FA memiliki *corrosion rate* 14%, 6%, dan 9% lebih kecil dari beton normal. ECC mereduksi sorptivitas beton sebesar 60 % dari nilai sorptivitas beton normal, sementara FA, SF, dan SF+FA mereduksi sorptivitas beton sebesar 21%, 20% dan 20.5 %. ECC memiliki koefisien difusi 3.5% lebih kecil dibandingkan beton normal, sementara FA, SF, dan SF+FA memiliki nilai koefisien difusi 3%, 2.8%, dan 2.9% lebih kecil dibandingkan beton normal.

**Kata Kunci** : Beton, *Durability*, *Corrosion Rate*, ECC, *Engineered Cementitious Material*, *Supplementary Material*, *Fly Ash*, *Crack*

*“Halaman sengaja dikosongkan”*

# **INVESTIGATION OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE AND SUPPLEMENTARY MATERIAL EFFECT IN CONCRETE TO DURABILITY PROPERTIES AND TIME TO CORROSION INDUCED CRACK**

Researcher : Gabriel Jose Posenti Ghewa  
NRP : 03111750020010  
Supervisor : 1. Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph. D.  
2. Dr. Ir. Djoko Irawan, MS

## **ABSTRACT**

Crack caused by corrosion is one of the main causes of reinforced concrete damage, especially in the marine environment. The marine environment is an aggressive environment for concrete because it contains aggressive agent such as chloride. Chloride that penetrates into reinforced concrete can lead to reinforcement over the time, so that the corrosion product will causes stress at the interface of concrete steel reinforcement and finally generating cracks to the concrete surface.

This research will investigate the effect of Engineered Cementitious Composite (ECC) and supplementary material on the durability properties and time to corrosion induced crack of concrete. Durability properties that investigated in this research is sorptivity and chloride diffusion. ECC and supplementary material such as type F fly ash and silica fume, well known as low permeability materials, considered to provide a good performance to resist water penetration.

Accelerated corrosion test in this research using the galvanostatic method. Galvanostatic method in this research was used to simulate corrosion process that occurs around the marine environment. with this method, concrete will partially immersed in 3.5% NaCl solution as a substitute for sea water. There are 5 types of concrete that used in this research, there are plain concrete (NC), concrete with 15% fly ash (FA), concrete with 5% silica fume (SF), concrete with 10% fly ash and 5% silica fume mixed (SF+FA), and ECC.

The result showed ECC to be the material that has the best durability, due to sorptivity and diffusion coefficient. ECC has 46% smaller corrosion rate compared with NC, while FA, SF, and SF+FA has 14%, 6%, and 9% smaller corrosion rate compared with NC. ECC reduces concrete sorptivity by 60% compared with NC's sorptivity, while FA, SF and SF+FA respectively reduce concrete sorptivity by 21%, 20% and 20.5% compared with NC. ECC has 3.5% smaller diffusion coefficient compared with NC, while FA, SF, and SF+FA has 3%, 2.8%, and 2.9% smaller diffusion coefficient compared with NC.

**Keywords** : Concrete, Durability, Corrosion Rate, ECC, Engineered Cementitious Material, Supplementary Material, Fly Ash, Crack



***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis limpahkan kepada Tuhan Yesus dan Bunda Maria, atas segala berkat dan tuntunanNya, tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih saya ucapkan kepada:

1. Bapa Yan Ghewa, Mama Maria Regina Tan, K Guan, K Rita, Cian, Santi, Deli, yang mendukung penulis secara materil dan moril.
2. Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D., dan Dr. Ir. Djoko Irawan, MS., sebagai pembimbing yang mendukung penulis secara materil dan ilmu yang mereka miliki, sehingga kekurangan penulis dan tesis ini dapat disempurnakan.
3. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA, dan Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D., sebagai penguji yang memberikan penulis masukkan-masukkan teknis dan informatif sehingga tesis ini dapat ditulis dengan alur yang baik.
4. Dr. Asdam Tambusay, ST., Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, ST., MT., dan Indra Komara, ST., MT., yang selalu meluangkan waktu untuk berbagi pikiran dan membimbing dalam pelaksanaan teknis.
5. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Sipil ITS bidang Struktur angkatan 2017.
6. PT Merak Jaya Beton, Varia Usaha Beton, dan Wika Beton yang memberikan sumbangsih berupa material dan tenaga dalam pelaksanaan penelitian.
7. Semua pihak baik perseorangan maupun perusahaan yang terlibat dalam penelitian ini dan tidak dapat saya sebutkan namanya satu per satu.

Sebagai penulis, saya berharap tesis yang dikerjakan ini akan memberikan sumbangsih yang baik dalam dunia pendidikan dan praktis, terutama dalam inovasi material pembangunan untuk kualitas pembangunan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan selamat membaca dan semoga bermanfaat. Tuhan memberkati.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

***”Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Durabilitas Beton Bertulang.....	7
2.2 Korosi Beton Bertulang.....	7
2.3 Mekanisme Perendaman Beton.....	8
2.4 Retak Akibat Korosi.....	9
2.5 Susut Pada Beton.....	10
2.6 <i>Engineered Cementitious Composite</i> .....	10
2.7 Fiber ( <i>Polivynil Alcohol</i> ).....	10
2.8 Percepatan Korosi.....	11
2.9 Penelitian Sejenis.....	12

<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>13</b>
3.1 Umum.....	13
3.2 Rancangan Penelitian.....	14
3.3 Tahapan Penelitian.....	14
3.3.1 Persiapan Material.....	14
3.3.2 Pengujian Material.....	14
3.3.3 <i>Mix Design</i> .....	16
3.4 Penentuan Kebutuhan Benda Uji.....	19
3.5 Pembuatan Benda Uji.....	19
3.6 Teknik <i>Curing</i> .....	20
3.7 Metode Pengujian Benda Uji.....	20
<b>BAB 4 HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>27</b>
4.1 Umum.....	27
4.2 Analisa Material.....	27
4.2.1 Agregat .....	27
4.2.2 <i>Fly Ash</i> .....	28
4.2.3 <i>Silica Fume</i> .....	28
4.2.4 Semen.....	28
4.2.5 Hasil Analisa Tarik Tulangan.....	28
4.2.6 Hasil Trial Uji Tarik ECC.....	29
4.3 Hasil Kuat Tekan.....	31
4.4 Hasil Absorpsi.....	32
4.5 Pengujian Susut.....	34
4.6 Hasil <i>Rapid Chloride Penetration Test</i> .....	36
4.7 Perhitungan Koefisien Difusi.....	38

4.8 Hasil Pengujian Percepatan Korosi Ditinjau Dari Lebar Retak .....	39
4.9 Ketebalan Karat Pada Permukaan Tulangan .....	42
4.10 Analisa Kehilangan Massa Tulangan.....	45
4.11 <i>Corrosion Rate</i> .....	47
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>51</b>
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>53</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>59</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>61</b>

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Diagram Prosentasi Kerusakan Beton Akibat Proses Fisik dan Kimiawi (Basheer, P. A. M, 1996).....	2
<b>Gambar 2.1.</b> Mekanisme korosi pada tulangan dalam beton (Claisse, 2008) .....	8
<b>Gambar 2.2.</b> Retak pada beton akibat induksi korosi pada baja tulangan (Zhao et al., 2012).....	9
<b>Gambar 2.3.</b> Ikatan Kimia Polivinil Alkohol (Ar,Irfan, 2015).....	11
<b>Gambar 2.4.</b> Polivinil Alkohol Yang Dipakai Dalam Penelitian .....	11
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir Penelitian .....	13
<b>Gambar 3.2.</b> Ukuran Benda Uji <i>Dogbone</i> .....	18
<b>Gambar 3.3.</b> <i>Mixing</i> dan Sampel uji .....	19
<b>Gambar 3.4.</b> Teknik <i>Curing</i> .....	20
<b>Gambar 3.5.</b> Skema Pengujian Tarik ECC ... ..	21
<b>Gambar 3.6.</b> Skema Pengujian Percepatan Korosi .....	22
<b>Gambar 3.7.</b> Skema Pengujian RCPT .....	23
<b>Gambar 3.8.</b> Skema Pengujian Susut Kering .....	25
<b>Gambar 3.9</b> Letak Sudut Pengukuran Tebal Karat .....	25
<b>Gambar 4.1.</b> Grafik Hubungan Tegangan Regangan Pengujian Tulangan .....	29
<b>Gambar 4.2.</b> Hasil Uji Tarik ECC .....	30
<b>Gambar 4.3.</b> Hasil Absorpsi.....	33



<b>Gambar 4.4.</b> Nilai <i>Sorptivity</i> Beton .....	33
<b>Gambar 4.5.</b> Perubahan Susut Beton Terhadap Waktu .....	35
<b>Gambar 4.6.</b> Hubungan Lebar Retak dan Waktu .....	40
<b>Gambar 4.7.</b> Produk Korosi yang Mengisi Celah Retak .....	42
<b>Gambar 4.8.</b> Pengukuran Ketebalan Karat .....	42
<b>Gambar 4.9.</b> Plotting Sudut Ukur Ketebalan Karat .....	43
<b>Gambar 4.10.</b> Distribusi Tebal Produk Korosi .....	44
<b>Gambar 4.11.</b> Hubungan Kehilangan Massa dan Waktu .....	46

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1.</b> <i>Mix Design</i> Beton dengan <i>Supplementary Material</i> .....	17
<b>Tabel 3.2.</b> Tabel <i>Mix Design Engineered Cementitious Composite</i> .....	18
<b>Tabel 3.3.</b> Matriks Kebutuhan Benda Uji .....	19
<b>Tabel 3.4.</b> Konstanta <i>Corrosion Rate</i> Berdasarkan Unit (ASTM G1-99).....	22
<b>Tabel 4.1.</b> Hasil Uji Tarik Tulangan .....	28
<b>Tabel 4.2.</b> Hasil Trial ECC.....	30
<b>Tabel 4.3.</b> Hasil Kuat Tekan .....	31
<b>Tabel 4.4.</b> Kriteria Hasil Uji RCPT (ASTM C1202).....	37
<b>Tabel 4.5.</b> Hasil Uji <i>Rapid Chloride Penetration Test</i> .....	37
<b>Tabel 4.6.</b> Rekap Perhitungan Koefisien Difusi .....	36
<b>Tabel 4.7.</b> <i>Corrosion Rate</i> per Sampel .....	50

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Beton sebagai material bangunan memiliki sifat dasar yang kuat terhadap gaya tekan dan lemah terhadap gaya tarik. Karena lemah terhadap gaya tarik, maka digunakanlah tulangan baja pada beton untuk mengatasi kelemahan tersebut. Penggunaan beton bertulang sebagai bahan bangunan sudah sangat banyak digunakan di zaman ini, salah satunya adalah sebagai bahan bangunan bagi bangunan di lingkungan laut.

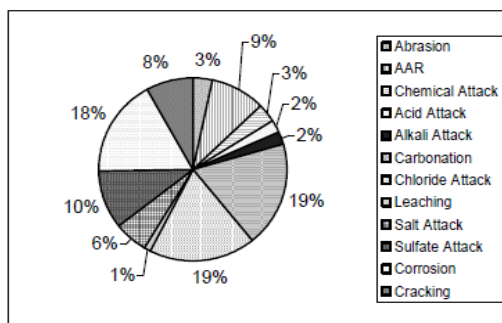
Bangunan yang berada di daerah pantai dan laut memiliki peluang besar terkena korosi, karena komposisi air laut yang terdiri dari zat-zat agresif seperti Klorida (Iqbal, 2009). Klorida yang terlarut dalam air laut dapat masuk ke dalam badan beton bertulang melalui pori-pori pada badan beton. Ketika bereaksi dengan lapisan pasif pada baja tulangan di dalam badan beton, terjadilah proses oksidasi yang menyebabkan terjadinya korosi pada baja tulangan tersebut.

Korosi tulangan adalah salah satu penyebab utama kerusakan dini pada struktur beton bertulang. (Zhao et al., 2012) . Proses korosi disebabkan oleh dua factor. Perubahan pH dan depasivasi. Ion klorida dikenal memiliki efek perusak terhadap baja karbon. Kebanyakan ion tersebut memiliki kemampuan untuk terserap di permukaan logam dan berinterferensi membentuk lapisan pasif. Pitting merupakan jenis serangan utama yang terjadi akibat ion klorida. Area kecil dimana ion Cl- terserap di permukaan logam merupakan daerah anodik menuju lapisan oksida pasif katodik yang luas. Ketika proses mulai, reaksi hidrolisis ion logam dari reaksi anodik menyebabkan penurunan pH, yang mana menghambat perbaikan lapisan film dan mempercepat serangan. Baja karbon akan terkorosi di dalam air yang mengandung klorida. Pada proses depasivasi, adanya reaksi antara baja tulangan dan ion hidroksida (OH) yang berasal dari reaksi oksigen dan air.

Hal ini dapat terjadi karena rusaknya lapisan pasif dari tulangan, yang dikenal dengan istilah depassivation, yang disebabkan oleh adanya infiltrasi ion klorida (Cl-) ke dalam beton (Zhao et al., 2013).

Seiring berjalannya waktu, volume produksi korosi yang dihasilkan setelah proses depassivation lebih besar dari logam asli (tulangan). Hal tersebut menyebabkan produk korosi akan menekan permukaan beton sekitarnya serta menghasilkan tegangan yang cukup besar pada cover beton (Zhao et al., 2011; Zhao et al., 2013; Zhao et al., 2011). Tegangan yang ditimbulkan akan mendesak permukaan beton sehingga muncul retakan pada permukaan beton tersebut. Retakan yang ditimbulkan mengakibatkan celah untuk zat agresif lain masuk ke dalam badan beton semakin besar, sehingga resiko kerusakan pada struktur beton bertulang semakin besar.

Studi mengenai keretakan beton bertulang akibat adanya korosi telah menjadi bahan penelitian selama beberapa tahun terakhir. Hal ini dikarenakan korosi telah menyebabkan banyak kerusakan terutama untuk bangunan yang berada di daerah pantai dan laut. Basheer (1996) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa dari hasil review-nya pada sebanyak lebih dari 400 dokumen tentang kerusakan beton maka terindikasikan kerusakan tersebut diakibatkan oleh mekanisme fisik dan kimiawi. Dan hal ini dapat dikategorikan seperti dalam diagram pada Gambar 1.



**Gambar 1**-Diagram Prosentasi Kerusakan Beton Akibat Proses Fisik dan Kimiawi (Basheer, P. A. M, 1996)

Kerusakan struktur bangunan, dalam hal ini struktur beton bertulang, akibat proses kimiawi berdasarkan data hasil review Basheer (1996) sekitar 77% dari data kerusakan struktur beton, dan klorida menyumbang persentase yang cukup besar (18%) sebagai salah satu penyebab kerusakan beton bertulang.

Beberapa metode eksperimental telah dikemukakan oleh beberapa peneliti untuk mengamati proses terjadinya korosi. Selama ini, eksperimental yang dilakukan sebagian besar menggunakan metode Galvanostatik (Cao And Cheung, 2014; Liu, 1998; Wilson, 2013). Metode ini dilakukan dengan merendam beton pada larutan NaCl dengan konsentrasi tertentu, kemudian dialiri arus listrik sehingga terjadi korosi dan retak. Meskipun metode tersebut dapat mensimulasikan korosi, akan tetapi itu hanya terbatas pada proses korosi yang terjadi pada beton dengan kondisi basah. Metode ini tidak dapat mensimulasikan proses korosi pada beton yang berada di daerah percikan (*Splash Zone*).

Struktur beton yang diletakkan di pesisir pantai maupun daerah percikan (*splash zone*) mengalami siklus basah dan kering, sehingga memiliki potensi korosi lebih besar dibandingkan dengan beton yang terendam. Beberapa studi yang telah dilakukan terkait dengan pengaruh dari siklus basah dan kering (*wetting and dry circle*) terhadap *corrosion rate* dan penetrasi klorida. M.Moukwa (1990) menyatakan bahwa *wetting and dry circle* menyebabkan penetrasi ion agresif yang lebih dalam dibandingkan dengan kondisi basah atau kering secara terpisah.

Banyak cara telah dilakukan untuk mencegah maupun mengatasi permasalahan kerusakan beton akibat adanya korosi dalam berbagai kondisi layan struktur. Pada kondisi awal, beton dapat didesain memperlambat kecepatan penetrasi klorida, yaitu dengan cara mendesain beton dengan kerapatan yang baik, meningkatkan tebal cover beton dan melapisi tulangan dengan epoxy (Sutrisno, 2017).

Penggunaan bahan-bahan konvensional dalam pembuatan beton bertulang dirasa belum cukup untuk membuat beton memiliki daya tahan yang maksimum terhadap korosi meskipun telah mempertebal cover dan melapisi permukaan beton

dengan epoxy, apalagi jika beton digunakan di wilayah yang memiliki kadar klorida tinggi. Hal ini dapat terjadi karena semen sebagai bahan terpenting pada beton merupakan material yang terdiri atas bahan-bahan kimia yang memungkinkan untuk bereaksi dengan bahan-bahan kimia di sekitarnya. Oleh karena itu, penelitian ini mengambil judul “Investigasi Efek Penggunaan *Engineered Cementitious Composite* dan *Supplementary material* Pada Beton Terhadap *Durability properties* dan *Time To Corrosion Induced Crack*”, untuk mencari tahu seberapa efektif efek penggunaan ECC dan penambahan material lain terhadap daya tahan beton, apakah akan semakin meningkatkan daya tahan beton terhadap karat akibat induksi korosi atau malah sebaliknya.

Penelitian ini meliputi kegiatan eksperimental. Kegiatan eksperimental menggunakan metode *accelerated corrosion*. Metode ini dipilih untuk mendapatkan data keretakan pada beton, laju korosi dan *chloride profile* pada beton.

## 1.2. Perumusan Masalah

Proses perbaikan dan perawatan struktur beton akibat korosi merupakan proses yang relative sulit dan mahal untuk dilakukan (Sutrisno, 2017). Oleh karena itu, diperlukan suatu inovasi pada material beton sehingga beton memiliki daya tahan yang baik terhadap korosi akibat penetrasi klorida. Permasalahan utama yang dibahas dalam pada penelitian ini adalah bagaimana efek penggunaan ECC dan *supplementary material* pada beton ditinjau dari ketahanan beton terhadap laju korosi akibat penetrasi klorida. Berdasarkan rumusan tersebut, maka detail permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa kecepatan *corrosion induced crack* pada pada beton normal, beton dengan *supplementary material* berupa *fly ash* dan *silica fume*, dan pada ECC?
2. Bagaimana hubungan *Durability properties* pada beton normal, beton dengan *supplementary material*, dan ECC?

### 1.3. Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui perbedaan kecepatan *corrosion induced crack* pada beton normal, beton dengan *supplementary material* dan ECC.
2. Untuk mengetahui *durability properties* pada beton normal, beton dengan *supplementary material* berupa *fly ash* dan *silica fume*, dan ECC, yang dalam penelitian ini diambil dari nilai sorptivitas dan difusi klorida beton.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian thesis ini adalah sebagai berikut.

1. *Mix Design* ECC dan hasil uji dengan durabilitas terbaik yang ditinjau dari nilai sortivitas, dapat dijadikan referensi dalam bidang konstruksi untuk membuat perencanaan struktur yang terletak di wilayah pantai dan sekitarnya.
2. Bahan referensi bagi para peneliti ke depan untuk pengembangan inovasi material beton yang tahan terhadap penetrasi korosi.

