



TESIS - RC5401

INVESTIGASI PENGARUH PRE-CRACK PADA KAPASITAS LENTUR BALOK ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC) TERKOROSI

WINDA NUR OKTAVIANI
03111750020005

DOSEN PEMIMBING
Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S., Ph.D.
Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.

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

“halaman ini sengaja dikosongkan”

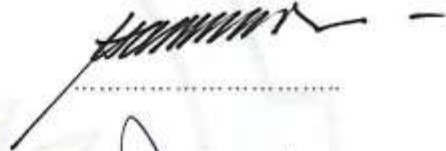
LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh ;
Winda Nur Oktaviani
NRP: 03111750020005

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



Penguji:

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



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



Kepala Departemen Teknik Sipil
Perencanaan dan Kebumihan



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

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: “**Investigasi Pengaruh Pre-crack pada Kapasitas Lentur Balok Engineered Cementitious Composite (ECC) Terkorosi**” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulis untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

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

Surabaya, Januari 2020



Winda Nur Oktaviani

NRP: 03111750020005

INVESTIGASI PENGARUH PRE-CRACK PADA KAPASITAS LENTUR BALOK *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* (ECC) TERKOROSI

Nama Mahasiswa : Winda Nur Oktaviani
NRP : 03111750020005
Dosen Konsultasi : Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.
Ir. Faimun, MSc., Ph.D.

ABSTRAK

Keretakan pada beton bertulang selama masa umur layan tidak dapat dihindari dan terjadi kerana beberapa alasan seperti melebihi kapasitas beban sehingga menghasilkan retak lentur pada elemen struktur. Retak pada beton bertulang terutama saat beton bertulang digunakan di daerah laut atau pantai akan memberi jalan zat agresif untuk mencapai tulangan sehingga mempercepat terjadinya korosi pada tulangan. Untuk mengatasi permasalahan ini, dilakukan penelitian tentang *Engineered Cementitious Composite* (ECC) dengan membandingkan kapasitas lentur sebelum dan sesudah korosi dengan beton bertulang konvensional (NC) dan beton bertulang menggunakan *supplementary material* yaitu fly ash (SMFA).

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah balok ukuran 100 mm X 200 mm X 2000 mm. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji *four point bending* untuk pengujian lentur dan *pre-crack*. Untuk percepatan korosi menggunakan metode galvanostatik dengan balok *pre-crack* direndam pada larutan NaCl 5% ditambahkan arus listrik 0,3 A selama 30 hari atau 1 bulan. Semua benda uji *dimoist curing* terlebih dahulu selama 28 hari. Mutu beton untuk balok NC dan SMFA yang digunakan adalah 50 MPa. Sedangkan mutu beton ECC adalah 45 MPa dengan kandungan fly ash 16% dari berat total semen. Dari hasil penelitian didapatkan *pre-crack* pada balok korosi sangat mempengaruhi laju korosi. Pada saat korosi, retak hasil *pre-crack* semakin membesar pada balok sehingga mempercepat jalannya proses korosi. Laju korosi terbesar ada pada balok NC dengan 5,311 mm/year untuk tulangan utama dan 7,150 mm/year untuk sengkang, balok SMFA dengan 2,529 mm/year untuk tulangan utama dan 3,452 mm/year untuk sengkang, dan balok ECC dengan laju korosi terkecil yaitu 1,366 mm/year untuk tulangan utama dan 1,787 mm/year untuk sengkang. Semakin besar laju korosi maka akan semakin banyak pengurangan luasan tulangan beton sehingga berdampak pada berkurangnya kapasitas lentur balok. Pada penelitian ini didapatkan penurunan kapasitas lentur balok NC sebesar 8,8% dari balok kontrol (sebelum korosi), balok SMFA sebesar 4,87% dari balok kontrol (sebelum korosi) dan balok ECC sebesar 1,69% dari balok kontrol (sebelum korosi). Pola retak sebelum dan sesudah korosi memiliki persamaan yaitu semua benda uji dominan retak lentur. Pada balok kontrol (sebelum korosi) dan sesudah korosi balok NC dan SMFA terdapat *crushing* pada sisi tekan sebelum balok mengalami keruntuhan. Sedangkan balok kontrol (sebelum korosi) dan sesudah korosi balok ECC tidak ditemukan *crushing* hingga balok runtuh. Lebar retak rata-rata balok kontrol (sebelum korosi) NC adalah 0,655mm, balok kontrol (sebelum korosi) SMFA adalah 0,600 mm, balok kontrol (sebelum korosi) ECC adalah 0,208 mm. Hasil lebar retak balok kontrol (tidak korosi) mendekati lebar retak teoritis ACI 318-95 dengan nilai sebesar 0,660 mm. Lebar retak rata-rata balok korosi NC adalah 0,9054mm, balok korosi SMFA adalah 0,8762 mm, balok korosi ECC adalah 0,4076 mm.

Kata kunci: Beton Konvensional, Beton *Supplementary Material*, *Engineered Cementitious Composite* (ECC), *Pre-crack*, Laju korosi, Kapasitas Lentur.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

INVESTIGATION EFFECT OF PRE-CRACK ON FLEXURAL CAPACITY OF CORRODED ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC) BEAM

Name : Winda Nur Oktaviani
NRP : 03111750020005
Consultation Lecturer : Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.
Ir. Faimun, MSc., Ph.D.

ABSTRACT

Cracks in reinforced concrete during the service life can occur and can not be avoided for several reasons such as exceeding load capacity so as to produce flexural cracks on structural elements. Cracks in reinforced concrete, especially for concrete exposed to marine environment will accelerate the ingress of aggressive ion such as chloride and sulphate. To overcome this problem, this research focused on application of Engineered Cementitious Composite (ECC) to enhanced the properties of concrete against chloride penetration. This research will comparing flexural capacity of ECC beam with conventional reinforced concrete (NC) and reinforced concrete using supplementary material using fly ash (SMFA).

The specimen used in this research was the beam with size of 100 mm X 200 mm X 2000 mm. The beam was pre-cracked with four point bending scheme before exposed with chloride. To accelerate corrosion process, the galvanostatic method was performed using 5% NaCl solution added electrical current 0,3 A for 30 days or 1 month. All test specimens were first cured for 28 days. The compressive strength for NC and SMFA beams used is 50 MPa. While the compressive strength of ECC with 16% fly ash content of the total weight of cement is 45 MPa. From the results of this research, it was found that the pre-crack on the corrosion beam greatly affected the corrosion rate. The width of existing crack from pre-crack increase as the exposure time increase resulting accelerated corrosion process. From experimental test it was found that the largest corrosion rate is on NC beams with 5,311 mm/year for main reinforcement and 7,150 mm/year for stirrups, SMFA beams with 2,529 mm/year for main reinforcement and 3,452 mm / year for stirrups, and ECC beams with the smallest corrosion rate of 1,366 mm / year for main reinforcement and 1,787 mm / year for stirrups. The greater the corrosion rate will reduce the area of the concrete reinforcement affect flexural capacity of beam. In this research, it was found that the NC beam's reduction capacity was 8,8% from the control beam (before corrosion), the SMFA beam by 4,87% from the control beam (before corrosion) and the ECC beam by 1,69% from the control beam (before corrosion). In the control beam (before corrosion) and after corrosion NC and SMFA beams there is crushing on the compression side before the beam has collapsed. While the control beam (before corrosion) and after corrosion of the ECC beam there was no crushing at the compression side until the beam collapsed. The average crack width for NC, SMFA and ECC before corrosion test was 0,655 mm; 0,600 mm and 0,208 respectively. The results of the crack width control beam (non-corrosion) with approach the theoretical according ACI 318-95 is 0,660 mm. This result has a good fit with the experimental test before corrosion. The average crack width for NC, SMFA and ECC after corrosion test was 0,9054 mm; 0,8762 mm and 0,4076 respectively.

Keyword: Conventional Concrete, Supplementary Material Concrete, *Engineered Cementitious Composite* (ECC), Pre-crack, Corrosion Rate, Flexural Capacity

“halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan berkatNya serta yang telah memberikan kekuatan hingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari jika keberhasilan dalam menyelesaikan tesis ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan dorongan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada yang terhormat:

1. Bapak Prof. Ir. Priyo Suprobo MS., Ph.D dan Bapak Ir. Faimun, MSc., Ph.D selaku dosen konsultasi yang telah banyak membantu dan membimbing penulis dalam penyusunan laporan tesis ini.
2. Bapak Dr. Ir. Djoko Irawan, MS. Selaku dosen wali.
3. Bapak Dr.techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc., selaku kepala departemen jurusan Teknik Sipil FTSPK – ITS.
4. Bapak Ir. I Putu Artama Wiguna, M.T, Ph.D, selaku ketua pasca sarjana jurusan Teknik Sipil FTSPK – ITS.
5. Dosen Teknik Sipil ITS atas semua ilmu yang telah diberikan dan tidak lelah mendidik kami sebagai mahasiswa Teknik Sipil ITS.
6. Bapak Dr. Asdam Tambusay, ST. dan Ibu Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, ST. yang telah banyak membantu memberi masukkan penulis dalam penyusunan laporan tesis ini.
7. Keluarga dan teman-teman yang telah memberikan semangat, dukungan, dan bantuan ketika penulis menghadapi permasalahan sehingga dapat menemukan solusi atas permasalahan yang dihadapi.

Penulis menyadari bahwa tesis yang dikerjakan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu penulis menerima dengan tangan terbuka segala saran dan usul ke arah perbaikan. Akhir kata semoga tesis ini bermanfaat bagi pembaca khususnya bagi mahasiswa/i Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Januari 2020

(Penulis)

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Retak Beton Bertulang	7
2.2. Korosi Beton Bertulang	10
2.3. Engineered Cementious Composite (ECC).....	13
2.4. Kapasitas Lentur.....	16
2.5. Metode Percepatan Korosi	19
2.5. Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1. Alur Penelitian.....	31
3.2. Studi Literatur.....	33
3.3. Perencanaan Benda Uji	33
3.4. Perhitungan Section Analysis.....	35
3.5. Material	42
3.6. Pengujian Material	43
3.7. Pembuatan Benda Uji.....	43
3.8. Pengujian Benda Uji.....	46
3.9. Pengujian Lentur	49
3.10. Balok Pre-crack	50
3.11. Metode Percepatan Korosi	51

BAB IV	HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA.....	53
4.1.	Material.....	53
4.1.1	Data Hasil Pengujian Material.....	53
4.1.1.1	Semen Portland.....	54
4.1.1.1.1	Pengujian Berat Jenis Semen Portland.....	54
4.1.1.2	Agregat Kasar.....	54
4.1.1.2.1	Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar.....	54
4.1.1.2.2	Pengujian Berat Volume Agregat Kasar.....	55
4.1.1.2.3	Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar.....	56
4.1.1.2.4	Pengujian Susunan Gradasi Agregat Kasar.....	57
4.1.1.3	Agregat Halus.....	58
4.1.1.3.1	Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus.....	58
4.1.1.3.2	Pengujian Berat Volume Agregat Halus.....	59
4.1.1.3.3	Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus.....	60
4.1.1.3.4	Pengujian Susunan Gradasi Agregat Halus.....	61
4.1.1.4	Fly Ash.....	56
4.1.1.4.1	Hasil Analisa X-ray Fluorence (XRF) Fly Ash.....	62
4.2.	Campuran Beton Konvensional (NC), Beton dengan Supplementary Material menggunakan Fly ash (SMFA), dan Engineered Cementitious Composite (ECC).....	63
4.3.	Kuat Tekan.....	67
4.4.	Kuat Tarik.....	70
4.4.1	Kuat Tarik Baja Tulangan.....	70
4.4.2	Kuat Tarik ECC.....	71
4.5.	Korosi pada Balok.....	73
4.6.	Kapasitas Lentur.....	83
4.6.1	Kapasitas Lentur Balok Kontrol (Tidak Ada Korosi).....	83
4.6.2	Kapasitas Lentur Balok Korosi.....	89
4.7.	Pola Retak.....	93
4.7.1	Pola Retak Balok Kontrol (Tidak Ada Korosi).....	93
4.7.2	Pola Retak Balok Korosi.....	100
BAB V	PENUTUP.....	105

DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN	115

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Retak Lentur Beton Bertulang.....	8
Gambar 2.2.	Studi Lebar Retak Beton Bertulang.....	9
Gambar 2.3.	Mekanisme Korosi pada Tulangan dalam Beton (Broofield, 2007).....	10
Gambar 2.4.	Proses Korosi untuk Beton Bertulang	12
Gambar 2.5.	Response Daktail ECC pada Uji Lentur (Li, 2011).....	14
Gambar 2.6.	Kurva Tegangan-Regangan Tarik Tipikal dan Pengembangan Lebar Retak ECC (Li, 2008).....	15
Gambar 2.7.	Kuat Lentur ECC dengan Penggunaan Fly Ash 55% dan 70% (Hossain and Sherir, 2014).....	16
Gambar 2.8.	Hasil Penelitian Krishnaraja & Kandasamy (2017)	17
Gambar 2.9.	Hasil Penelitian Apriyanto (2009)	18
Gambar 2.10.	Benda Uji balok Penelitian Yuan, Ji & Shah (2007)	19
Gambar 2.11.	Pengaturan Metode Galvanostatik pada Penelitian Yuan, Ji & Shah (2007)	20
Gambar 2.12.	Hasil Percepatan Korosi korosi di (a) Balok OPCC-2 dan (b) Balok FGC-3 penelitian Maalej et al (2010)	21
Gambar 2.13.	Perluasan retak longitudinal yang diinduksi oleh korosi dari waktu ke waktu pada (a) balok mortar (MT), (b) mono HPFRCC (MF), (c) hibrid HPFRCC (HF) Shaikh et al (2015).....	26
Gambar 2.14.	Kehilangan baja dengan waktu pada (a) balok mortar retak (MT), (b) balok mono HPFRCC (MF) retak, (c) balok hibrid HPFRCC (HF) retak Shaikh et al (2015)	27
Gambar 2.15.	Balok Eksperimen Barrocal et al (2018)	28
Gambar 2.16.	Grafik hasil kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik belah balok Barrocal et al (2018).....	30
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3.2.	Lanjutan diagram alir penelitian.....	33
Gambar 3.3.	Lanjutan diagram alir penelitian.....	34
Gambar 3.4.	Penampang melintang balok.....	37
Gambar 3.5.	Set-up pengujian four point bending	49
Gambar 3.6.	Skema pembebanan four point bending beserta penempatan strain gauge dan LVDT	50
Gambar 3.7.	Skema pengujian percepatan korosi	52

Gambar 4.1.	Hasil ayakan agregat kasar.....	58
Gambar 4.2.	Hasil ayakan agregat halus.....	61
Gambar 4.3.	Benda uji ECC setelah uji tekan (Wang dan Li, 2006).....	69
Gambar 4.4.	Benda uji ECC setelah uji tekan.....	69
Gambar 4.5.	Grafik uji tarik dogbone ECC.....	71
Gambar 4.6.	<i>Set-up</i> pengujian <i>pre-crack</i>	74
Gambar 4.7.	Pola retak <i>pre-crack</i> balok NC.....	74
Gambar 4.8.	Pola retak <i>pre-crack</i> balok SMFA.....	74
Gambar 4.9.	Pola retak <i>pre-crack</i> balok ECC.....	74
Gambar 4.10.	Instalasi pengujian percepatan korosi.....	76
Gambar 4.11.	Balok NC korosi sisi kanan dan kiri minggu pertama.....	78
Gambar 4.12.	Balok NC korosi sisi kanan dan kiri minggu kedua.....	78
Gambar 4.13.	Balok NC korosi sisi kanan dan kiri minggu ketiga.....	78
Gambar 4.14.	Balok NC korosi sisi kanan dan kiri minggu keempat.....	78
Gambar 4.15.	Balok SMFA korosi sisi kanan dan kiri minggu pertama.....	79
Gambar 4.16.	Balok SMFA korosi sisi kanan dan kiri minggu kedua.....	79
Gambar 4.17.	Balok SMFA korosi sisi kanan dan kiri minggu ketiga.....	80
Gambar 4.18.	Balok SMFA korosi sisi kanan dan kiri minggu keempat.....	80
Gambar 4.19.	Balok ECC korosi sisi kanan dan kiri minggu pertama.....	80
Gambar 4.20.	Balok ECC korosi sisi kanan dan kiri minggu kedua.....	80
Gambar 4.21.	Balok ECC korosi sisi kanan dan kiri minggu ketiga.....	81
Gambar 4.22.	Balok ECC korosi sisi kanan dan kiri minggu keempat.....	81
Gambar 4.23.	Pengujian <i>four point bending</i> di PT Wijaya Karya Beton, Tbk.....	83
Gambar 4.24.	Hubungan <i>load-deflection</i> Balok Kontrol.....	84
Gambar 4.25.	Komparasi hubungan beton dan ECC (sruyanto et al, 2010).....	86
Gambar 4.26.	Hubungan beban dan regangan tulangan.....	89
Gambar 4.27.	Pengujian <i>four point bending</i> di ITS.....	90
Gambar 4.28.	Hubungan <i>load-displacement</i> balok terkorosi.....	90
Gambar 4.29.	Hubungan <i>load-displacement</i> balok kontrol dan balok terkorosi NC.....	92
Gambar 4.30.	Hubungan <i>load-displacement</i> balok kontrol dan balok terkorosi SMFA.....	93
Gambar 4.31.	Hubungan <i>load-displacement</i> balok kontrol dan balok terkorosi ECC.....	94

Gambar 4.32. Hubungan <i>load-displacement</i> balok kontrol dan balok terkorosi semua tipe beton	95
Gambar 4.33. Pola retak balok kontrol NC	96
Gambar 4.34. Pola retak balok kontrol SMFA	97
Gambar 4.35. Pola retak balok kontrol ECC	98
Gambar 4.36. Pola retak balok korosi NC	100
Gambar 4.37. Pola retak balok korosi SMFA	101
Gambar 4.38. Pola retak balok korosi ECC	102

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Lebar retak yang diizinkan menurut ACI 224.....	7
Tabel 2.2	Tipikal proporsi campuran ECC (Li, 2008)	15
Tabel 2.3	Hasil pengujian Ali & Khan (2017)	19
Tabel 2.4	Hasil pengujian Maalej et al (2003)	22
Tabel 2.5	Parameter mekanis serat karbon	24
Tabel 2.6	Hasil eksperimental (Wang et al, 2012)	24
Tabel 2.7	Ringkasan penelitian Barrocal et al (2018)	29
Tabel 3.1	Proporsi campuran ECC	35
Tabel 3.2	Hasil beban perhitungan manual dan response 2000	42
Tabel 3.3	Material dan spesifikasinya	42
Tabel 3.4	Peraturan pengujian material	43
Tabel 3.5	Kebutuhan benda uji	44
Tabel 3.6	Pengujian benda uji	46
Tabel 4.1	Material dan spesifikasinya	53
Tabel 4.2	Hasil pengujian berat jenis semen portland	54
Tabel 4.3	Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar	55
Tabel 4.4	Hasil pengujian berat volume agregat kasar	56
Tabel 4.5	Hasil pengujian kadar lumpur agregat kasar	57
Tabel 4.6	Hasil pengujian susunan gradasi agregat kasar	57
Tabel 4.7	Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus	59
Tabel 4.8	Hasil pengujian volume agregat halus	59
Tabel 4.9	Hasil pengujian kadar lumpur agregat halus	60
Tabel 4.10	Hasil pengujian susunan gradasi agregat halus	61
Tabel 4.11	Hasil analisa x-ray flourence (XRF) fly ash	62
Tabel 4.12	Nilai rata-rata SiO ₂ , Al ₂ O ₃ dan Fe ₂ O ₃ fly ash.....	62
Tabel 4.13	<i>Mix design</i> beton konvensional milik PT. Wijaya Karya Beton Tbk. berdasarkan SNI 03-2834-2002	63
Tabel 4.14	<i>Mix design</i> beton <i>supplementary material</i> milik PT. Wijaya Karya Beton Tbk. berdasarkan SNI 03-2834-2002	65
Tabel 4.15	Proporsi campuran beton NC, Beton SMFA dan ECC	67

Tabel 4.16	Hasil uji kuat tekan.....	68
Tabel 4.17	Hasil uji tulangan Ø8.....	70
Tabel 4.18	Hasil uji tulangan D10.....	70
Tabel 4.19	Ukuran lebar retak <i>pre-crack</i>	75
Tabel 4.20	Perhitungan mencari arus korosi.....	78
Tabel 4.21	Ukuran lebar retak setelah korosi.....	81
Tabel 4.22	Laju korosi balok NC, SMFA dan ECC.....	82
Tabel 4.23	Daktilitas balok kontrol NC, SMFA dan ECC.....	87
Tabel 4.24	Daktilitas balok korosi NC, SMFA dan ECC.....	91
Tabel 4.25	Hasil data perbandingan beton tidak korosi dan beton korosi.....	95
Tabel 4.26	Ukuran lebar retak balok NC.....	97
Tabel 4.27	Ukuran lebar retak balok SMFA.....	98
Tabel 4.28	Ukuran lebar retak balok ECC.....	99
Tabel 4.29	Ukuran lebar retak balok korosi NC.....	101
Tabel 4.30	Ukuran lebar retak balok korosi SMFA.....	102
Tabel 4.31	Ukuran lebar retak balok korosi ECC.....	102

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton sering dipakai dalam konstruksi bangunan. Beton merupakan material komposit yang terdiri dari agregat halus, agregat kasar, semen, air, dan dengan atau tanpa *admixture* (Chundley et al, 2008). Namun, beton masih memiliki keterbatasan, seperti kuat tarik yang rendah, daktilitas yang rendah dan memiliki keretakan dari pembebanan ataupun susut (Berrocal et al, 2018). Untuk meningkatkan kuat tarik pada beton ditambahkan tulangan yang memiliki kemampuan kuat tarik yang tinggi.

Keretakan pada struktur beton bertulang selama masa umur layan, tidak dapat dihindari dan terjadi karena beberapa alasan seperti melebihi kapasitas beban sehingga menghasilkan retak lentur pada elemen struktur. Apapun alasannya, retak pada beton bertulang terutama saat beton bertulang berada di daerah laut atau pesisir pantai akan memberi jalan zat agresif untuk mencapai tulangan dan mempercepat munculnya korosi dalam baja. Inisiasi dan perambatan korosi dipengaruhi lebar retak. Retak kurang dari 0,1-0,2 mm tidak memiliki dampak signifikan terhadap proses korosi (Negrutiu et al, 2019). Semakin besar retak yang terdapat pada beton bertulang maka akan semakin mempercepat korosi pada tulangan baja dan kegagalan pada beton bertulang (Li et al, 2017).

Korosi pada tulangan menimbulkan masalah serius saat masa layan dan durabilitas beton. Menurut ACI, durabilitas beton merupakan kemampuan bahan untuk menahan segala kondisi (pelapukan, serangan bahan kimia, abrasi dan kondisi layan lainnya). Korosi pada tulangan akan menghasilkan pengurangan kapasitas beban struktur dan penurunan deformasi pada masa layan (Negrutiu et al, 2019). Faktor yang menyebabkan hal tersebut yaitu korosi baja akan mengurangi luas penampang pada permukaan baja. Kapasitas tulangan untuk

menahan kuat tarik menurun karena kehilangan area penampang tersebut dan juga mengurangi lekatan antara baja dan beton.

Untuk mengurangi lebar retak pada beton untuk meminimalisir zat agresif masuk ke dalam beton, para peneliti menambahkan fiber kedalam beton atau biasa disebut *Fiber-Reinforced Concrete* (FRC) dimana retak terdistribusi dengan baik dan mengurangi lebar retak, akan tetapi daktilitasnya masih rendah (Shin et al, 2015). Selanjutnya para peneliti mengembangkan komposit semen yang diperkuat oleh fiber yang biasa disebut *high-performance fiber reinforced cementitious composite* (HPFRCC). HPFRCC telah menunjukkan menurunkan lebar retak dan dapat mendistribusikan retak mikro yang berasal dari penyebaran fiber sehingga dapat memberikan daktilitas yang lebih besar yang tidak didapat dari FRC.

Engineered Cementitious Composite (ECC) diperkenalkan oleh Victor Li pada tahun 1993 termasuk dalam kelas HPFRCC dengan materialnya terdiri dari semen, fly ash, silica sand, air, HRWR dan fiber dengan fraksi volume 2%. ECC adalah salah satu tipe bahan komposit semen dengan perkuatan serat dan memiliki daktilitas yang lebih besar dari beton bertulang. Penggunaan ECC dapat meningkatkan kapasitas lentur sebesar 12% daripada beton (Szerszen et al., 2007). Kemampuan bahan ECC untuk meregang umumnya lebih dari 3% dengan mempertahankan lebar kerekatakan sekitar 60 μm hingga kegagalan (Yang et al., 2011). ECC menunjukkan tingkat korosi baja lebih rendah daripada beton bertulang (Sahamaran, Li, & Andrade, 2008).

Penerapan ECC dalam balok menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan polimer yang diperkuat oleh fiber atau disebut *Fiber Reinforced Polymer* (FRP). Kegagalan *debonding* sering dijumpai pada elemen struktur dengan perkuatan FRP. Kegagalan *debonding* dipengaruhi oleh rambatan retak lentur, terutama pada elemen struktur yang hanya diberi perkuatan FRP pada sisi tarik mengakibatkan kemampuan perkuatan FRP terhadap balok beton tidak optimal (Lu et al, 2007). *Debonding* dimulai dari retak lentur yang dominan

kemudian merambat hingga ke ujung FRP (Teng et al, 2007). Maalej and Leong (2005) menempatkan ECC pada area tarik beton semen bertulang (RCC) untuk mengurangi *debonding* dari FRP. Didapatkan hasil dengan adanya ECC dapat meningkatkan kekuatan dan meminimalisir kehilangan kapasitas defleksi.

Maalej, Ahmed, & Paramasivam (2003) membandingkan perilaku lentur Balok Functionally-Graded Concrete (FGC) terdiri dari OPC+ *Ductail Fiber Reinforced Cementitious Composite* (DFRCC) dan balok konvensional (Ordinary Portland Cement (OPC)). DFRCC yang di temukan oleh JCI *committee* termasuk dalam kelas HPRCC sama seperti ECC yang ditemukan Victor Li. Pengujian dilakukan dengan cara balok diberikan *Pre-crack* sebesar 70% dari beban ultimate dengan lebar retak maksimum OPCC-2 sebesar 0,54 mm, FGC-2 sebesar 0,28 mm dan FGC-3 sebesar 0,30mm. Setelah itu dilakukan percepatan korosi menggunakan metode galvanostatik pada zona tarik OPCC menunjukkan kehilangan baja sekitar 10,1% dalam 83 hari. Dalam periode waktu yang sama, pada balok FGC kehilangan baja hanya sekitar 6,6%. Hal ini menunjukkan kapasitas beban dan defleksi pada balok bertulang lebih besar daripada balok FGC.