### 1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Semen yang digunakan adalah *Ordinary Portland Cement*
2. *Supplementary material* yang digunakan adalah *fly ash* sebanyak 15% dan *silica fume* sebanyak 5% yang bertindak sebagai bahan pengganti semen dalam konsentrasi tertentu.
3. Beton yang digunakan adalah beton normal, ECC dan beton dengan *Supplementary material* dengan kuat tekan rencana 45 MPa pada umur 28 hari
4. Penelitian menggunakan larutan klorida sebesar 3.5%



5. Agregat kasar dan halus merupakan agregat lokal
6. Penelitian dilakukan pada skala laboratorium saja
7. HRWR menggunakan Tamcem 60RA untuk ECC dan Consol SS-88 untuk beton
8. Pengujian percepatan korosi dengan metode galvanostatik
9. *Durability properties* yang diuji pada penelitian ini adalah absorpsi, sorptivitas dan difusi klorida.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Durabilitas Beton Bertulang**

*Durability* atau durabilitas (ketahanan) pada beton bertulang adalah kemampuan suatu material dalam menahan proses perusakan dari lingkungan sehingga beton dapat mempertahankan kemampuan, bentuk asal, kualitas dan unsur layan (Sutrisno, 2017). Pada struktur beton bertulang, durabilitas lebih ditekankan pada kemampuan struktur untuk menahan terjadinya pelapukan, serangan bahan-bahan kimia, abrasi, maupun proses-proses lain yang dapat merusak struktur tersebut dengan mempertahankan sifat-sifat dan kemampuannya.

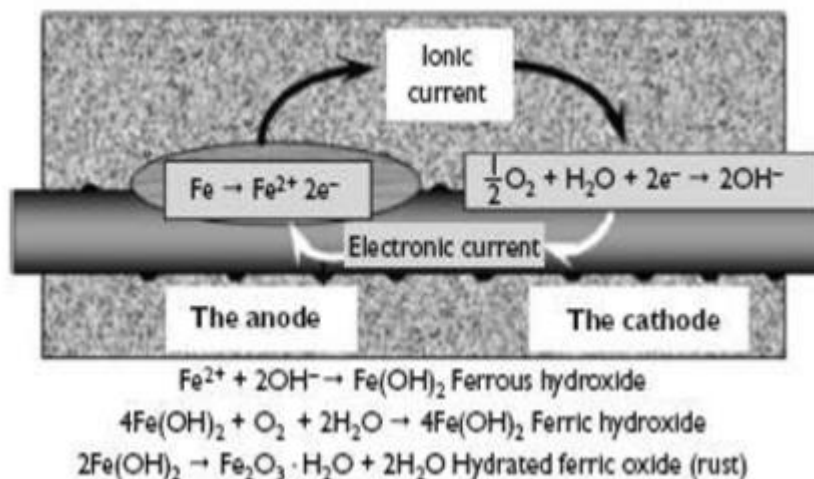
Durabilitas pada beton sendiri terdiri dari porositas, sorptivitas (tingkat penyerapan), permeabilitas (kemampuan untuk meloloskan fluida), dan susut. (Dimitriou, Savva, And Petrou, 2018)

Karena berhubungan dengan kemampuan meloloskan fluida, dalam penelitian ini, akan digunakan pengujian absorpsi dan difusi klorida sebagai indikator yang akan menunjukkan bagaimana durabilitas dari beton yang digunakan.

#### **2.2. Korosi Beton Bertulang**

Claisse (2008) menjelaskan mekanisme korosi pada tulangan dalam beton pada permukaan baja dimana lapisan pasifnya hilang akan menjadi anoda dari reaksi korosi baja tulangan. Elektron yang dilepaskan dari reaksi anoda ini, menyebabkan gas O<sub>2</sub> dan air di atas permukaan baja, yang masih tertutup oleh lapisan pasif, bereaksi, bagian baja ini menjadi katoda. Kedua ion yang terbentuk pada anoda dan katoda bergabung membentuk senyawa hasil korosi. Fe(OH)<sub>2</sub> sebagai bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang

mengalami korosi. Jika konsentrasi O<sub>2</sub> tinggi, maka akan terbentuk Fe(OH)<sub>3</sub>. Skema proses terjadinya korosi dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1-** Mekanisme korosi pada tulangan dalam beton (Claisse, 2008)

Laju korosi dapat didefinisikan sebagai besarnya kehilangan berat bahan persatuan waktu. Laju korosi dapat juga didefinisikan sebagai besarnya kehilangan elektrokimia, yaitu laju korosi pada waktu pengukuran. Laju korosi saat pengukuran didefinisikan sebagai besarnya kehilangan berat bahan persatuan waktu, satuan laju korosi yang digunakan adalah mils per years (mpy), millimeter per years (mmpy) dan micrometer per years ( $\mu$ mpy), maka laju korosi dapat dinyatakan sebagai laju penetrasi atau kehilangan ketebalan per satuan waktu (Claisse, 2008).

### 2.3. Mekanisme Perendaman Beton Pada Larutan NaCl dan Hubungannya Dengan Korosi Beton Bertulang

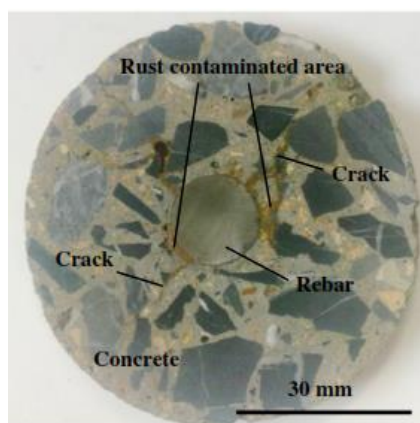
Struktur beton bertulang yang terletak pada daerah dekat dengan laut terbagi atas dua kondisi *exposure*, yaitu *direct* dan *indirect*. Beton yang berada pada kondisi *direct exposure* meliputi struktur-struktur yang tenggelam penuh maupun sebagian di laut. Sedangkan kategori *indirect exposure* lebih mengacu pada beton yang terletak di pesisir pantai atau di daerah percikan (*Splash Zone*).

Struktur beton yang tenggelam secara penuh mengakibatkan penetrasi air laut dan zat agresif yang terkandung di dalamnya menjadi mudah masuk ke dalam

badan beton. Pada daerah ini, mekanisme beton yang terendam penuh berdampak pada kecepatan masuknya ion klorida secara terus menerus pada beton. Karena terjadi infiltrasi klorida, maka akan terjadi reaksi antara ion klorida dan ion hidroksida yang ada pada baja tulangan, sehingga menyebabkan terjadinya korosi pada baja tulangan di dalam beton. Simulasi perendaman seperti inilah yang akan menjadi skema pengujian percepatan korosi dalam penelitian ini.

#### 2.4. Retak Akibat Korosi

Keretakan yang diinduksi korosi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur beton bertulang (Zhao et al, 2011). Ketika korosi terjadi pada baja tulangan di dalam beton, volume dari baja akan meningkat sekitar 2 sampai 6 kali volume baja awal (Suda, Misra dan Motohashi, 1993; Zhao et al, 2011) , yang menghasilkan tekanan dalam beton, yang akhirnya mengakibatkan retak pada selimut beton (Gambar 2.2). Setelah retakan mencapai selimut beton, zat-zat agresif yang berada di udara akan lebih cepat masuk ke dalam beton, yang akan menyebabkan kerusakan agresif pada baja tulangan (Xia, 2014). Oleh karena itu, investigasi keretakan yang diinduksi korosi sangat penting untuk memprediksi umur layan dan durabilitas dari beton bertulang.



**Gambar 2.2-**Retak pada beton akibat induksi korosi pada baja tulangan (Zhao et al., 2012)

## **2.5. Susut Pada Beton (*Dry Shrinkage*)**

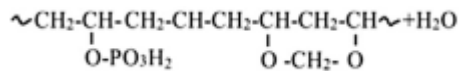
Elemen struktur secara umum rentan terhadap pengeringan susut di daerah-daerah dengan kondisi cuaca hangat dan panas. Dalam beton normal dengan rasio air-semen lebih tinggi dari 0,45, susut pada kondisi kering dianggap sebagai alasan paling signifikan terjadinya retak dini (Yousefieh, 2017). Susut kering dimulai setelah perawatan beton, tergantung pada sifat beton (desain campuran, penempatan beton dan metode perawatan) dan kondisi lingkungan (suhu, kelembaban relatif, kecepatan angin).

## **2.6. *Engineered Cementitious Composite***

*Engineered Cementitious Composite (ECC)* merupakan material *self healing* pada beton yang ditemukan oleh Victor Li, dkk dari University of Michigan. *Engineered Cementitious Composite (ECC)* adalah material komposit berbasis semen yang diperkuat dengan serat yang sistematis direkayasa untuk mencapai keuletan tinggi dibawah beban lentur dan geser. Berdasarkan penelitian Li, dengan menggunakan desain material berbasis mikromekanik, daktilitas maksimum lebih dari 3% di bawah pembebanan tarik uniaksial dapat dicapai dengan hanya 2% konten serat berdasarkan volume. *Engineered Cementitious Composite* juga memiliki regangan mencapai 5% ketika diuji menggunakan benda uji yang terbuat dari mortar ECC (Li, 2003)

## **2.7. *Fiber (Polivinil Alcohol)***

Berbeda dari senyawa polimer pada umumnya yang diproduksi melalui reaksi polimerisasi, polivinil alkohol diproduksi secara komersial melalui hidrolisis polivinil asetat dengan alkohol karena monomer dari vinil alkohol tidak dapat dipolimerisasi secara alami menjadi PVA (Wang, 2000). Produk PVA dijumpai sebagai kopolimer dari vinil asetat dan vinil alkohol. Rumus struktur polivinil alkohol dengan kopolimer vinil asetat dijabarkan pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3.** Ikatan Kimia Polivinil Alkohol (Ar, Irfan,2015)

Sifat fisis dari PVA ditentukan oleh kondisi polimerisasi dari poli(vinil asetat), kondisi pada saat hidrolisis, proses pengeringan, dan proses penggilingan. Polivinil alkohol dalam kondisi ruangan berbentuk bubuk putih dengan titik lebur berkisar antara 220<sup>0</sup>C - 267<sup>0</sup>C. Polivinil alkohol larut pada pelarut yang bersifat polar seperti air, dimethyl sulfoxide, acetamide serta dimethylformamide (Ar,Irfan, 2015). Polivinil alkohol digunakan sebagai bahan *admixture* pada beton untuk menambah daya tahan terhadap gaya tarik yang bekerja pada beton, sehingga memiliki daktilitas yang lebih baik daripada beton tanpa polivinil alkohol.



**Gambar 2.4-**Polivinyll Alcohol yang dipakai dalam penelitian

## 2.8 Percepatan Korosi

Percepatan korosi dalam penelitian ini menggunakan metode kombinasi Galvanostatik. Metode ini digunakan oleh Sutrisno pada penelitiannya di tahun 2017 Sutrisno menemukan bahwa percepatan korosi dengan menggunakan metode galvanostatik ini meningkatkan *corrosion rate* pada baja tulangan hampir 100 kali lebih besar dari *corrosion rate* dari tulangan yang terkorosi secara alami. Metode ini dipakai untuk mensimulasikan proses korosi yang terjadi di

lingkungan agresif dengan lebih cepat, karena metode lain seperti *wetting and drying* sendiri memakan waktu sangat lama untuk mendapatkan target hasil *corrosion rate* yang diharapkan. Zhao et al., (2011) dalam penelitiannya berjudul *Non-uniform distribution of rust layer around steel bar in concrete*, membutuhkan waktu dua tahun untuk mendapatkan hasil retakan akibat induksi korosi pada baja tulangan yang mencapai permukaan beton, sedangkan Sutirno (2017) hanya membutuhkan waktu sekitar tujuh hari untuk mendapatkan hasil retakan akibat induksi korosi dengan metode galvanostatik.

## 2.9 Penelitian Sejenis

- Chousidis. N., et al (2016) pada penelitiannya yang berjudul “*Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes*” menggunakan *fly ash* 10% sebagai pengganti semen dan kemudian merendam beton *fly ash* tersebut ke dalam larutan 3.5% NaCl selama 100 hari. Hasilnya, penggunaan *fly ash* mereduksi nilai porositas 4.9% jika dibandingkan dengan beton normal, yang membuat beton tersebut lebih tahan terhadap penetrasi klorida yang dapat mengakibatkan korosi.
- Penelitian oleh Liu, H., et al pada tahun 2017 dengan judul “*Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment*”, menyatakan bahwa ECC mampu mempertahankan durabilitas sampai 420 hari sejak di-*expose* pada larutan yang mengandung Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + NaCl, dengan daktilitas di atas 2%.

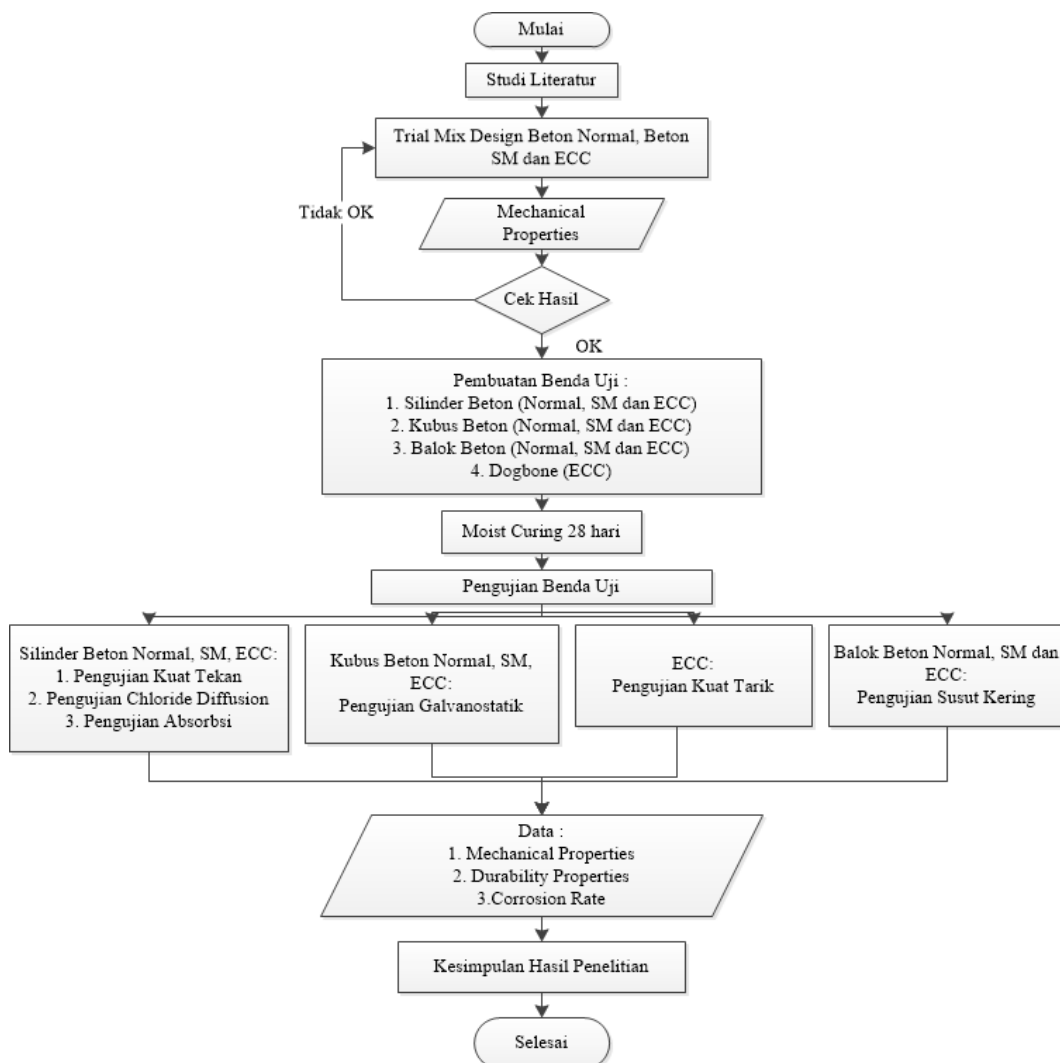
Dalam penelitian ini, akan dibuat beton dengan *supplementary material* dan ECC, yang akan diuji durabilitasnya berupa absorpsi dan difusi klorida, serta akan di-*expose* pada larutan 3.5% NaCl dan kemudian akan dialiri listrik sebagai media percepatan korosi untuk melihat bagaimana pengaruh dari penggunaan *supplementary material* dan ECC terhadap nilai *corrosion rate* yang dihasilkan pada pengujian.

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Umum

Pada bab ini akan dibahas langkah kerja penelitian dan detail pengujian yang akan dikerjakan. Diagram alir penelitian “Investigasi Efek Penggunaan *Engineered Cementitious Composite* dan *Supplementary material* Pada Beton Terhadap *Durability properties* dan *Time To Corrosion Induced Crack*” dapat dilihat pada gambar 3.1



**Gambar 3.1**-Diagram Alir Penelitian



## **3.2. Rancangan Penelitian**

Untuk mengetahui kecepatan penetrasi ion klorida dan durabilitas dari beton normal dan beton ECC, maka dilakukan beberapa pengujian seperti pengujian terhadap material, pengujian terhadap beton dan pengujian terhadap pasta. Pengujian dilakukan dengan berpedoman pada ASTM, SNI, dan Nord Test.

## **3.3 Tahapan Penelitian**

### **3.3.1. Persiapan Material**

Pada tahapan pengujian material ini, dilakukan persiapan dan pengumpulan material yang digunakan dalam pembuatan benda uji beton bertulang. Material yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Semen  
Digunakan semen OPC
- b. Pasir  
Pasir yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir lumajang
- c. Kerikil  
Digunakan batu pecah yang berasal dari Mojokerto
- d. Tulangan  
digunakan tulangan ulir dengan diameter 13 mm

### **3.3.2. Pengujian Material**

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kelayakan material sebelum digunakan sebagai campuran beton. Pengujian material meliputi:

- a. Pengujian Pasir  
Material yang digunakan sebagai agregat halus adalah pasir Lumajang. Selanjutnya, dilakukan analisa agregat halus di Laboratorium Beton

dan Bahan Bangunan Teknik Sipil ITS untuk mengetahui karakteristik dari material tersebut. Jenis pengujian yang dilakukan adalah:

- Pengujian Berat Jenis Pasir (ASTM C 128-93)
- Pengujian Kadar Air (ASTM C556-97/SNI 1971 : 2011)
- Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara (ASTM C29/29M-97)
- Pengujian Air Resapan Pasir (ASTM C 128-01)
- Pengujian Kebersihan Pasir terhadap lumpur (ASTM C117)
- Pengujian Kadar Organik (ASTM C40/C40M-11)
- Pengujian Jumlah Bahan Dalam Agregat Yang lolos Saringan No 200 (ASTM C117)

b. Pengujian Kerikil

Kerikil yang digunakan berasal dari Mojokerto. Pengujian kerikil sebagai agregat kasar ini dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Teknik Sipil ITS untuk mengetahui karakteristik dari material tersebut. Jenis pengujian yang dilakukan adalah :

- Pengujian Berat Jenis Kerikil (ASTM 127-88)
- Pengujian Kelembaban Kerikil (ASTM C556-89)
- Pengujian Air Resapan Kerikil (ASTM C 127-01)
- Pengujian Kadar Lumpur kerikil (ASTM C142)
- Percobaan Berat Volume Kerikil (ASTM C 29 / C 29 M – 91<sup>a</sup>)

c. Pengujian Semen

Semen yang digunakan adalah Ordinary Portland Cement (OPC) produksi PT. Semen Gresik. Pengujian Semen dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Teknik Sipil ITS, dengan metode pengujian sebagai berikut:

- Pengujian Konsistensi Normal Semen (ASTM C187-16)
- Pengujian Waktu Ikat Awal Semen dengan menggunakan alat Vicat (ASTM 191-13)
- Pengujian Berat Jenis Semen (ASTM 188-89)

d. Pengujian Tulangan

Pengujian tulangan dilakukan untuk mengetahui kuat leleh dan putus dari tulangan tersebut. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Teknik Sipil ITS

e. Pengujian Material Tambahan

Pengujian Material tambahan berupa *fly ash* dan *silica fume* dilakukan dengan uji XRF di Laboratorium Energi dan Lingkungan, ITS

### 3.3.3. *Mix Design*

Terdapat 2 *Mix Design* dalam penelitian ini sebagai berikut:

*Mix Design* untuk beton dengan *Supplementary material* berpedoman pada DOE dengan target kuat tekan 45 Mpa. Sebelum ditetapkan presentase besarnya *supplementary material*, dilakukan trial untuk mengecek kuat tekan optimum dari beton agar didapatkan presentase *supplementary material* yang tepat. Dari hasil trial, diperoleh kuat tekan optimum benda uji diperoleh dengan penambahan 15% *fly ash* untuk beton dengan *fly ash*, 5% *silica fume* untuk beton dengan *silica fume*, dan 10% *fly ash* + 5% *silica fume* untuk beton campuran *fly ash* dan *silica fume*. *Mix design* yang dipakai dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.1-Mix Design** Beton dengan *Supplementary material*

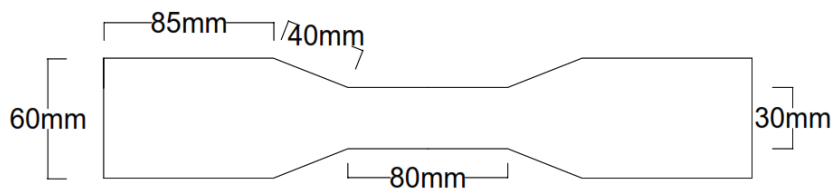
Tipe	COMPONENT	Mix Kg/m <sup>3</sup>	Weight (Kg)
Normal	Cement	580	22.51
	Fine Aggregate	680	26.39
	Coarse Aggregate	1110	43.08
	Water	147	5.71
	Console S-88	800 (ml/100 Kg Binder)	180.09
Dengan <i>Fly ash</i> 15 %	Cement	493	19.13
	FA	87	3.38
	Fine Aggregate	680	26.39
	Coarse Aggregate	1110	43.08
	Water	147	5.71
Dengan <i>silica fume</i> 5%	Cement	551	21.39
	SF	29	1.13
	Fine Aggregate	680	26.39
	Coarse Aggregate	1110	43.08
	Water	147	5.71
Dengan FA 10% +SF 5%	Cement	493	19.13
	SF	29	1.13
	FA	58	2.25
	Fine Aggregate	680	26.39
	Coarse Aggregate	1110	43.08
	Water	147	5.71
	Console S-88	800 (ml/100 Kg Binder)	180.09

*Mix Design Engineered Cementitious Composite Concrete* dilakukan dengan trial pada komposisi campuran sebagai berikut.

**Tabel 3.2-**Tabel *Mix Design Engineered Cementitious Composite*

Material	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5	Trial 6	Trial 7	Trial 8	Trial 9
Cement, C	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fly ash/ Cement	1.6	1.8	2	1.6	1.8	2	1.6	1.8	2
Sand/ Cement	0.84	0.90	0.97	0.84	0.90	0.97	0.84	0.90	0.97
Water/ Binder	0.26	0.28	0.28	0.28	0.3	0.3	0.3	0.26	0.26
Fibre	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
HRWR/C	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

*Mix Design* di atas akan diuji dengan dua pengujian, yaitu kuat tekan pada specimen kubus dengan panjang sisi 5 cm. Perbedaan dari masing-masing mix design trial ini adalah di komposisi *binder* dan *water/cement ratio*. Kuat tarik dilakukan pada sepsimen dogbone (gambar 3.2). Hasil pengujian dengan kuat tekan dan kuat tarik terbaik akan menjadi *Mix Design* tetap pada penelitian ini.



**Gambar 3.2-** Ukuran benda uji *Dog Bone*

### 3.4 Penentuan Kebutuhan Benda Uji

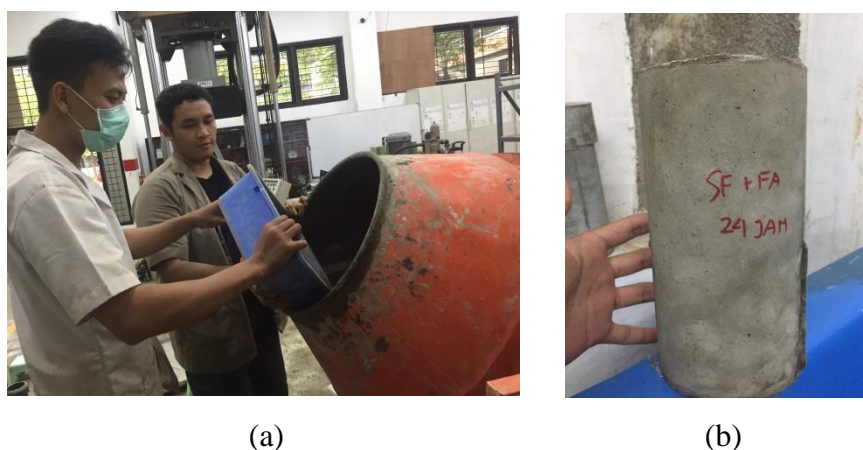
Setelah mendapatkan *Mix Design* dengan hasil kuat tekan dan tarik terbaik dari trial *Mix Design*, kemudian dilakukan penentuan kebutuhan benda uji. Berikut adalah matriks kebutuhan benda uji yang bisa dilihat pada tabel 3.3.

**Tabel 3.3**-Matriks Kebutuhan Benda Uji

Bebutuhan Benda Uji Beton Silinder 10 cm x 20 cm						Total
Pengujian	Normal	FA 15%	SF 5%	FA10%+SF5%	ECC	
Kuat Tekan	6	6	6	6	6	15
Absorbsi	1	1	1	1	1	5
Chloride Diffusion	1	1	1	1	1	5
Kebutuhan Benda Uji Beton Kubus 15cm x 15cm						Total
Accelerated Corrosion	10	10	10	10	10	50
Kebutuhan Benda Uji Balok 7.5 cm x 7.5 cm x 28.5 cm						Total
Dry Shrinkage	2	2	2	2	2	10

### 3.5. Pembuatan Benda Uji

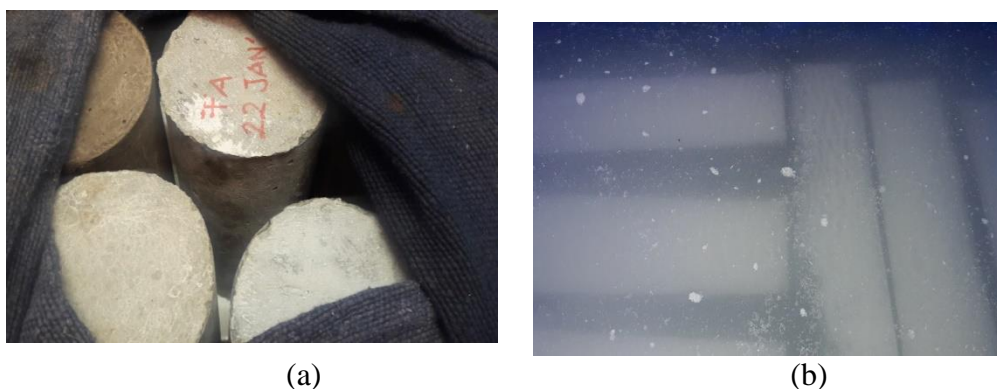
Proses pembuatan benda uji dilaksanakan di laboratorium beton dan bahan bangunan, teknik sipil, FTSLK ITS. Pembuatan benda uji dalam penelitian ini mengacu pada ASTM C39 / C39M – 18 dan SNI 03-2493-2011. Proses pembuatan benda uji dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut ini.



**Gambar 3.3.** (a) Mixing benda uji. (b) Sampel kuat tekan.

### 3.6 Teknik *Curing*

Perawatan (*curing*) benda uji dilakukan dengan dua metode. Untuk benda uji susut kering, *curing* dilakukan dengan merendam benda uji ke dalam larutan kalsium karbonat. Hal ini dilakukan untuk menjaga kelembaban beton agar lebih terjaga kelembabannya. *Curing* untuk benda uji susut kering ini telah sesuai dengan ASTM C 31. Untuk benda uji selain susut kering, dilakukan dengan cara melapisi beton dengan lap kain basah. *Curing* dilakukan selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian. Metode ini dipilih dengan maksud menyesuaikan kondisi sampel seperti ketika berada di lapangan, yang umumnya dicuring dengan kondisi lembab, bukan basah sepenuhnya. Juga dengan *curing* ini, tulangan benda uji untuk percepatan korosi tidak langsung mengalami kontak dengan air. Contoh perlakuan benda uji dengan *mixture curing* dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut.

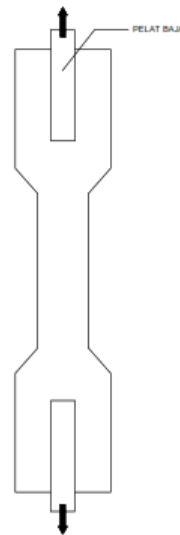


**Gambar 3.4.** (a) *Moisture Curing* pada sampel silinder (b) *Curing* dengan larutan kalsium karbonat

### 3.7 Metode Pengujian Benda Uji

- a. Pengujian Kuat Tekan berdasarkan ASTM C39 M-01  
Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mencari kuat tekan dari beton normal, beton dengan *supplementary material*, dan beton ECC pada umur 28 hari.

- b. Pengujian Tarik berdasarkan ASTM D-638 dan ASTM D 5083-02  
Pengujian kuat tarik dilakukan untuk mencari kuat tarik dari mortar ECC pada umur 28 hari. Rate kuat tekan yang digunakan sebesar 0.5mm/menit.



**Gambar 3.5.** Skema pengujian tarik benda uji ECC

- c. Pengujian *Accelerated Corrosion* :

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan mencari *corrosion rate* dari beton normal, beton dengan *supplementary material*, dan beton ECC. Pengujian dilakukan dengan metode Galvanostatik. Metode ini dipilih dengan maksud untuk melihat seberapa besar penetrasi klorida dari larutan NaCl bisa masuk ke dalam badan beton.

- Galvanostatik (ASTM G192 - 08(2014))

Perhitungan Kerapatan Arus, *Corrosion rate* dan Time to Corrosion Initial dapat dihitung dengan rumus yang digunakan oleh Sutrisno, 2015 dalam penelitiannya yang berjudul *The Experimental Test Of Corrosion Induced Cracking In Reinforced Concrete Using Accelerated Method* sebagai berikut:

$$\text{Corrosion rate} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (3.1)$$



Keterangan:

K : Konstanta yang menunjukkan unit dari *corrosion rate* (ASTM G 1-99) dapat dilihat di tabel 3.4)

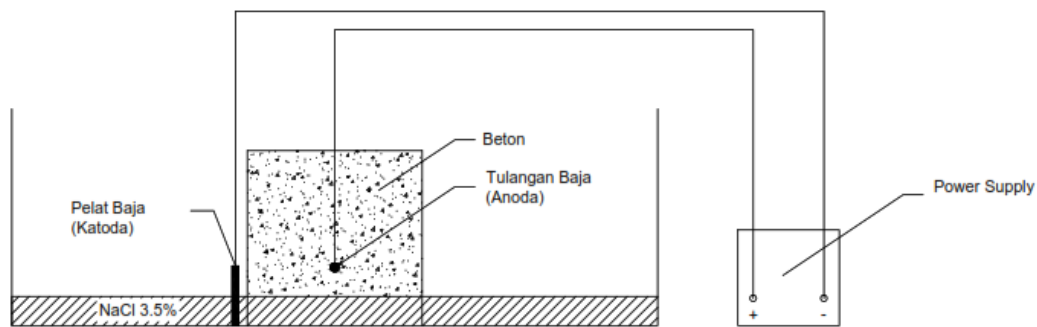
T : Waktu (Jam)

A : Luas Penampang tulangan

W : *Mass Loss* (Gram)

D : Berat Jenis Tulangan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

Skema pengujian dengan metode galvanostatik dapat dilihat pada gambar 3.6



**Gambar 3.6.** Skema Pengujian Percepatan Korosi

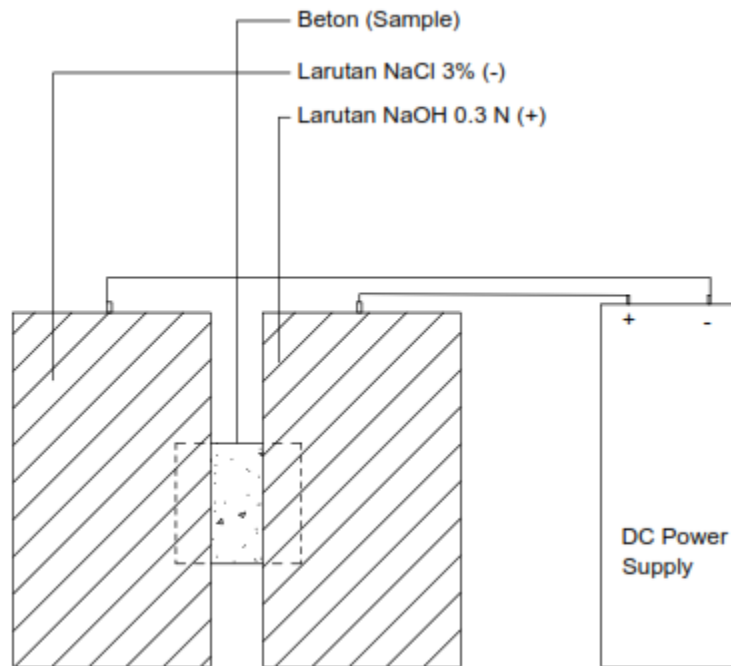
**Tabel 3.4-**Konstanta *Corrosion rate* berdasarkan Unit

<i>Corrosion rate</i> Unit Desired	Constant (K) in <i>Corrosion rate</i> Equation
Mils per year (mpy)	$3.45 \times 10^6$
Inches per year (ipy)	$3.45 \times 10^3$
Inches per month (ipm)	$2.87 \times 10^2$
Millimeters per year (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
Micrometers per year ( $\mu/\text{y}$ )	$8.76 \times 10^7$
Picometers per second (pm/s)	$2.78 \times 10^8$
Grams per square per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ )	$1.00 \times 10^4 \times D$
Milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^4 \times D$
Micrograms per square meter per second ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ )	$2.78 \times 10^4 \times D$

Sumber: ASTM G1-99

d. *Rapid Chloride Penetration Test* (ASTM C1202-12)

Metode pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan penetrasi klorida untuk masuk dari permukaan beton sampai pada permukaan baja tulangan dalam beton.



**Gambar 3.7.** Skema Pengujian *Rapid Chloride Penetration Test*

Koefisien difusi diperoleh dengan mengukur konsentrasi ion klorida pada benda uji setelah dilakukan uji penetrasi dengan menggunakan perumusan sebagai berikut.

$$D = \frac{RTL}{zFU} * \left( \frac{xd - \alpha\sqrt{xd}}{t} \right) \quad (3.2)$$

Dimana:

D = Koefisien Difusi

F = Konstanta Faraday

R = Konstanta Gas

T = Temperatur Absolut

U = Beda Potensial Listrik

L = Tebal benda Uji

xd = Jarak pengukuran kandungan klorida dari permukaan beton

t = Waktu pengukuran

Koefisien  $\alpha$  dapat dicari dengan menggunakan perumusan berikut

$$\alpha = 2 * \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erfc} \left( 1 - \left( \frac{2cd}{c_0} \right) \right) \quad (3.3)$$

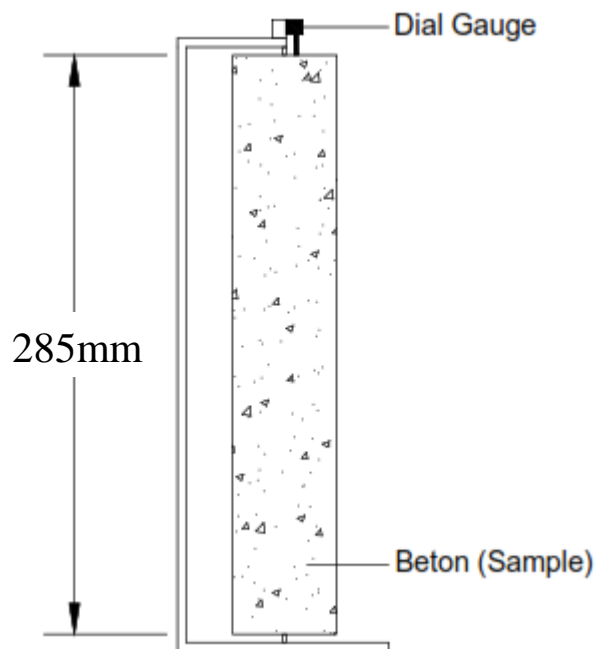
Koefisien  $c_0$  dan  $c_d$  adalah konsentrasi pada permukaan beton dan konsentrasi pada titik  $x_d$ .

e. Pengujian Absorpsi (ASTM C642)

Pengujian Absorpsi merupakan pengujian untuk mengetahui kecepatan masuknya air ke dalam badan beton. Pengujian ini dilakukan dengan membagi satu silinder beton menjadi tiga bagian, kemudian direndam di dalam air dan ditimbang beratnya per sekian waktu yang sudah ditentukan.

f. Pengujian Susut Kering (ASTM C157 dan C596)

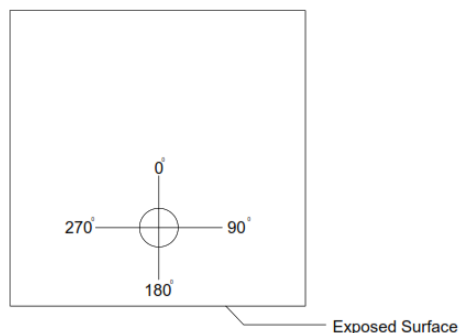
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan pada panjang beton akibat diekspose pada lingkungan kering, sehingga didapatkan *properties* susutnya. *Properties* susut ini bias menjadi acuan untuk mengetahui *mechanical properties* pada beton, khususnya untuk retak awal akibat susut itu sendiri. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 3.8



**Gambar 3.8.** Skema Pengujian Susut Kering

g. Pengukuran tebal korosi

Pengukuran lebar retak pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dimana letak volume karat terbesar berada di badan tulangan. Pengukuran menggunakan mikroskop digital *Dinolite* yang kemudian diplot berdasarkan sudut tulangan seperti gambar 3.9. Setelah sudut pengukuran di-plot, kemudian dilakukan pengukuran tebal karat per sudut  $30^0$  dan kemudian disajikan dalam grafik untuk ditinjau pola persebaran volume karat pada baja tulangan.



**Gambar 3.9.** Letak Sudut Pengukuran Tebal Karat

***”Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB 4**

### **HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Umum**

Bab ini membahas mengenai analisa dari material yang digunakan dalam penelitian serta hasil uji eksperimental dari sample yang sudah ditentukan. Kegiatan analisa dan eksperimental dalam bab ini bertujuan untuk mendapatkan *durability properties* dari beton yang pada tahap selanjutnya akan diuji dengan percepatan korosi. Pengujian *properties* beton ini meliputi pengujian terhadap material yang digunakan sebagai campuran beton seperti semen, pasir, kerikil dan air. Pengujian selanjutnya adalah pengujian *properties* beton yang meliputi pengujian kekuatan tekan, kuat tarik, absorpsi beton dan kecepatan penetrasi klorida tersebut.