Menurut Pimanmas, & Maekawa (2001) penelitian dalam skala ekperimental (laboratorium) yang membahas pengaruh retak pada penurunan kapasitas lentur balok bertulang menggunakan asumsi yang paling mendasar mengikuti metodologi penelitian konvensional yaitu beton bertulang tidak memiliki cacat awal, sehingga benda uji disimpan sebaik mungkin untuk meminimalisir kerusakan asli yang tidak diinginkan. Sedangkan fakta dalam lapangan beton bertulang yang nyata hampir pasti memiliki cacat awal dan bisa mengalami kondisi pembebanan tidak merata. Oleh karena itu Pada skala ekperimental dilakukan *Pre-crack* untuk pendekatan kondisi beton dilapangan. *Pre-crack* disini adalah beton bertulang sengaja diberikan beban kurang dari beban ultimit.

Pada penelitian dilakukan investigasi efek *pre-crack* terhadap kapasitas lentur pada balok terkorosi beton bertulang (NC), beton dengan *supplementary material*

menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Metode percepatan korosi yang digunakan adalah metode galvanostatik, sehingga penelitian ini berjudul Investigasi Pengaruh *Pre-crack* pada Kapasitas Lentur Balok Terkorosi Menggunakan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan analisa uraian dalam latar belakang di atas, maka dapat dikemukakan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana efek *pre-cracking* terhadap laju korosi pada beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC)?
2. Bagaimana efek *pre-cracking* terhadap perubahan kapasitas lentur pada balok kontrol (sebelum korosi) dan balok korosi beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC)?
3. Bagaimana pola retak yang terjadi pada balok kontrol (sebelum korosi) dan sesudah korosi pada beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka dapat dikemukakan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis efek *pre-cracking* terhadap laju korosi pada beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).
2. Menganalisis efek *pre-cracking* terhadap perubahan kapasitas lentur pada balok kontrol (sebelum korosi) dan balok korosi beton konvensional (NC),

beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).

3. Menganalisis pola retak yang terjadi pada balok kontrol (sebelum korosi) dan sesudah korosi pada beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat pada tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Para perencana bidang konstruksi dapat menggunakan *Engineered Cementitious Composite* (ECC) sebagai bahan pertimbangan perencanaan struktur di lingkungan laut.
2. Sebagai referensi untuk pengembangan studi penelitian tentang *Engineered Cementitious Composite* (ECC) selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penulisan thesis ini adalah sebagai berikut:

1. Beton yang digunakan adalah beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).
2. Mutu beton untuk beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash dengan kandungan 15% dari berat total (SMFA) dengan adalah 50 Mpa.
3. Mutu beton untuk *Engineered Cementitious Composite* (ECC) adalah 45 MPa dengan kandungan fly ash 16% dari berat total.
4. Fly ash yang digunakan fly ash kelas F.
5. Penelitian ini menggunakan serat PVA (*Polyvinyl Alcohol Fiber*) RECS 15/ 8 mm untuk ECC.
6. Semen yang digunakan adalah OPC

7. Penelitian ini hanya menginvestigasi perilaku lentur menggunakan balok ukuran 100 X 200 X 2000 mm untuk balok kontrol (sebelum korosi) dan balok korosi beton konvensional (NC), beton dengan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).
8. Pengujian lentur menggunakan uji *four point bending*.
9. Penelitian ini menggunakan klorida (NaCl) sebesar 5% untuk pengujian percepatan korosi dengan metode galvanostatik.
10. Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium.

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Retak Beton Bertulang

Retak merupakan kerusakan yang sering ditemukan di beton bertulang. Salah satu penyebab keretakan pada beton bertulang adalah beban melebihi kapasitas elemen struktur. Menurut Thulasi et al (2018) retak dibagi dua yaitu retak structural dan retak non-structural. Retak structural merupakan retak yang terjadi akibat kontruksi salah, desain salah atau beban yang melebihi kapasitas elemen struktur. Retak struktur ini dapat membahayakan keselamatan bangunan. Selanjutnya retak non-structural merupakan retak yang berasal dari bahan bangunan dan tidak membahayakan keselamatan bangunan. Akan tetapi walaupun tidak membahayakan keselamatan bangunan, apabila tidak segera diperbaiki maka retak tersebut akan memberikan sedikit celah air untuk masuk ke dalam beton dan semakin lama air dapat menembus cover beton sampai pada tulangan sehingga menyebabkan korosi tulangan sehingga mempengaruhi stabilitas struktur dalam rangka panjang.

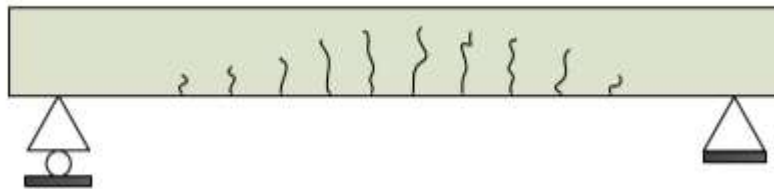
Menurut ACI 224-90, lebar retak maksimum yang diizinkan pada beton bertulang untuk bangunan tergantung dari lokasi, jenis struktur, permukaan beton, dan lain-lain. Lebar retak yang diizinkan dapat dilihat pada tabel. 2.1.

Tabel 2.1 Lebar Retak yang diizinkan menurut ACI 224-90

Bangunan yang bersentuhan dengan	Lebar retak yang diizinkan (in)
Udara kering	0,016
Udara lembap, tanah	0,012
Larutan bahan kimia	0,007
Air laut dan percikan air laut	0,006
Struktur penahan air	0,004

Salah satu pola retak struktur yang terdapat pada beton bertulang adalah retak lentur. Retak pada elemen struktur yang dapat dikategorikan retak lentur apabila memiliki pola vertikal/tegak dan biasanya retak ini disebabkan oleh beban yang

melebihi kapasitas elemen struktur. Elemen struktur seperti balok merupakan elemen struktur yang menanggung beban lateral dalam arah transversal yang menyebabkan terjadinya momen lentur dan gaya geser di sepanjang bentangnya. Pola retak lentur dapat dilihat pada gambar 2.1 terjadi karena kegagalan balok dalam menahan beban lentur sehingga terjadi pada daerah lapangan (tengah bentang), karena pada daerah ini timbul momen lentur paling besar.

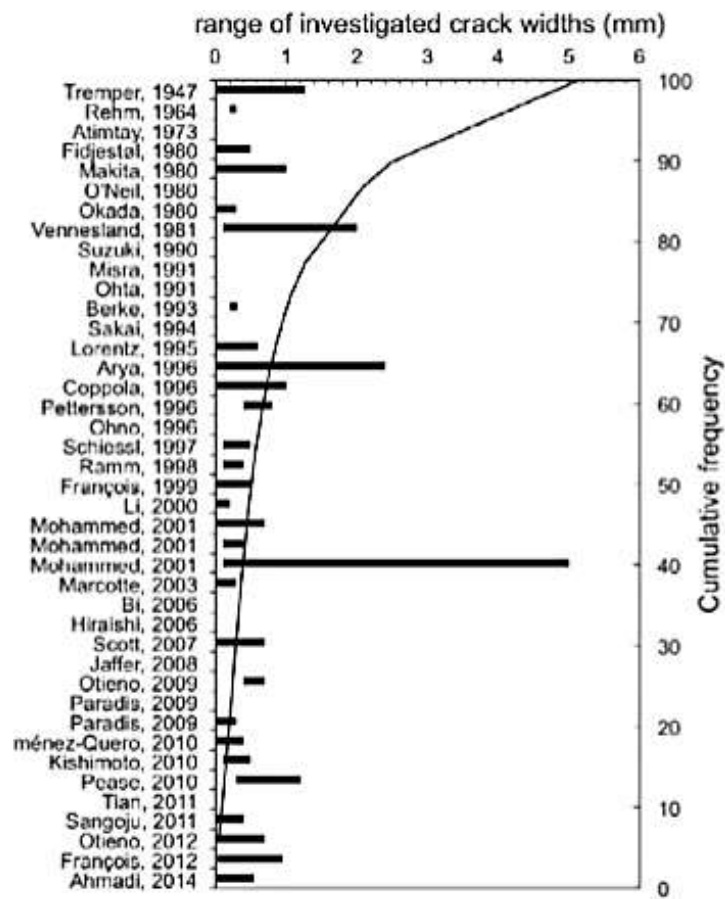


Gambar 2.1 Retak Lentur Beton Bertulang

Pembentukan retak pada beton bertulang terutama bangunan pada daerah laut akan mempengaruhi durabilitasnya dengan efek yang paling signifikan adalah *de-passivation* pada tulangan beton sehingga mengakibatkan korosi tulangan (Shaikh, 2018). *De-passivation* merupakan proses hilangnya lapisan pasif dari permukaan tulangan dimana lapisan pasif ini berguna untuk melindungi tulangan dari korosi. Akibat munculnya retak dalam beton memiliki dampak besar terhadap mekanisme korosi tulangan dalam struktur beton bertulang (Fu, Jin, Ye, Jin, & Dai, 2017). Keberadaan retak dan beban mekanis dapat mempercepat masuknya klorida, air dan oksigen ke beton. Saat tingkat korosi relative kecil (4%), maka korosi baja menunjukkan sedikit efek pada kapasitas beban lentur. Jika tingkat korosi meningkat maka cacat dan retak akan meningkat secara signifikan selama pembebanan, sehingga kapasitas beban lentur menurun bahkan terjadi kegagalan struktur (Dong, Zhao, Wang, & Jin, 2017).

Pada penelitian ekperimental untuk menghasilkan retak pada balok bertulang menggunakan metode *Pre-crack*. Metode *Pre-crack* adalah memberikan retak pada beton dengan memberikan beban dengan alat *third point bending* atau *four*

point bending hingga mendapatkan lebar retak yang diinginkan. Menurut Siad et al (2017) *pre-crack* pada beton dapat terjadi dengan memberikan beban sebesar 60% dari beban ultimit dengan hasil keretakan maksimum sebesar 0,3 mm. Menurut Shaikh (2018) Apabila lebar retak pada beton sudah mencapai 0,3 mm maka akan semakin memperlihatkan peningkatan korosi pada tulangan baja tersebut. 80% studi yang mempelajari keretakan beton menggunakan metode *pre-crack* menghasilkan retak di bawah 1 mm dan dalam kasus luar biasa bisa menghasilkan 5 mm (Käthler, Angst, Wagner, Larsen, & Elsener, 2017). Studi keretakan pada beton bertulang dapat dilihat di gambar 2.2.

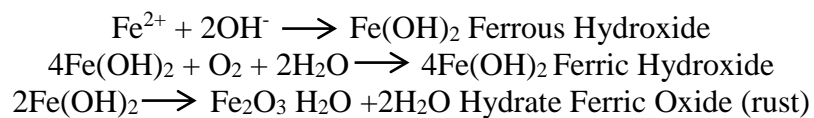
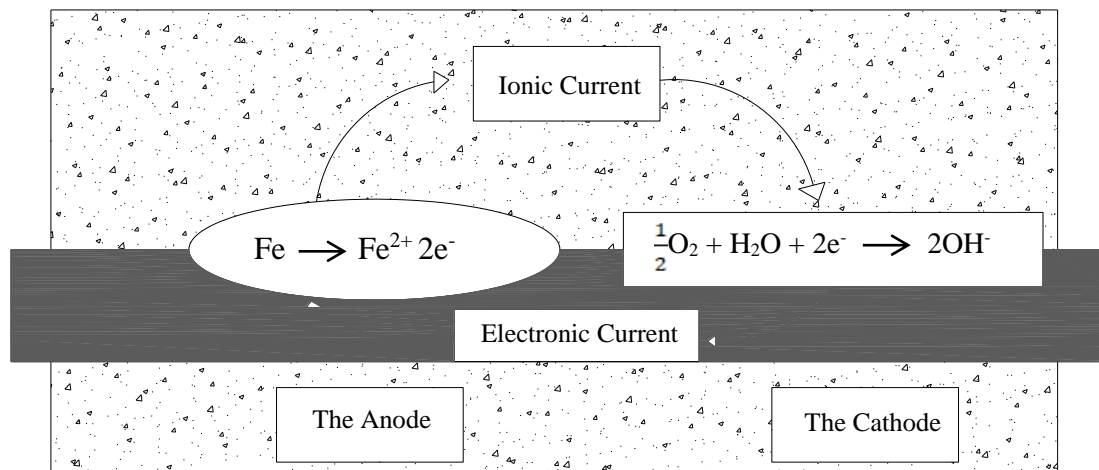


Gambar 2.2. Studi lebar retak beton bertulang (Käthler, Angst, Wagner, Larsen, & Elsener, 2017)

2.2 Korosi Beton Bertulang

Korosi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan structural dan mekanisme degradasi yang paling dominan pada struktur beton bertulang (Noh et al, 2018). Korosi adalah kerusakan material karena reaksi dengan lingkungannya (Afandi, Arief, & Amiadji, 2015). Korosi pada bangunan biasanya terjadi pada tulangan baja dalam beton.

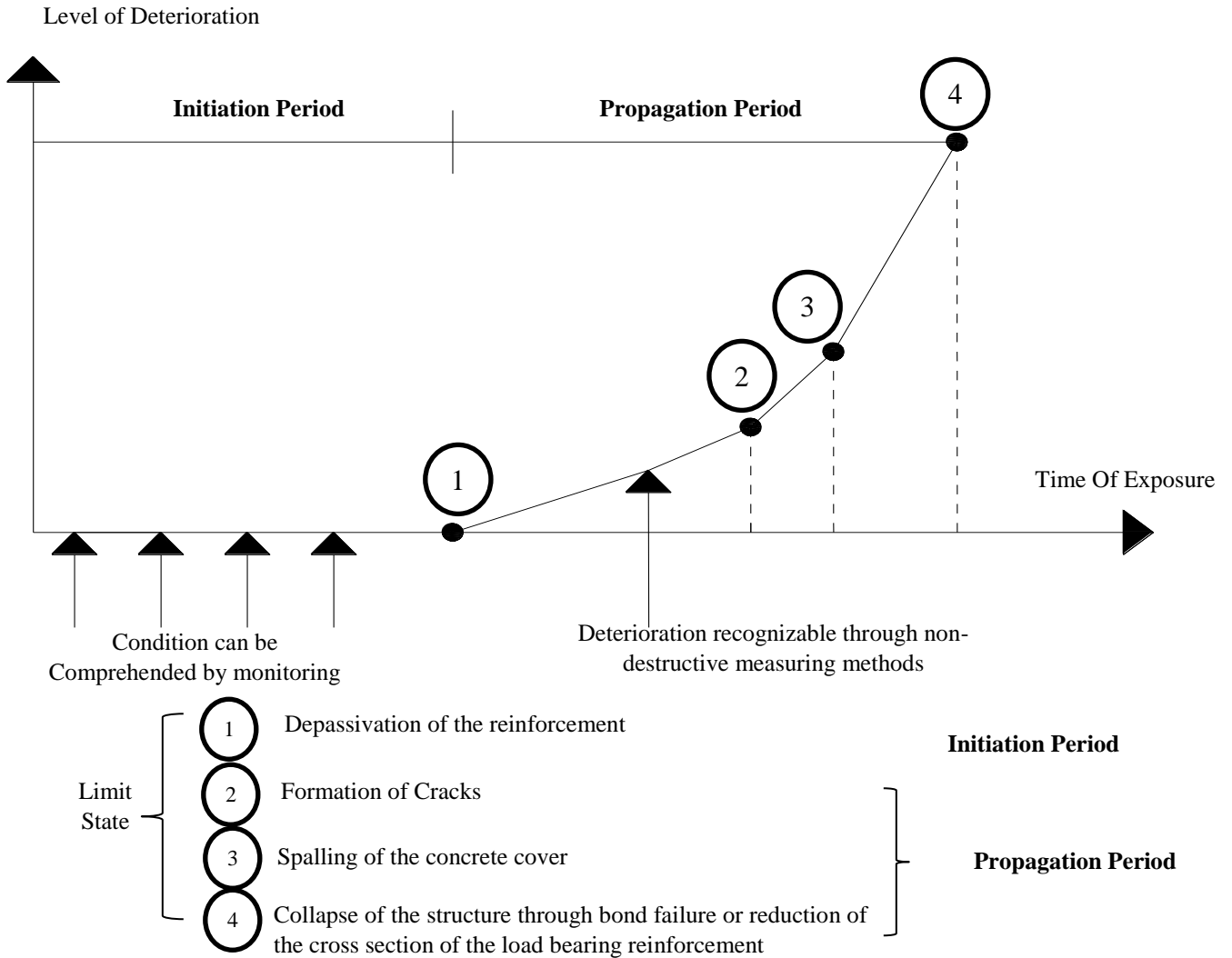
Broomfield (2007) menjelaskan mekanisme korosi pada permukaan tulangan baja beton bertulang. Korosi pada permukaan tulangan terjadi dimana lapisan pasif hilang akan menjadi anoda dari reaksi korosi tulangan. Elektron yang dilepaskan dari reaksi anoda menyebabkan gas O_2 dan air di atas permukaan baja yang masih tertutup oleh lapisan pasif bereaksi sehingga bagian tulangan baja ini menjadi katoda. Kedua ion yang terbentuk pada anoda dan katoda bergabung membentuk senyawa hasil korosi. $Fe(OH)_2$ sebagai bentuk awal senyawa hasil korosi akan berada di permukaan baja yang mengalami korosi. Jika konsentrasi O_2 tinggi, maka akan terbentuk $Fe(OH)_3$. Penjelasan ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Mekanisme Korosi Pada Tulangan Dalam Beton (Broomfield, 2007)

Efek langsung dari korosi adalah kehilangan penampang tulangan, Ekspansi volumerik produk korosi yang menghasilkan retak longitudinal pada selimut beton, dan perubahan pada antarmuka beton dan tulangan akibat pembentukan produk korosi (Cairns et al, 2008). Korosi pada tulangan beton akan mengurangi permukaan tulangan baja sehingga berpengaruh pada kapasitas tarik baja. Selain itu, hilangnya permukaan tulangan baja juga mempengaruhi kuat lekatan beton dan tulangan sehingga berkontribusi dalam pengurangan kekakuan dan daktilitas elemen struktur, dengan demikian akan berdampak juga pada kekuatan elemen struktur (Patil et al, 2017).

Proses terjadinya korosi dibagi menjadi dua periode, yaitu periode inisiasi dan periode propagansi (Pacheco & Polder, 2012) yang dapat dilihat pada gambar 2.4. Periode inisiasi merupakan waktu yang diperlukan hingga lapisan pasif pada beton bertulang dihilangkan oleh kandungan klorida (Cl^-) yang cukup tinggi hingga mencapai permukaan tulangan baja, dimana lapisan pasif berkurang dan menghilangkan fungsi perlindungan pada beton bertulang. Sedangkan Periode propagansi merupakan waktu baja terkorosi sehingga mengurangi bagian baja dan menyebabkan penurunan keamanan struktur. Korosi propagansi dibagi 2 jenis yaitu korosi setempat (*pitting*) dimana korosi ini hanya terjadi pada daerah tertentu dan korosi seragam dimana korosi terjadi pada seluruh permukaan tulangan. Produksi korosi yang terbentuk pada permukaan baja ini menghasilkan tegangan tarik yang mengarah ke retak, *spalling* dan akhirnya terjadi keruntuhan pada struktur.



Gambar 2.4. Proses korosi untuk beton bertulang
(Pacheco & Polder, 2012)

Korosi pada tulangan yang diinduksi klorida pada beton menunjukkan karakteristik *pitting*, yang dapat mengurangi kemampuan bantalan dan daktilitas struktur beton bertulang. Karat terbentuk di sekitar tulangan dapat menghasilkan tegangan tarik yang besar pada penutup beton di sekitarnya, menghasilkan retakan longitudinal dalam penutup beton dan degradasi lekatan baja-beton (Fu et al., 2017).

Rodriguez, Ortega, & Casal (1997) meneliti pengaruh korosi tulangan terhadap kapasitas lentur beton bertulang. Dari hasil penelitian kapasitas lentur balok mengalami penurunan sebesar 23% dengan tingkat korosi 14%. Mardani (2017) menemukan korosi pada baja tulangan mengakibatkan penurunan kapasitas lentur. Hasil penelitian menunjukkan dengan tingkat korosi 4,25 % terjadi penurunan kapasitas lentur sebesar 7,95%. Akbar (2017) juga melakukan dengan balok normal (tidak ada korosi) dengan balok bertulang terkorosi. Didapatkan hasil nilai penurunan kapasitas lentur dan lendutan adalah masing-masing 12,24 % dan 40,53 %. Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya korosi penurunan kapasitas lentur menjadi lebih besar dibandingkan balok yang tidak terkorosi.

El- Maaddawy et al (2005) melakukan penelitian tentang efek korosi pada beton retak. El- Maaddawy et al menemukan bahwa lebar retak pada beton korosi akan merambat 22% lebih cepat pada saat elemen struktur diberi beban. Kehilangan tulangan dan kapasitas juga diamati dalam penelitian ini. Kehilangan tulangan masing-masing balok sebesar 8,9% dan 22,2% dengan masing-masing penurunan kekuatan sebesar 6,4% dan 20%. Hal ini dikarenakan balok yang memiliki retak akan memberikan akses jalan yang lebih mudah pada hasil dari ion klorida dari air laut untuk masuk ke dalam tulangan baja sehingga mempercepat proses korosi di beton daripada yang beton tidak retak.

2.3 Engineered Cementitious Composite (ECC)

Engineered Cementitious Composite (ECC) yang ditemukan oleh Victor Li, dkk dari University of Michigan pada tahun 1993 termasuk dalam kelas *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)*. *Engineered Cementitious Composite (ECC)* adalah material komposit berbasis semen yang diperkuat dengan serat yang dirancang mikromekanis untuk mencapai toleransi kerusakan tinggi saat diberi beban dan durabilitas yang tinggi (Li, 2003).

Karakteristik yang paling penting antara ECC dan beton konvensional (NC) adalah ECC mampu mencapai regangan tarik 3% hingga 5% dengan lebar retak 100 μm tergantung pada campuran ECC tersebut (Zhang et al, 2011). Pembentukan retak-retak mikro menghasilkan regangan lebih dari 300 kali dari beton konvensional (Hasib, 2016). Retak-retak mikro ini memberikan peningkatan beban dan memungkinkan ECC untuk menunjukkan pengerasan regangan (*strain hardening*) yang mirip dengan daktilitas metal. Karakteristik pengerasan regangan (*strain hardening*) dapat dicapai karena material mikromekanis (semen, agregat halus, dan serat) (Li, 2003). Penggunaan rancangan mikromekanik pada material ECC akan memastikan pengerasan regangan (*strain hardening*) dapat meningkatkan response daktilitas ECC yang dapat dilihat pada gambar 2.5 (Li, 2008).



Gambar 2.5 Response daktail ECC pada uji lentur (Li, 2008)

Berbagai serat telah dicoba dalam ECC, tetapi serat PVA (*Polyvinyl Alcohol*) ditemukan paling efektif dan efisien untuk mencapai pengerasan regangan (*strain hardening*) setelah retak pertama (Weimann and Li, 2003). Tipikal proporsi

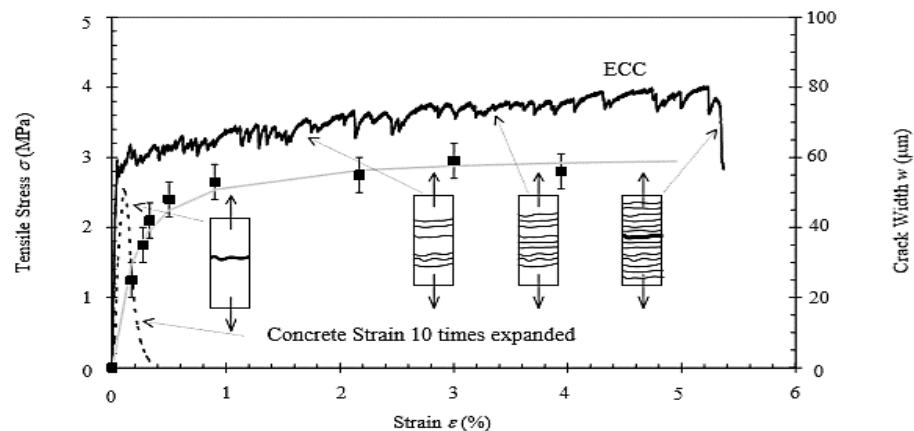
campuran ECC dari Victor Li (2008) menggunakan serat PVA dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tipikal proporsi campuran ECC (Li, 2008)

Semen	Air	Agregat halus	Fly ash	HRWR*	Fiber (Vol. %)
1.0	0,56	0,8	1.2	0,012	2

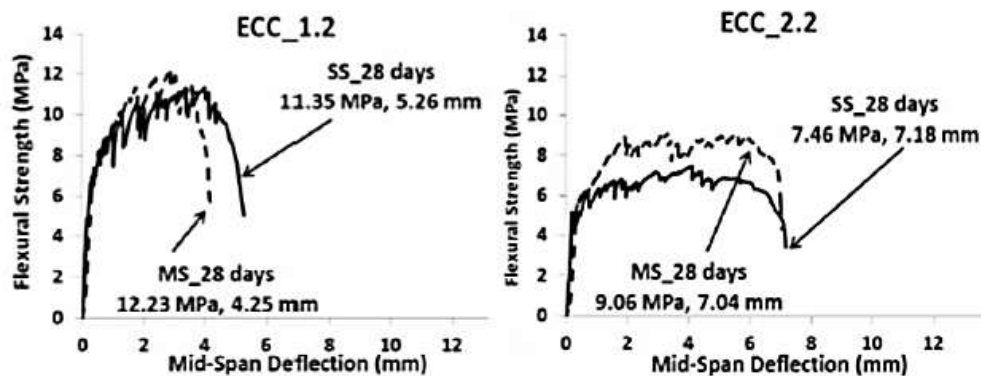
*HRWR : *High Range Water Reducer*; semua proporsi bahan berdasarkan berat kecuali fiber

Sebagian besar HPFRCC bergantung pada volume serat yang tinggi untuk mencapai kinerja yang tinggi tetapi ECC menggunakan jumlah yang rendah biasanya 2% dengan ukuran serat yang pendek-pendek yang memungkinkan fleksibilitas dalam pelaksanaan konstruksi (Hasib, 2016). Gambar 2.6. menunjukkan kurva tegangan-regangan tarik uniaksial khas ECC yang mengandung 2% serat PVA. Pengerasan regangan karakteristik setelah retak pertama disertai dengan beberapa retak mikro. Regangan maksimum adalah 5% dengan kuat tarik 4,9 MPa dan lebar retakan dibawah 80 μm . (Li, 2008) Lebar retak ECC penting untuk kemudahan melayani struktur ECC karena daktilitas tarik merupakan keamanan struktural pada kondisi batas akhir.