#### **4.2. Analisa Material**

##### **4.2.1 Agregat**

Sub bab ini membahas mengenai hasil analisa material. Kualitas material yang digunakan mempengaruhi kualitas beton yang dihasilkan. Material yang dianalisa meliputi semen, pasir, kerikil, *fly ash*, *silica fume* dan tulangan. Berdasarkan pengujian, agregat yang digunakan pada penelitian ini memnuhi persyaratan yang ditetapkan. Hasil dari analisa material berupa *mechanical properties* dari semen, agregat halus dan agregat kasar dapat dilihat pada lampiran tabel 1.

#### 4.2.2 Fly ash

*Fly ash* yang digunakan berasal dari pabrik PT Varia Usaha Beton. Kelas *fly ash* yang digunakan merupakan kelas F. Hasil analisa kandungan *fly ash* dapat dilihat pada lampiran tabel 2.

#### 4.2.3 silica fume

*silica fume* merupakan salah satu material tambahan yang berfungsi meningkatkan performa beton. Hasil uji kandungan *silica fume* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada lampiran tabel 3.

#### 4.2.4 Semen

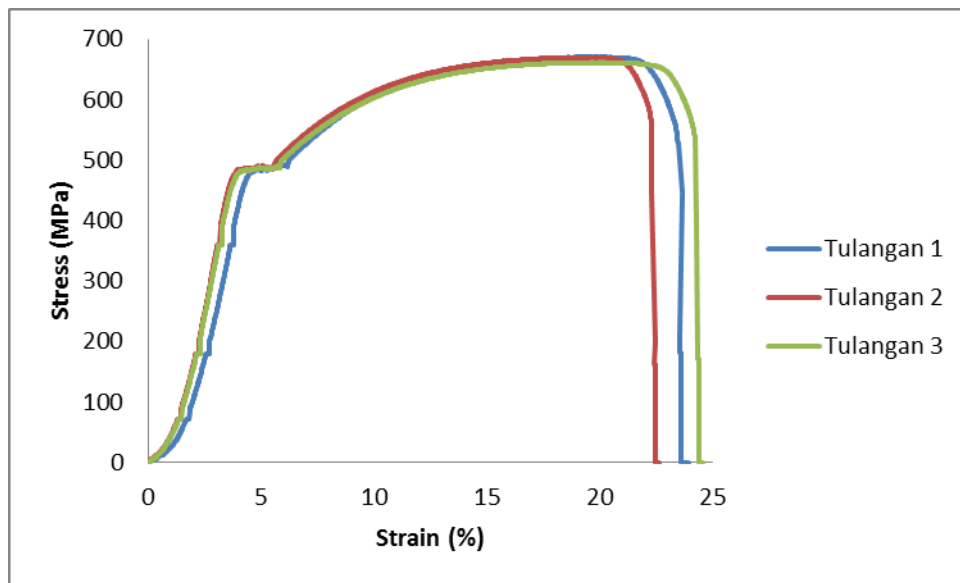
Semen yang digunakan pada penelitian ini merupakan semen OPC. Hasil analisa kandungan senyawa dalam semen OPC dapat dilihat pada lampiran tabel 4.

#### 4.2.5 Hasil Analisa Tarik Tulangan

Tulangan yang digunakan merupakan tulangan ulir dengan diameter 13mm. Tulangan ini akan digunakan sebagai media percepatan korosi pada beton yang diuji dengan menggunakan metode galvanostatik. Hasil dari uji tarik tulangan dapat dilihat dalam tabel 4.1 dan gambar 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil Uji Tarik Tulangan

Name	Yield Force	Yield Stress	Max Force	Max Stress
Parameter	0.1 %/FS	0.1 %/FS		
Units	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>
D 13 - 1	6353.47	47.8668	8890.65	66.9818
D 13 - 2	6413.06	48.3158	8883.96	66.9314
D 13 - 3	6343.27	47.79	8774.02	66.1031



**Gambar 4.1** Grafik hubungan antara tegangan dan regangan dalam pengujian tarik tulangan

Dari hasil di atas, diketahui rata-rata nilai kuat leleh dari tulangan yang digunakan adalah sebesar 480 MPa dan kuat tarik ultimit dari tulangan tersebut adalah 665 MPa.

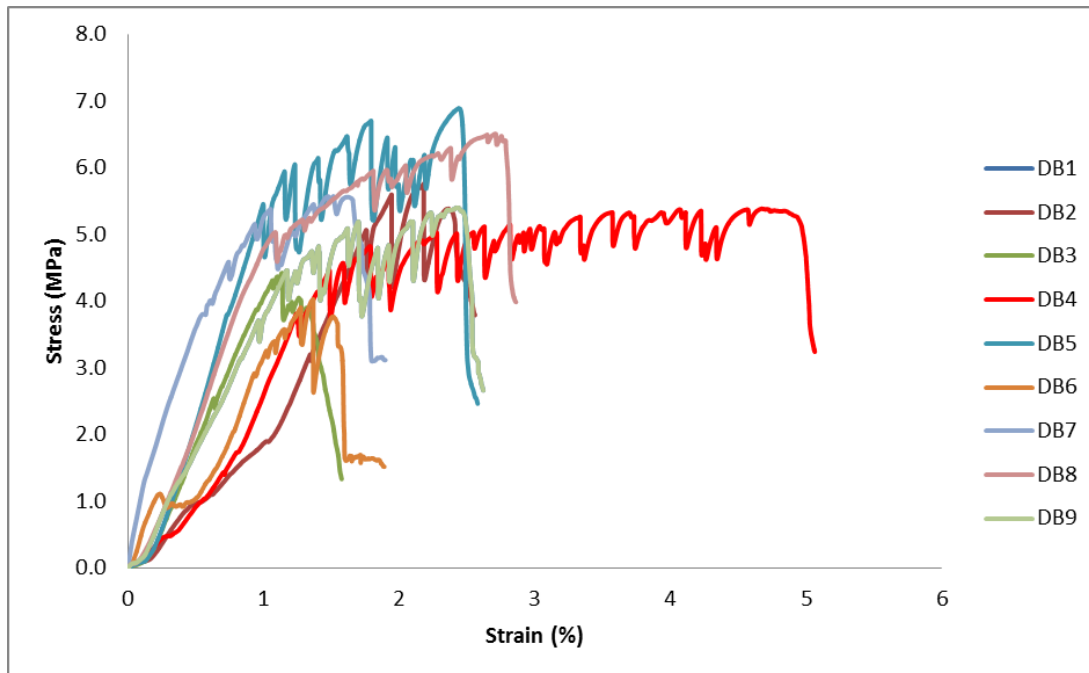
#### 4.2.6 Hasil *Trial* Uji Tarik ECC

Hasil *trial* uji tarik ECC pada penelitian ini dapat dilihat dalam tabel 4.2, yang ditinjau dari regangan yang dihasilkan. Grafik hubungan *stress* dan *strain* untuk masing-masing komposisi terbaik dapat dilihat pada gambar 4.2



**Tabel 4.2.** Hasil Trial ECC

Mix Type	Compressive Test		Tensile Test		$\epsilon$ (%)
	Max Force (N)	Fc (MPa)	Max Force (N)	Max Displacement (mm)	
1	368000	46.9	1200	5.36	3
2	387000	49.3	1380	4.34	2.54
3	404000	51.5	1090	2.75	1.57
4	354000	45.1	1280	8.85	5.1
5	385000	49.0	1590	4.34	2.54
6	378000	48.2	1010	3.41	1.9
7	372000	47.4	1310	3.35	1.87
8	368000	46.9	1490	4.98	2.83
9	386000	49.2	1240	4.58	2.66



**Gambar 4.2.** Hasil Uji tarik ECC

Pada tabel 4.2, dapat dilihat bahwa mix type 4 memiliki hasil regangan terbaik di antara mix type lainnya, yang kemudian dipilih sebagai mix design ECC dalam penelitian ini. Pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa ECC dapat

mencapai 5% regangan sebelum akhirnya putus. Ini menunjukkan bahwa ECC memiliki nilai regangan yang lebih besar daripada beton.

### 4.3 Hasil kuat tekan

Setelah mendapatkan analisa material penyusun beton yang akan dibuat, maka dilakukan pengecoran dan proses curing. Setelah itu dilaksanakan kuat tekan untuk mengetahui apakah *mix design* yang ditetapkan memenuhi syarat batasan masalah dalam penelitian ini. Kuat tekan dilakukan pada beton silinder dengan tinggi 20 cm dan diameter 10 cm, dengan masing-masing jenis beton berjumlah enam (6) buah. Tiga (3) diuji saat berumur 14 hari dan 3 diuji saat berumur 28 hari. Hasil dari kuat tekan dapat dilihat pada tabel 4.3.

**Tabel 4.3.** Hasil Kuat Tekan

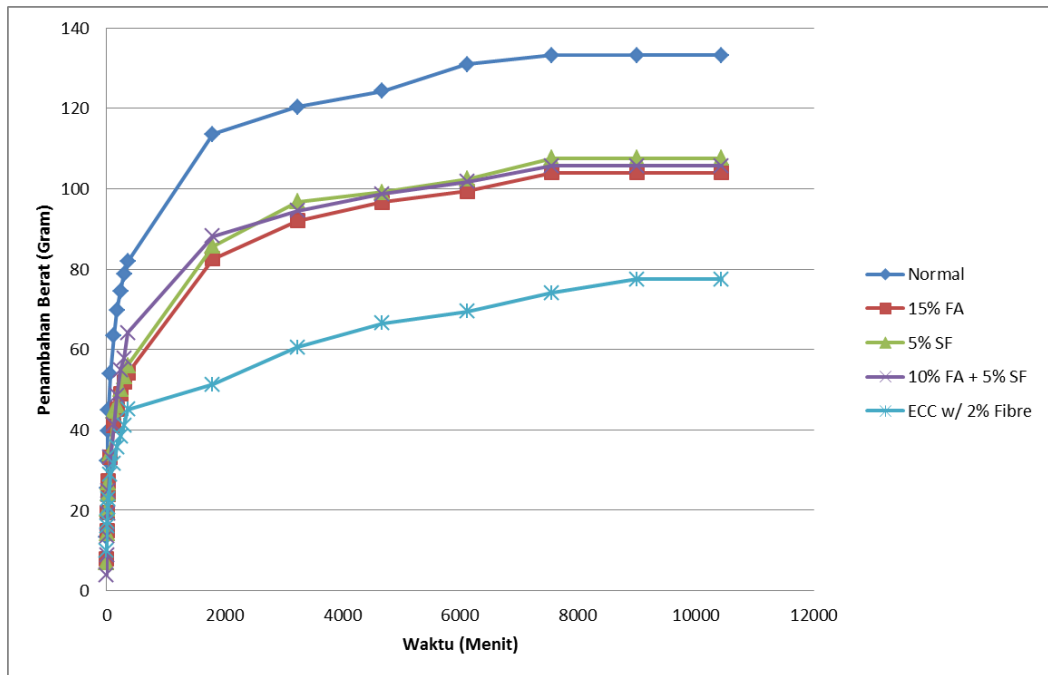
Umur	Jenis Beton	Gaya Tekan (kgf)	Fc' (Mpa)	Berat (gram)	Ukuran (diameter x tinggi) (cm)
28	Normal	36400	46.37	3634	10 x 20
28	FA 15%	41700	53.12	3668	10 x 20
28	SF 5%	41200	52.48	3514	10 x 20
28	SF5%+FA10%	41400	52.74	3495	10 x 20
28	ECC	35400	45.10	397	5 x 10

Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa kuat tekan yang diperoleh memenuhi batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu 45 MPa pada umur 28 hari. Seperti yang dapat dilihat pada tabel 4.3, penggunaan *supplementary material* meningkatkan kuat tekan beton. *Fly ash* dan *silica fume* sebagai material tambahan juga memberikan kontribusi yang baik untuk menahan penetrasi air ke dalam beton. Kuat tekan yang tinggi dari penambahan *supplementary material* ini disebabkan kehalusan material dan sifat pozzolan dari *supplementary material* itu sendiri. Reaksi silica reaktif dan kalsium hidroksida dalam *fly ash* dan *silica fume* yang terhidrasi oleh semen menghasilkan tambahan kalsium silikat (C-S-H) yang memberikan kekuatan tambahan (Chen, 2013; Hatungimana, 2019). Dari hasil kuat tekan juga dapat terlihat bahwa ECC

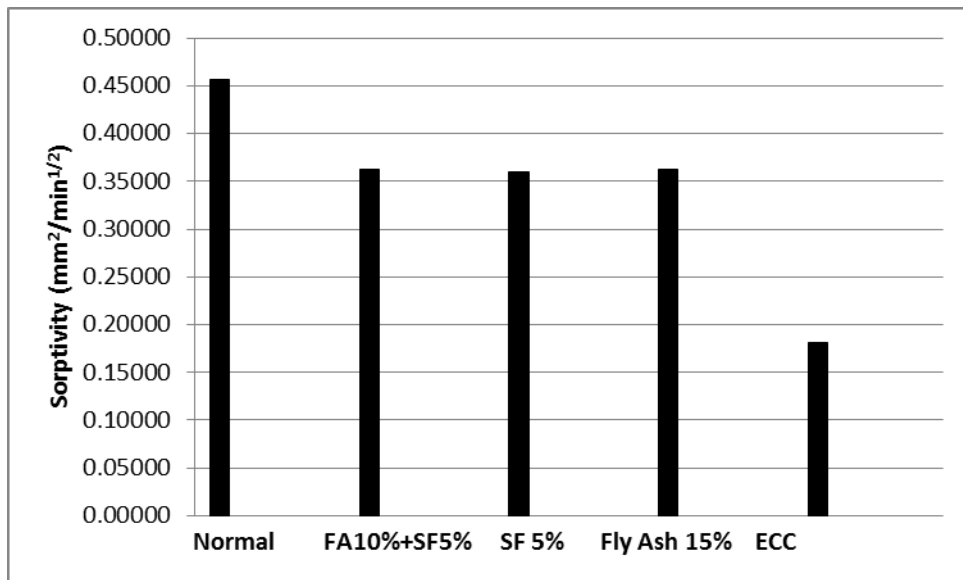
memiliki kuat tekan terendah, namun masih masuk dalam batasan kondisi dalam penelitian ini. Menurut sifat mekanik ECC yang dikemukakan oleh Li, ECC memiliki kuat tekan yang cukup baik karena memiliki bahan penyusun berupa *cement-based material* yang banyak, seperti semen dan *fly ash*. Penggunaan *silica sand* sebagai agregat halus juga memberikan penambahan CSH yang membuat reaksi pengikatan pada ECC menjadi lebih baik. Pori-pori dalam ECC pun menjadi lebih kecil dibanding beton karena memakai mikro material yang membuat kerapatan dan ikatan pada ECC menghasilkan kuat tekan yang baik (Li, 2011). Namun, untuk kuat tekan, ECC tidak bisa dibandingkan dengan beton normal yang memakai agregat kasar seperti batu alam yang dapat mencapai kuat tekan lebih tinggi dari penelitian ini, karena ECC memang disusun untuk memperoleh daktilitas yang baik. Bukan kuat tekan (Li, 2011). Pada penelitian ini juga, hasil trial kuat tekan pada ECC menunjukkan semakin besar kuat tekan ECC, nilai regangan menjadi lebih fluktuatif dan banyaknya retakan menjadi lebih sedikit dibanding yang tidak memiliki kuat tekan terlalu tinggi. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.2.

#### **4.4 Hasil Absorpsi**

Absorpsi pada beton merupakan salah satu properti yang perlu diuji, terutama untuk beton yang akan digunakan pada lingkungan yang memiliki kontak langsung dengan air, karena berdampak pada kemampuan beton untuk menahan penetrasi air yang masuk ke dalam badan beton. Pengujian ini menggunakan ASTM C 1585 sebagai pedoman pelaksanaan. Silinder beton dengan 20 cm dan diameter 10 cm dipotong menjadi 3 bagian dan kemudian diuji. Hasil rata-rata pengujian dapat dilihat dalam gambar 4.3 dan 4.4 di bawah ini.



**Gambar 4.3.** Hasil Absorpsi dilihat dari penambahan massa pada sampel



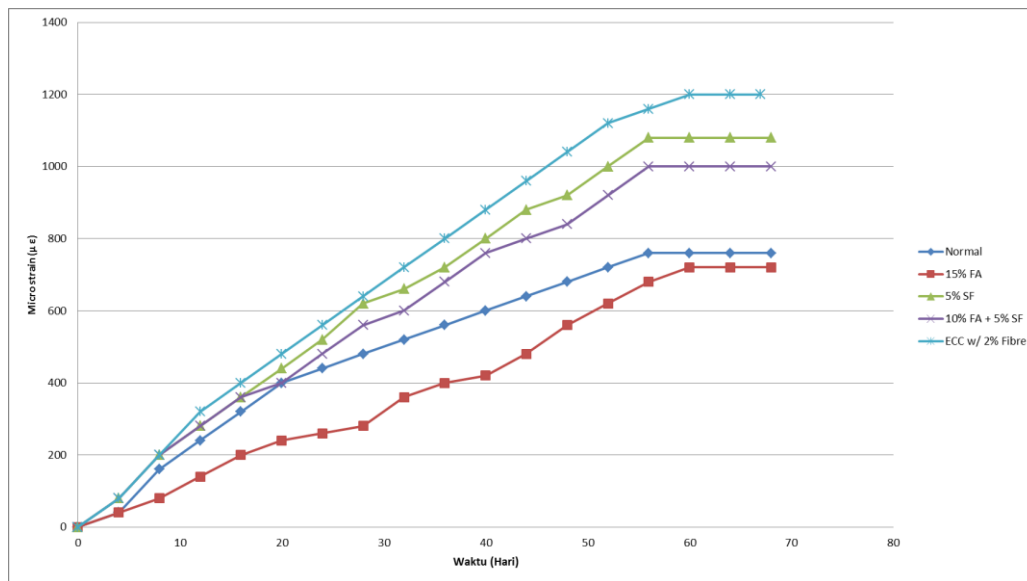
**Gambar 4.4.** Nilai *Sorptivity* Beton

Pada gambar 4.3, dapat dilihat bahwa penambahan massa pada sampel akibat resapan air yang paling kecil ada pada ECC, kemudian beton dengan 15% *fly ash* sebagai pengganti semen, kombinasi 10% *Fly ash* dan 5% *silica fume*. Hal yang sama didapat juga pada gambar 4.4 mengenai nilai *sorptivity* beton.

Berdasarkan nilai *sorptivity* beton, semakin kecil nilainya, semakin baik kemampuan beton dalam menahan penetrasi air untuk masuk ke dalam beton. Seperti yang diharapkan, penggunaan ECC dan material tambahan berupa *silica fume* dan *fly ash* mereduksi resapan air yang masuk ke dalam beton. Penggunaan *micro material* pada ECC (ukuran partikel  $\leq 100$  micro meter) dalam penelitian ini memiliki efek yang sangat baik dalam menahan penetrasi air ke dalam beton. ECC yang tersusun dari mikro material membuat beton memiliki pori-pori yang lebih sedikit dari beton lainnya, sehingga memiliki nilai *sorptivity* yang sangat kecil (Zhang, 2019). Kombinasi penggunaan 10% *fly ash* dan 5% *silica fume* menunjukkan hasil yang lebih baik dari penggunaan 5% *silica fume* saja. Dalam proses hidrasi semen, jika kandungan kalsium hidroksida pada *binder* bereaksi dengan pozzolan dalam jumlah yang tepat dan membentuk *Calcium Silicate Hydrate* (CSH), kalsium hidroksida akan tereliminasi dan molekul CSH tadi akan meningkat di dalam *binder* yang mengakibatkan ikatan dengan agregat semakin kuat dan meningkatkan kuat tekan serta kepadatan beton. Partikel *fly ash* dan *silica fume* yang merupakan pozzolan yang sangat reaktif dengan kemampuan pengisi pori yang tinggi menghasilkan penambahan peningkatan kekuatan dan kepadatan yang lebih baik daripada hanya dengan menggunakan *silica fume*. (Leung, 2016).