Gambar 2.6. Kurva Tegangan-Regangan Tarik Tipikal dan Pengembangan Lebar Retak ECC (Li, 2008)

Berdasarkan parameter desain campuran ECC, kuat lentur ECC bervariasi dari 5 hingga 16 MPa (Wang and Li, 2003). Menurut Hasib (2012) kuat lentur akan berkurang dengan meningkatkannya kadar fly ash yang digunakan. Hal ini dikarenakan berkurangnya kekerasan pada permukaan antara serat PVA dan mortar. Penggunaan agregat halus yang lebih besar tetap akan meningkatkan kuat lentur, akan tetapi daktilitasnya akan berkurang (Sherir et al, 2014). Gambar 2.7 menunjukkan tipikal kapasitas lentur ECC dengan penggunaan fly ash 55% dan 70%.

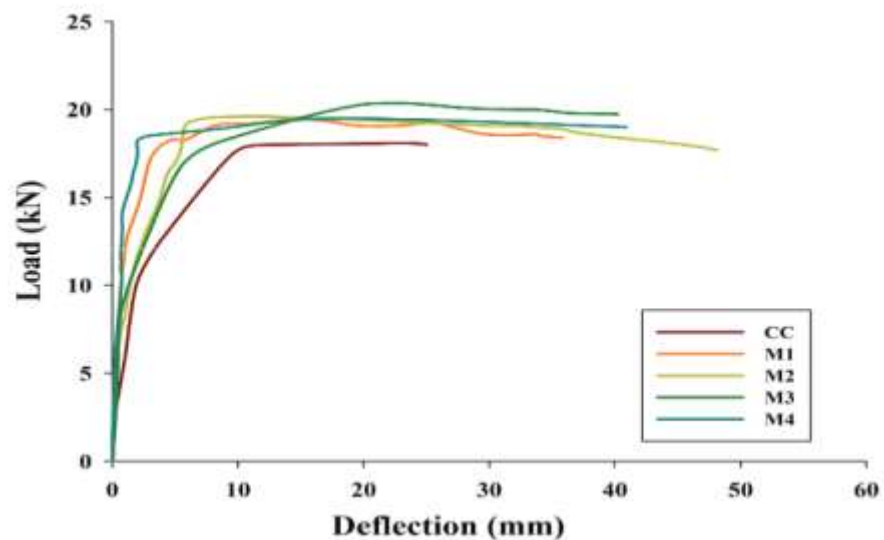


Gambar 2.7. Kuat lentur ECC dengan penggunaan fly ash 55% dan 70% (Sherir et al, 2014)

2.4 Kapasitas Lentur

Pemberian serat pada balok bertulang dengan menyebarkan secara merata dapat meningkatkan kuat lentur balok bertulang. Pada penelitian Swamy, dkk (1979) mendapatkan hasil bahwa serat pada balok bertulang akan menaikkan kekuatan dan meningkatkan daktilitas balok sehingga struktur dapat terhindar dari keruntuhan tiba-tiba yang disebabkan oleh pembebanan pada struktur yang berlebihan.

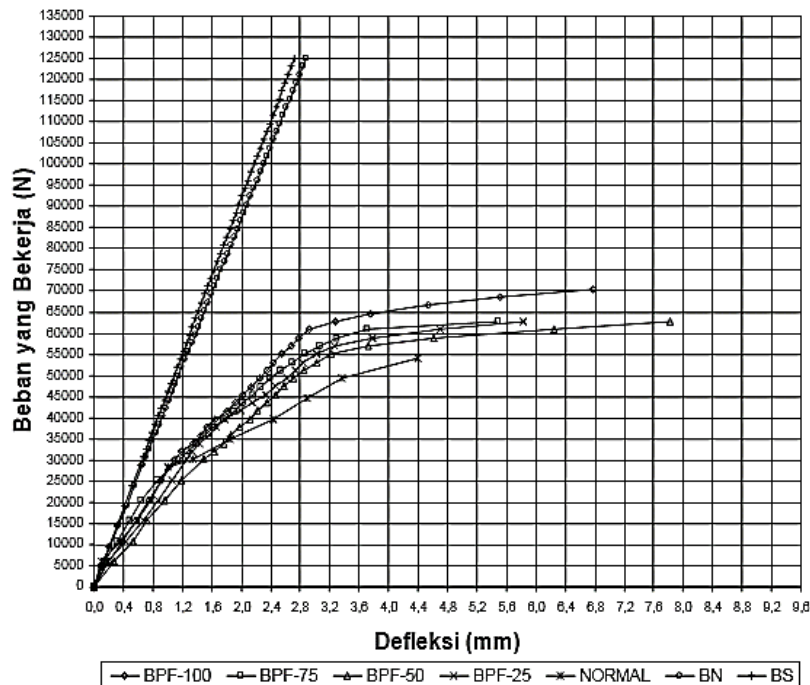
Engineered Cementitious Composite (ECC) merupakan material yang terdiri dari mortar dan fiber disebarkan secara merata dengan volume hingga 2% dapat meningkatkan kekuatan lentur lebih besar dibandingkan beton konvensional. Penelitian Krishnaraja & Kandasamy (2017) menggunakan benda uji balok dengan material M1 (ECC dengan serat *polyvinyl Alcohol* (PVA)), M2 (ECC dengan serat *polypropylene* (PP)), M3 (ECC dengan campuran serat PVA dan serat baja masing-masing 0,65% dan 1,35% fraksi volume), M4 (ECC dengan campuran serat PP dan serat baja masing-masing 0,65% dan 1,35% fraksi volume) dan beton konvensional. Pada penelitian tersebut didapatkan hasil kapasitas lentur ECC dengan campuran serat PVA dan serat baja lebih tinggi 1,12 kali dari beton konvensional, 1,05 kali dari M1, 1,04 kali dari M2 dan M4. Hasil penelitian Krishnaraja & Kandasamy (2017) dapat dilihat pada 2.8.



Gambar 2.8 Hasil Penelitian Krishnaraja & Kandasamy (2017)

Penelitian Apriyanto (2009) membandingkan kapasitas lentur beton normal dan beton yang dilapisi fiber *polypropylene*. Benda uji ada 3 balok beton normal (BN), 3 balok dengan lapisan beton bawah 25% selebihnya beton normal (BPF-25), 3 balok dengan lapisan beton bawah 50% selebihnya beton normal (BPF-50), 3 balok dengan lapisan beton bawah 75% selebihnya beton normal (BPF-75), dan

3 balok full fiber (BPF-100). Di dapatkan hasil bahwa menggunakan fiber pada balok bertulang dapat meningkatkan kapasitas lentur yaitu BPF-75 sebesar 28,99%, BPF-50 sebesar 21,06% dan BPF-25 sebesar 16,34% daripada kuat kapasitas lentur balok normal. Adapun peningkatan defleksi sebesar 22,6% untuk BPF-100, BPF-75, BPF-50, serta 9,7% untuk BPF-25 dibandingkan beton konvensional. Hasil penelitian Apriyanto dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Hasil Penelitian Apriyanto (2009)

Penelitian Ali & Khan (2017) menggunakan benda uji balok dengan ECC sebagai lapisan bawah balok. Pada penelitian ini menggunakan 2 benda uji balok dengan beton komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 75 mm, 2 benda uji balok dengan beton komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 100 mm, dan 2 balok Beton konvensional (NC) sebagai balok kontrol. Pada penelitian ini didapatkan bahwa rata-rata beban retak meningkat dengan meningkatnya ketebalan lapisan ECC di permukaan bawah beton. Apabila dibandingkan dengan balok kontrol, rata-rata peningkatan sebesar 32% dan 70% yang dapat diamati

saat beban retak pertama untuk tebal lapisan ECC 75 mm dan 100 mm. Beban leleh untuk lapisan ECC 75 mm dan 100 mm masing-masing meningkat sebesar 11% dan 19%. Selanjutnya beban ultimate balok komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 75 mm-1 dan balok komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 100 mm-1 mengalami peningkatan sebesar 9% dan 12 % dari balok control-2. Dengan demikian dapat disimpulkan daya dukung balok dapat meningkat dengan menambahkan lapisan ECC pada bagian bawah balok. Pada balok komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 75 mm dan balok komposit dengan tebal lapisan bawah ECC sebesar 100 mm didapatkan pula penurunan defleksi sebesar 42% dan 37% dibandingkan balok control. Hasil penelitian Ali & Khan (2017) dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hasil Pengujian (Ali & Khan, 2017)

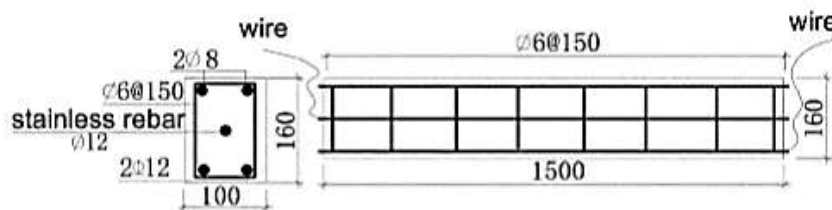
Tipe Balok	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)
RC Control Beam-1	55,19	107,21	137,57
RC Control Beam-2	56,12	96,20	116,71
RC ECC 75 Beam-1	74,06	118,35	127,61
RC ECC 75 Beam-2	72,65	108,04	114,25
RC ECC 100 Beam-1	94,32	125,73	130,65
RC ECC 100 Beam-2	94,56	115,89	120,57

2.5 Metode Percepatan Korosi

Pada umumnya proses korosi natural berlangsung secara lambat sehingga efek dari korosi tidak dapat diamati dalam waktu yang singkat. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang layak dalam waktu yang relative singkat, maka digunakan metode percepatan korosi (*accelerated corrosion*). Percepatan korosi digunakan untuk mensimulasikan mekanisme terjadinya korosi pada beton bertulang. Percepatan korosi ini tidak terbatas pada siklus alamiah seperti siklus basah-kering, tetapi dapat digunakan untuk mensimulasikan mendekati kondisi sebenarnya di lapangan pada beton bertulang di daerah laut terhadap korosi sehingga dapat memberikan hasil sifat korosif dari material tersebut.

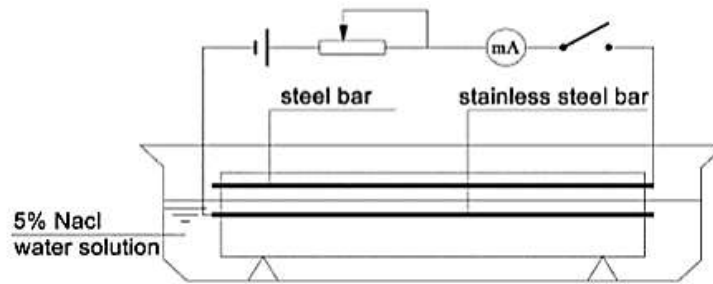
Metode galvanostatik merupakan salah satu metode yang dapat metode percepatan korosi tulangan baja dalam beton. Metode ini sering digunakan untuk mempelajari efek dari tingkat korosi pada struktural. Adapun cara kerja metode ini adalah dengan korosi pada tulangan diinduksi dengan memberikan aliran listrik pada tulangan dibeton sebagai anoda dan batang *stainless* sebagai katoda. Metode ini dapat mengontrol tingkat korosi dengan variasi arus dan atau selang waktu arus. Keuntungan dari metode ini yaitu dapat mencapai tingkat korosi yang tinggi dalam waktu singkat dan dapat mengontrol derajat korosi sesuai yang diinginkan.

Yuan, Ji, & Shah (2007) melakukan penelitian korosi dengan benda uji balok 100 x 160 x 1500 mm seperti gambar 2.10 menggunakan metode galvanostatik dengan menggunakan laurtan NaCl untuk mengetahui pengaruh korosi pada balok tersebut. Berdasarkan penelitian Yuan, Ji, & Shah (2007) didapatkan hasil bahwa metode galvanostatik seperti pada gambar 2.11 dapat digunakan dengan hasil korosi terjadi pada seluruh permukaan tulangan baja. Selanjutnya korosi batang baja utama pada balok dapat mengurangi kapasitas beban dan karakteristik getas dan dapat mentransfer mode kegagalan dari mode ulet ke getas.



Ket: Satuan pada gambar adalah mm.

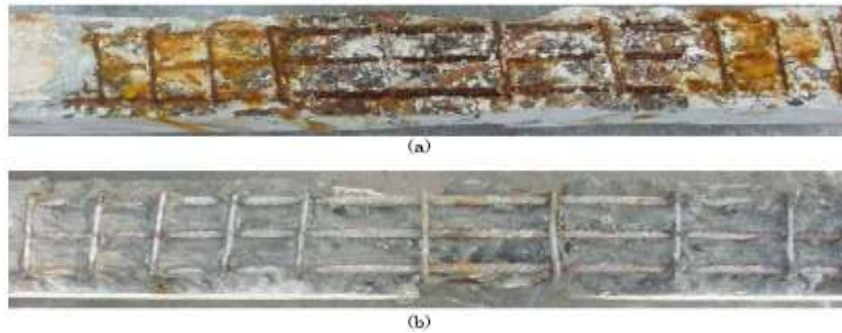
Gambar 2.10 Benda Uji Balok penelitian Yuan, Ji, & Shah (2007)



Gambar 2.11 Pengaturan metode galvanostatik pada penelitian Yuan, Ji, & Shah (2007)

Maalej et al. (2003) melakukan percepatan korosi pada balok ukuran 210 x 300 x 2500 mm dengan menggabungkan 2 metode yaitu siklus basah-kering (3,5 hari basah dan 3,5 hari kering) menggunakan 3% larutan NaCl dan galvanostatik dengan arus menggunakan potensial listrik tetap 8Volt yang anodanya diterapkan di tulangan bajada katoda menggunakan *wiremesh* berdiameter 3mm dengan ukuran sisi persegi 15mm. Benda uji menggunakan balok *Functionally-Graded Concrete* (FGC) sebanyak 3 buah (1 benda uji kontrol dan 2 benda uji korosi) dan balok konvensional (*Ordinary Portland Cement* (OPC)) sebanyak 2 buah (1 benda uji kontrol dan 1 benda uji korosi).

Dari penelitian Maalej et al. (2003) didapatkan spesimen menggunakan OPCC-2 mengalami massa kehilangan baja $\pm 10,1\%$ dalam 83 hari. Pada specimen beton dengan perkuatan fiber (FGC-2) mengalami massa kehilangan baja $\pm 6,6 \%$ dalam 83 hari. Sedangkan specimen beton dengan perkuatan fiber (FGC-3) memerlukan waktu 141 hari untuk mengalami massa kehilangan baja $\pm 10 \%$. Spesimen FGC-03 memerlukan waktu lama untuk mencapai tingkat yang sama dengan OOPC-2 dikarenakan permeabilitas FCG lebih rendah sehingga celah klorida yang masuk kedalam beton sangat sedikit. Hasil percepatan korosi penelitian Maalej et al. (2003) dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Hasil percepatan korosi di (a) Balok OPCC-2 dan (b) Balok FGC-3 penelitian (Maalej et al., 2003)

2.6 Penelitian Terdahulu

1. *Corrosion Durability and Structural Response of Functionally-Graded Concrete Beams* oleh Maalej et al. (2003)

Penelitian yang dilakukan oleh Maalej et al. (2003) membandingkan perilaku lentur Balok *Functionally-Graded Concrete* (FGC) balok konvensional (*Ordinary Portland Cement* (OPC)). Balok *Functionally-Graded Concrete* (FGC) merupakan gabungan dari *Ordinary Portland Cement* (OPC) ditambah material *Ductile Fibre Reinforced Comentitious Composite* (DFRCC). Bahan yang digunakan DFRCC adalah serat baja dan PVA dengan masing-masing volume fraksi 1% dan 1,5% serta Fly Ash kelas F digunakan sebagai 50% pengganti OPC. Benda uji yang digunakan balok ukuran 210 X 300 X 2500 mm. Tulangan memanjang terdiri dari 3-16 mm dalam zona tarik dan 2-13 mm dalam zona tekan. Pengujian dilakukan dengan cara balok diberikan *Pre-crack* sebesar 70% dari beban *ultimate* dengan lebar retak maksimum OPCC-2 sebesar 0,54 mm, FGC-2 sebesar 0,28 mm dan FGC-3 sebesar 0,30 mm. Setelah itu dilakukan penggabungan 2 metode korosi, pertama yaitu percepatan korosi dengan menggunakan galvanostatik dan selanjutnya menggunakan metode korosi *wet-dry cycle* (3,5 hari basah menggunakan air yang

mengandung 3% NaCl dan 3,5 hari kering). Hasil pengujian dapat dilihat di tabel 2.4.

Tabel 2.4 Hasil Pengujian (Maalej et al., 2003)

Specimen designation	Yield load (kN)	Peak load (kN)	Load at failure ^a		Deflection at failure ^a		Average corr. current (amps)		Steel loss ^b (%)	Chloride content (%)	pH value
			(kN)	% of control	(mm)	% of control	Wet cycle	Dry cycle			
OPCC-1	201.9	208.2	197.7	-	26.1	-	-	-	-	0.014	12.9
OPCC-2	167.1	181.1	171.4	87	21.1	91	1.06	0.07	10.1	0.46	11.6
FGC-1	234.7	239.6	226.3	-	29.8	-	-	-	-	0.01	12.7
FGC-2	224.4	227.0	215.6	95	29.8	100	0.81	0.05	6.6	0.09	12.1
FGC-3	207.6	213.0	202.0	89	28.0	94	0.65	0.03	10.0	0.14	11.9

Dari penelitian ini dapat disimpulkan hasil pengujian setelah dilakukan percepatan korosi pada zona tarik OPCC-2 menunjukkan kehilangan baja sekitar 10,1% dalam 83 hari. Dalam periode waktu yang sama, pada balok FGC kehilangan baja hanya sekitar 6,6%. Kandungan klorida pada pada OPC lebih besar yaitu 46% dibandingkan FGC sebesar 14%. Pada OPCC-2 mengalami penurunan kapasitas lentur sekitar 13% dan 9% untuk kapasitas defleksi. Pada GFC-2 mengalami penurunan kapasitas lentur sekitar 5%, tetapi kapasitas defleksi tidak ada pengaruh. Dilain sisi, FGC-3 mengalami penurunan kapasitas lentur sekitar 11% dan 6% untuk kapasitas defleksi. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan penurunan kapasitas beban dan defleksi pada balok konvensional lebih besar daripada balok FGC.

2. *The Flexural Performance of Pre-Damaged Reinforced Concrete Beam Strengthened With CFRP in Seawater Enviroment* oleh Wang et al. (2012)

Penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2015) membandingkan perilaku lentur balok bertulang pra-retak yang diperkuat dengan lapisan CFRP tanpa paparan air laut dan yang terpapar air laut selama 3 bulan, 5 bulan dan 7

bulan. Benda uji yang digunakan 5 balok ukuran lebar x tinggi x panjang adalah 140 X 180 X 1400 mm dengan tulangan utama 12 mm dan sengkang 6 mm dengan selimut beton 25 mm. Balok pertama yaitu P1-A-1 diuji four point bending dengan kenaikan beban tiap 5 kN selama 15 menit sampai runtuh hanya untuk mengetahui beban ultimate balok yaitu sebesar $P = 55$ kN. 4 Balok selanjutnya diberi *pre-crack* sebesar 55% dari beban ultimate. Selanjutnya 4 balok *pre-crack* (P1-B-2, P1-A-2, P1-A-3, P1-A-4) tersebut dilapisi lembaran serat karbon yang diberikan dibagian bawah sepanjang 1200 mm dengan lebar 140 mm. Diberi tambahan *U-Shaped hoop* di setiap ujung lembaran CFRP dengan lebar 100 mm dan tinggi 155 mm. Parameter mekanis dari serat karbon dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Parameter mekanis serat karbon

Thickness (mm)	Tensile Strength (Mpa)	Elastic Modulus (Gpa)	Elongation (%)	Density (g/m³)
0,167	4215,6	231,5	1,75	300

Setelah balok *pre-crack* dilapisi lembaran CFRP, tiga balok di masukan ke dalam ruangan untuk dilakukan *wet and dry* menggunakan air laut. Waktu korosi yang ditetapkan adalah 3 bulan untuk P1-A-2, 5 bulan untuk P1-A-3, dan 7 bulan P1-A-4. Sedangkan balok P1-B-2 tidak diberi paparan air laut. Setelah usia balok korosi tercapai dilakukan pengujian four point bending dengan kenaikan beban tiap 10 kN sampai beton runtuh. Hasil eksperimen Wang et al (2012) dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Hasil eksperimen (Wang et al, 2012)

Code of test beam	Maximum Crack Width (mm)	Number of cracks	Cracking Load (kN)	Yield Load of Steel Bar (kN)	Ultimate Load (kN)	Failure Mode
P1-A-1	2.0	9	15 – 20	55	55	C
P1-B-2	1.4	20	35.4	50	69.4	C
P1-A-2	1.6	14	40	50 – 60	75	C
P1-A-3	1.81	13	20	45	58.3	C

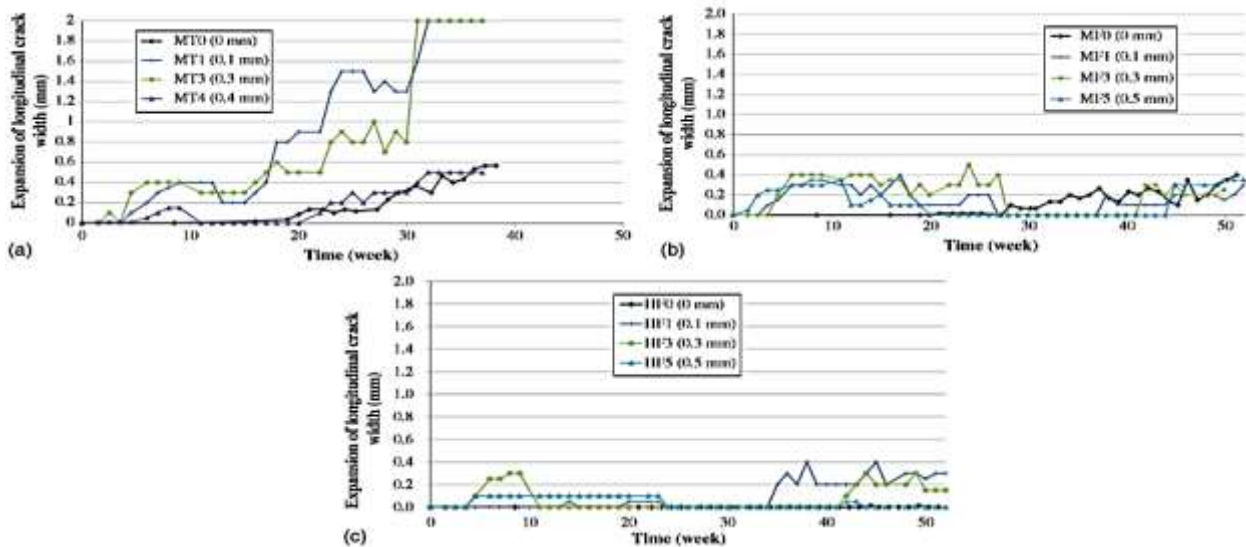
P1-A-4	2.1	11	20	40	45	C
---------------	-----	----	----	----	----	---

Tabel 2.6 menunjukkan hasil eksperimen dimana lebar retak balok P1-B-2 lebih kecil dibandingkan balok P1-A-1. Hal ini disebabkan lembar serat karbon dapat menahan perkembangan retak dan meningkatkan kekuatan balok. Sedangkan untuk balok yang terkena paparan air laut dengan perpanjangan waktu korosi, jumlah retak akan berkurang, tetapi lebar retak akan meningkat. Selanjutnya pada kapasitas lentur ditemukan balok P1-A-2 yang mengalami korosi selama 3 bulan memiliki kapasitas lentur 8,1% lebih tinggi dibandingkan P1-B-2 tanpa korosi. Setelah diperiksa ditemukan bahwa hanya ada sedikit karat terutama di bagian retakan balok. Menurut Liang et al (2003) kapasitas lentur balok tidak akan terpengaruh secara jelas apabila laju korosi tulangan utama mencapai 9%. Sebaliknya, gaya ekspansi dari sedikit korosi meningkatkan kekuatan ikatan atau kekuatan ikatan antara tulangan dan beton, dan kerusakan slip lekatan pada permukaan tulangan. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 2, kapasitas lentur berkurang dengan waktu korosi. Laju reduksi kekuatan lentur balok P1-A-3 adalah 16%, dan balok P1-A-4 adalah 35,2% terhadap balok P1-B-2. Hal ini terutama disebabkan oleh melemahnya tegangan ikatan antara lembar serat karbon dan beton di bawah lingkungan korosif. Tetapi kapasitas lentur dari semua balok berkarat lebih tinggi dari atau serupa dengan balok dasar. Artinya balok *pre-crack* yang diperkuat dengan CFRP efektif dalam lingkungan korosif. Namun, efektivitasnya akan berkurang dengan meningkatnya derajat korosi.