#### **4.5 Pengujian Susut**

Susut merupakan salah satu *mechanical properties* dari beton. Susut yang terlalu besar pada beton dapat menurunkan kualitas beton karena dapat menyebabkan retakan pada badan beton. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian susut dengan menggunakan metode ASTM C-596 mengenai susut kering. Berikut hasil pengujian susut berdasarkan jenis campuran beton yang dapat dilihat pada gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Perubahan Susut Beton Terhadap Waktu

Susut pada beton normal umumnya memiliki nilai 800-1200  $\mu\epsilon$ . Sedangkan nilai susut pada mortar bisa mencapai 2000  $\mu\epsilon$ . Hasil pada penelitian ini memenuhi kriteria tersebut. Terlihat bahwa susut terkecil ada pada beton dengan 15% *fly ash*. Dan terbesar ada pada ECC. Susut pada beton dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban. Hal ini dipengaruhi oleh kemampuan material untuk mempertahankan kelembaban di dalam badan beton itu sendiri. *Fly ash* memiliki susut yang lebih kecil dari beton normal, meskipun tidak begitu signifikan perbedaannya, karena memiliki kehalusan sama seperti yang dimiliki oleh semen biasa, dan memiliki kerapatan yang sedikit lebih baik daripada beton dengan semen saja, yang mengakibatkan efek mereduksi retakan pada beton dengan rasio air semen yang rendah. *silica fume*, meskipun meningkatkan kekuatan beton, namun ternyata memiliki susut yang lebih besar daripada beton normal dan *fly ash*, karena terjadi proses kimiawi yang mengakibatkan adanya rekonstruksi pada porositas beton, yang membuat beton dengan *silica fume* tidak bisa diperlakukan sama dengan beton *fly ash* (Sarkar, 2016) Penggunaan *silica fume* sendiri pada umumnya memiliki *properties shrinkage* yang lebih tinggi daripada beton normal (Zhang, 2013). Hal ini disebabkan karena reaksi kimia dari *silica fume* terhadap binder yang sangat tinggi. Saat proses hidrasi antara semen dan *silica fume*, ikatan C-S-H yang terbentuk menjadi sangat reaktif karena kandungan silika

dalam *silica fume* yang tinggi, sehingga mempengaruhi kelembaban dalam beton yang semakin berkurang karena panas hidrasi yang dihasilkan (Wongkeo, 2012).

Untuk ECC sendiri, meskipun memiliki performa kuat tekan yang lebih baik daripada material berbasis semen seperti pada beton normal, ECC menghasilkan susut beton yang lebih besar dari semua benda uji karena menggunakan material berbasis semen yang lebih banyak, meskipun penggunaan serat dapat menurunkan nilai susut. (Pelisser, 2010 ; Yousefieh, 2017). ECC pada umur 28 hari dapat memiliki nilai susut sebesar  $1200\mu\epsilon$  -  $1800\mu\epsilon$ , sedangkan pada beton normal dan yang memakai fiber baja memiliki nilai susut sebesar  $400\mu\epsilon$  -  $800\mu\epsilon$  (Zhang, 2013). Beberapa penelitian terhadap ECC telah dilakukan dan ditemukan bahwa beberapa factor yang paling mempengaruhi *mechanical properties* dari ECC adalah *water-binder ratio*, *sand-binder ratio*, kandungan *fly ash* dan volume fiber (Sahmaran, 2013; Liu, 2017; Pan, 2015; Leung, 2017). Dalam penelitian sebelumnya oleh Gao, dengan menggunakan *fly ash-cement ratio* sebesar 1.85, diperoleh nilai susut mencapai lebih dari  $1200\mu\epsilon$ . Pada hari ke-60 diperoleh dengan *ratio fly ash* terhadap semen = 1.85 (Gao, 2018). Gao juga menemukan bahwa susut pada ECC meningkat seiring penambahan volume fiber PVA pada ECC. Dalam penelitiannya, Gao memakai *range* fiber PVA 0.5%-2% dari volume ECC. Penggunaan fiber PVA juga meningkatkan ketahanan ECC terhadap retak akibat susut meskipun tidak 100%.

#### **4.6 Hasil Rapid Chloride Penetration Test**

Klorida merupakan salah satu zat agresif yang dapat merusak struktur beton bertulang. *Rapid Chloride Penetration Test* merupakan satu metode pengujian durabilitas beton untuk menentukan kemampuan beton dalam menahan penetrasi klorida untuk masuk ke dalam beton. Pengujian ini berpedoman pada ASTM *Rapid Chloride Penetration Test* 1202-12. Kriteria mengenai hasil uji dapat dilihat dalam tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Kriteria Nilai Hasil Uji *Rapid Chloride Penetration Test*

Charge Passed (Coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4000	High
2000-4000	Moderate
1000-2000	Low
100-1000	Very Low
<100	Negligible

Sumber: ASTM C1202

Dalam *Rapid Chloride Penetration Test* ini juga dilakukan perhitungan terhadap koefisien difusi untuk mengetahui seberapa besar kemampuan sample uji dalam menghantarkan zat agresif melalui proses difusi. Berikut hasil yang diperoleh dari *Rapid Chloride Penetration Test* terhadap lima (5) sampel uji dengan jenis yang berbeda yang dapat dilihat pada tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Hasil *Rapid Chloride Penetration Test*

	Kuat Arus (A)				
	Normal	15% <i>Fly ash</i>	10%FA +5% SF	5% <i>silica fume</i>	ECC
I <sub>0</sub>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
I <sub>30</sub>	0.06	0.05	0.06	0.06	0.04
I <sub>60</sub>	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04
I <sub>90</sub>	0.07	0.06	0.06	0.07	0.04
I <sub>120</sub>	0.08	0.06	0.07	0.07	0.04
I <sub>150</sub>	0.09	0.07	0.07	0.07	0.04
I <sub>180</sub>	0.09	0.07	0.07	0.07	0.05
I <sub>210</sub>	0.1	0.07	0.07	0.07	0.05
I <sub>240</sub>	0.11	0.08	0.07	0.07	0.05
I <sub>270</sub>	0.11	0.08	0.07	0.07	0.05
I <sub>300</sub>	0.12	0.08	0.08	0.07	0.05
I <sub>330</sub>	0.13	0.08	0.08	0.08	0.05
I <sub>360</sub>	0.14	0.09	0.09	0.09	0.05
Q <sub>s</sub>	2007	1494	1494	1512	981



Arus listrik yang mengalir melalui badan beton dipengaruhi oleh konduktivitas yang dihasilkan oleh medium berupa larutan NaOH dan NaCl. Untuk bisa menghasilkan konduktivitas listrik, kedua larutan ini harus masuk ke dalam badan beton dan kemudian listrik akan mengalir melalui ion-ion di dalam beton. Tentu hal ini dipengaruhi oleh kemampuan beton dalam mengabsorpsi air. Semakin cepat beton mengabsorpsi air, semakin besar konduktivitas yang dihasilkan. Dari hasil yang diperoleh, didapatkan bahwa penetrasi klorida beton normal cukup signifikan, kemudian pada beton dengan material tambahan penetrasi klorida rendah, dan ECC penetrasi klorida sangat rendah. Hal ini juga berbanding lurus dengan hasil pengujian absorpsi dimana penggunaan material tambahan dan ECC menambah durabilitas beton untuk menahan penetrasi air untuk masuk ke dalam badan beton, sehingga penggunaan *fly ash* dan *silica fume* memberikan hasil difusi klorida yang lebih rendah daripada beton normal. (Wang 2018).

#### 4.7 Perhitungan Koefisien Difusi

Koefisien difusi menunjukkan kecepatan penetrasi ion klorida ke dalam beton. Pengukuran kandungan klorida dalam beton dilakukan pada jarak 1 cm dari permukaan beton. Nilai koefisien difusi dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut ini.

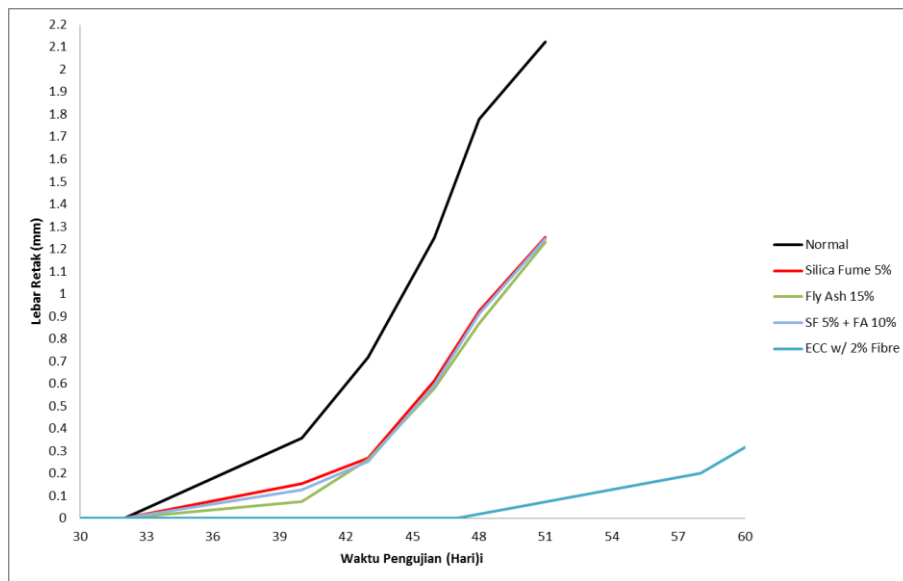
**Tabel 4.6.** Rekap perhitungan Koefisien Difusi

Sample	Co	Cd	T	RTL/ZFU	xd	t	$\alpha$	D
	(%)	(%)	(K)		(m)	(detik)		(m <sup>2</sup> /detik)
Normal	3.0	1.578	303	$2.17 \times 10^{-5}$	0.01	21600	0.00104775	9.95457E-12
15% <i>Fly ash</i>	3.0	0.9186	303	$2.17 \times 10^{-5}$	0.01	21600	0.00437883	9.65506E-12
10% FA + 5% SF	3.0	0.9259	303	$2.17 \times 10^{-5}$	0.01	21600	0.003819827	9.66348E-12
5% SF	3.0	0.9343	303	$2.17 \times 10^{-5}$	0.01	21600	0.004099327	9.67284E-12
ECC	3.0	0.8351	303	$2.17 \times 10^{-5}$	0.01	21600	0.004751492	9.61013E-12

Difusi klorida bergantung pada kemampuan murni difusi pada beton yang jenuh air dan tergantung pada kapilaritas air asin pada beton yang tidak jenuh air. (Nielsen, 2003). Dalam penelitian ini, kemampuan difusi beton yang diuji adalah pada beton yang sudah jenuh air, sehingga hasil yang didapat benar-benar merupakan kemampuan difusi murni pada beton. Penetrasi klorida ke dalam beton dipacu oleh beberapa factor. Ikatan kimia dan mekanik antara ion klorida dan hasil hidrasi semen dapat mengubah struktur mikro pada beton. Koefisien difusi klorida juga berubah seiring waktu *exposed sample* pada larutan klorida (Mangat, 1999; Thomas, 2004). Nobuaki dan Page mempelajari juga pengaruh temperature terhadap difusi klorida dan hasilnya menunjukkan bahwa terjadi peningkatan penetrasi klorida seiring dengan peningkatan suhu. (Nobuaki, 2009; Page 1981). Pengujian koefisien difusi ini dilakukan terhadap 5 sampel dengan *binder* yang berbeda. Dari hasil pengujian, dapat dilihat bahwa koefisien difusi terbesar terdapat pada beton normal dan yang paling terkecil didapat pada ECC. Hal ini berbanding lurus dengan pengujian durabilitas lainnya dalam penelitian ini, khususnya terhadap ketahanan terhadap penetrasi klorida dan juga penetrasi air. Penggunaan *supplementary material* berupa *fly ash* dan *silica fume* memiliki nilai koefisien difusi yang lebih kecil daripada beton normal. Hal ini juga dapat dilihat dari konsentrasi klorida yang terdapat dalam badan beton. Seperti yang telah diungkapkan Nielsen bahwa difusi klorida bergantung pada kemampuan murni kapilaritas beton, maka hasil yang menunjukkan ECC memiliki koefisien difusi terkecil sesuai dengan kemampuan absorpsi ECC, begitu juga dengan beton dengan *supplementary material* berupa *fly ash* dan *silica fume*.

#### **4.8 Hasil Pengujian Percepatan Korosi Ditinjau Dari Lebar Retak**

Pengujian percepatan korosi menggunakan metode galvanostatik dan dianalisa dari lebar retak dan juga kehilangan massa (*weight loss*) dari baja tulangan pada beton. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan kuat arus 0.02 A. Berikut hasil dari pengujian percepatan korosi ditinjau dari lebar retak pada badan beton.



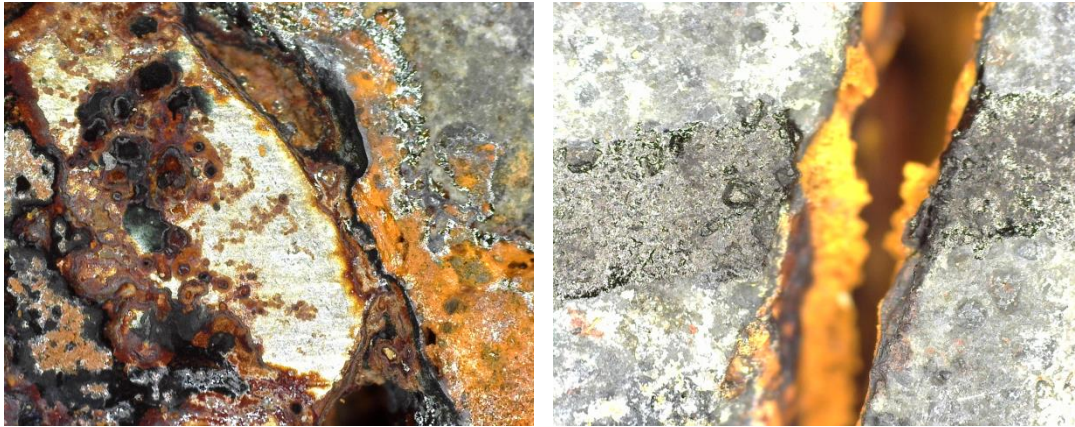
**Gambar 4.6** – Hubungan antara lebar retak maksimum (mm) dan waktu perendaman (hari)

Proses korosi pada baja tulangan umumnya dipengaruhi oleh oksigen, air, dan zat klorida. Gambar 4.6 menunjukkan ketika retakan pertama terjadi, retak tumbuh dengan cepat dan meningkat seiring waktu pengujian bertambah. Hal ini disebabkan karena ketika mencapai retakan pertama, air, klorida, dan oksigen lebih mudah masuk sehingga menyebabkan proses korosi pada tulangan menjadi lebih cepat dari sebelumnya. Dengan adanya tambahan arus listrik yang mempermudah merusak lapisan passive tulangan yang telah bereaksi dengan udara, air dan klorida, volume karat meningkat dan menimbulkan tegangan di dalam badan beton yang semakin besar, yang berakibat gaya desak ke permukaan beton menjadi semakin bertambah dan retak menjadi semakin besar. Selain itu, karena retak menjadi semakin besar, spalling juga mulai terjadi pada permukaan beton (terjadi paling besar pada beton normal) sehingga beton menjadi lebih sulit untuk diamati bagian dalamnya. Untuk gambar mengenai pola retak selengkapnya dapat dilihat pada lampiran gambar 2.

Pada ECC, volume karat yang terjadi pada tulangan tidak sebesar pada beton lainnya yang bahkan mengalami spalling. Jika dilihat dari pola retaknya, ECC memiliki retak yang lebih banyak dari beton, namun memiliki lebar retak

yang jauh lebih kecil daripada beton. Hal ini sesuai dengan karakteristik ECC yang didesain untuk mengembangkan *microcrack* yang banyak sehingga daktilitas ECC menjadi lebih besar daripada beton pada umumnya (Li, 2011). ECC dapat menghasilkan retak yang banyak juga dipengaruhi oleh matriks penyusun ECC yang terdiri dari *micro material* dan fiber PVA, yang memberikan performa *tensile* yang lebih baik daripada beton normal, sehingga ketika retak pertama terjadi, fiber akan bekerja menahan retak tersebut agar tidak semakin membesar dan bagian lain dari badan ECC akan menerima retakan selanjutnya (Yousefieh, 2017; Leung, 2017). Karena memiliki lebar retak yang jauh lebih kecil daripada beton lainnya, maka zat-zat yang menginduksi korosi seperti air, oksigen dan klorida yang masuk ke dalam badan beton hingga mencapai tulangan pun menjadi lebih kecil jumlahnya daripada beton lainnya. Dengan perbedaan jumlah air, oksigen, dan klorida dalam ECC daripada beton normal, maka induksi korosi yang terjadi dalam ECC menjadi lebih lambat daripada beton lainnya, sehingga retak pertama pada ECC pun terjadi 11 hari lebih lambat daripada beton normal dan beton dengan *supplementary material*.

Selain pengamatan terhadap lebar retak beton, pengamatan juga dilakukan terhadap infiltrasi produk korosi ke dalam celah retak yang terbentuk. Seiring dengan terjadinya proses keretakan, produk korosi mulai mengisi celah di sepanjang retak. Gambar 4.7 menunjukkan produk korosi yang mengisi celah di sepanjang retakan yang terjadi. Masuknya produk korosi ke dalam celah retak semakin lama semakin merembes ke luar sehingga akan bercampur dengan air perendaman. Hal inilah yang membuat air rendaman berubah warna dari bening menjadi coklat.



**Gambar 4.7-** Produk Korosi Yang Mengisi Celah Retak

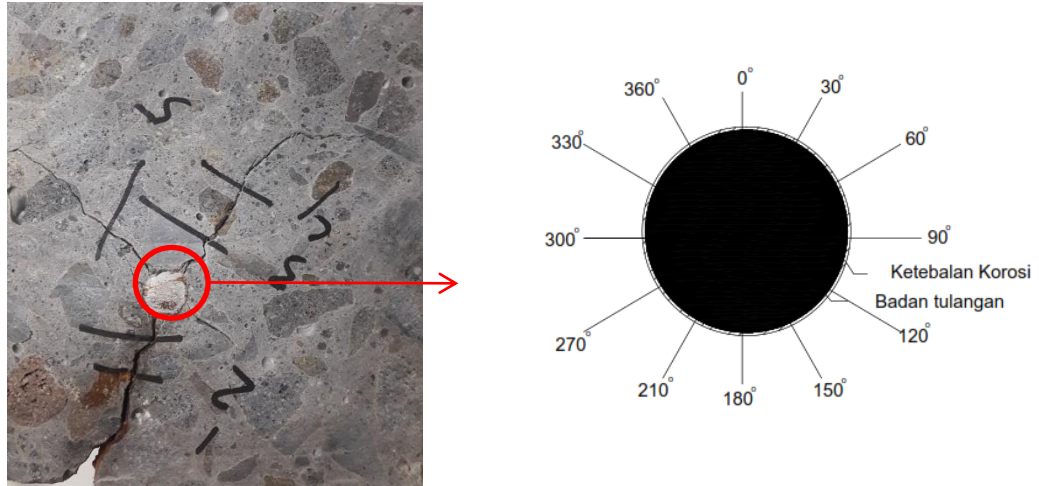
#### **4.9 Ketebalan Karat Pada Permukaan Tulangan**

Proses korosi menghasilkan produk korosi di sekitar badan tulangan sebagai hasil dari reaksi elektrokimia. Distribusi karat di sepanjang perimeter tulangan juga diamati dalam penelitian ini. Pengamatan dilakukan dengan *digital photographic system measurement* seperti pada gambar 4.8 untuk mendapatkan data ketebalan karat di sepanjang perimeter tulangan. Skema pengukuran tebal karat dapat dilihat pada gambar 3.9.



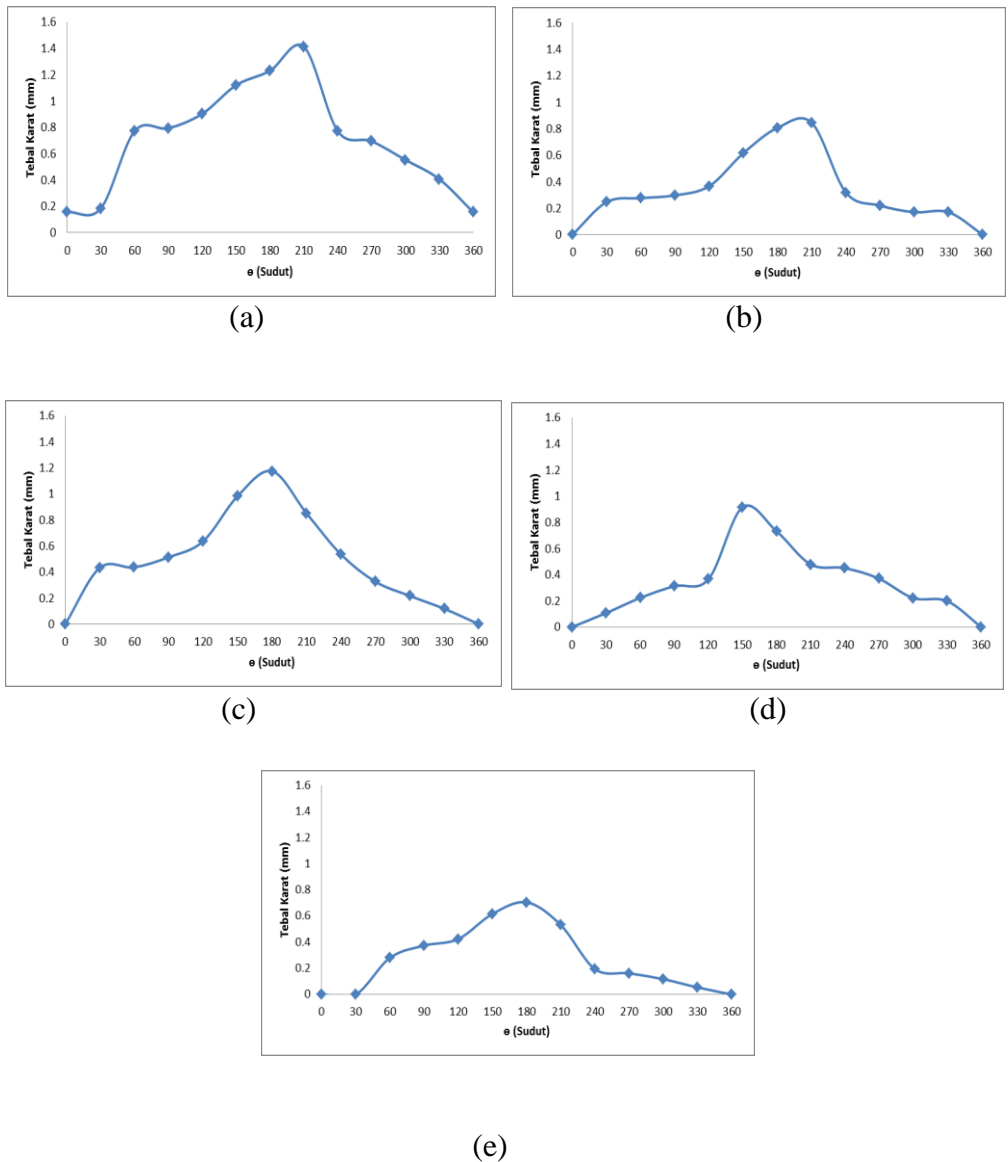
**Gambar 4.8.** Pengukuran Ketebalan Karat

Untuk pola sebaran karat dan ketebalan karat pada perimeter tulangan, diambil masing-masing contoh pada benda uji ke-10 dari tipe beton yang berbeda-beda. Metode pengukuran ketebalan karat pada beton dapat dilihat pada gambar 4.9.



**Gambar 4.9.** *Plotting* Sudut Ukur Ketebalan Karat pada Tulangan

Pada tulangan yang terkorosi seperti pada gambar 4.9, dilakukan plotting sudut per 30 derajat untuk diukur berapa besar ketebalan karat yang berada pada badan tulangan tersebut. Pengukuran ketebalan karat hanya dilakukan tepat pada titik yang sudah diplot. Untuk pengukuran dilakukan dengan menggunakan *dinolite*, dan contoh hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.8. Rekap hasil pengukuran ketebalan karat pada sampel beton dapat dilihat pada gambar 4.9.



**Gambar 4.10.** Distribusi tebal produk korosi pada beton (a) Normal (b) *Fly ash* 15% (c) *silica fume* 5% (d) SA 5% + FA 10% (e) ECC

Pada gambar 4.10 terlihat bahwa ketebalan produk korosi tidak merata di sepanjang perimeter tulangan. Bagian yang paling dekat dengan *exposed surface* memiliki ketebalan rata-rata lebih besar dibanding bagian lainnya. Pada beberapa bagian, ketebalan karat terbesar tidak tepat berada pada sudut  $180^0$ . Hal ini disebabkan karena karat lebih cepat terinisiasi pada bagian ulir daripada baja tulangan, dimana bagian ulir pada baja tulangan tidak sama antara satu dengan yang lainnya. Arus listrik yang menginduksi korosi pada baja tulangan mengalir

di permukaan badan tulangan. Kuat arus pada baja tulangan memiliki nilai yang berbeda, tergantung luas permukaan tempat arus tersebut mengalir. Semakin besar kuat arus, semakin cepat terjadinya induksi korosi. Bagian ulir pada tulangan memiliki luas permukaan yang lebih besar daripada bagian yang bukan ulir, sehingga kuat arus yang mengalir pada bagian ulir lebih besar daripada bagian yang bukan ulir, sehingga volume karat terbesar tidak selalu terdapat tepat pada sudut  $180^{\circ}$ .

#### 4.10 Analisa Kehilangan Massa Tulangan

Analisa terhadap berkurangnya berat tulangan dilakukan untuk mengetahui prosentasi korosi yang terjadi. Analisa ini dilakukan dengan menimbang tulangan sebelum pengujian dan setelah dilakukan percepatan korosi. Proses pengukuran berat tulangan dilakukan sesuai dengan ASTM G1. Proses membersihkan tulangan dari produk korosi sebelum dilakukan pengukuran berat dilakukan dengan pembersihan secara *mechanical*. Kehilangan massa

Perhitungan kehilangan massa secara teoritis dilakukan dengan menggunakan hukum Faraday. Berdasarkan Hukum Faraday, massa dari produk korosi yang terbentuk dari percepatan korosi dengan menggunakan arus listrik dihitung dengan menggunakan perumusan berikut ini.

$$M_{th} = \frac{AIt}{ZF} \quad (4.1)$$

Dimana:

$M_{th}$  = Massa tulangan terkorosi secara teoritis (gr)

A = Berat atom dari baja tulangan (56 gr)

Z = Elektron Valensi Baja Tulangan ( $Z=2$ )

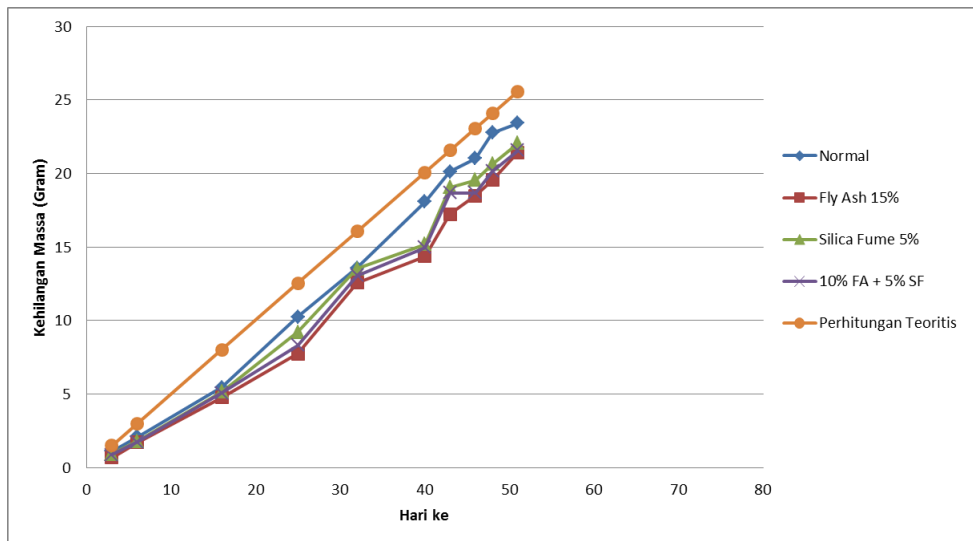
I = Arus yang diaplikasikan (Ampere)

t = Waktu perendaman di larutan NaCl (*second*)

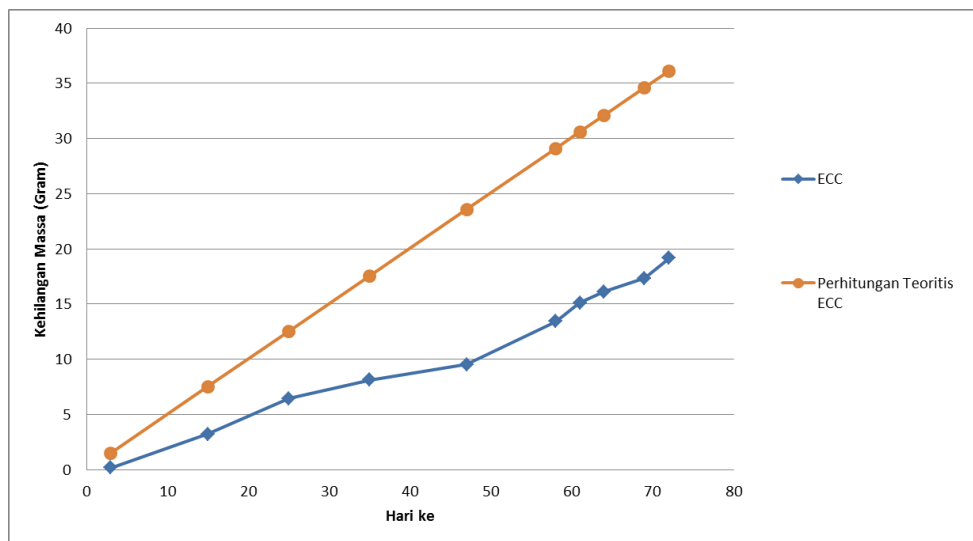
F = Konstanta Faraday (96487 Amp-sec)



Rangkuman dari hasil pengukuran kehilangan massa actual dan teoritis diperlihatkan pada gambar 4.11.



(a)



(b)

**Gambar 4.11** – Hubungan kehilangan massa tulangan dengan lamanya pengujian pada (a) beton normal dan *supplementary material* (b) ECC.

Pada gambar 4.11, terdapat dua gambar yang dipisah karena lamanya waktu perendaman pada benda uji ECC berbeda dari beton lainnya. Terlihat ada sedikit perbedaan antara kehilangan massa tulangan secara actual dan korosi

untuk beton normal dan beton dengan *supplementary material*, dan terdapat gap yang cukup jauh antara perhitungan kehilangan massa secara teoritis dan kehilangan massa actual pada ECC. Pada dasarnya, penerapan hukum faraday ini berlaku untuk logam yang tidak dilapisi oleh material lain. Terjadinya gap pada perhitungan actual dan teoritis kemungkinan terjadi karena berkurangnya besaran arus yang teraplikasikan pada tulangan di dalam beton, karena beton bersifat isolator, yang berakibat laju korosi di dalam badan beton menjadi lebih lambat.

Sedangkan terjadinya perbedaan gap antara beton dengan material penyusun yang berbeda-beda kemungkinan dipengaruhi oleh ketahanan beton terhadap penetrasi air dan klorida sebagai bahan penghantar arus. Jika dilihat dari *properties* absorpsi dan nilai *sorptivity* yang dimiliki oleh masing-masing beton, maka dapat disimpulkan bahwa ECC dengan nilai *sorptivity* terkecil mampu menghambat terjadinya proses korosi pada baja tulangan dalam beton dengan lebih baik dibanding material tambahan yang lain, terlihat dari gap yang dihasilkan. Karena beton dengan *supplementary material* dan ECC memiliki kemampuan yang baik dalam menahan menahan penetrasi zat agresif yang terlarut di dalam air dari luar, maka arus listrik di dalam beton pun tidak dapat tersalurkan dengan baik karena tidak adanya konduktor berupa air dan klorida, sehingga proses korosi berjalan lebih lambat dari beton biasa.

#### 4.11 Corrosion rate

Perhitungan *corrosion rate* dilakukan untuk mengetahui seberapa besar laju korosi yang terjadi pada tulangan terhadap waktu. Untuk menghitung *corrosion rate*, dilakukan perhitungan terlebih dahulu terhadap *corrosion current density* dengan perumusan sebagai berikut.

$$i_{corr} = \frac{27\left(1-\frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{dc} \quad (4.2)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai *corrosion current density* bergantung pada kualitas beton yang dicerminkan dengan menggunakan variable *water/cement* (w/c), yaitu factor air semen pada *mix design* beton dan dc (selimut

beton). Factor air semen pada penelitian ini adalah 0.253 dan selimut beton sebesar 5cm. Berdasarkan persamaan tersebut, didapatkan nilai  $I_{corr}$  sebesar  $4.61\mu A/cm^2$ . Berdasarkan nilai *corrosion current density* tersebut, maka *corrosion rate* dari tulangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dari hukum Faraday sebagai berikut.

$$CR = K * \left( \frac{a * i_{corr}}{nD} \right) \quad (4.3)$$

Dimana:

CR = *Corrosion rate* (mm/year)

K = Faktor constant (K=0.00327 mm/year)

a = Berat atom dari baja tulangan (56 gr)

$i_{corr}$  = *Corrosion current density* ( $\mu A/cm^2$ )

n = Elektron valensi dari baja tulangan (n=2)

D = *Density* tulangan ( $7.85\text{ gr/cm}^3$ )

Dengan menggunakan persamaan 4.3 di atas, maka didapatkan nilai *corrosion rate* sebenarnya dari baja tulangan sebesar 0.0538 mm/year.

Untuk mempercepat proses korosi yang terjadi, dilakukan eksperimen menggunakan metode galvanostatik. Prases pengujian dilakukan dengan merendam benda uji ke dalam 3.5% larutan NaCl hingga mencapai  $\pm 2.5$  cm dari permukaan beton, dan dialiri dengan kuat arus 0.02 A pada baja tulangan selama hampir dua bulan. Dengan menggunakan perumusan yang ada pada ASTM G102-89, maka nilai *corrosion current density* yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut.

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (4.4)$$

Dimana:

$i_{corr}$  = Kerapatan arus ( $\mu A/cm^2$ )

$$I_{\text{corr}} = \text{Total arus } (\mu\text{A})$$

$$A = \text{Luas penampang tulangan } (\text{cm}^2)$$

Berdasarkan yang diterapkan di pengujian, didapatkan:

$$I_{\text{corr}} = 0.02 \text{ A} = 20000\mu\text{A}$$

$$A = \pi r^2 = 132.67 \text{ cm}^2$$

$$i_{\text{corr}} = 150.75 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

Dengan menggunakan metode percepatan korosi, maka nilai *corrosion rate* beton saat dipercepat dapat dihitung dengan menggunakan perumusan di atas. Dengan menggunakan persamaan 4.3 hasil perhitungan *corrosion rate* dari tulangan yang digunakan dalam penelitian ini meningkat menjadi 1.7583 mm/year. Perhitungan *corrosion rate* juga dilakukan berdasarkan kehilangan massa pada tulangan dari pengujian. Perhitungan *Corrosion rate* berdasarkan kehilangan massa tulangan dihitung berdasarkan persamaan dari ASTM G192 - 08(2014) sebagai berikut:

$$\text{Corrosion rate} = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

Keterangan:

K : Konstanta yang menunjukkan unit dari *corrosion rate* (ASTM G 1-99) dapat dilihat di tabel 3.4)

T : Waktu (Jam)

A : Luas Penampang tulangan

W : Mass Loss (Gram)

D : Berat Jenis Tulangan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

Dari rumus di atas, maka hasil perhitungan *corrosion rate* pada masing-masing tipe benda uji dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

**Tabel 4.7** *Corrosion rate* per sampel

Sample Code	<i>Corrosion rate</i> (mm/years)				
	Normal	15% <i>Fly ash</i>	5% <i>silica fume</i>	10% FA + 5% SF	ECC
1	1.31	0.78	1.07	1.02	0.20
2	1.22	1.00	1.05	1.02	0.75
3	1.20	1.04	1.13	1.11	0.90
4	1.44	1.09	1.29	1.17	0.81
5	1.49	1.38	1.48	1.43	0.71
6	1.58	1.26	1.33	1.31	0.81
7	1.64	1.41	1.55	1.52	0.87
8	1.60	1.41	1.49	1.42	0.88
9	1.66	1.43	1.51	1.47	0.88
10	1.61	1.47	1.52	1.48	0.93
Rata-rata	1.47	1.23	1.34	1.29	0.78

Dapat dilihat bahwa *corrosion rate* pada tulangan di dalam beton normal memiliki nilai yang hampir sama dengan perhitungan berdasarkan ASTM 102-89. Dan pada beton dengan *supplementary material* lainnya memiliki nilai yang lebih kecil dari beton normal. Hal ini disebabkan oleh kemampuan beton dalam menahan zat agresif dan penetrasi air sebagai konduktor arus di dalam badan beton, sehingga proses korosi berjalan menjadi lebih lambat, yang mengakibatkan volume korosi yang terjadi pada tulangan menjadi lebih sedikit, dibanding dengan beton normal dengan waktu yang sama. Sedangkan pada ECC, nilai *corrosion rate* jauh lebih kecil dengan waktu perendaman yang lebih lama, karena kemampuan ECC dalam menahan penetrasi air dan klorida lebih baik dari beton *supplementary* lainnya. Hal ini disebabkan ECC memakai mikro material sebagai bahan penyusun utamanya.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan untuk mengetahui *durability properties*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai *corrosion rate* masing-masing material terhadap beton normal adalah sebagai berikut.
  - 1.1. *Corrosion rate* ECC memiliki nilai 1.84 mm/year, 46% lebih kecil daripada beton normal.
  - 1.2. *Corrosion rate* beton dengan *fly ash* 15% memiliki nilai *corrosion rate* 2.91mm/year, 14% lebih kecil dari beton normal.
  - 1.3. *Corrosion rate* beton dengan *silica fume* 5% memiliki nilai 3.18, 6% lebih kecil dari beton normal.
  - 1.4. *Corrosion rate* beton dengan *silica fume* 5% dan *fly ash* 10% memiliki nilai 3.07, 9% lebih kecil dari beton normal.
  - 1.5. Beton normal memiliki nilai *corrosion rate* 3.38.
2. Kemampuan beton dalam menahan penetrasi fluida, dalam hal ini dilihat dari nilai sorptivitas dan koefisien difusi adalah sebagai berikut.
  - 2.1. ECC memiliki nilai *sorptivity* 0.18 dan koefisien difusi  $9.61 \times 10^{-12}$
  - 2.2. Beton dengan *fly ash* 15% memiliki nilai *sorptivity* 0.36 dan koefisien difusi  $9.655 \times 10^{-12}$ ,
  - 2.3. Beton dengan *silica fume* 5% yang memiliki nilai *sorptivity* 0.3626 dan koefisien difusi  $9.672 \times 10^{-12}$
  - 2.4. Beton dengan *fly ash* 10% dan *silica fume* 5% yang memiliki nilai *sorptivity* 0.3624 dan koefisien difusi  $9.663 \times 10^{-12}$ .
  - 2.5. Beton normal yang menjadi control memiliki nilai *sorptivity* 0.456 dan koefisien difusi  $9.954 \times 10^{-12}$

Dari nilai *durability properties* yang diperoleh pada penelitian ini, ECC menjadi material dengan performa durabilitas terbaik terhadap penetrasi fluida ditinjau dari nilai sorptivitas dan koefisien difusi, serta ketahanan terhadap retak akibat korosi ditinjau dari nilai *corrosion rate*.