3. *Corrosion Durability of Reinforcing Steel in Cracked High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Beams* oleh Shaikh et al. (2015)

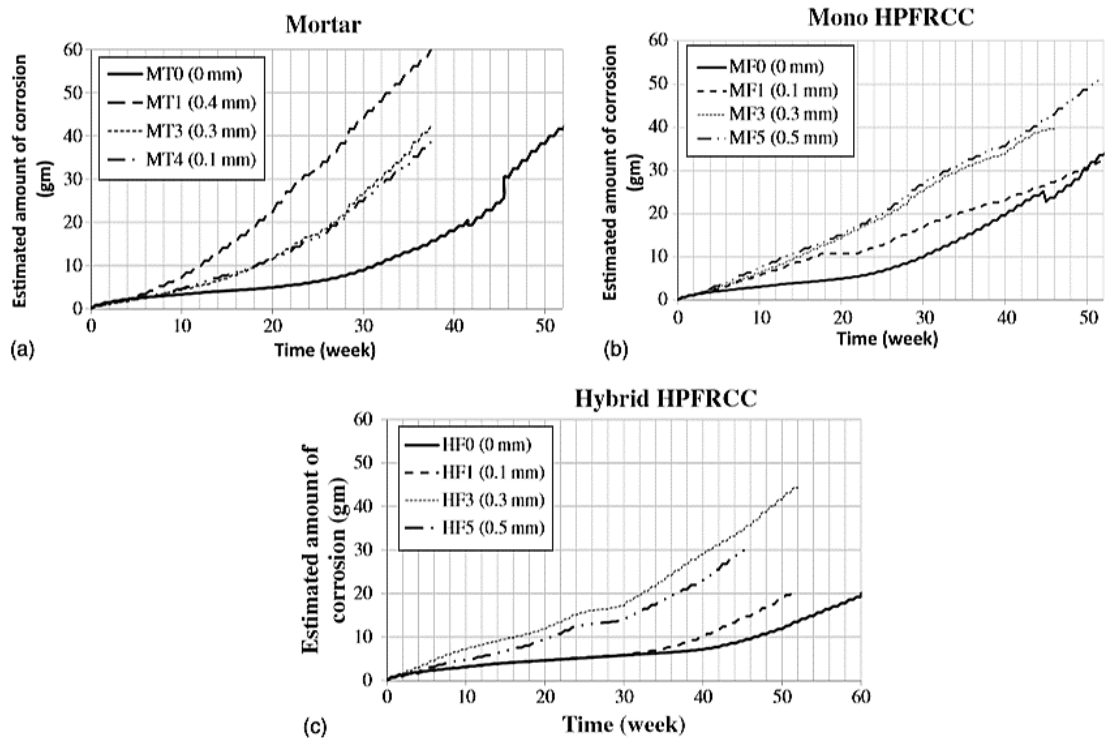
Penelitian yang dilakukan oleh Shaikh et al. (2015) membandingkan ketahanan korosi tulangan dalam balok *pre-crack* dari mortar, HPFRCC mono (HPRCC dengan serat polyethylene (PE)), dan Kombinasi hibrida (kombinasi dari serat steel cord (SC) dan Sreat PE). Benda uji yang digunakan balok ukuran

100 X 100 X 400 mm. Bahan yang digunakan mono HPFRCC adalah serat PE dengan volume fraksi 1,5%, sedangkan hibrida HPFRCC menggunakan serat SC dan PE dengan masing-masing volume fraksi 0,75%. Di semua balok digunakan tulangan polos berdiameter 13 mm dengan tebal selimut 20 mm. Pengujian dilakukan dengan cara balok diberikan *pre-crack* hingga mendapat keretakan maksimum 0,01 mm, 0,3 mm, 0,5 mm. Setelah itu dilakukan percepatan korosi dengan menggunakan galvanostatik dengan *wet-dry cycle* (3,5 hari basah menggunakan air yang mengandung 3% NaCl dan 3,5 hari kering). Hasil penelitian Shaikh et al (2015) dapat dilihat pada gambar 2.13. Pada gambar grafik 2.11 dapat disimpulkan bahwa hasil balok mono HPFRCC (MF) (b) dan hibrid HPFRCC (HF) (c) menunjukkan lebar yang lebih kecil dari retakan longitudinal yang diinduksi korosi daripada balok mortar (a). Menurut Shaikh et al (2015) hal ini disebabkan terjadinya *self-healing* pada balok HPFRCC dan semakin kecil retak maka akan semakin cepat penyembuhannya.



Gambar 2.13 Perluasan retak longitudinal yang diinduksi oleh korosi dari waktu ke waktu pada (a) balok mortar (MT), (b) mono HPFRCC (MF), (c) hibrid HPFRCC (HF) (Shaikh et al., 2015)

Selanjutnya balok HPFRCC hibrida berkinerja lebih baik daripada mono HPFRCC beams dengan lebar retak yang sama antara kehilangan baja lebih rendah dan toleransi kerusakan akibat korosi yang lebih tinggi. Gambar 2.14 menunjukkan pada minggu ke 38 lebar retak terbesar 0,4 mm mortar sudah mengami kehilangan baja sebanyak 60 gram. Pada minggu ke 38 mono HPFRCC dengan lebar terbesar 0,5 mengami kehilangan baja sebanyak 35 gram. Sedangkan paada minggu ke 38 hibrida HPFRCC dengan lebar terbesar 0,5 mengami kehilangan baja sebanyak 20 gram.



Gambar 2.14 Kehilangan baja dengan waktu pada (a) balok mortar retak (MT); (b) balok mono HPFRCC (MF) retak; (c) balok hibrid HPFRCC (HF) retak (Shaikh et al, 2015)

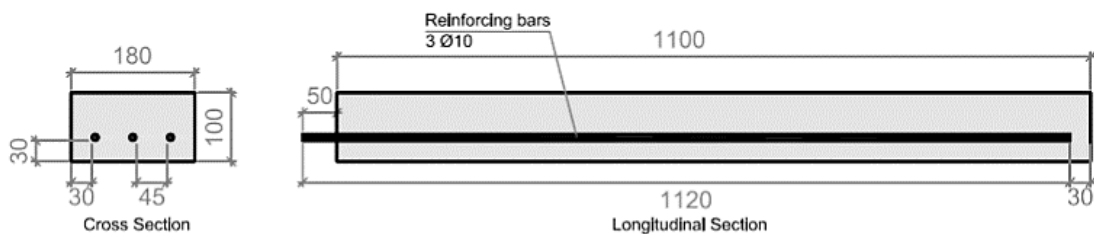
Dapat disimpulkan bahwa walaupun balok HPBRCC mono dan hibrida menunjukkan dengan lebar retak yang sama dengan balok mortar, akan tetapi

balok HPBRCC mono dan hibrida memiliki ketahanan korosi yang lebih baik sehingga menghasilkan kehilangan berat baja yang lebih rendah dibandingkan balok mortar.

4. *The Effect of Fibres on Steel Bar Corrosion and Flexural Behavior of Corroded RC Beam* oleh Berrocal et al. (2018)

Penelitian yang dilakukan oleh Berrocal et al. (2018) menyelidiki pengaruh penguatan serat dibeton bertulang yang telah diberi retak pada saat terjadi korosi dan pada perilaku lentur beton tersebut. Ada 32 spesimen balok ukuran lebar x tinggi x panjang adalah 180 X 100 X 1100 dan 3 tulangan utama diameter 10 mm berjarak 45 mm tiap tulangan dalam penelitian ini dengan campuran rasio $w/c = 0,47$ dapat dilihat pada gambar 2.15. Kuat tekan menggunakan benda uji kubus dengan ukuran masing-masing sisi 150 mm yang diuji pada 28 hari dan 3,6 tahun. Kuat lentur menggunakan benda uji balok dengan ukuran 150 X 150 X 550 mm yang diuji pada 28 hari dan 3,6 tahun. Ada 4 macam kelompok specimen yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. *Plain* (PL) yaitu beton konvensional tanpa serat
2. *Steel* (ST) yaitu beton konvensional dengan campuran serat baja
3. *Hybrid* (HY) yaitu beton konvensional dengan campuran kombinasi serat baja dan serat PVA
4. *Syntetic* (SY) yaitu beton konvensional dengan campuran serat *Polyvinyl Alkohol* (PVA)



Gambar 2.15. Balok specimen Barrocal et al. (2018)

Pada setiap kelompok benda uji diberikan perlakuan yang berbeda yaitu specimen tidak di *pre-crack*, specimen *dipre-crack* dengan diberi beban sekali saja, specimen *dipre-crack* dengan diberi beban lima kali untuk meningkatkan retak lebih besar, dan specimen awalnya sudah retak diberi beban agar retak tetap terbuka. *Pre-crack* dilakukan hingga mendapatkan lebar retak 0,1 mm sampai 0,4 mm. Selanjutnya balok dimasukan kedalam larutan air minum untuk control specimen dan larutan NaCl 16,5% yang dapat dilihat pada tabel 2.7 menunjukkan perlakuan pada masing-masing kelompok specimen.

Tabel 2.7 Ringkasan penelitian Barrocal et al. (2018)

Balok dalam larutan air minum

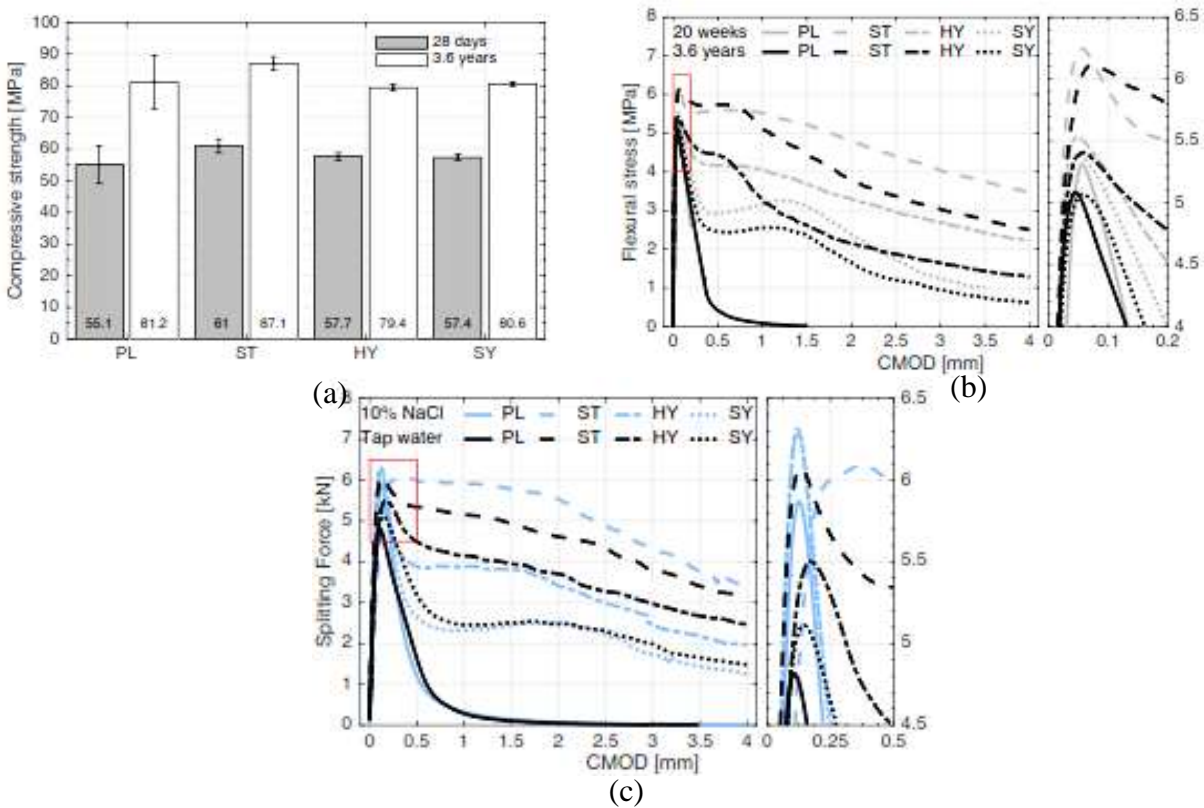
Kondisi pembebanan	Series	Target lebar retak	Jumlah balok
<i>Uncracked</i>	PL	-	3
<i>Uncracked</i>	ST	-	3

Balok korosi dalam larutan NaCl

Kondisi pembebanan	Series	Target lebar retak	Jumlah balok		
<i>Uncracked</i>	PL	-	3		
	ST	-	3		
	HY	-	3		
	SY	-	3		
<i>Cracked</i>	<i>Unloaded</i>	1 Cycle	PL	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			ST	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			HY	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			SY	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
	<i>Loaded</i>	5 Cycle	PL	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			ST	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			HY	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			SY	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			PL	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4
			ST	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	4

Keterangan : PL = Plain, ST = Steel, HY = Hybrid, SY = Synthetic

Balok yang direndam pada larutan NaCl dilakukan secara *wet and dry* dengan waktu basah 2 minggu ditutup dengan lembaran polietilen untuk meminimalkan penguapan larutan dan kering 2 minggu pada kondisi laboratorium ($20,5 \pm 3,6$ C dan $45 \pm 15\%$ RH) selama 3,6 tahun. Didapatkan hasil pada gambar 2.16 kuat tekan awal yang diukur pada 28 hari meningkat hampir 40% setelah 3,6 tahun terlepas dari penambahan serat, sedangkan kuat lentur tidak berubah. Kuat lentur *pre-crack* dari campuran beton bertulang serat, di sisi lain, mengalami pengurangan sekitar 1 MPa antara pengujian yang dilakukan pada 20 minggu dan 3,6 tahun. Pengurangan ini disebabkan pecahnya serat yang disebabkan oleh peningkatan ikatan serat-matriks. Pemaparan larutan klorida 10% dalam waktu lama dibandingkan dengan air yang dapat diminum tidak memengaruhi kekuatan campuran beton polos dan diperkuat serat setelah retak.

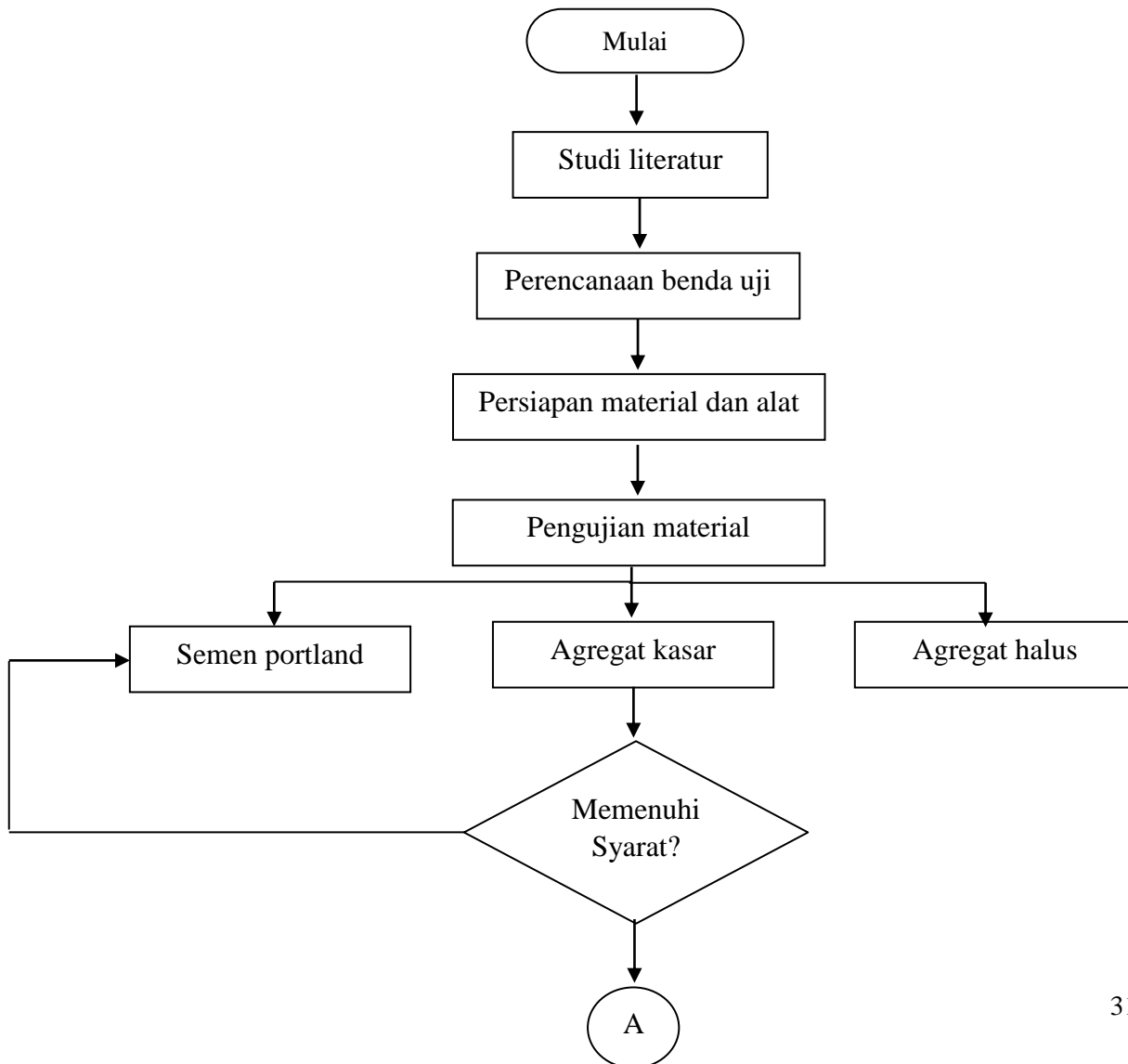


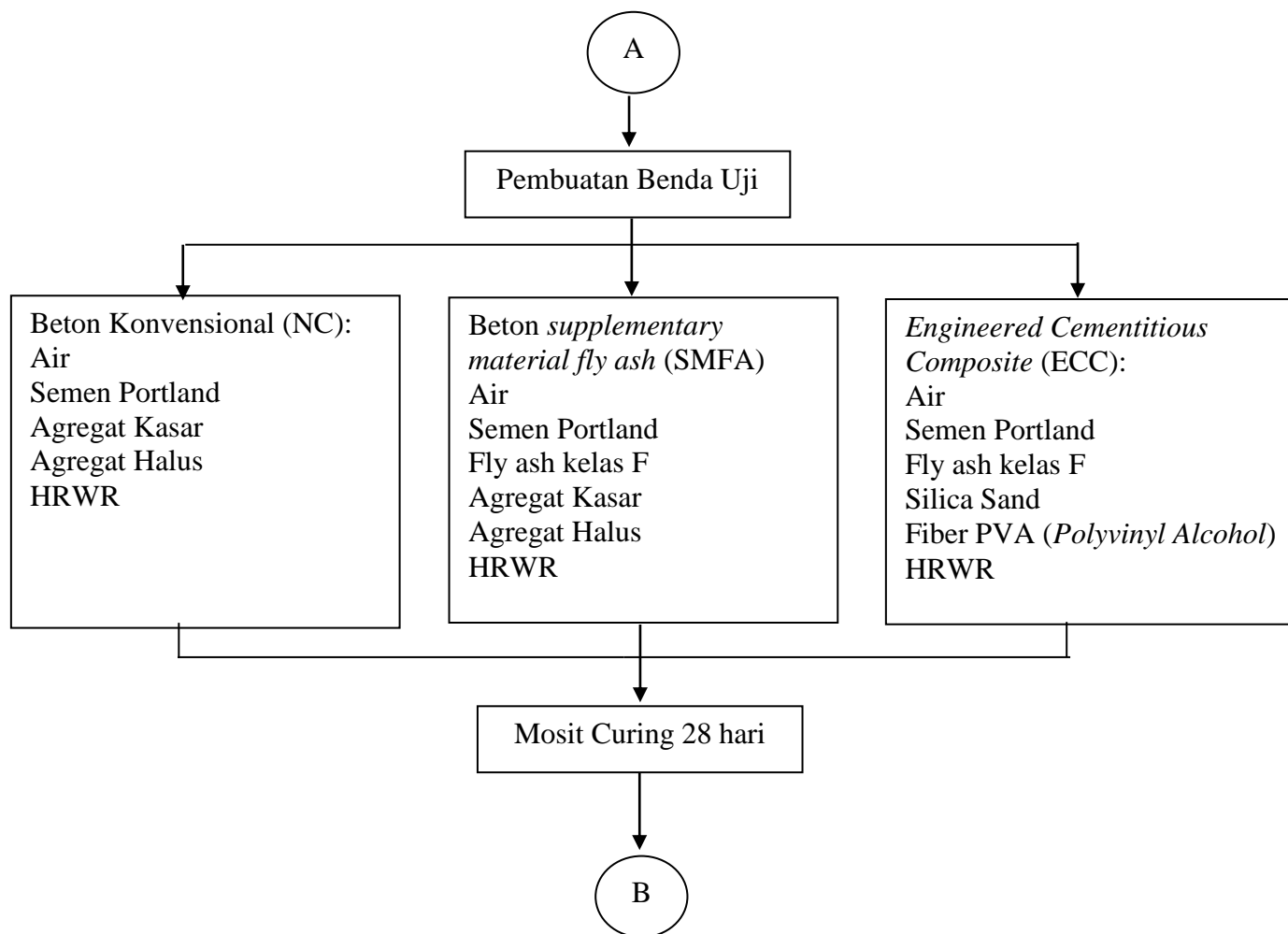
Gambar 2.16 Grafik hasil (a) kuat tekan, (b) kuat lentur dan (c) kuat tarik belah balok

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

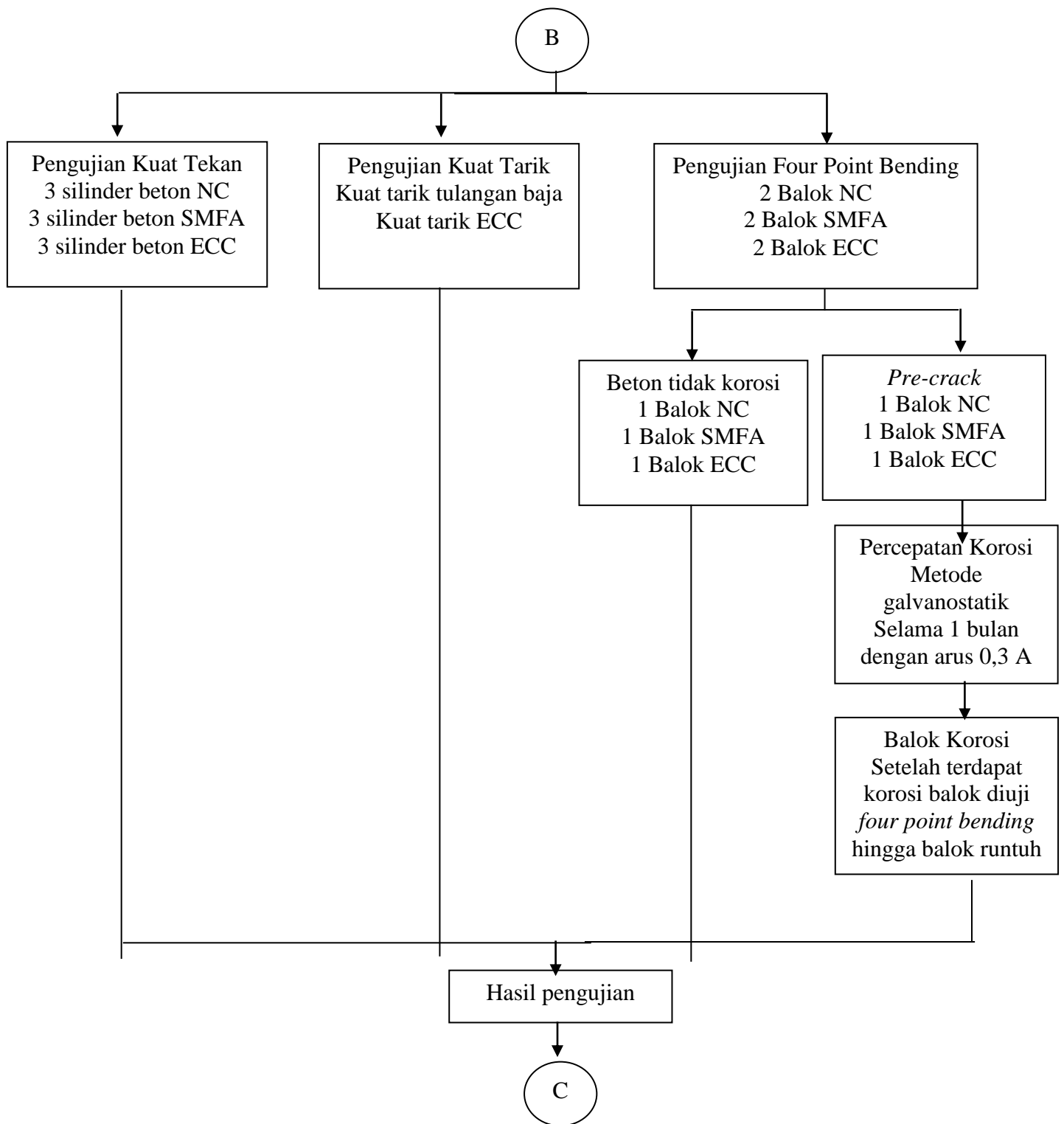
3.1 Alur Penelitian

Metodologi penelitian merupakan urutan – urutan kegiatan penelitian, meliputi pengumpulan data, perencanaan benda uji, pengujian material, perawatan benda uji, pengujian benda uji dan diteruskan dengan penarikan kesimpulan. Untuk memudahkan dan menjaga kesesuaian hasil yang dicapai, pada kegiatan penelitian ini dilengkapi dengan peralatan uji yang sesuai. Adapun sistematika metodologi penelitian ini dapat dilihat seperti began alir pada gambar 3.1.

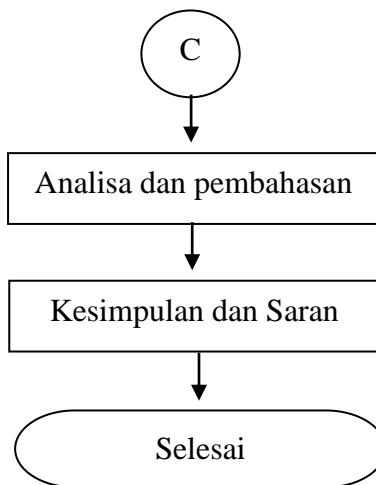




Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Lanjutan Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Lanjutan Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

Adapun studi literatur penelitian ini dengan mengumpulkan referensi-referensi teori relevan yang mendukung terhadap penelitian yang dilakukan. Tujuannya adalah sebagai dasar teori dalam melakukan studi. Studi literatur telah dijabarkan pada bab 2.