## 5.2. Saran

1. Dari penelitian ini, indikator durabilitas beton hanya dilihat dari properties absorpsi dan difusi. Untuk penelitian selanjutnya, dengan mix design yang sama, bisa dilakukan pengujian durabilitas lainnya seperti porositas dan permeabilitas.
2. Untuk penelitian lanjutan, diperlukan pengembangan pengujian untuk ECC, seperti pengujian kuat tarik belah. Dan juga untuk pengujian tekan beton, agar digunakan strain gauge sehingga didapatkan hubungan interaksi tegangan dan regangan pada ECC saat menerima beban tekan.
3. Rumus Faraday yang digunakan untuk menghitung kehilangan massa terlihat tidak cocok digunakan untuk tulangan dalam ECC, sehingga diperlukan pendekatan dengan perhitungan yang baru. Untuk itu diperlukan standar deviasi pengujian sample yang baik agar pendekatan perhitungan dapat menghasilkan nilai yang mendekati kondisi actual.
4. Penggunaan ECC dengan mix design terbaik dalam penelitian ini bisa digunakan dalam dunia konstruksi untuk cover beton sehingga dapat memberikan ketahanan yang lebih baik daripada beton pada umumnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ar, Irfan. 2015. "Synthesis , Characterization and Fuel Cell Performance Tests of Boric Acid and Boron Phosphate Doped , Sulphonated and Phosphonated Poly ( Vinyl Alcohol ) Based Composite Membranes" 288: 426–33.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.188>.
- ASTM D5083. (1996). "Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens," 1–7. *ASTM International*, (D).
- ASTM C642. (1997). "Standard Test Method For Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete." *ASTM International*, (C).  
<https://doi.org/10.1520/G0642-97>
- ASTM G1. (1999). "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Speciment." *ASTM International*, (G).  
<https://doi.org/10.1520/G0001-90R99E01>
- ASTM D638. (2010). "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic." *ASTM International*, (D). <https://doi.org/10.1520/C0638-10>
- ASTM D559. (2011). "Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures." *ASTM Standards International*, 04(C), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0559-03>.
- ASTM C. (2012). 1202-12. "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," *ASTM International, Pa, Usa*, (C), 1–8. <https://doi.org/10.1520/C1202-12.2>
- ASTM C191. (2013). "Standard Test Method for Time Setting of Hidraulic Cement by Vicat Needle." *ASTM International*, (C).  
<https://doi.org/10.1520/C0191-13>



- ASTM C39. (2014). “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” 3–9. *ASTM International*, (C). <https://doi.org/10.1520/C0039>
- ASTM C187. (2016). “Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste.” *ASTM International*, (C). <https://doi.org/10.1520/C0187-16>
- ASTM C188. (2016). “Standard Test Method for for Density of Hydraulic Cement.” *ASTM International*, (C). <https://doi.org/10.1520/C0188-16>
- ASTM G192. (2016). “Standard Test Method for Determining the Crevice Repassivation Potential of Corrosion-Resistant Alloys Using a Potentiodynamic.” *ASTM International*, (G). (Reapproved 2014), 1–10. <https://doi.org/10.1520/G0192-08R14.2>
- ASTM C117. (2017). “Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200 ) Siece in Mineral Agregates by Washing.” *ASTM International*, (C). <https://doi.org/10.1520/C0117-17>
- Basheer, P. A.M., S. E. Chidiac, and A. E. Long. 1996. “Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures.” *Construction and Building Materials* 10 (1 SPEC. ISS.): 27–37. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00092-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00092-5).
- Cao, Chong, and Moe M S Cheung. 2014. “Non-Uniform Rust Expansion for Chloride-Induced Pitting Corrosion in RC Structures.” *Construction and Building Materials* 51: 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>.
- Claisse, Peter. 2008. “Book Review Corrosion Of Steel In Concrete-Understanding, Investigation and Repair 2<sup>nd</sup> Broomfield J. P., Taylor & Francis, London, 2006, 978-0-4153-3404-4, 296.” *Proceedings of the*

*Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 161 (3): 135–135.  
<https://doi.org/10.1680/coma.2008.161.3.135>.

D. Hatungimana, C. Taşköprü, M. İçhedef, M. Murat, and Ş. Yazıcı, “Compressive strength , water absorption , water sorptivity, and surface radon exhalation rate of silica fume and fly ash based mortar,” vol. 23, no. October 2018, pp. 369–376, 2019.

Dimitriou, George, Pericles Savva, and Michael F. Petrou. 2018. “Enhancing Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete.” *Construction and Building Materials* 158: 228–35.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>.

Duchesne, Josée, and R. Mejía de Gutiérrez. 2003. “Effect of Supplementary Cementing Materials on the Concrete Corrosion Control.” *Revista de Metalurgia* 39 (94): 250–55.  
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.iExtra.1127>.

H.Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, Jayaprakash Jaganathan and M.P. Anwar, “Sorptivity of self-compating concrete containing fly ash and silica fume,” *Constr. Build. Mater*, vol 113, pp. 369-375, 2019.

Li, Dongqi, Zongli Li, Congcong Lv, Guohui Zhang, and Yueming Yin. 2018. “A Predictive Model of the Effective Tensile and Compressive Strengths of Concrete Considering Porosity and Pore Size.” *Construction and Building Materials* 170: 520–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.028>.

Li, Victor C. 2003. “On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications.” *Advanced Concrete Technology* 1 (3): 215–30. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>.

Liu, T. 1998. “Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures.” *Cem. Concr. Res.* 28 (3): 365–79.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00259-2).

- Moukwa, M. 1990. "Deterioration of Concrete in Cold Sea Waters." *Cement and Concrete Research*. 20 (c): 439–46.
- O'Neill Iqbal, Prince, and Tetsuya Ishida. 2009. "Modeling of Chloride Transport Coupled with Enhanced Moisture Conductivity in Concrete Exposed to Marine Environment." *Cement and Concrete Research* 39 (4): 329–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.001>.
- Pourfalah, S, and B Suryanto. 2013. "Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures Using Locally Available Materials in the UK." *The Infrastructure and Environment Scotland 1st Postgraduate Conference*. 75–78.
- Riding, Kyle A, Jonathan L Poole, Anton K Schindler, Maria C G Juenger, and Kevin J Folliard. 2008. "Quantification of Effects of Fly Ash Type on Concrete Early-Age Cracking Quantification of Effects of Fly Ash Type on Concrete Early-Age Cracking," no. March.
- S. P. Zhang and L. Zong, "Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials," 2014.
- Sarkar, Souptik, and Aritra Halder. 2016. "Shrinkage in Concretes Containing Fly Ash," no. August.
- Suda, Kumiko, Sudhir Misra, and Kenichi Motohashi. 1993. "Corrosion Products of Reinforcing Bars Embedded in Concrete." *Corrosion Science* 35 (5–8): 1543–49. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90382-Q](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90382-Q).
- Sutrisno, Wahyuniarsih. 2017. *Model Prediksi Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah Dan Kering*, Disertasi Dr., Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

- Wang, Dezhi, Xiangming Zhou, Bo Fu, and Lirong Zhang. 2018. "Chloride Ion Penetration Resistance of Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume against Combined Freezing-Thawing and Chloride Attack" 169: 740–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.038>.
- Wilson, J., and T. Yu. 2013. "Accelerated Artificial Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Slabs Using the Half-Cell Potential Method." *26th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2013, SAGEEP 2013*, no. 4.
- Wongkeo, Watcharapong, Pailyn Thongsanitgarn, and Arnon Chaipanich. 2012. "Compressive Strength and Drying Shrinkage of Fly Ash-Bottom Ash-Silica Fume Multi-Blended Cement Mortars." *Materials and Design* 36: 655–62. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.043>.
- X. Chen, S. Wu, and J. Zhou, "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 869–874, 2013.
- Xia, Jin, and Wei-liang Jin. 2014. "Prediction of Corrosion-Induced Crack Width of Corroded Reinforced Concrete Structures." *4th International Conference on the Durability of Concrete Structures*, no. 24–26 July: 146–54. <https://doi.org/10.5703/1288284315395>.
- Yousefieh, Negin, Alireza Joshaghani, Erfan Hajibandeh, and Mohammad Shekarchi. 2017. "Influence of Fibers on Drying Shrinkage in Restrained Concrete." *Construction and Building Materials* 148: 833–45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.093>.
- Z. Zhang, A. Yuvaraj, J. Di, and S. Qian, "Matrix design of light weight , high strength , high ductility ECC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 210, pp. 188–197, 2019.

- Zhang, Peng, and Qing-fu Li. 2013. "Composites : Part B Effect of Polypropylene Fiber on Durability of Concrete Composite Containing Fly Ash and Silica Fume." *Composites Part B* 45 (1): 1587–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.006>.
- Zhao, Y X, H Xu, and W L Jin. 2013. "Concrete Cracking Process Induced by Steel Corrosion- A Review." *Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers.*, no. 2: 1–10.
- Zhao, Yuxi, Bingyan Hu, Jiang Yu, and Weiliang Jin. 2011. "Non-Uniform Distribution of Rust Layer around Steel Bar in Concrete." *Corrosion Science* 53 (12): 4300–4308. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.045>.
- Zhao, Yuxi, Jiang Yu, Bingyan Hu, and Weiliang Jin. 2012. "Crack Shape and Rust Distribution in Corrosion-Induced Cracking Concrete." *Corrosion Science* 55: 385–93. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.11.002>.
- Zhao, Yuxi, Jiang Yu, Yingyao Wu, and Weiliang Jin. 2012. "Critical Thickness of Rust Layer at Inner and out Surface Cracking of Concrete Cover in Reinforced Concrete Structures." *Corrosion Science* 59: 316–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.018>.

## BIODATA PENULIS



Nama Lengkap : Gabriel Jose Posenti Ghewa

Tempat/Tanggal Lahir : Dili, 19 Maret 1994

Riwayat Pendidikan : - SDK St. Maria Assumpta, Kota Kupang  
- SMP N 2 Kota Kupang  
- SMA N 1 Kota Kupang  
- S1 Universitas DR. Soetomo, Surabaya  
- S2 Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Pengalaman Seminar : International Seminar on Science and Technology  
(2019)

*“Halaman sengaja dikosongkan”*

Lampiran 1 – Gambar Set Up Pengujian



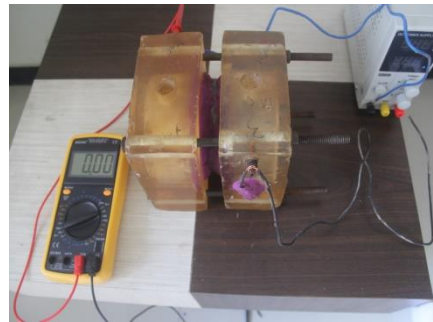
a



b



c



d



e

**Gambar 1.** (a) Kuat Tekan, (b) Susut Kering, (c) Absorpsi, (d) *Chloride diffusion*, (e) Galvanostatik



## Lampiran 2 – Hasil Analisa Material

**Tabel 1.** Hasil Percobaan Berat Jenis Semen

Percobaan	
Berat Semen (w1).....gram	250
Berat Labu....gram	174
Berat Semen + minyak + labu takar (w2) .....gram	796
Berat labu takar + minyak (w3) .....gram	618
$B_j = 0,8 w_1 / (w_1 + w_3 - w_2)$	2,77

Berdasarkan hasil pengujian, berat jenis semen yang dipakai dalam penelitian ini adalah 2.77.

**Tabel 2.** Waktu Pengikatan Semen

Pukul	Interval Waktu	Penetrasi
(WIB)	(Menit)	(mm)
12.05	0.00	40.00
12.20	15.00	34.00
12.35	30.00	30.00
12.50	45.00	19.00
13.05	60.00	17.00
13.20	75.00	13.00
13.35	90.00	13.00
13.50	105.00	10.00
14.05	120.00	10.00
14.20	135.00	9.00
14.35	150.00	6.00
14.50	165.00	0

Dari hasil di tabel 2, diperoleh waktu pengikatan awal semen adalah 37 menit 42 detik dengan interpolasi.

**Tabel 3.** Konsistensi Normal Semen

No	Item diamati	Pengujian I	Pengujian II	Pengujian III	Pengujian IV	Interpolasi
1	Berat Air, Wa (mL)	65	75	85	95	87
2	Berat Semen, Ws (mL)	300	300	300	300	300
3	Konsistensi = (Wa/Ws)*100%	21.7	25	28.3	31.7	29
4	Penetrasi	0	2	6.5	26	10

Dari hasil pada tabel 3, didapatkan konsistensi semen terhadap air = 29%.

**Tabel 4.** Hasil Pengujian Berat Jenis Pasir

	A	B	
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	500	500	Gram
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	496	492	Gram
Berat Piknometer diisi air (25oC) (B)	822.6	840	Gram
Berat Piknometer +Benda Uji SSD + Air	1129	1158	Gram
			Rata-Rata
Berat Jenis (Bulk) = $Bk / (B+500-Bt)$	2.56	2.7	2.63

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis pasir, maka diketahui berat jenis pasir yang digunakan adalah 2.63.

**Tabel 5.** Kadar Air Agregat Halus

No	Nomor Contoh dan Kedalaman	A	B	Satuan
1	Nomor Talam yang dipakai			Gram
2	Berat Talam + Contoh Basah	3235	3152	Gram
3	Berat Talam + Contoh Kering	3228	3146	Gram
4	Berat Air	7	6	Gram
5	Berat Talam	235	152	Gram
6	Berat Contoh Kering	2993	2994	Gram
7	Kadar Air	0.23	0.2	%
8	Rata-Rata	0.215		%

Berdasarkan hasil uji kadar air dalam agregat halus, maka diketahui kadar air agregat halus yang digunakan adalah sebesar 0.215%.

**Tabel 6.** Analisa Bobot Isi Agregat Halus

No	Metode Uji	Berat Contoh (Kg)	Ukuran Agregat (mm)	Volume Penakar (m <sup>3</sup> )	Berat Penakar (Kg)	Berat Jenis Agregat (Kg/m <sup>3</sup> )	Rongga Udara (%)
1	Rojok	5.539	< 4.75	0.003	2.57	990	1.00
2	Ketuk	5.581	< 4.75	0.003	2.57	1004	1.00
3	Gembur	5.125	< 4.75	0.003	2.57	852	1.00

Berdasarkan hasil uji terhadap bobot isi dan rongga udara agregat halus, diketahui dari masing-masing pengujian, bobot isi yang diperoleh untuk pasir yang dirojok adalah 990 kg/m<sup>3</sup>, untuk pasir yang dipadatkan dengan cara diketuk bagian wadahnya adalah 1004 kg/m<sup>3</sup>, dan untuk pasir yang gembur adalah 852 kg/m<sup>3</sup>. Besarnya nilai rongga udara dari ketiga sifat pengujian tersebut adalah 1%.

**Tabel 7.** Analisa Air Resapan Agregat Halus

	A	B	
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	500	500	Gram
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	496	492	Gram
Berat Piknometer diisi air (25oC) (B)	822.6	840	Gram
Berat Piknometer +Benda Uji SSD + Air	1129	1158	Gram
	%	%	Rata-Rata (%)
Berat Jenis (Bulk) = $Bk / (B+500-Bt)$	2.56	2.7	2.63
Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh = $500 / (B+500-Bt)$	2.58	2.75	2.67
Berat Jenis Semu (Apparent) = $Bk / (B+Bk-Bt)$	2.62	2.83	2.72
Penyerapan = $(500-Bk)/Bk * 100\%$	0.81	1.63	1.22

Berdasarkan hasil pengujian air resapan agregat halus, diperoleh rata-rata kemampuan penyerapan agregat halus adalah 1.22%.

**Tabel 8.** Analisa Kebersihan Pasir Terhadap Lumpur

NOMOR PERCOBAAN	1	2
Berat pasir kering (w1).....gram	500 gr	500 gr
Berat pasir bersih kering (w2) .....gram	429 gr	422 gr
Kadar lumpur = $(w1-w2)/w1 \times 100\%$	14,2 %	15,6 %

Berdasarkan hasil pengujian kadar lumpur pada agregat halus, diketahui presentasi lumpur terhadap pasir dalam agregat halus adalah sebesar 14.9%.

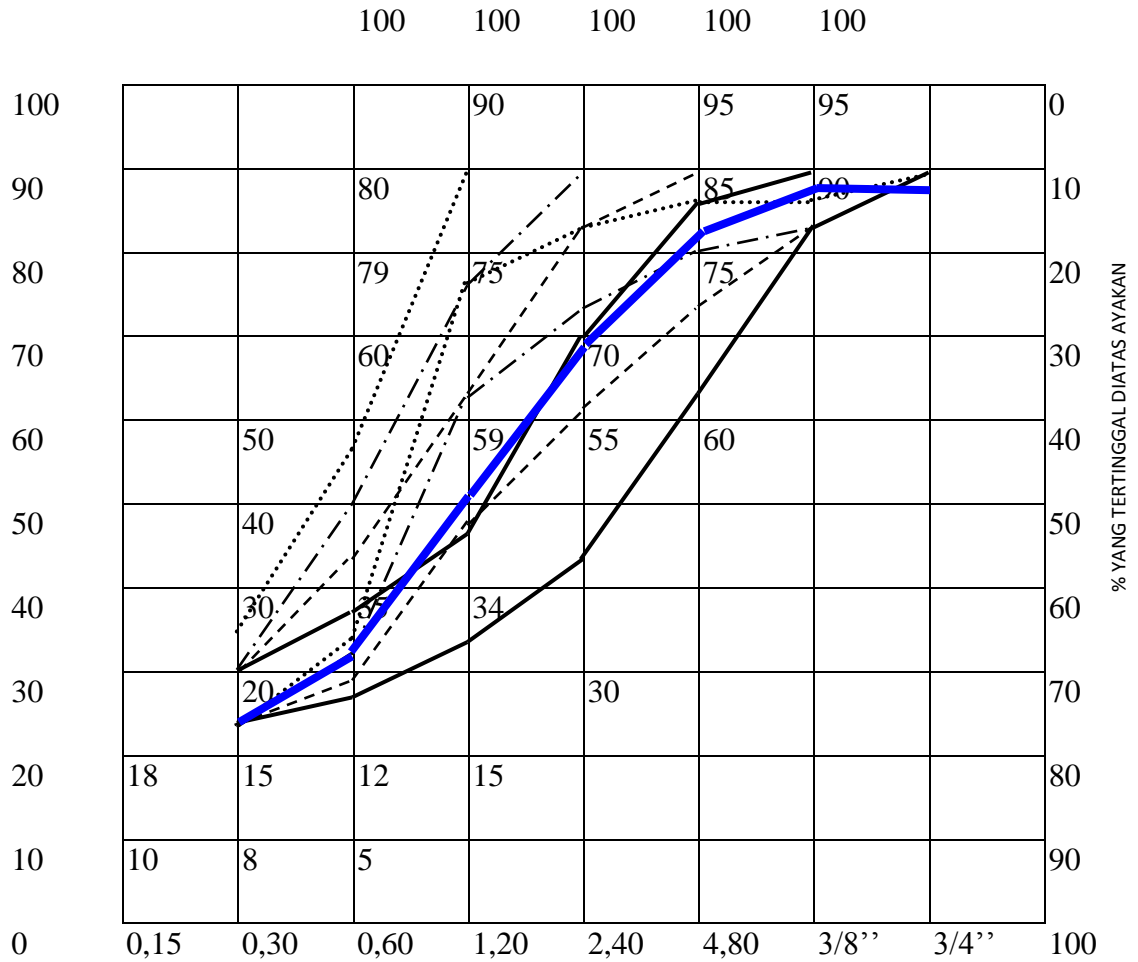
**Tabel 9.** Analisa Agregat Halus Lolos Saringan no. 200

Berat Kering Benda Uji + Wadah (W1)	732	Gram
Berat Wadah (W2)	232	Gram
Berat Kering Benda Uji Awal (W3=W1-W2)	500	Gram
Berat Kering Benda Uji Setelah Pencucian + Wadah (W4)	706	Gram
Berat Kering Benda Uji Setelah Pencucian (W5=W4-W2)	474	Gram
Persen Bahan Lolos Saringan No 200 [(W3-W5)/W3*100]	5.2	%

Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan bahwa presentase agregat halus yang lolos saringan no. 200 adalah sebesar 5.2% dari keseluruhan sampel.