3.3 Perencanaan Benda Uji

Perencanaan benda uji adalah desain awal atau estimasi jenis material, mutu material, serta dimensi material yang digunakan untuk penelitian. Pada penelitian ini menggunakan mutu beton (f_c') 50 Mpa. Untuk *mix design* beton konvensional (NC) dan beton *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) yang digunakan di produksi oleh PT. Wijaya Karya Beton dengan agregat kasar maksimum sebesar 20 mm dengan spesifikasi mutu $f_c' = 50$ Mpa.

Sedangkan *mix design* ECC diambil dari penelitian terdahulu berjudul *Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures using Locally Available Materials in the UK* (Pourfalah & Suryanto, 2013) yang

dikembangkan menggunakan water to binder dan rasio fly ash-over-cement dengan spesifikasi mutu 45 MPa dengan melakukan *mix and trial* dimana yang akan digunakan adalah *mix* keempat karena kuat tarik dan regangannya karakteristik ECC terbaik dibandingkan yang lainnya. Proporsi campuran ECC dapat dilihat pada tabel 3.2. Gambar grafik *mix and trial* dapat dilihat pada lampiran 4. Volume fiber PVA di ambil 2% dari berat total.

Material	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5	Trial 6	Trial 7	Trial 8	Trial 9
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W/CM	0.26	0.28	0.28	0.28	0.3	0.3	0.3	0.26	0.26
S/C	0.84	0.90	0.97	0.84	0.90	0.97	0.84	0.90	0.97
FA/C	1.60	1.80	2.00	1.60	1.80	2.00	1.60	1.80	2.00
HRWR/C	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Polyvinyl Alcohol (PVA) Fiber	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%

Tabel 3.1 Proporsi Campuran ECC

Keterangan:

- W = Water
- CM = Cement + Fly Ash
- FA = Fly Ash
- S = Silica Sand
- HRWR = High Water Reducer Ratio

Ukuran benda uji adalah sebagai berikut:

- a. Silinder Beton konvensional (NC) dan beton SMFA ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
- b. Silinder ECC ukuran diameter 50 mm dan tinggi 100 mm.
- c. *Dog bone* ukuran lebar 60 mm, tebal 10 mm dan Panjang 330 mm.
- d. Balok ukuran lebar 100 mm, tinggi 200 mm, dan panjang 2000 mm.

Perhitungan Balok:

Menentukan dimensi balok menggunakan rumus pendekatan berdasarkan SK SNI 03-2847-2013.

✚ Tinggi balok

Untuk balok dengan dua tumpuan sederhana $h \geq \frac{L}{16}$

Panjang balok (L) = 2000 mm

Tinggi balok = $h \geq \frac{L}{16} = h \geq \frac{2000}{16} = h \geq 125$

Jadi tinggi balok yang dipakai $h = 200$ mm

✚ Lebar Balok

Lebar balok = $\frac{1}{2}h \leq b \leq \frac{2}{3}h$

Tinggi balok yang dipakai = 200 mm

Lebar balok = $\frac{1}{2}h \leq b \leq \frac{2}{3}h$

= $\frac{1}{2} 200 \text{ mm} \leq b \leq \frac{2}{3} 200 \text{ mm}$

= $100 \text{ mm} \leq b \leq 133,33 \text{ mm}$

Jadi lebar balok yang dipakai $b = 100$ mm

3.4 Perhitungan *Section Analysis*

3.4.1 Perhitungan Manual

Data material dan section properties sebagai berikut:



Gambar 3.4 Penampang melintang balok

Tinggi balok	(h)	= 200 mm
Lebar balok	(b)	= 100 mm
Selimut beton	(d')	= 43 mm
Tinggi efektif	$d = h - d'$	= 157 mm
Tegangan leleh baja t. utama (f_y)		= 559 Mpa
Tegangan leleh baja sengkang (f_y)		= 397 Mpa
Kuat tekan beton	(f_c')	= 50 Mpa
Tul. Tekan D10	(A_s')	= 2 D 10 mm
Tul. Tarik D10	(A_s)	= 3 D 10 mm
Modulus elastisitas baja	(E_s)	= 200000 Mpa
Modulus elastisitas beton	(E_c)	= $4700\sqrt{f_c'}$ = 33234 Mpa
Modulus rupture	(f_r)	= $0,7\sqrt{f_c'}$ = 4,95 Mpa

1. Menghitung proporsi baja

Rasio tulangan tekan :

Tul Tekan : 2 D 10

$$As' = n \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot 3.14 \cdot 5^2 = 157,079 \text{ mm}^2$$

$$\rho' = \frac{As'}{b \cdot d} = \frac{157}{100 \cdot 157} = 0,0100$$

Rasio tulangan tarik :

Tul. Tarik : 3 D 10

$$As = n \cdot \pi \cdot r^2 = 3 \cdot 3.14 \cdot 5^2 = 235,620 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{As'}{b \cdot d} = \frac{235,5}{100 \cdot 157} = 0,0150$$

A. Sebelum retak

1. Rasio modular/angka ekuivalen

$$n = \frac{Es}{Ec} = \frac{200000}{33234} = 6,02$$

2. Jarak garis netral (garis pusat transformasi)

$$A = b \cdot h + (n - 1)(As + As')$$

$$A = 100 \cdot 200 + (6,02 - 1)(235,620 + 157,079) = 21970,54 \text{ mm}^2$$

Maka, nilai y dihitung dari serat atas balok:

$$y_{atas} = \frac{\left((b \cdot h) \cdot \left(\frac{h}{2} \right) \right) + ((n - 1)As \cdot d) + ((n - 1)As' \cdot d')}{A}$$

$$= \frac{\left((100 \cdot 200) \cdot \left(\frac{200}{2} \right) \right) + ((6,02 - 1)235,620 \cdot 157) + ((6,02 - 1)157,079 \cdot 43)}{21970,54}$$

$$y_{atas} = 101 \text{ mm}$$

3. Momen Inersia dan momen retak

$$I = \left(\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \right) + (b \cdot h \left(y - \left(\frac{h}{2} \right) \right)^2) + (n - 1)As(d - y)^2 + (n - 1)As'(y - d')^2$$

$$= \left(\frac{1}{12} \cdot 100 \cdot 200^3 \right) + (100 \cdot 200 \left(101 - \left(\frac{200}{2} \right) \right)^2) + ((6,02 - 1)235,620(157 - 101)^2)$$

$$+ ((6,02 - 1)157,079(101 - 43)^2)$$

$$I = 73045971 \text{ mm}^4$$

Retak akan terjadi ketika modulus rupture mencapai serat bawah penampang, sehingga:

$$M_{retak} = \frac{f_r \times I}{y_{bawah}} = \frac{f_r \times I}{h - y_{atas}} = \frac{4,95 \times 73045971}{200 - 101} = 3652941,17 \text{ Nmm}$$

B. Setelah retak leleh pertama

1. Faktor garis netral

Asumsikan beton berperilaku secara elastis, sehingga:

$$K = \left(((\rho + \rho')^2)n^2 + \frac{2(\rho + \rho'.d')}{d}n \right)^{\frac{1}{2}} - (\rho + \rho')n$$

$$K = \left(((0,015 + 0,010)^2)6,02^2 + \frac{2(0,015+0,010.43)}{157} \right) 6,02^{\frac{1}{2}} - (0,015 + 0,010)6,02$$

$$K = 0,34$$

Maka jarak garis netral dari serat atas balok:

$$Kd = K \times d = 0,34 \times 157 = 52,68 \text{ mm}$$

2. Regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{559}{200000} = 0,0028$$

3. Regangan beton bagian atas

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \times \left(\frac{kd}{(d-kd)} \right) = 0,0028 \times \left(\frac{52,68}{(157-52,68)} \right) = 0,0014$$

4. Tegangan pada beton

$$f_c = \varepsilon_c \times E_c = 0,0014 \times 33234 = 46,91 \text{ MPa}$$

5. Regangan tulangan tekan

$$\varepsilon_{s'} = \varepsilon_c \times \left(\frac{kd-d'}{kd} \right) = 0,0014 \times \left(\frac{52,68-43}{52,68} \right) = 0,00026$$

6. Tegangan tulangan tekan

$$f_{s'} = \varepsilon_{s'} \times E_s = 0,00026 \times 200000 = 51,88 \text{ MPa}$$

7. Gaya tekan pada beton dan baja

$$C_c = 1/2 \cdot f_c \cdot b \cdot kd = 1/2 \cdot 46,91 \cdot 100 \cdot 52,68 = 123562,27 \text{ N}$$

$$C'_s = A_s' \cdot f_s = 157,079 \cdot 51,88 = 8149 \text{ N}$$

$$\text{Maka gaya tekan total adalah } = C_c + C'_s = 131711,27 \text{ N}$$

8. Jarak total gaya tekan dari ujung tepi balok

Karena gaya tekan total = 131711,27 N, maka jarak total gaya tekan dari ujung tepi atas balok adalah:

$$\begin{aligned} y' &= (d' \cdot C'_s) + (C_c \cdot kd/3) / (C_c + C'_s) \\ &= (43 \cdot 8149) + (1123562,27 \cdot 52,68/3) / (131711,27) \\ &= 19,13 \text{ mm} \end{aligned}$$

Maka jarak pusat gaya tekan ke pusat tulangan tarik adalah:

$$Jd = d - y' = 157 - 19,13 = 137,87 \text{ mm}$$

Momen saat leleh pertama adalah:

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot jd = 235,630 \cdot 559 \cdot 137,87 = 18158454,9 \text{ Nmm}$$

C. Setelah retak saat beban ultimit

Karena regangan pada tulangan tekan belum leleh ($\epsilon'_s \leq \epsilon_s$), maka untuk mencari nilai a dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s, \text{ dimana } \epsilon'_s = 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right), \text{ maka } f'_s = 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \cdot E_s \quad (3.1)$$

$$C_s = A_s' \cdot f'_s \quad (3.2)$$

Substitusi (3.1) ke (3.2), maka

$$C_s = A_s' \cdot 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \cdot E_s \quad (3.3)$$

Dimana $c = \frac{a}{\beta_1}$, Apabila dimasukkan kedalam (3.3) maka didapatkan

$$C_s = A_s' \cdot 0,003 \left(\frac{a-\beta_1 x d'}{a} \right) \cdot E_s \quad (3.4)$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad (3.5)$$

$$T = A_s \cdot f_y \quad (3.6)$$

Persamaan kesetimbangan adalah $C_c + C_s = T$, dengan menggunakan persamaan ini, akan dapat mendapatkan nilai a. setiap segmen dikalikan dengan a, maka kita menemukan fungsi kuadrat dari a.

$$(0,85 \cdot f'_c \cdot b) a^2 + ((As' \cdot Es \cdot 0,003) - (As \cdot fy)) a - (As' \cdot Es \cdot 0,003 \cdot \beta 1 \cdot d') = 0$$

Ket: Mutu beton 50 MPa, maka $\beta 1 = 0,85 - 0,05 \cdot (f'_c - 30) / 7 = 0,71$

Untuk mendapatkan nilai a gunakan persamaan ABC. Maka nilai a yang didapatkan:

$$a = 30,7$$

Setelah mendapatkan nilai a, cek kembali kondisi kesetimbangan

$$C_s = As' \cdot 0,003 \left(\frac{a - \beta 1 \cdot d'}{a} \right) \cdot Es = 157,079 \cdot 0,003 \left(\frac{30,7 - 0,71 \cdot 43}{30,7} \right) \cdot 200000 = 1039,6 \text{ N}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a = 0,85 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 30,7 = 130671,7 \text{ N}$$

$$T = As \cdot fy = 235,620 \cdot 600 = 1413731,7 \text{ N}$$

Momen ultimit:

$$M_u = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \left(d - \frac{1}{2} \cdot a \right) + As' \cdot 0,003 \left(\frac{a - \beta 1 \cdot d'}{a} \right) \cdot Es (d - d')$$

$$= 0,85 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 30,7 (157 - 1/2 \cdot 30,7) + 157,079 \cdot 0,003 \left(\frac{30,7 - 0,71 \cdot 43}{30,7} \right) \cdot 200000 (157 - 43)$$

$$= 18625133,6 \text{ Nmm}$$

Maka didapatkan nilai kapasitas dari pengujian *four point bending* adalah

$$P = \frac{4 \cdot M_u}{(L - X)}$$

dimana L adalah jarak tumpuan ujung ke ujung = 1700 mm, dan

X adalah jarak pembebanan = 700 mm.

$$P = \frac{4 \cdot M_u}{(L - X)} = \frac{4 \cdot 18625133,6}{(1700 - 700)} = 74500,5 \text{ N} = 74,5005 \text{ kN}$$

Pada penelitian ini sebagai verifikasi perhitungan manual *section analysis* juga dilakukan *section analysis* menggunakan program response 2000. Didapatkan

beban ultimit sebesar 81 kN. Hasil beban saat retak, leleh dan ultimit dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Hasil beban perhitungan manual dan response 2000

	Perhitungan Manual	Response 2000
	(kN)	(kN)
P_{cr}	14,612	12,174
P_{yield}	72,609	73,044
P_{ult}	74,5005	81,160

3.5 Material

Pada penelitian ini adapun material bahan yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Material dan spesifikasinya

Material	Spesifikasi
Air	-
Kerikil	Ukuran max 20 mm
Pasir	-
Fly Ash	Kelas F
Silica Sand	Ukuran 200 μ m
Fiber	Panjang 8 mm
HRWR	TANCEM 60 RA untuk ECC TANCEM 60 RS untuk beton NC dan beton SMFA
Tulangan tekan dan tarik	D 10
Sengkang	\emptyset 8

3.6 Pengujian Material

Pada penelitiatn ini dilakukan pengujian kualitas terhadap material yang akan digunakan dan mengacu standard yang dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Peraturan pengujian material

Material	Pengujian	Peraturan
Semen	Pengujian berat jenis semen	ASTM C 188-89
Agregat Kasar	Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar	SNI 03-1969-1990
	Pengujian berat volume agregat kasar	ASTM C 29-97
	Pemeriksaan kadar lumpur agregat kasar	WB-ENG-PS-06-LK01
	Pemeriksaan susunan gradasi agregat kasar	ASTM C 33
Agregat Halus	Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus	SNI 03-1969-1990
	Pengujian berat volume agregat halus	ASTM C 29-97
	Pemeriksaan kadar lumpur agregat halus	WB-ENG-PS-06-LK01
	Pemeriksaan susunan gradasi agregat halus	SNI 03-2834-2000

3.7 Pembuatan Benda Uji

Pada penelitian ini benda uji yang digunakan adalah *dogbone*, silinder, dan balok dengan jumlah masing-masing benda uji dapat dilihat pada tabel 3.5 dengan mutu beton yaitu 50 Mpa. Masing-masing beton konvensional (NC), beton menggunakan *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) dan ECC menggunakan lima benda uji silinder untuk pengujian kuat tekan. Selanjutnya dua benda uji *dogbone* ECC dilakukan pengujian kuat tarik. Pada benda uji balok dilakukan pengujian balok tidak ada korosi (satu balok beton konvensional (NC), satu balok beton menggunakan

supplementary material (SMFA) dan satu balok ECC) dan balok terkorosi (satu balok beton konvensional (NC), satu balok beton menggunakan *supplementary material* (SMFA) dan satu balok ECC).

Tabel 3.5 Kebutuhan Benda Uji

No	Benda Uji	Kuat Tekan			Kuat Tarik			Four Point Bending			Percepatan Korosi			Jumlah
		NC	SMFA	ECC	NC	SMFA	ECC	NC	SMFA	ECC	NC	SMFA	ECC	
1	Silinder 150X300 mm	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
2	Silinder 50X100 mm	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
3	Dogbone	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2
4	Balok	-	-	-	-	-	-	2	2	2	1*	1*	1*	6
Total benda uji													17	

Keterangan : * = Balok diambil dari four point bending (setelah diberi *pre-crack*)

NC = Beton konvensional (NC)

SMFA = Beton *supplementary material* menggunakan fly ash

ECC = *Engineered Cementitious Composite*

Adapun langkah-langkah untuk pembuatan benda uji ECC adalah sebagai berikut:

1. Masukkan *fly ash*, semen, pasir dan 70% air ke dalam wadah lalu diaduk manual hingga merata selama 1-2 menit.
2. Hasil campuran pertama dimasukkan ke dalam mixer dan tambahkan HRWR dan 30% air. Lalu diputar dengan kecepatan sangat pelan selama 2 menit.
3. Ubah kecepatan putaran menjadi normal selama 2-3 menit dan tambahkan *fibre* (PVA).

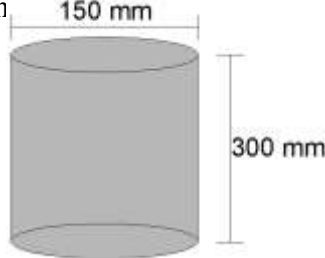
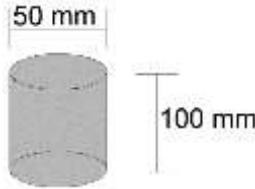
4. Lalu mixer dimatikan dan campuran diaduk merata manual untuk memastikan semua *fibre* (PVA) sudah tercampur rata dan cek *plastic viscosity*.
5. Lakukan mixer lagi selama 5 menit dengan kecepatan normal dan bisa berhenti jika *fibre* sudah benar-benar tersebar.
6. *Fresh concrete ECC* siap dimasukkan kedalam cetakan balok, *dogbone* dan silinder.

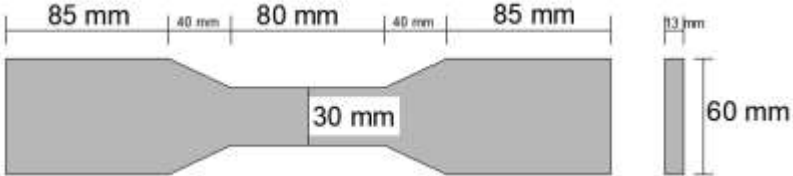


Selanjutnya dilakukan *curing*. *Curing* secara umum dipahami sebagai perawatan beton, yang bertujuan untuk menjaga supaya beton tidak terlalu cepat kehilangan air, atau sebagai tindakan menjaga kelembaban dan suhu beton, segera setelah proses finishing beton selesai dan waktu total setting tercapai. Pada penelitian ini perawatan beton dilakukan dengan cara *moist curing* selama 28 hari.

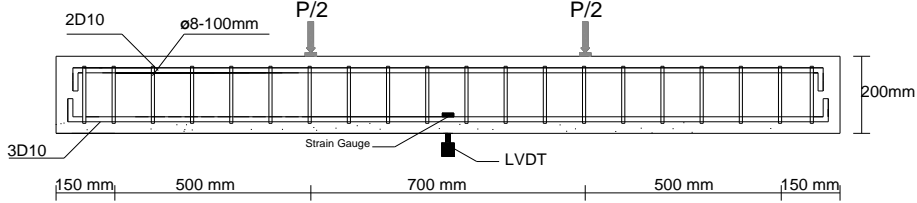
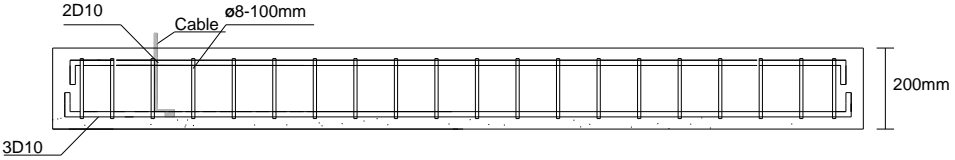
3.8 Pengujian Benda Uji

Pada penelitian ini masing-masing benda uji dilakukan pengujian kuat tekan, pengujian kuat tarik, pengujian *four point bending*, pengujian percepatan korosi, dan pengujian porositas sesuai dengan tabel 3.6.

Tabel 3.6 Pengujian benda uji

Pengujian	Peraturan	Kegunaan	Benda Uji	Hasil
Pengujian kuat tekan	SNI 03-1974-2011	untuk mengetahui kuat tekan beton karakteristik (kuat tekan maksimum yang dapat di terima oleh beton sampai beton mengalami kehancuran)	3 buah silinder beton NC dan 3 buah silinder beton SMFA ukuran 	Kuat tekan beton NC, beton SMFA, dan ECC
			3 buah silinder ECC ukuran 50 mm x 100 mm 	

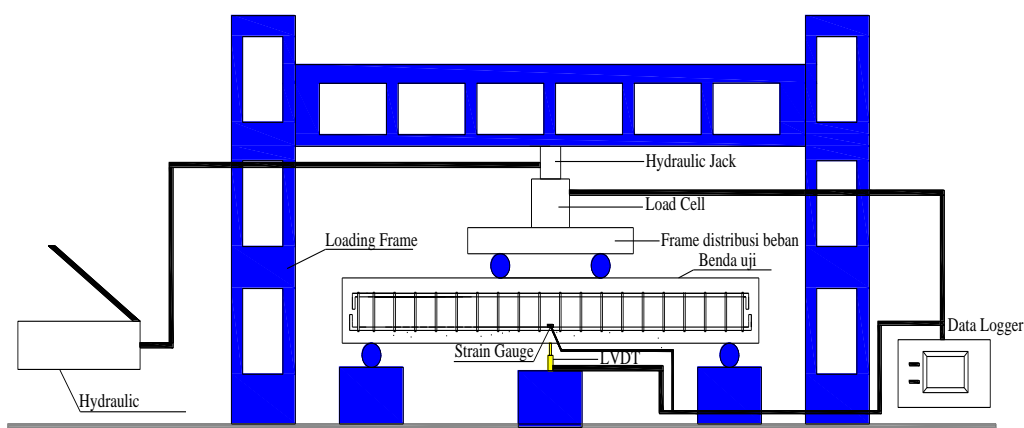
Pengujian	Peraturan	Kegunaan	Benda Uji	Hasil
Pengujian kuat tarik	ASTM D638	untuk mengetahui kuat tarik ECC	<p>2 buah dogbone ECC</p> 	Kuat tarik ECC
	ASTM E 8M-04	Untuk mendapatkan nilai tegangan leleh, tegangan ultimit, regangan dan <i>elongation</i>	<p>3 buah tualangan Ø8</p>  <p>3 buah tualangan D10</p> 	Tegangan leleh, tegangan ultimit, regangan dan <i>elongation</i>

Pengujian	Peraturan	Kegunaan	Benda Uji	Hasil
Pengujian <i>four point bending</i>	SNI 4431 2011	Untuk mengetahui kekuatan lentur balok	<p>2 buah balok NC, 2 buah balok SMFA dan 2 buah balok ECC</p> 	Data pola retak, kekuatan lentur dan lendutan
Pengujian Percepatan Korosi	ASTM G1	Untuk mempercepat korosi tulangan pada beton	<p>1 buah balok NC, 1 balok SMFA dan 1 buah balok ECC <i>pre-crack</i></p> 	Laju korosi pada balok

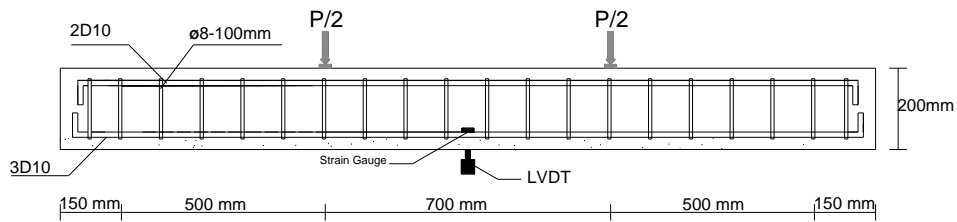
3.9 Pengujian Lentur

Pada penelitian ini untuk pengujian lentur balok menggunakan pengujian *four point bending*. *Four point bending* merupakan pengujian dengan menggunakan 2 tumpuan dan 2 pembebanan. Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hydraulic jack* dan *load cell*. *Set-up* pengujian balok dapat dilihat pada gambar 3.4. Penelitian ini menggunakan jarak 700 mm dan jarak balok ke titik tumpuan sebesar 150 mm. Pada tengah bentang diberikan *load cell* untuk mendapatkan data kapasitas beban balok selama pengujian, strain gauge untuk mengukur regangan tulangan dan LVDT untuk mengukur defleksi balok yang terjadi akibat pembebanan yang dapat dilihat pada gambar 3.5.

Pengujian balok control dilakukan di PT. Wijaya Karya Beton, Tbk menggunakan *hydraulic jack* manual dan karena keterbatasan alat, operator hanya dapat menaikkan beban dengan minimal setiap kenaikan beban sebesar 50 psi atau setara dengan 6,8948 KN untuk mendapatkan pembacaan data yang banyak dan penyebaran pola retak hingga balok hancur. Sedangkan pengujian balok korosi dilakukan di Laboratorium Material dan Bahan ITS menggunakan *hydraulic jack* dari alat sehingga dapat *disetting* menggunakan kenaikan setiap beban 5 kN agar mendapatkan data beban yang banyak dan pengamatan pola retak per kenaikan beban hingga beton mengalami kegagalan.



Gambar 3.5 *Set-up* pengujian *four point bending*



Gambar 3.6 Skema Pembebanan *Four Point Bending* beserta penempatan *strain gauge* dan LVDT

3.10 Balok *Pre-crack*

Beberapa penelitian menggunakan *pre-crack* untuk pendekatan kondisi beton dilapangan. *Pre-crack* disini merupakan beton bertulang sengaja diberikan beban kurang dari beban ultimit. Metode *pre-crack* menggunakan pengujian *four point bending*. Pada penelitian ini *pre-crack* pada benda uji dilakukan di Laboratorium Struktur ITS dengan menggunakan alat uji *bending*. Karena alat *bending* di Laboratorium struktur menggunakan satuan kilogram (kg), maka untuk balok *pre-crack* dibebani dengan setiap kenaikan 50 kg atau setara dengan 0,49 kN. *Linier Variabel Differential Transformer* (LVDT) dengan panjang 10 cm dipasang pada pertengahan bentang untuk mengukur defeksi pada balok selama pemberian *pre-crack*.

Pre-crack dilakukan hingga terdapat retak-retak beton hingga mencapai setengah tinggi balok. Rata-rata *pre-crack* balok dihentikan saat beban mencapai 19,6133 kN. Selanjutnya pengukuran lebar menggunakan alat *hand microscope*. Retak setiap kenaikan beban juga diberi garis warna untuk memberikan tanda retak agar mempermudah melihat secara visual perubahan retak yang terjadi selama beton mengalami korosi pada tulangan dimana pengujian percepatan dikorosi dilakukan setelah balok di *pre-crack*. Kondisi ini akan sama seperti elemen struktur di daerah laut yang sudah ada retak dan terkontak langsung dengan air laut, dimana hal

tersebut akan semakin mempercepat korosi pada tulangan beton sehingga dapat menurunkan kapasitas elemen struktur tersebut.

3.11 Metode Percepatan Korosi

Pada penelitian ini menggunakan metode galvanostatik. Benda uji balok yang telah diberi *Pre-crack* di letakkan di *artificial chamber* dengan perlakuan khusus untuk mempercepat korosi. Maalej et al. (2003) melakukan metode ini untuk mensimulasi korosi yang terjadi mendekati dengan kondisi nyata. Didalam *artificial chamber* digunakan suhu $T = 30^{\circ}\text{C} (\pm 2^{\circ}\text{C})$ dan kelembapan maksimum 80%. Adapun peralatan dan urutan pelaksanaan dapat adalah sebagai berikut:

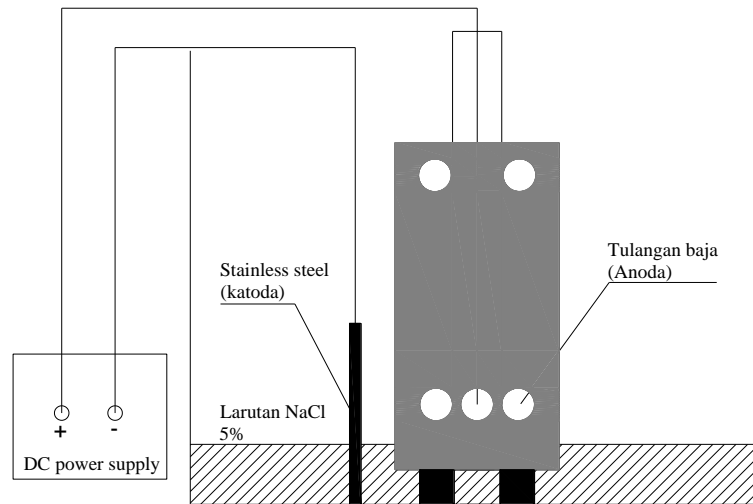
Peralatan :

Kotak perendaman
DC power supply
Current regulator
Kabel listrik
Stainless steel (sebagai katoda)
Plastic chair (bantalan)

Urutan pelaksana :

1. Persiapkan larutan NaCl 5%
Ket: Larutan NaCl 5% diambil seperti kadar air laut yang ekstreme.
2. Masukkan larutan NaCl 5% ke dalam kotak perendaman.
3. Masukkan stainless steel ke dalam rendaman larutan NaCl 5%.
Stainless steel berfungsi sebagai katoda.
4. Pasang kabel listrik pada tulangan daerah tarik (Anoda) yang dapat dilihat pada gambar 3.6.
Ket: Kabel listrik dipasang pada tulangan sebelum pengecoran beton
5. Tempelkan kabel arus positif pada tulangan dan kabel arus negative pada *stainless steel*.
6. *DC power supply* dinyalakan untuk mengalirkan arus listrik dengan arus konstan sebesar 0,3A.

7. Percepatan korosi dilakukan selama 1 bulan. Gambar skema percepatan korosi dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.7 Skema pengujian percepatan korosi

Berdasarkan ASTM G1-90 (*Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens*) untuk menghitung I_{corr} metode galvanostatik dapat menggunakan rumus berikut:

$$L = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (3.7)$$

Dimana:

L = Laju korosi (mm/year)

K = 8,76 mm/yr

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

A = Luas permukaan tulangan (cm²)

T = Waktu pengamatan (jam)

D = Berat jenis baja tulangan = 7,850 g/cm³

BAB IV

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab ini menampilkan hasil pengujian yang telah dilakukan untuk dianalisa dan diambil kesimpulan. Hasil pengujian ini terdiri dari hasil uji material dan hasil tes pengujian pada benda uji. Data hasil pengujian akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah analisa data.

4.1 Material

Pada penelitian ini adapun material bahan yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Material dan spesifikasinya

Material	Spesifikasi
Air	-
Kerikil	Ukuran max 20 mm
Pasir	Lumajang
Semen	OPC tipe 1
Fly Ash	Kelas F
Silica Sand	Ukuran 200 μ m
Fiber	Panjang 8 mm
Admixture	TANCEM 60 RA untuk ECC Consol SS-8 untuk beton konvensional
Tulangan tekan dan tarik	D 10
Sengkang	\emptyset 8

4.1.1 Data Hasil Pengujian Material

Sebelum membuat benda uji, perlu dilakukan pengujian terhadap material yang digunakan. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dan spesifikasi material yang digunakan pada penelitian ini. Material yang diuji adalah agregat kasar, agregat halus, fly ash dan semen dengan berbagai jenis

pengujian. Berikut merupakan pengujian yang dilakukan terhadap material:

4.1.1.1. Semen Portland

4.1.1.1.1. Pengujian Berat Jenis Semen Portland

Pengujian ini berdasarkan ASTM C 188-89 dengan tujuan untuk mengetahui berat jenis semen Portland. Berdasarkan tabel pengujian jenis semen portland yang terdapat pada tabel 4.2 didapatkan hasil berat jenis semen adalah 3,15. Nilai ini sama dengan nilai berat jenis semen Portland berdasarkan ASTM C 188-89 dengan kisaran 3,0 – 3,2.

Tabel 4.2 Hasil pengujian berat jenis semen portland

	I	II	III	Rata-rata
Berat Semen (A) (ml)	500	500	500	500
Berat Semen + Solar + Labu (B) (ml)	1510	1518	1514	1514
Berat Labu +Solar (C) (ml)	1142	1150	1146	1146
Berat Jenis Solar	0,83	0,83	0,83	0,83
Berat Jenis Semen = $\frac{A}{(A+C)-B} \times 0,83$ (gr/cm ³)	3,15	3,15	3,14	3,15

4.1.1.2. Agregat Kasar

4.1.1.2.1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis halus curah kering, berat jenis agregat kasar SSD, berat jenis agregat kasar semu dan penyerapan agregat kasar berdasarkan SNI 03-1969-1990. Hasil rata-rata dari 3 pengujian yang didapatkan dari hasil pengujian kerikil Pasuruan pada tabel 4.3 adalah sebagai berikut:

- ✚ Rata-rata berat jenis halus curah kering : 2,66%
- ✚ Rata-rata berat jenis agregat kasar SSD : 2,68%
- ✚ Rata-rata berat jenis agregat kasar semu : 2,73%
- ✚ Rata-rata penyerapan agregat kasar : 1,08%

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis agregat kasar sebesar 2,66% dan penyerapan air agregat kasar sebesar 1,08% yang sesuai dengan persyaratan SNI 03-1969-1990, yaitu berat jenis bulk agregat kasar minimum 2,5 dan penyerapan maksimum 3%.

Tabel 4.3 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar

	I	II	III
Berat Benda Uji Kering Oven (W1) (gr)	4940	4950	4950
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (W2) (gr)	5000	5000	5000
Berat Benda SSD dalam Air (W3) (gr)	3140	3130	3142

	I	II	III	Rata-rata
Berat Jenis Agregat Halus Curah Kering: $\frac{W1}{W2 - W3}$	2,66	2,65	2,66	2,66
Berat Jenis Agregat Halus Kondisi SSD: $\frac{W2}{W2 - W3}$	2,69	2,67	2,69	2,68
Berat Jenis Agregat Halus Semu: $\frac{W1}{W1 - W3}$	2,74	2,72	2,74	2,73
Penyerapan Agregat Halus: $\frac{W2 - W1}{W1} \times 100\%$	1,21	1,01	1,01	1,08

4.1.1.2.2. Pengujian Berat Volume agregat kasar

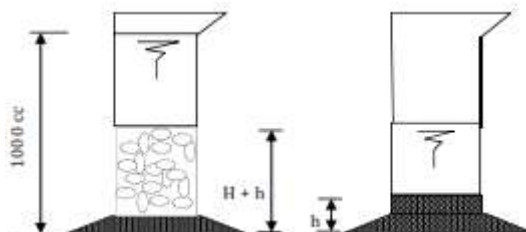
Berdasarkan tabel pengujian berat volume agregat kasar yang terdapat pada tabel 4.4 dimana hasil akhir didapatkan berat volume rata-rata adalah 1,39 g/cm³.

Tabel 4.4 Hasil pengujian berat volume agregat kasar

	I	II	III
Berat Tempas (W1) (gr)	702	702	702
Berat tempat contoh (V) (gr)	5000	5000	5000
Berat Volume Padat (Compact)			
Berat Tempas + Contoh (W2) (gr)	7900	7890	7890
Berat Contoh Padat (W3 = W2-W1) (gr)	7198	7188	7188
Berat Volume Padat ($\frac{W3}{V}$) (gr/cm ³)	1,44	1,438	1,438
Berat Volume Padat Rata-rata (B1) (gr/cm ³)	1,44		
Berat Volume Gembur			
Berat Tempas + Contoh (W2) (gr)	7430	7410	7480
Berat Contoh Gembur (W3 = W2-W1) (gr)	6728	6708	6778
Berat Volume Gembur ($\frac{W3}{V}$) (gr/cm ³)	1,346	1,342	1,356
Berat Volume Gembur Rata-rata (B2) (gr/cm ³)	1,35		
Berat Volume Rata-Rata ($\frac{B1+B2}{2}$) (gr/cm ³)	1,39		

4.1.1.2.3 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar

Berdasarkan tabel pengujian kadar lumpur agregat kasar yang terdapat pada tabel 4.5 dimana hasil kadar lumpur yang didapat adalah 2,44%. Berdasarkan WB-ENG-PS-06 LK01 kadar lumpur yang diizinkan < 3% maka kadar lumpur pada split memenuhi syarat.



Syarat:

1. Kadar Lumpur < 3% volume (waktu pengendapan \pm 10 menit)
2. Pasir secara visual bersih (tidak ada kotoran)

Tabel 4.5 Hasil pengujian kadar lumpur agregat kasar

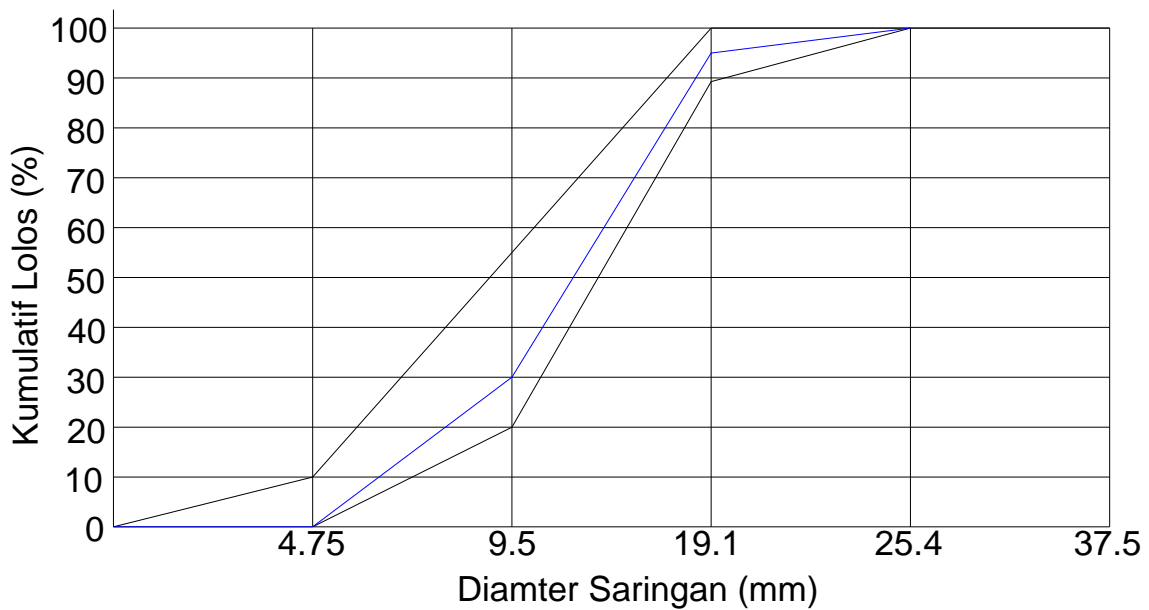
	I	II	III
Tinggi Kerikil (H + h) (ml)	400	400	400
Tinggi Lumpur (h) (ml)	10	10	10
Kadar Lumpur (%) = $\frac{h}{H+h} \times 100$ (%)	2,44	2,44	2,44
Rata-rata	2,44 %		

4.1.1.2.4 Pengujian Susunan Gradasi Agregat Kasar

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui dan menentukan pembagian butir agregat kasar serta menentukan modulus halus dalam butiran kerikil. Hasil analisa saringan agregat kasar dapat dilihat pada tabel 4.6. Berdasarkan ASTM C 33 agregat yang baik harus memenuhi zona lengkung ayakan. Dari tabel 4.6 didapatkan grafik lengkung ayakan agregat kasar pada gambar 4.1 dengan spesifikasi ukuran maksimal agregat 20 mm yang menunjukkan material yang digunakan memenuhi persyaratan dengan modulus halus 6,78 dengan standar 6,85-7,60.

Tabel 4.6 Hasil pengujian susunan gradasi agregat kasar

Diameter Saringan	Berat Tertahan		Kumulatif Tertahan (%)	Kumulatif Lolos (%)
	Gram	%		
76,00	0	0	0	100
37,50	0	0	0	100
19,10	618	6,31	6,31	93,69
9,50	6480	66,18	72,49	27,51
4,75	2570	26,25	98,73	1,27
2,36	124	1,27	100	0
1,18	0	0	100	0
0,60	0	0	100	0
0,30	0	0	100	0
0,15	0	0	100	0
Pan	0	0	100	0
Jumlah Berat	9792 gram		FM = 6,78	



Keterangan: Garis biru merupakan hasil analisa saringan

Gambar 4.1 Hasil ayakan agregat kasar

4.1.1.3. Agregat Halus

4.1.1.3.1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis halus curah kering, berat jenis agregat kasar SSD, berat jenis agregat halus semu dan penyerapan agregat kasar berdasarkan SNI 03-1969-1990. Hasil rata-rata dari 3 pengujian yang didapatkan dari tabel 4.7 pengujian kerikil Pasuruan adalah sebagai berikut:

- ✚ Rata-rata berat jenis halus curah kering : 2,70%
- ✚ Rata-rata berat jenis agregat kasar SSD : 2,73%
- ✚ Rata-rata berat jenis agregat kasar semu : 2,79%
- ✚ Rata-rata penyerapan agregat kasar : 1,28%

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis agregat halus sebesar 2,70% dan penyerapan air agregat halus sebesar 1,28% yang sesuai dengan persyaratan SNI 03-1969-1990, yaitu berat jenis bulk agregat halus minimum 2,5 dan penyerapan maksimum 2%.

Tabel 4.7 Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus

	I	II	III
Berat Benda Uji Kondisi SSD (W1) (gr)	500	500	500
Berat Tabung + Air + Benda Uji (W2) (gr)	1620	1619,5	1619
Berat Benda Uji Kering (W3) (gr)	493	494	494
Berat Tabung + air (W4) (gr)	1303,5	1302,5	1301,8

	I	II	III	Rata-rata
Berat Jenis Agregat Halus Curah Kering: $\frac{W3}{W1 + W2 + W3}$	2,69	2,70	2,70	2,70
Berat Jenis Agregat Halus Kondisi SSD: $\frac{W1}{W1 + W4 - W2}$	2,72	2,73	2,74	2,73
Berat Jenis Agregat Halus Semu: $\frac{W3}{W4 + W3 - W2}$	2,79	2,79	2,79	2,79
Penyerapan Agregat Halus: $\frac{W1 - W3}{W3} \times 100\%$	1,42%	1,21%	1,21%	1,28%

4.1.1.3.2. Pengujian Berat Volume agregat halus

Berdasarkan tabel pengujian berat volume agregat halus yang terdapat pada tabel 4.8 dimana hasil akhir didapatkan berat volume rata-rata 1,405 g/cm³.

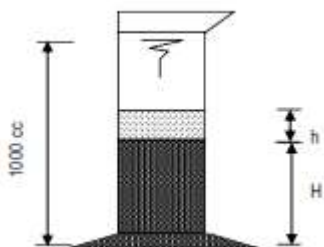
Tabel 4.8 Hasil pengujian volume agregat halus

	I	II	III
Berat Tempat (W1) (gr)	700	700	700
Berat tempat contoh (V) (gr)	5000	5000	5000
Berat Volume Padat (Compact)			
Berat Tempat + Contoh (W2) (gr)	7820	7940	7950
Berat Contoh Padat (W3 = W2 - W1) (gr)	7120	7240	7250

Berat Volume Padat	$\left(\frac{W3}{V}\right)$ (gr/cm ³)	1,424	1,448	1,450
Berat Volume Padat Rata-rata (B1)	(gr/cm ³)	1,44		
Berat Volume Gembur				
Berat Tempat + Contoh	(W2) (gr)	7540	7540	7560
Berat Contoh Gembur	(W3 = W2-W1) (gr)	6840	6840	6860
Berat Volume Gembur	$\left(\frac{W3}{V}\right)$ (gr/cm ³)	1,368	1,368	1,372
Berat Volume Gembur Rata-rata (B2)	(gr/cm ³)	1,37		
Berat Volume Rata-Rata	$\left(\frac{B1+B2}{2}\right)$ (gr/cm ³)	1,405		

4.1.1.3.3 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Berdasarkan tabel pengujian kadar lumpur agregat halus yang terdapat pada tabel 4.9 dimana hasil kadar lumpur yang didapat adalah 3,73%. Berdasarkan WB-ENG-PS-06 LK01 kadar lumpur yang diizinkan < 5% maka kadar lumpur pada split memenuhi syarat.



Syarat:

1. Kadar Lumpur < 5% volume (waktu pengendapan \pm 10 menit)
2. Pasir secara visual bersih (tidak ada kotoran)

Tabel 4.9 Hasil pengujian kadar lumpur agregat halus

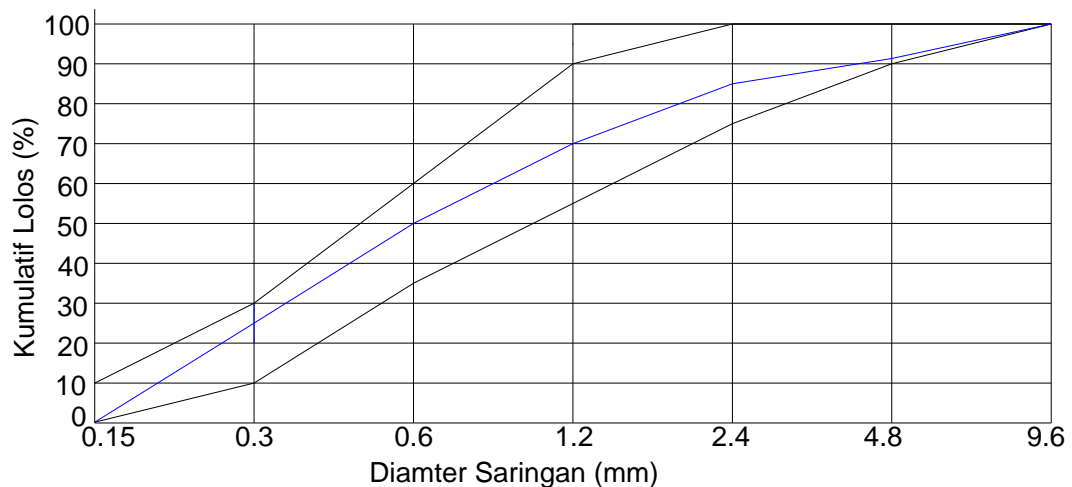
	I	II	III
Tinggi Pasir (H) (ml)	400	480	400
Tinggi Lumpur (h) (ml)	20	20	10
Kadar Lumpur (%) = $\frac{h}{H+h} \times 100$ (%)	4,76	4,00	2,44
Rata-rata	3,73 %		

4.1.1.3.4 Pengujian Susunan Gradasi Agregat Halus

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui dan menentukan pembagian butir agregat halus serta menentukan modulus halus dalam butiran kerikil. Hasil analisa saringan agregat halus dapat dilihat pada tabel 4.10. Berdasarkan SNI 03-2834-2000 pasir lumajang yang digunakan termasuk dalam zona 2 dan menunjukkan material yang digunakan memenuhi persyaratan dengan modulus halus 2,77 dengan standar 2,10-3,37.

Tabel 4.10 Hasil pengujian susunan gradasi agregat halus

Diameter Saringan	Berat Tertahan		Kumulatif Tertahan (%)	Kumulatif Lolos (%)
	Gram	%		
38,00	0	0	0	100
19,00	0	0	0	100
9,60	0	0	0	100
4,60	188	8,22	8,22	91,78
2,40	148	6,47	14,69	85,31
1,20	292	12,76	27,45	72,55
0,60	524	22,90	50,35	49,65
0,30	616	26,92	77,27	22,73
0,15	500	21,85	99,13	0,87
Pan	20	0,87	100	0
Jumlah Berat	2288 gram		FM = 2,77	



Keterangan: Garis biru merupakan hasil analisa saringan

Gambar 4.2 Hasil ayakan agregat halus

4.1.1.4. Fly Ash

4.1.1.4.1 Hasil Analisa X-Ray Flourence (XRF) Fly Ash

Fly ash yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Paiton Probolinggo. Analisa kimia fly ash dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS, Surabaya. Didapatkan hasil seperti tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Analisa X-Ray Flourence (XRF) Fly Ash

Compound	Conc	Unit	Compound	Conc	Unit	Compound	Conc	Unit	Compound	Conc	Unit
Al	9,73	0%	Al	9,83	0%	Al ₂ O ₃	12,8	0%	Al ₂ O ₃	12,7	0%
Si	30,5	0%	Si	30,7	0%	SiO ₂	43	0%	SiO ₂	43,2	0%
P	0,58	0%	P	0,58	0%	P ₂ O ₅	0,81	0%	P ₂ O ₅	0,78	0%
K	3,38	0%	K	3,37	0%	K ₂ O	2,36	0%	K ₂ O	2,37	0%
Ca	11,8	0%	Ca	11,7	0%	CaO	9,32	0%	CaO	9,32	0%
Ti	1,62	0%	Ti	1,59	0%	TiO ₂	1,47	0%	TiO ₂	1,44	0%
V	0,072	0%	V	0,073	0%	V ₂ O ₅	0,074	0%	V ₂ O ₅	0,079	0%
Cr	0,054	0%	Cr	0,05	0%	Cr ₂ O ₃	0,044	0%	Cr ₂ O ₃	0,04	0%
Mn	0,26	0%	Mn	0,26	0%	MnO	0,17	0%	MnO	0,16	0%
Fe	38,3	0%	Fe	38,1	0%	Fe ₂ O ₃	26,8	0%	Fe ₂ O ₃	26,6	0%
Cu	0,08	0%	Cu	0,1	0%	CuO	0,05	0%	CuO	0,04	0%
Mo	3,27	0%	Mo	3,3	0%	MoO ₃	3	0%	MoO ₃	3,01	0%
Ba	0,3	0%	Ba	0,4	0%	BaO	0,25	0%	BaO	0,2	0%
Na	-	-	Na	-	-	Na ₂ O	-	-	Na ₂ O	-	-

Dari hasil XRF didapatkan data seperti tabel 4.11. Masing-masing data dirata-rata sehingga didapatkan nilai rata-rata SiO₂ adalah 43,1, Al₂O₃ dengan 12,75, dan Fe₂O₃ adalah 26,7 yang dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12 Nilai rata-rata SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ Fly Ash .

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Total	Kelas
Fly Ash Paiton Probolinggo	43,1	12,75	26,7	82,55	F

ri hasil analisa fly ash didapatkan nilai total SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ = 82,55 %. Berdasarkan ASTM C-618 (*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*) nilai minimal SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ = 70% maka fly ash tersebut kelas F.

4.2 Campuran beton konvensional (NC), *Beton dengan supplementary material menggunakan Fly Ash (SMFA) dan Engineered Cementitious Composite (ECC)*

Penelitian ini juga berkeja sama dengan PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Beton konvensional (NC) dan *Beton dengan supplementary material menggunakan Fly Ash (SMFA)* menggunakan *mix design* miki PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. *Mix design* Beton NC dan beton SMFA milik PT. Wijaya Karya Beton Pasuruan direncanakan berdasarkan SNI 03-2834-2000 dengan mutu beton 50 Mpa yang ada pada tabel 4.13 dan 4.14. Berdasarkan *mix design* beton konvensional (NC) dan beton *supplementary material* menggunakan Fly Ash (*SMFA*) milik PT. Wijaya Karya Beton Pasuruan didapatkan proporsi campuran beton konvensional (NC) dan beton *supplementary material* menggunakan Fly Ash (*SMFA*) seperti pada tabel 4.15.

Sedangkan *mix design Engineered Cementitious Composite (ECC)* diambil dari penelitian terdahulu berjudul *Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures using Locally Available Materials in the UK* (Pourfalah & Suryanto, 2013) yang dikembangkan menggunakan water to binder dan rasio fly ash-over-cement seperti pada tabel 3.2. Proporsi campuran beton NC, beton SMFA dan ECC dapat dilihat pada tabel 4.15.