**Tabel 10.** Gradasi Agregat Halus

Lubang ayakan inci/mm	Pasir Tertinggal		
	Gram	%	Σ %
4.75	136.5	6.8	6.8
2.38	255.2	12.76	19.56
1.19	224.9	11.25	30.81
0.59	355.3	17.76	48.57
0.297	497.2	24.86	72.43
0.149	248.1	12.4	86.83
0	282.8	13.17	100
Jumlah	2000	100%	



**Gambar 2.** Gradasi Agregat Halus

Dari hasil yang diperoleh, agregat halus yang dipakai masuk ke dalam zona gradasi 2.

**Tabel 11.** Berat Jenis Agregat Kasar

PERCOBAAN NOMOR	1	2
Berat Batu pecah di udara (w1).....gram	3000 gr	3000 gr
Berat Batu pecah di air (w2)....gram	1796 gr	1890 gr
Berat jenis Batu pecah = $w1/(w1-w2)$	2,49	2,7
Rata-rata	2.59	

Berdasarkan hasil pengujian, berat jenis agregat kasar yang akan digunakan adalah 2.59

**Tabel 12.** Presentase Kelembaban Agregat Kasar

<b>PERCOBAAN NOMOR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Berat Batu pecah asli (w1)...gram	500	500
Berat Batu pecah oven (w2)...gram	495	495
Kelembaban Batu pecah = $(w1-w2)/w2 \times 100\%$	1%	1 %

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui kelembaban batu pecah dalam kondisi normal adalah sebesar 1%

**Tabel 13.** Presentase Resapan Air Agregat Kasar

<b>PERCOBAAN NOMOR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Berat Batu pecah SSD..gram	3000 gr	3000 gr
Berat Batu pecah (w)...gram	2942 gr	2945 gr
Kadar air resapan = $\{(3000 - w)/w \times 100\%$	1,971 %	1,868 %
Rata-rata	1.9195 %	

Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan kadar resapan air pada agregat kasar adalah sebesar 1.9195%.

**Tabel 14.** Kadar Lumpur Agregat Kasar

<b>NOMOR PERCOBAAN</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Berat kering sebelum dicuci (w1)...gram	1000 gr	1000 gr
Berat kering sesudah dicuci (w2)..gram	986 gr	955 gr
Kadar lumpur = $(w1-w2)/w1 \times 100\%$	1,4%	0,5%
Rata-rata	0.95 %	

Dari hasil pengujian, diketahui kadar lumpur dalam agregat kasar adalah sebesar 0.95%.

**Tabel 15.** Hasil Percobaan Berat Volume Kerikil

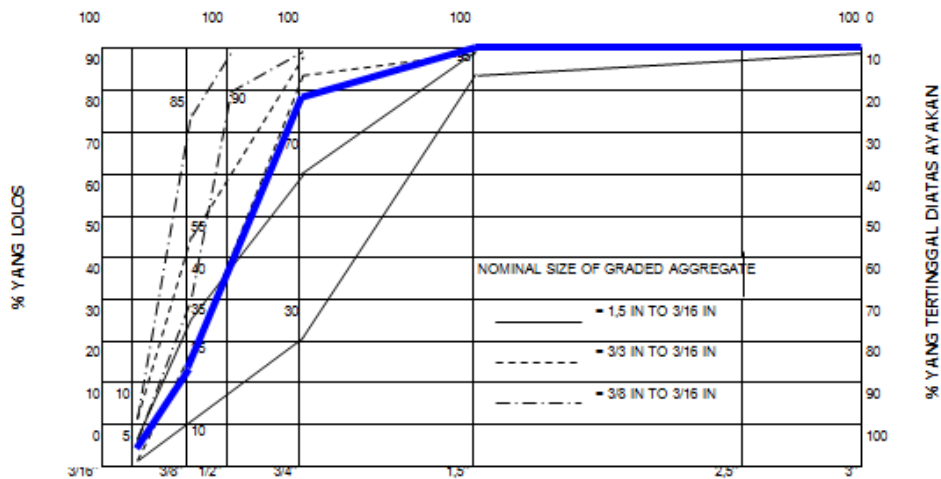
JENIS PERCOBAAN	DENGAN ROJOKAN	TANPA ROJOKAN
Berat silinder (w1)....kg	2,650	2,650
Berat silinder + batu pecah (w2).....kg	17,300	16,400
Berat batu pecah (w2-w1)....kg	14,650	13,750
Volume silinder(v)...liter (dm <sup>3</sup> )	10	10
Berat volume (w2-w1)/v.....kg/liter	1,465	1,375

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui berat jenis agregat kasar adalah 1.465 kg/dm<sup>3</sup> dengan rojokan, dan 1.375 kg/dm<sup>3</sup> tanpa rojokan.

**Tabel 16.** Analisa Ayakan Agregat Kasar

Lubang saringan		Kerikil		
		Tertinggal		
No.	Mm	gram	%	E %
3''	76,2	-	-	-
1,5''	38,1	-	-	-
3/4 ''	19,1	1200	30,69	30,69
3/8 ''	9,5	1455	37,21	67,9
4	4,76	500	12,78	80,68
8	2,38	-	-	-
16	1,19	-	-	-
30	0,59	-	-	-
50	0,297	-	-	-
Pan	0,000	755,5	19,32	100
Jumlah	3910	100%	664.55	





**Gambar 3.** Gradasi Agregat Kasar

Dari gambar 3, dapat dilihat bahwa hasil analisa gradasi batu pecah menunjukkan bahwa batu pecah ini masuk ke dalam zona 3/8 inch sampai 3/16 inch, dengan ukuran agregat maksimum 20mm

**Tabel 17.** Hasil Analisa Kandungan Kimia OPC

Komponen	Konsentrasi
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.3
SiO <sub>2</sub>	10.9
SO <sub>3</sub>	2.48
K <sub>2</sub> O	0.45
CaO	78.34
TiO <sub>2</sub>	0.44
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
MnO	0.072
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.77
CuO	0.076
ZnO	0.026
SrO	0.054
ZrO <sub>2</sub>	0.028
BaO	0.1

**Tabel 18.** Hasil Analisa Kandungan Kimia Silica Fume

<b>Komponen</b>	<b>Konsentrasi</b>
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.023
SiO <sub>2</sub>	91.1
SO <sub>3</sub>	1.3
K <sub>2</sub> O	3.28
CaO	2.3
TiO <sub>2</sub>	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
MnO	0.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37
CuO	0.11
ZnO	0.154
SrO	0.026
PbO <sub>2</sub>	0.054
BaO	0

**Tabel 19.** Hasil Analisa Kandungan Kimia Fly Ash

Komponen	Konsentrasi
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.7
SiO <sub>2</sub>	43.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.78
K <sub>2</sub> O	2.37
CaO	9.32
TiO <sub>2</sub>	1.44
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.079
MnO	0.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.6
CuO	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04
MoO <sub>3</sub>	3.01
PbO <sub>2</sub>	0.054
BaO	0.2

**Tabel 20.** Hasil Analisa Tarik Tulangan

Name	Yield Force	Yield Stress	Max Force	Max Stress
Units	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>
D 13 - 1	6353.47	47.8668	8890.65	66.9818
D 13 - 2	6413.06	48.3158	8883.96	66.9314
D 13 - 3	6343.27	47.79	8774.02	66.1031

### Lampiran 3. Hasil Pengujian

**Tabel 21.** Penambahan Massa Pengujian Absorpsi

TIME (MINUTES)	ADDITIONAL MASS (GRAMS)				
	NORMAL	15% FA	5% SF	10%FA + 5% SF	ECC
1	13.29	8.01	6.9	3.87	9.92
5	25.44	14.82	14.2	8.82	16.06
10	32.23	19.34	20.22	13.61	17.06
20	39.8	23.91	24.11	19.19	20.79
30	45	27.33	26.94	24.95	22.9
60	53.88	33.24	34.14	33.22	28.87
120	63.52	41.09	44.7	41.24	31.57
180	69.66	45.22	46.12	48.5	35.71
240	74.49	49.09	50.15	54.89	38.28
300	78.8	51.92	53.24	57.8	41.18
360	81.9	54.17	56.08	64.12	45.06
1800	113.59	82.58	85.67	88.19	51.32
3240	120.38	92.06	96.73	94.46	60.56
4680	124.24	96.69	99.15	98.64	66.55
6120	130.95	99.4	102.45	101.67	69.45
7560	133.24	103.96	107.54	105.73	74.08
9000	133.24	103.96	107.54	105.73	77.46
10440	133.24	103.96	107.54	105.73	77.46

**Tabel 22.** Nilai *Initial dan Secondary Absorption* (Sorptivitas)

Sample Code	Sample Dimension (mm)		Sample Weight (gram)		Initial Absorption		Secondary Absorption	
	Diameter (cm)	Height (cm)	Before Test (gr)	After 6hr Absorption (gr)	mm/s <sup>1/2</sup>	mm/min <sup>1/2</sup>	mm/s <sup>1/2</sup>	mm/min <sup>1/2</sup>
N1	10.07	6.635	1240.29	1266.81	0.074	0.577	0.477	3.691
N2	10.07	6.63	1136.17	1161.53	0.085	0.656	0.425	3.295
N3	10.07	6.7	1192.49	1222.51	0.087	0.676	0.468	3.626
FA1	10.11	7.05	1254.29	1275.12	0.064	0.495	0.383	2.969
FA2	10.11	6.15	1114.88	1134.20	0.067	0.522	0.378	2.926
FA3	10.11	6.635	1229.29	1243.31	0.064	0.496	0.293	2.272
SF1	10.03	6.8	1278.60	1298.70	0.064	0.495	0.397	3.077
SF2	10.03	6.7	1118.40	1143.50	0.084	0.654	0.441	3.419
SF3	10.03	6.5	1217.10	1236.60	0.067	0.516	0.369	2.861
SA1	9.96	6.65	1246.30	1267.47	0.055	0.423	0.371	2.874
SA2	9.96	6.55	1150.70	1172.81	0.060	0.461	0.380	2.945
SA3	9.96	6.22	1087.10	1107.94	0.093	0.721	0.397	3.075
ECC1	10.02	6.4	962.55	978.13	0.062	0.482	0.199	1.541
ECC2	10.02	6.9	1129.50	1142.80	0.057	0.443	0.142	1.101
ECC3	10.02	6.7	986.94	1003.12	0.051	0.392	0.201	1.558

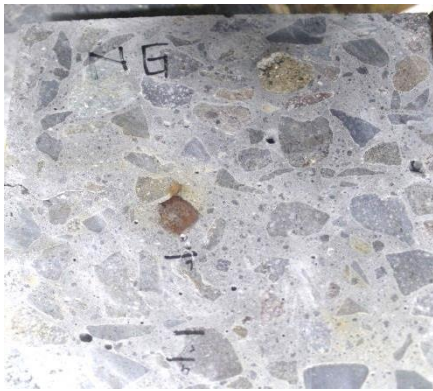
**Tabel 23. Rekap Pengamatan Lebar Retak**

Normal		Silica Fume 5%	Fly Ash 15%	SF 5% + FA 10%	ECC	
Day	Crack Width (mm)	Crack Width (mm)	Crack Width (mm)	Crack Width (mm)	Day	Crack Width (mm)
3	0	0	0	0	3	0
6	0	0	0	0	16	0
16	0	0	0	0	25	0
25	0	0	0	0	35	0
32	0	0	0	0	47	0
40	0.357	0.154	0.074	0.127	58	0.201
43	0.719	0.268	0.262	0.254	61	0.374
46	1.25	0.612	0.578	0.596	64	0.412
48	1.78	0.924	0.867	0.912	67	0.447
51	2.123	1.254	1.231	1.248	70	0.598

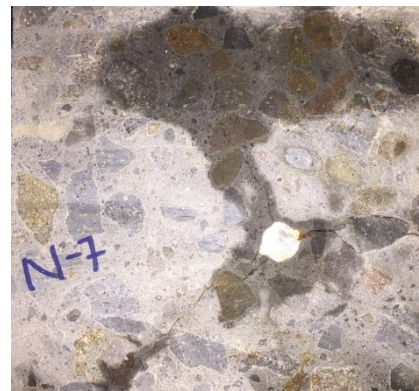
**Tabel 24. Rekap Kehilangan Massa Tulangan**

Normal		Silica Fume 5%	Fly Ash 15%	SF 5% + FA 10%	ECC	
Day	Weight Loss (Grams)	Weight Loss (Grams)	Weight Loss (Grams)	Weight Loss (Grams)	Day	Weight Loss (Grams)
3	1.12	0.92	0.67	0.87	3	0.17
6	2.09	1.79	1.72	1.74	16	3.23
16	5.46	5.16	4.76	5.08	25	6.43
25	10.24	9.21	7.74	8.31	35	8.12
32	13.57	13.52	12.56	13.05	47	9.54
40	18.08	15.18	14.37	14.97	58	13.42
43	20.12	19.06	17.24	18.69	61	15.11
46	21.01	19.54	18.48	18.67	64	16.12
48	22.78	20.64	19.54	20.14	67	17.34
51	23.42	22.06	21.43	21.56	70	19.18

Lampiran 4. Gambar Pola Retak



a



b



c



d

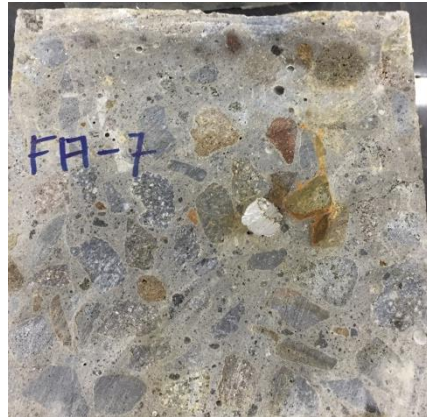


e

**Gambar 4.** Pola Retak Pada Beton Normal di Hari ke- (a) 40, (b) 43, (c) 46, (d) 48, (e) 51



a



b



c



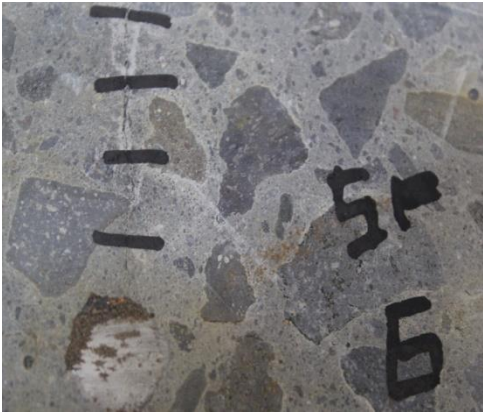
d



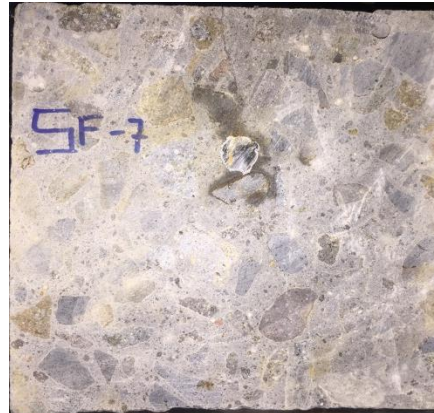
e

**Gambar 5.** Pola Retak Pada Beton dengan 15% *Fly Ash* di Hari ke- (a) 40, (b) 43, (c) 46, (d) 48, (e) 51





a



b



c



d

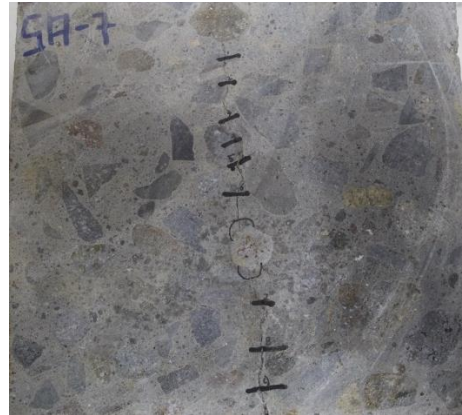


e

**Gambar 6.** Pola Retak Pada Beton dengan 5% *Silica Fume* di Hari ke- (a) 40, (b) 43, (c) 46, (d) 48, (e) 51



a



b



c



d

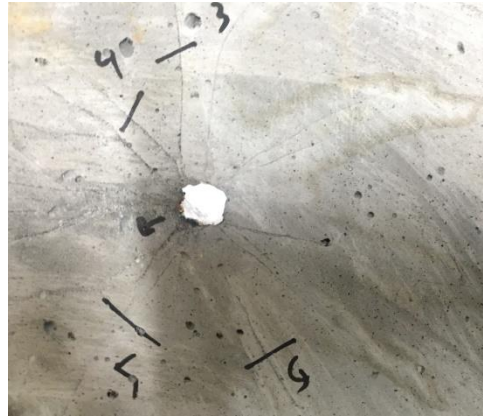


e

**Gambar 7.** Pola Retak Pada Beton dengan 5% *Silica Fume* + 10% *Fly Ash* di Hari ke- (a) 40, (b) 43, (c) 46, (d) 48, (e) 51



a



b



c



d



e

**Gambar 8.** Pola Retak Pada ECC di Hari ke- (a) 58, (b) 61, (c) 64, (d) 67, (e) 70

Lampiran 5. Gambar Proses Pengerjaan dan Penelitian



**Gambar 9.** Pengambilan Material di PT. Merak Jaya Beton



**Gambar 10.** Persiapan Agregat



**Gambar 11.** Proses Pengecoran



**Gambar 12.** Pengecoran ECC Menggunakan Mixer Khusus



**Gambar 13.** Pengecekan Slump Flow ECC



**Gambar 14.** Penimbangan Sample Uji Absorpsi



**Gambar 15.** Pemberian Tulangan Pada Beton Segar Sampel Galvanostatik



**Gambar 16.** Curing Beton Sample Galvanostatik