Tabel 4.13 *Mix Design* Beton Konvensional milik PT Wijaya Karya Beton, Tbk berdasarkan SNI 03-2834-2000

No	Uraian	Tabel / Grafik Perhitungan	Nilai
1	Kuat tekan karakteristik	Ditetapkan	52 Mpa pada 28 hari
2	Standard deviasi	Butir 4.3.2.1.1) (2 tabel 1)	6 Mpa atau tanpa data
3	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2)	$1,64 \times 6 = 9$ Mpa
4	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.3	$52 + 9 = 61$ Mpa
5	Jenis semen	Ditetapkan	Ordinary Portland Cement Tipe I
6	Jenis admixture		Tamcem 60 RS
7	Jenis agregat halus	Pasir Alami Lumajang	Pasir alami

8	Jenis agregat kasar	Kerikil Pasuruan	Batu Pecah
9	Faktor air semen bebas	Tabel-2 SNI 03-2834-2000 Grafik-2 SNI 03-2834-2000	0,3
10	Faktor air semen maks	Diketahui	0,6
11	Slump	Ditetapkan	20 - 24 mm
12	Ukuran agregat max.	Ditetapkan	20 mm
13	Kadar air bebas	Tabel 6 Ayat 3.3.5	156 kg/m ³
14	Jumlah semen	11: 8 atau 7	156/0,3 = 525 kg/m ³
15	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	-
16	Jumlah semen minimum	Ditetapkan	325 kg/m ³
17	Faktor air semen yang disesuaikan		0,3
18	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3 s/d 6	Daerah gradasi susunan butir zona 2
19	Persen agregat halus		42 %
20	Berat jenis relative agg. Gabungan (Kering permukaan)		2,71 t/m ³
21	Berat jenis beton	Grafik 16	2400 kg/m ³
22	Kadar mixture	Ditetapkan	1,1% → 0,011 x 525 = 5,5 ltr/m ³
23	Kadar agg. gabungan	21-(14+13)-22	1818 kg/m ³
24	Kadar agregat halus	19 X 23	764 kg/m ³
25	Kadar agregat kasar	23-24	1054 kg/m ³

Banyak bahan	Semen (kg)	Kerikil (kg)	Pasir (kg)	Air (kg)	Admixture (liter)
Tiap m ³	525	1054	764	156	5,5

Tabel 4.14 *Mix Design* Beton *supplementary material* menggunakan Fly Ash (SMFA) milik PT Wijaya Karya Beton, Tbk berdasarkan SNI 03-2834-2000

No	Uraian	Tabel / Grafik Perhitungan	Nilai
1	Kuat tekan karakteristik	Ditetapkan	52 Mpa pada 28 hari
2	Standard deviasi	Butir 4.3.2.1.1) (2 tabel 1)	6 Mpa atau tanpa data
3	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2)	$1,64 \times 6 = 9$ Mpa
4	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.3	$52 + 9 = 61$ Mpa
5	Jenis semen	Ditetapkan	Ordinary Portland Cement Tipe I
6	Jenis admixture		Tamcem 60 RS
7	Jenis agregat halus	Pasir Alami Lumajang	Pasir alami
8	Jenis agregat kasar	Kerikil Pasuruan	Batu Pecah
9	Faktor air semen bebas	Tabel-2 SNI 03-2834-2000 Grafik-2 SNI 03-2834-2000	0.3
10	Faktor air semen maks	Diketahui	0,6
11	Slump	Ditetapkan	20 - 24 mm
12	Ukuran agregat max.	Ditetapkan	20 mm
13	Kadar air bebas	Tabel 6 Ayat 3.3.5	156 kg/m^3
14	Jumlah semen	11: 8 atau 7	$156/0,3 = 525 \text{ kg/m}^3$
15	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	-
16	Jumlah semen minimum	Ditetapkan	325 kg/m^3
17	Faktor air semen yang disesuaikan		0,3
18	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3 s/d 6	Daerah gradasi susunan butir zona 2
19	Persen agregat halus		41 %
20	Berat jenis relative agg. Gabungan (Kering permukaan)		$2,71 \text{ t/m}^3$

21	Berat jenis beton	Grafik 16	2400 kg/m ³
22	Kadar mixture	Ditetapkan	1,1% → 0,011 x 525 = 5,5 ltr/m ³
23	Kadar agg. gabungan	21-(14+13)-22	1818 kg/m ³
24	Kadar agregat halus	19 X 23	731 kg/m ³
25	Kadar agregat kasar	23-24	1054 kg/m ³

Komposisi Fly ash per 1 m³

Faktor pengali Fly ash 1,1 = 1,1 X 525 = 550 Kg

Dosis Fly ash (15%) = 80 Kg

Jumlah semen = 470 Kg

Banyak bahan	Semen (kg)	Fly ash (Kg)	Kerikil (kg)	Pasir (kg)	Air (kg)	Admixture (liter)
Tiap m ³	470	80	1054	731	156	5,5

Tabel 4.15 Proporsi Campuran Beton NC, Beton SMFA dan ECC

Type	Materials	Mix Proportion
Beton Konvensional (NC)	Cement	525 kg/m ³
	Fine Aggregate	764 kg/m ³
	Coarse Aggregate	1054 kg/m ³
	Water	156 liter/m ³
	Tamcem 60 RS	5,5 liter/m ³
Beton supplementary material menggunakan fly ash (SMFA)	Cement	470 kg/m ³
	Fine Aggregate	731 kg/m ³
	Coarse Aggregate	1052 kg/m ³
	Water	156 liter/m ³
	Tamcem 60 RS	5,5 liter/m ³
	Fly Ash	80 kg/m ³
Engineered Cementitious Composite (ECC)	Cement	465 kg/m ³
	Fly Ash	743,86 kg/m ³
	Silica Sand	389,32 kg/m ³
	Water	283,86 liter/m ³
	HRWR	2,73 liter/m ³
	Fibre	25,74 kg/m ³

4.3 Kuat Tekan

Beton konvensional (NC) dan beton *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) menggunakan komposisi *mix design* dari PT. Wijaya Karya Beton dengan spesifikasi mutu 50 MPa. Pada beton SMFA, digunakan fly ash sebesar 15% dari berat semen. Sedangkan untuk *Engineered Cementitious Composite* (ECC) menggunakan komposisi *mix design* dari penelitian terdahulu berjudul *Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures using Locally Available Materials in the UK* (Pourfalah & Suryanto, 2013) yang dikembangkan menggunakan water to binder dan rasio fly ash-over-cement dengan target mutu semua jenis beton adalah 45 Mpa.

Berdasarkan hasil uji kuat tekan *design* beton konvensional (NC) dan beton *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) yang dilakukan di Laboratorium WIKA Pasuruan dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC) di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan ITS didapatkan hasil seperti pada table 4.16.

Tabel 4.16 Hasil uji kuat tekan

Jenis Beton	Umur Beton (Hari)	P (N)	A (mm ³)	Berat (Kg)	Kuat Tekan (Mpa)	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)
NC	28	903260	17662,5	13,440	51.140	50.80
	28	900000	17662,5	13,580	50.900	
	28	890000	17662,5	13,530	50.360	
SMFA	28	953976	17662,5	13,480	54.011	54.88
	28	965818	17662,5	13,520	54.680	
	28	988100	17662,5	13,500	55.940	
ECC	28	90906	1962,5	0,422	46.300	45.86
	28	89938	1962,5	0,4325	45.805	
	28	89281	1962,5	0,4195	45.471	

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan kuat tekan rata-rata 28 hari beton konvensional (NC) sebesar 50,80 MPa, Beton *suppelementary material* menggunakan Fly Ash (SMFA) adalah 54,88 MPa, dan ECC sebesar 45,86 Mpa. Kuat tekan beton SMFA lebih besar dibandingkan beton konvensional. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fly ash memiliki ukuran butiran fly ash yang sangat kecil (45 μm) dibandingkan dengan ukuran butiran semen (75 μm). Fly ash dapat mengisi pori-pori dalam beton sehingga menjadi lebih padat dan kuat. Kandungan silika (SiO_2) yang tinggi dalam fly ash dapat mempengaruhi proses hidrasi semen. Silika berikatan dengan Ca(OH)_2 untuk membentuk gel C-S-H sehingga meningkatkan kekuatan beton (Shih et al., 2006). Pengikat tambahan yang dihasilkan oleh reaksi fly ash dan kapur memungkinkan beton yang dicampur dengan fly ash dapat meningkatkan kekuatan dari waktu ke waktu (Upadhyay and Kamal, 2007).

Kuat tekan ECC tidak berbeda secara signifikan dari beton konvensional ke beton mutu tinggi. Berdasarkan penelitian terdahulu hasil kuat tekan ECC bervariasi 30 hingga 60 Mpa, tergantung pada proporsi campuran komposisinya. Pada penelitian Zhou et al (2014) menggunakan benda uji silinder pada 28 hari mendapatkan kuat tekan ecc sebesar 35-60

Mpa. Kuat tekan ECC yang dihasilkan dari penelitian Tambusay et al (2015) sebesar 48,70 Mpa dan 49,67 Mpa. Hasil penelitian Chung et al (2017) mendapatkan kuat tekan dengan nilai 44,9 Mpa, 46,1 Mpa, dan 51,1 Mpa. Dapat disimpulkan bahwa kuat tekan ecc yang dihasilkan pada penelitian ini tidak jauh berbeda dengan penelitian terdahulu.

Perilaku ECC pada saat di tekan cenderung lebih halus dibandingkan beton dengan kekuatan tinggi dan disertai dengan tonjolan pada badan silinder secara bertahap dari pada kegagalan dengan kehancuran secara eksplosif yang dapat dilihat pada gambar 4.3. (Wang and Li, 2007). Hal tersebut juga terjadi pada saat benda uji ECC di uji tekan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.3. Benda Uji ECC setelah di uji tekan (Wang and Li, 2007)



Gambar 4.4 Benda Uji ECC setelah di uji tekan

Dalam desain beton konvensional, parameter material yang paling penting adalah kuat tekan. Hal ini dikarenakan kinerja structural sering dianggap diatur oleh kekuatan materialnya. Kekuatan material yang lebih

tinggi diharapkan menyebabkan kekuatan structural yang lebih tinggi. Menurut Wang dan Li (2007) Konsep ini hanya valid jika property kekuatan material benar-benar mengatur mode kegagalan. Namun, jika kegagalan yang dicari karena tarik maka bahan kekuatan tinggi tidak selalu berarti kekuatan structural akan lebih tinggi. Melainkan material dengan ketangguhan yang tinggi dan daktail seperti ECC dapat menghasilkan kekuatan sktruktural yang lebih tinggi.

4.4 Kuat Tarik

4.4.1 Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kuat tarik baja beton dan parameter lainnya (tegangan leleh, tegangan putus dan regangan). Prinsip pengujian ini adalah benda uji dengan ukuran tertentu diberi beban gaya tarik secara kontinyu pada ujung kedua uji benda uji hingga putus. Pada penelitian ini benda uji yang digunakan adalah benda uji baja tulangan polos diameter 8 mm ($\varnothing 8$) dan tulangan ulir diameter 10 mm (D10) sesuai dengan SNI 2052-2017 berjumlah 3 buah untuk masing-masing diameter. Hasil pengujian tarik tulangan dapat dilihat pada tabel 4.17 dan 4.18.

Tabel 4.17 Hasil Uji Tulangan $\varnothing 8$

Benda Uji	A_{awal}	A_{akhir}	Tegangan Leleh	Tegangan Ultimate	Regangan Maximum	Elongation
	(mm ²)	(mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
$\varnothing 8 - 1$	50,24	27,6	393,66	537,21	37,234	30,964
$\varnothing 8 - 2$	50,24	30,7	398,214	543,928	47,758	39,37
$\varnothing 8 - 3$	50,24	29,2	399,566	540,816	44,332	38,356
Rata-rata	50,24	29,21	397,146	540,65	42,7747	36,23

Tabel 4.18 Hasil Uji Tulangan D10

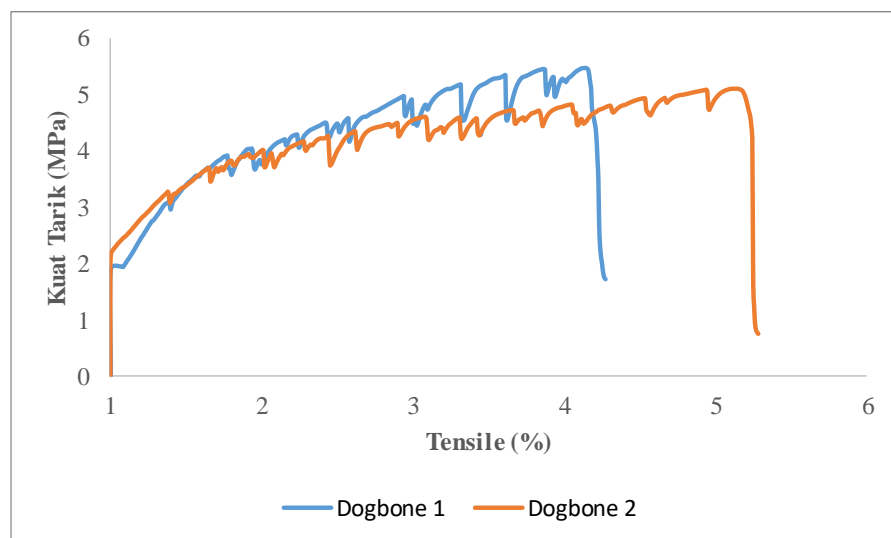
Benda Uji	A_{awal}	A_{akhir}	Tegangan Leleh	Teganang Ultimate	Regangan Maximum	Elongation
	(mm ²)	(mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
D10 - 1	78,5	55,7	520,974	616,129	33,422	23,69
D10 - 2	78,5	56,7	560,982	652,695	38,358	28,932

D10 - 3	78,5	57,8	595,1	679,114	40,056	31,23
Rata-rata	78,5	56,72	559,019	649,313	37,2787	27,95

Dari tabel 4.17 diketahui nilai tegangan leleh benda uji Ø8-1 sebesar 393,66 Mpa, Ø8-2 sebesar 398,214 MPa, dan Ø8-3 sebesar 399,566 Mpa. Maka nilai tegangan leleh rata-rata dari specimen tulangan baja Ø8 adalah 397,146 MPa. Selanjutnya pada tabel 4.18 diketahui hasil uji tarik benda uji, tegangan leleh D10-1 sebesar 520,974 Mpa, D10-2 sebesar 560,982 MPa, dan D10-3 sebesar 595,100 Mpa. Maka nilai tegangan leleh rata-rata dari specimen tulangan baja D10 adalah 559,019 MPa.

4.4.1 Kuat tarik ECC

Kuat tarik (*tensile strength*) merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh suatu bahan ketika diregangkan sebelum bahan tersebut patah (Samsuddin et al, 2009). Uji kuat tarik dilakukan dengan menggunakan benda uji dogbone. Pada penelitian ini Pengujian kuat tarik ECC (*Engineered Cementitious Composite*) dengan menggunakan benda uji dogbone dengan ukuran lebar 60 mm, tebal 10 mm dan Panjang 330 mm sebanyak 2 buah didapatkan hasil seperti pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Grafik uji tarik dogbone

Berdasarkan Penelitian Victor Li (2008) berjudul *Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance* karakteristik dari ECC adalah memiliki nilai kuat tarik ultimit sebesar 4 – 12 Mpa dan memiliki regangan tarik ultimit 1-8 %. Pada penelitian Guan et al (2018) didapatkan hasil retak pertama terdapat pada saat kuat tarik mencapai 2,9 MPa. Setelah terjadi retak pertama, kuat tarik terus meningkat hingga menghasilkan lebih banyak retak-retak mikro. Kuat tarik ultimit terdapat pada saat kuat tarik mencapai 4,4 MPa dengan kapasitas regangan 4,5%.

Leepach & Li (2007) menggunakan 3 benda uji ecc dengan volume fiber PVA berbeda-beda. ECC-1 menggunakan fraksi volume fiber PVA 1% dari berat total. ECC-3 menggunakan fraksi volume fiber PVA 1,5% dari berat total. ECC-5 menggunakan fraksi volume fiber PVA 2% dari berat total. Didapatkan retak pertama pada 3 variasi benda uji ECC saat kuat tarik mencapai antara 2,8 MPa hingga 5 MPa. Kuat ultimit pada 3 variasi benda uji ECC saat kuat tarik mencapai antara 5 MPa hingga 6,7 MPa dengan regangan maksimum antara 1,5% dan 5%.

Qin et al (2019) menggunakan 3 buah ECC menggunakan fraksi volume fiber PVA 2% dari berat total. Didapatkan retak pertama pada 3 variasi benda uji ECC saat kuat tarik mencapai antara 6 MPa hingga 8 MPa. Kuat ultimit pada 3 variasi benda uji ECC saat kuat tarik mencapai antara 8,5 MPa hingga 9 MPa dengan regangan maksimum antara 6% dan 8%.

Berdasarkan gambar 4.3 dan 4.4 dapat disimpulkan bahwa benda uji dogbone ECC pada penelitian ini dengan fraksi volume 2% yaitu dogbone 1 retak pertama terjadi pada saat kuat tarik mencapai 3 MPa dan memiliki kuat tarik ultimit sebesar 5 Mpa dengan kapasitas regangan 4,1 %. Dogbone 2 retak pertama terjadi pada saat kuat tarik mencapai 3,2 MPa dan memiliki kuat tarik ultimit sebesar 5 Mpa dengan kapasitas regangan 5,1%. Beban dari 0 meningkat hingga mencapai batas elastis. Pada batas elastis terjadi retak mikro pertama pada dogbone ECC. Peningkatan beban selanjutnya menghasilkan response *strain-hardening* dimana jumlah

peningkatan retak mikro terbentuk sehingga kapasitas beban terus meningkat sampai kapasitas regangan tarik habis. Kegagalan akhir dari benda uji dogbone terjadi ketika salah satu dari banyak retakan membentuk celah lebih besar sehingga akan kehilangan kapasitas tarikan serat di mortar pada daerah retak tersebut.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik pada penelitian ini didapatkan hasil sama dengan penelitian terdahulu yaitu antara 2 hingga 5 MPa. Sedangkan regangan maksimum pada penelitian juga mirip dengan penelitian terdahulu. Pada penelitian ini didapatkan regangan tarik sebesar 4,1% dan 5,1% dan penelitian terdahulu antara 4,5% hingga 8%.

4.5 Korosi pada Balok

Pada penelitian ini untuk korosi pada beton digunakan metode percepatan korosi yaitu galvanostatik. Percepatan korosi ini menggunakan menggunakan power supply untuk mengaliri arus listrik ke benda uji yang terendam pada larutan yang terkandung NaCl sebesar 5% dengan ukuran arus tertentu untuk mempecepat proses korosi tulangan beton. Sebelum dilakukan percepatan korosi, benda uji sebelumnya di moist curing terlebih dahulu selama 28 hari untuk menjaga kelembapan beton. Selanjutnya dilakukan *pre-crack* untuk menghasilkan retak pada beton. Pengujian *pre-crack* dilakukan di *Workshop* struktur di ITS. *Pre-crack* diberikan sampai terjadi retak pada selimut beton dan *pre-crack* dihentikan saat retak sudah mencapai setengah tinggi balok. *Pre-crack* dihentikan saat beban mencapai 19,6133 kN. Pengujian *pre-crack* dapat dilihat pada hgambar 4.6. Gambar pola retak balok dapat dilihat pada gambar 4.7, 4.8, dan 4.9.



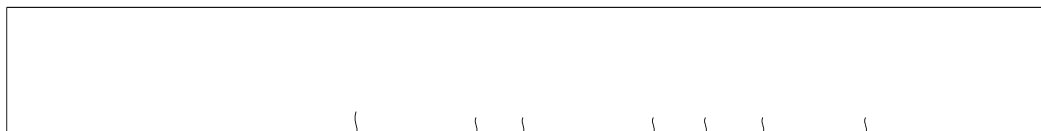
Gambar 4.6 *Set-up* pengujian *pre-crack*



Gambar 4.7 Pola retak *pre-crack* balok NC



Gambar 4.8 Pola retak *pre-crack* balok SMFA



Gambar 4.9 Pola retak *pre-crack* balok ECC

Lebar retak balok *pre-crack* pada masing-masing benda uji juga diamati pada penelitian ini. Berdasarkan hasil ekperimental ukuran lebar retak *pre-crack* dapat dilihat pada tabel 4.19.

Tabel 4.19 Ukuran lebar retak *Pre-crack*

Balok	Lebar Retak (mm)				
	NC	0,047	0,015	0,039	0,055
Rata-rata : 0,0366 mm					
SMFA	0,035	0,034	0,038	0,025	0,022
	Rata-rata : 0,0308 mm				
ECC	0,029	0,029	0,028	0,023	0,035
	Rata-rata :0,0288 mm				

Pada tabel 4.21 lebar retak *pre-crack* rata-rata balok NC adalah 0,0366 mm, balok SMFA dengan 0,0308 mm dan balok ECC sebesar 0,0288 mm. Balok ECC memiliki lebar retak terkecil dibandingkan balok NC dan balok SMFA.

Setelah dilakukan *pre-crack*, balok *pre-crack* dimasukkan ke dalam kolam dan diberi air larutan NaCl 5% dengan kedalaman air sebatas selimut beton yaitu 3 cm. Setelah balok *pre-crack* terendam air larutan NaCl, balok langsung dialiri arus listrik pada hari yang sama. Model rangkaian instalasi listrik yang digunakan untuk percepatan korosi dapat dilihat pada gambar 3.6. Sumber arus listrik berasal dari *power supply* dengan arus listrik yang diberikan sebesar 0,3 A. Rangkaian listrik terdiri dari anoda yaitu tulangan tarik baja yang tertanam pada beton dan katoda yaitu *stainless steel*. Pada *power supply* kabel arus positif digabungkan dengan tulangan tarik baja dan kabel arus negatif digabungkan dengan *stainless steel*. Percepatan korosi dilakukan selama 1 bulan. Proses instalasi percepatan korosi pada balok dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Instalasi pengujian percepatan korosi

Untuk mendapatkan arus listrik percepatan korosi, menggunakan perhitungan dengan mematok seberapa *degree of corrosion* yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan dengan *degree of corrosion* sebesar 20% agar korosi pada beton tidak sampai terjadi *spalling* dimana didapatkan nilai arus listrik sebesar 0,3A. Pengujian dilakukan dengan arus listrik 0,3A dengan waktu pengujian 1 bulan. Untuk menghitung kebutuhan arus listrik yang diperlukan adalah sebagai berikut:

Diket: Asumsi korosi tulangan / *Degree of Corrosion* (ρ) = 20%

Diameter tulangan	= 1 cm
Panjang diameter tulangan (L)	= 200 cm
Berat jenis tulangan (D)	= 7,850 gr/cm ³
Berat Atom valensi tulangan (v)	= 27,925 gr
Jumlah ion Fe (z)	= 2

Konstanta Faraday (F)	= 96,487 amp.s
Konsentrasi NaCl	= 5%
Lama waktu korosi	= 1 bulan
	= 2592000 sec

Menghitung permukaan tulangan (*surface area*):

$$\begin{aligned}
 A &= \pi \cdot \text{Diameter tul.} \cdot L \cdot (2 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot \text{Diameter tul}^2) \\
 &= 3,14 \cdot 1.200 \cdot (2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 1^2) \\
 &= 629,57 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

Menghitung berat tulangan awal (*Innitial Weight of Steel Bar*):

$$\begin{aligned}
 W_i &= (\frac{1}{4} \pi \cdot \text{Diameter tul}^2) \cdot D \cdot L \\
 &= (\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 1^2) \cdot 7,850 \cdot 200 \\
 &= 1232,45 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

Menghitung berat tulangan setelah korosi (*Weight of Steel Bar after corrosion*):

$$\begin{aligned}
 W_f &= W_i - (\frac{\rho \cdot W_i}{100}) \\
 W_f &= 1232,45 - (\frac{20 \cdot 1232,45}{100}) \\
 &= 985,96 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

Menghitung masa aktual tulangan akibat korosi per satuan luas permukaan tulangan:

$$\begin{aligned}
 M_{AK} &= \frac{W_i - W_f}{\pi \cdot \text{Diameter tul.} \cdot L} \\
 &= \frac{1232,45 - 985,96}{3,14 \cdot 1.200} \\
 &= 0,3925 \text{ gr/cm}^2
 \end{aligned}$$

Menghitung kebutuhan arus listrik *power supply*:

$$\begin{aligned}
 I_{app} &= \frac{M_{AK} \cdot F}{v \cdot t} \\
 &= \frac{0,3925 \cdot 96,487}{27,925 \cdot 2592000} \\
 &= 0,00052 \text{ Amp/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$I_{power\ supply} = A \cdot I_{app}$$

$$= 629,57 \cdot 0,00052$$

$$= 0,329 \text{ Amp} = 0,3 \text{ A}$$

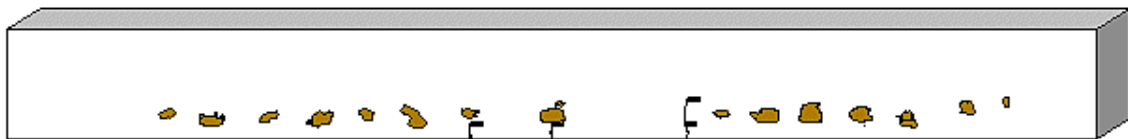
Tabel hasil perhitungan korosi dapat dilihat pada tabel 4.20.

Tabel 4.20 Perhitungan mencari arus korosi

Balok	Degree of corrosion %	Diameter of bar cm	Length of bar cm	Surface area cm ²	Innitaal weight of steel bar (w _i) gr	Weight after corrosion (w _f) Gr	Actual mass of rust gr/cm ²	Exposed time		Current apply		
								Month	sec	Amp/cm ²	ρAmp/cm ²	Amp
E	20	1	200	629,57	1232,45	985,96	0,3925	1	2592000	0,00052	523,215	0,3294

Adapun penyebaran korosi pada masing- masing benda uji dari minggu pertama hingga minggu keempat adalah dapat dilihat pada gambar4.11, 4.12, 4.13, dan 4.14.

✚ Beton NC minggu pertama



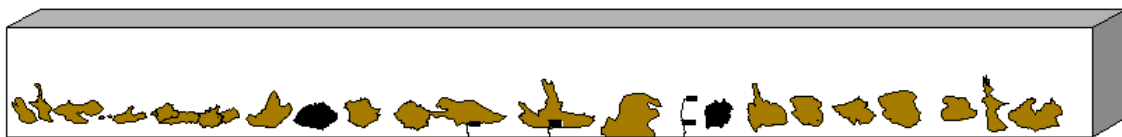
Gambar4.11 Balok NC korosi minggu pertama

✚ Beton NC minggu kedua



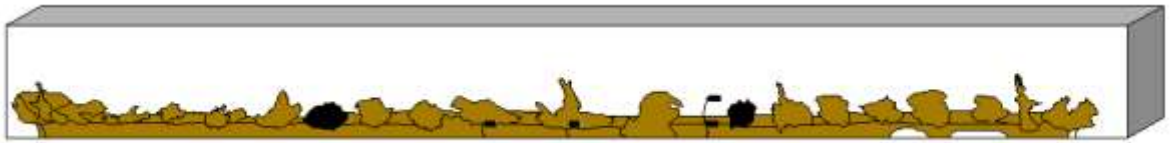
Gambar 4.12 Balok NC korosi minggu kedua

✚ Beton NC minggu ketiga



Gambar4.13 Balok NC korosi minggu ketiga

✚ Beton NC minggu keempat

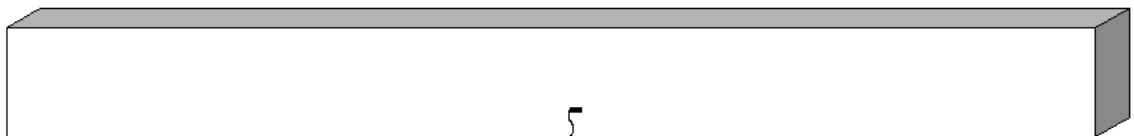


Gambar4.14 Balok korosi NC sisi minggu keempat

Pada minggu pertama balok NC sudah mulai terlihat tanda korosi pada permukaan beton terlihat dari pada gambar 4.12. Korosi berkembang dari minggu kedua hingga minggu keempat. Selain memiliki penyebaran korosi palang banyak dibandingkan balok SMFA dan balok ECC, didapatkan juga lubang akibat korosi pada daerah *pre-crack* yang terletak pada samping kanan dan kiri balok NC. Korosi dihentikan pada minggu ke empat sesuai dengan waktu percepatan korosi sesuai pada penelitian ini yaitu 1 bulan.

Selanjutnya pada benda uji balok SMFA pada minggu pertama seperti pada gambar 4.15, belum terlihat tanda korosi pada permukaan beton. Saat minggu kedua yaitu gambar 4.16 mulai terlihat sedikit korosi pada permukaan beton dan berkembang hingga waktu percepatan korosi dihentikan seperti gambar 4.17 dan 4.18. Balok SMFA memiliki penyebaran korosi paling sedikit dibandingkan dua tipe beton lainnya.

✓ Beton SMFA minggu pertama



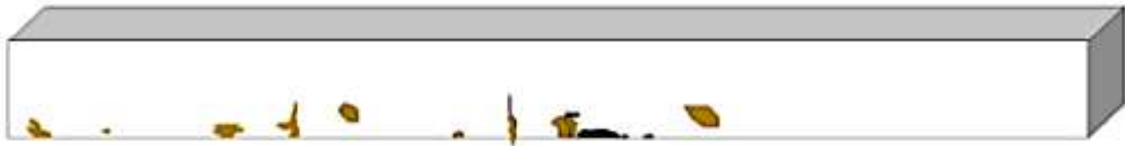
Gambar4.15 Balok SMFA korosi minggu pertama

✓ Beton SMFA minggu kedua



Gambar4.16 Balok SMFA korosi minggu kedua

- ✓ Beton SMFA minggu ketiga



Gambar4.17 Balok SMFA korosi minggu ketiga

- ✓ Beton SMFA minggu keempat



Gambar4.18 Balok SMFA korosi minggu keempat

Balok ECC memiliki cukup banyak tanda penyebaran korosi dibandingkan balok SMFA. Walaupun banyak tanda korosi, balok ECC tidak memiliki lubang akibat korosi seperti balok NC. Penyebaran korosi balok ECC dapat dilihat pada gambar 4.19,4.20, 4.21, dan 4.22.

- ❖ Balok ECC minggu pertama



Gambar4.19 Balok ECC korosi minggu pertama

- ❖ Balok ECC minggu kedua



Gambar4.20 Balok ECC korosi minggu kedua

❖ Balok ECC minggu ketiga



Gambar4.21 Balok ECC korosi minggu ketiga

❖ Balok ECC minggu keempat



Gambar4.22 Balok ECC korosi minggu keempat

Setiap tipe beton memiliki ukuran lebar retak bervariasi. Lebar retak setelah korosi dapat dilihat pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Ukuran lebar retak setelah korosi

Balok	Lebar Retak (mm)				
	NC	0,479	0,483	0,0440	0,694
Rata-rata : 0,5862 mm					
SMFA	0,358	0,341	0,375	0,502	0,558
	Rata-rata : 0,4268 mm				
ECC	0,104	0,141	0,120	0,103	0,067
	Rata-rata : 0,1070 mm				

Pada saat balok NC *di pre-crack* nilai lebar retak rata-rata adalah 0,0366 mm, akan tetapi setelah terjadi korosi lebar retak balok mengalami peningkatan ukuran lebar retak menjadi 0,5862 mm. Balok *pre-crack* SMFA awalnya memiliki lebar retak rata-rata yaitu 0,0308 mm, setelah korosi lebar retak menjadi 0,4268 mm. Sedangkan balok *pre-crack* ECC memiliki lebar retak 0,0288 mm, setelah korosi menjadi 0,107 mm. Retak pada setiap balok semakin meningkat karena dengan berjalannya waktu, karat akibat korosi berakumulasi pada permukaan tulangan dan mulai mendesak kulit selimut beton. Penambahan volume akibat karat yang lebih besar dari volume awal besi akan menimbulkan terjadinya

desakan dan tarikan di dalam beton. Bila tegangan tarik yang terjadi sudah melebihi kekuatan tarik beton, maka akan terjadi retak.

Pada penelitian ini untuk menghitung laju korosi (*corrosion rate*) menggunakan rumus yang sesuai dengan ASTM G 1-90. Percepatan korosi dilakukan selama 1 bulan dengan arus listrik sebesar 0,3 A. Tabel 4.22 menunjukkan laju korosi (L) dan *degree of corrosion* (ρ) setiap benda uji. Adapun variabel untuk menghitung laju korosi (L) adalah berat tulangan akibat korosi (W), waktu percepatan korosi (T), luas penampang tulangan (A), Berat jenis/*density* tulangan (D) sebesar 7,850 gr/cm³, Konstanta (K) sebesar 8.76 mm/yr. Hasil laju korosi masing-masing benda uji dapat dilihat pada tabel 4.22.

Tabel 4.22 Laju korosi balok NC, SMFA dan ECC

Balok	Tulangan	Berat Awal gr	Berat akhir gr	Berat yang hilang gr	ρ %	Waktu jam	A cm ²	D gr/cm ²	K mm/yr	L mm/yr
NC	Utama	6058.248	5789	269.248	4.651	720	0.785	7.857	87.6	5.311
	Sengkang	4210	3978	232	5.832	720	0.5024	7.857	87.6	7.150
SMFA	Utama	6058.248	5930	128.248	2.162	720	0.785	7.857	87.6	2.529
	Sengkang	4210	4098	112	2.733	720	0.5024	7.857	87.6	3.452
ECC	Utama	6058.248	5989	69.248	1.156	720	0.785	7.857	87.6	1.366
	Sengkang	4210	4152	58	1.396	720	0.5024	7.857	87.6	1.787

Laju korosi terbesar ada pada balok beton normal (NC). Hal ini dikarenakan air larutan NaCl tidak hanya masuk dari retak hasil *pre-crack* pada beton, tetapi juga masuk melalui pori-pori pada beton. Molekul air sangat kecil sehingga mampu menebus pori-pori atau rongga yang sangat kecil sekalipun (Pramudiyanto, 2011). Air larutan NaCl masuk ke dalam beton tersebut akan bereaksi dengan besi dan udara hingga menghasilkan senyawa baru yaitu karat. Semakin besar air larutan NaCl masuk ke dalam beton akan semakin cepat laju korosi korosinya. Laju korosi terkecil terdapat pada balok ECC karena lebar retak ECC lebih rendah dibandingkan NC dan SMFA. Sedangkan pada balok NC dan

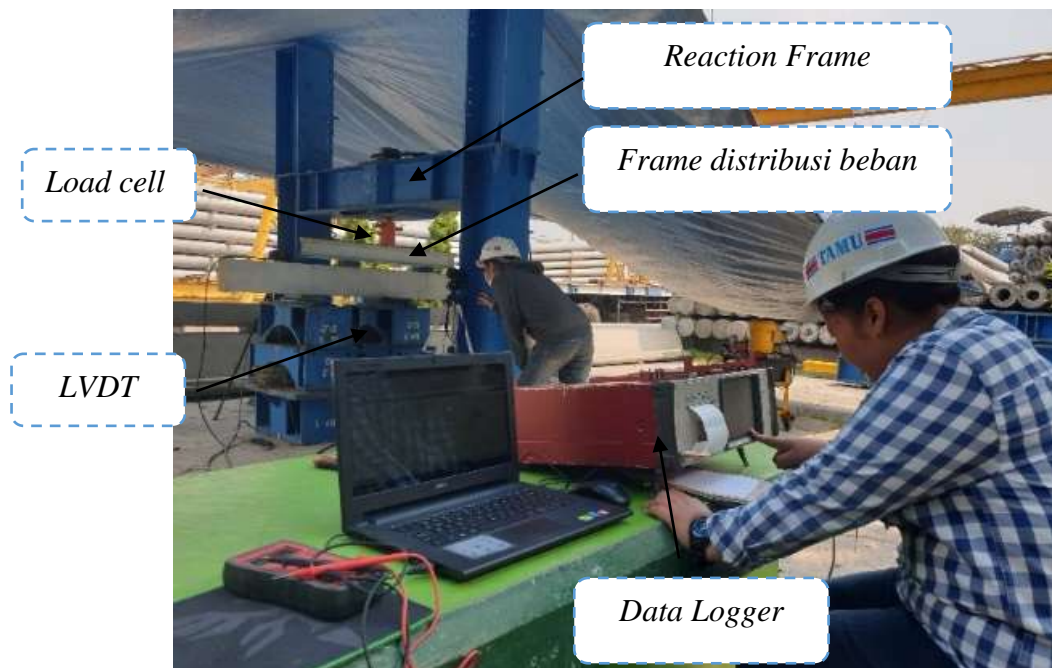
SMFA, selain perubahan lebar retak lebih besar, juga ditemukan spalling akibat korosi pada masing-masing balok. Sehingga selain retak, spalling pada balok NC dan SMFA juga semakin memberikan jalan masuk zat agresif sehingga laju korosi NC dan SMFA lebih besar dibandingkan ECC.

4.6 Kapasitas lentur

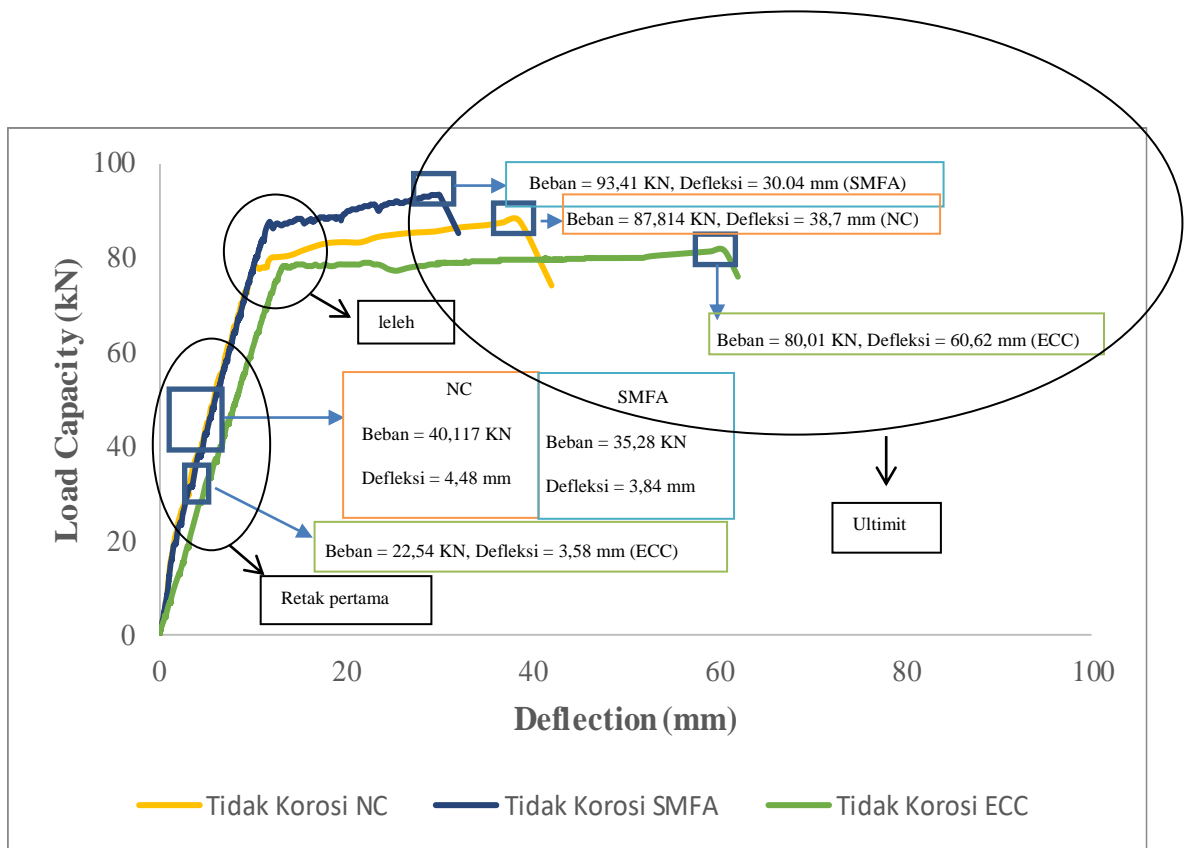
4.6.1 Kapasitas Lentur Balok Kontrol (Tidak Ada Korosi)

Pengujian lentur dilakukan menggunakan pengujian *four point bending* dengan lokasi pengujian berada di PT Wijaya Karya Beton, Tbk seperti gambar 4.23. Pengujian ini dilakukan saat beton mencapai umur 28 hari. Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan balok diatas dua tumpuan dan dibebani dua beban terpusat. Balok diberi beban hingga mengalami keruntuhan.

Adapun data-data yang diambil pada penelitian ini adalah beban dari *load cell* dan defleksi dari LVDT yang dipasang di bawah dan berada di tengah bentang balok yang didisambungkan pada *data logger*. Pada gambar 4.24 merupakan grafik hasil pengujian *four point bending*.



Gambar 4.23 Pengujian *Four Point Bending* di PT Wijaya Karya Beton, Tbk.



Gambar 4.24 Hubungan *load-deflection* Balok Kontrol

Pengujian *four point bending* yang dilakukan pada masing-masing jenis beton dengan benda uji balok ukuran 100 X 200 X 2000 mm menghasilkan grafik hubungan beban dan defleksi seperti pada gambar 4.28. Dari hubungan beban dan defleksi ditunjukkan pada gambar 4.27. Dapat dilihat pada gambar 4.24 terdapat tiga bagian utama yang terbentuk yaitu bagian retak pertama, bagian leleh dan bagian ultimit.

Pada bagian retak pertama, balok beton konvensional (NC) retak pertama terjadi di beban 40,117 kN. Pada balok *supplementary material* menggunakan fly ash (SMFA) retak pertama terjadi di beban 35,28 kN. Sedangkan balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC) retak pertama terjadi di beban 22,54 kN.

Setelah terjadi leleh, retak mulai semakin berkembang di tengah bentang balok yang disebabkan oleh semakin bertambahnya beban yang diberikan pada balok. Pada ECC banyak menghasilkan retak-retak mikro pada daerah tarik karena fiber dari campuran ECC pada saat terjadi pembebanan dimana

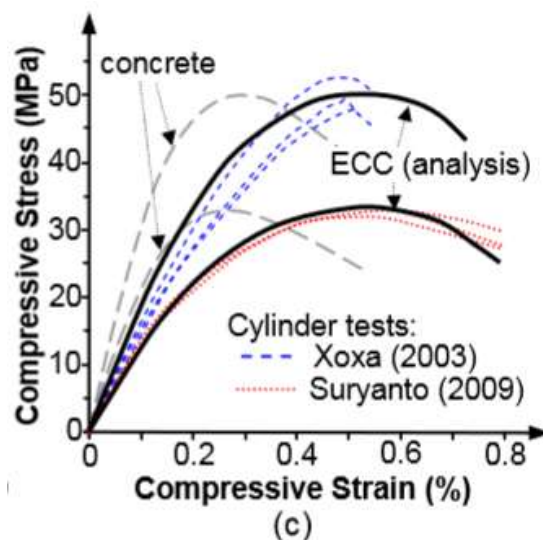
memastikan bahwa beban tidak berkurang secara drastis setelah retak awal (Khrisnaraja and Kandasamy, 2017).

Berdasarkan gambar 4.24 didapatkan bahwa balok NC memiliki beban maksimum 87,814 kN. Balok SMFA memiliki beban maksimum 93,41 kN. Balok ECC memiliki beban maksimum 80,01 kN. Kapasitas lentur balok berbeda disebabkan oleh kuat tekan ECC berada dibawah NC dan SMFA.

Beberapa penelitian telah membahas tentang pengaruh kuat tekan terhadap kapasitas lentur balok bertulang. Menurut NRMCA (2017) kapasitas lentur balok dipengaruhi 10-20% dari kuat tekan beton. Sedangkan kuat tekan beton tergantung dari jenis, ukuran, dan volume agregat yang digunakan. Aidil (2017) melakukan penelitian dengan simulasi komputer dengan menggunakan balok dengan variasi mutu beton yaitu 15 MPa, 17,5 MPa, 20 MPa, 22,5 MPa, 25 MPa, dan 27,5 MPa. Didapatkan hasil kapasitas lentur pada mutu beton 27,5 MPa lebih besar dibandingkan mutu beton lainnya. Didapatkan bahwa terjadi penurunan kapasitas lentur setiap penurunan mutu beton 2,5 MPa yaitu sebesar 1979,45 N. Dady, Y (2015) melakukan penelitian pengaruh kuat tekan terhadap kuat lentur beton bertulang dan menemukan bahwa semakin tinggi kuat beton, maka akan semakin tinggi juga kuat lenturnya. Hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur adalah parabola. Berdasarkan dua penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kuat tekan beton maka kapasitas lentur balok juga akan semakin besar.

Pada gambar 4.24 juga ditemukan perbedaan kekakuan (*stiffness*) pada masing-masing specimen. Balok beton konvensional (NC) dan balok beton dengan menggunakan *supplementary material* yaitu fly ash (SMFA) memiliki kesamaan kekakuan dibandingkan balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Kekakuan berhubungan dengan modulus elastis material. Modulus elastis menggambarkan suatu kekakuan relatif atau kekakuan suatu material, dimana semakin kaku material maka modulus elastisitas akan tinggi sedangkan material yang fleksibel akan memiliki modulus elastisitas yang rendah (Vaidy, dkk, 2019). Modulus elastisitas diukur berdasarkan kemiringan elastis dari gambar grafik tegangan dan regangan.

Suryanto et al (2010) melakukan penelitian tentang modulus elastis beton konvensional dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Hasil penelitian didapatkan modulus elastisitas beton lebih tinggi dibandingkan ECC yang dapat dilihat pada gambar 4.25. Hal ini dikarenakan tidak adanya agregat kasar dalam balok ECC. Dalam beton konvensional (NC) agregat menempati volume yang besar sehingga berperan penting dalam sifat mekanik dan stabilitas beton. Akan tetapi, dengan adanya serat, penambahan agregat dapat menyebabkan *balling* pada saat pencampuran dan terjadi penyebaran serat yang buruk (De koker & Van Zijl, 2004). Efek akan semakin jelas apabila ukuran agregat semakin besar. Penyebaran serat merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi sifat *strain-hardening* pada ECC (Torigoe et al, 2003). Oleh karena itu, ukuran dan jumlah dibatasi dalam ECC. Biasanya ECC menggunakan pasir silika halus dengan ukuran butiran maksimum 250 μm biasanya digunakan sebagai agregat halus dalam ECC.



Gambar 4.25. Komparasi hubungan beton dan ECC (Suryanto et al, 2010)

Berdasarkan gambar 4.24 juga ditemukan walaupun kapasitas lentur ECC lebih rendah, namun ECC memiliki daktilitas lebih besar dibandingkan NC dan SMFA. Patokan response lentur pada ECC merupakan daktilitasnya (Li, 2008). Saat ECC di uji lentur akan banyak menghasilkan retak-retak mikro pada bagian tarik sehingga memungkinkan untuk menghasilkan kelengkungan

yang lebih besar atau biasa disebut beton *bendedable*. Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk berdeformasi secara signifikan tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti. Pada penelitian ini, daktilitas balok dinyatakan sebagai perbandingan antara defleksi ultimit terhadap defleksi pada saat leleh pertama kali berdasarkan kurva beban-defleksi balok. Pada penelitian ini besarnya nilai daktilitas (μ) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{ultimit}}{\Delta_{yield}} \quad (4.3)$$

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_{ultimit}}{\varphi_{yield}} \quad (4.4)$$

Berdasarkan grafik hubungan *load – deflection* pada gambar 4.24 didapatkan nilai daktilitas NC, SMFA dan ECC dapat dilihat pada tabel 4.23.

Tabel 4.23 Daktilitas kontrol balok NC, SMFA dan ECC

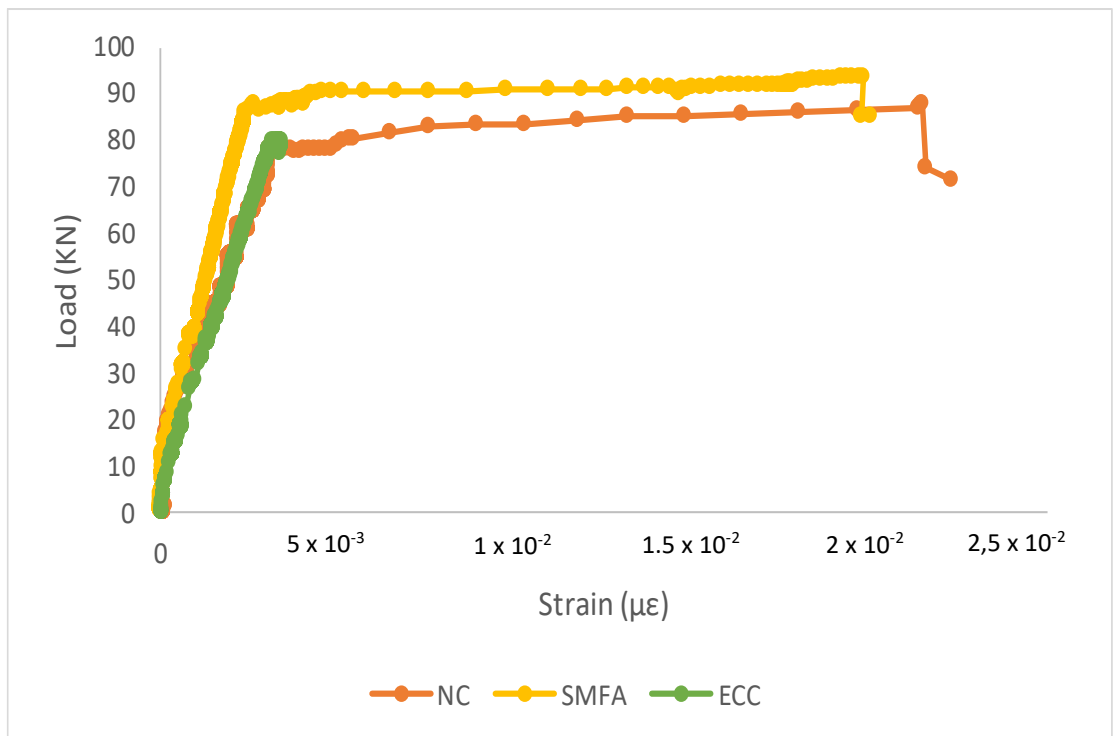
Balok	Kondisi Leleh				Kondisi Ultimit				Daktilitas	
	P _y (kN)	Δ _y (m)	M _y (kN.m)	φ _y	P _u	Δ _u	M _u	φ _u	μ _Δ	μ _φ
NC	80,036	0,01204	19,404	0,001068	87,814	0,0387	21,953	0,004118	3,21	3,86
SMFA	84,16	0,01139	21,040	0,001075	93,41	0,03004	23,3525	0,0040970	2,63	3,80
ECC	77,95	0,01392	19,4875	0,0009505	80,01	0,06062	20,405	0,0040724	4,12	4,28

Dapat dilihat pada tabel 4.23 daktilitas ECC lebih besar dibandingkan dengan balok NC dan SMFA. Hal ini dikarenakan penyebaran serat yang merata dalam ECC. Penggunaan serat pada ECC meningkatkan kemampuan regangan. Daktilitas tersebut merupakan hasil dari dari penyebaran serat pada ECC. Dengan daktilitas yang tinggi menunjukkan daya tahan yang tinggi sehingga dapat dipertimbangkan sebagai material bangunan untuk meningkatkan masa layan dan keselamatan masyarakat.

Peningkatan daktilitas menggunakan ECC ini juga ditemukan pada beberapa penelitian sebelumnya seperti penelitian Shanour et al (2018) dengan membandingkan beton konvensional dan ECC. tentang *performance* lentur pada balok ECC. Hasil penelitian Shanour et al (2018) mendapatkan balok

ECC dengan fiber PVA 1% (balok B2) dan 2% (balok B3) memiliki daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional (balok B1). Selanjutnya Penelitian Khrisnaraja, dkk (2018) mempelajari tentang *performance* lentur beton bertulang dengan lapisan ECC. Walaupun ECC hanya digunakan sebagai matrial lapisan bagian bawah (daerah tarik) pada beton seperti pada penelitian Khrisnaraja, dkk (2017), didapatkan juga daktilitas ECC lebih besar dibandingkan beton konvensional. CC sebagai balok control (beton konvensional), M1 (ECC dengan fiber PVA 2%), M2 (ECC dengan fiber PP 2%), M3 (ECC dengan fiber PVA 0,65% dan serat baja 1,35%), dan M4 (ECC dengan fiber PP 0,65% dan serat baja 1,35%). Hasil daktilitas beton yang dilapisi ECC lebih tinggi dibandingkan beton konvensional dengan daktilitas tertinggi ada pada benda uji M2.

Hubungan beban dan regangan baja pada balok NC, balok SMFA dan balok ECC juga diamati pada penelitian ini dan dapat dilihat pada gambar 4.26. Balok NC memiliki maksimum regangan sebesar 21374 atau $0,021374 \mu\epsilon$ saat beban mencapai 86,921 KN. Balok SMFA memiliki maksimum regangan sebesar 19831 atau $0,019831$ saat beban mencapai 93,41 KN. Semua tulangan pada balok NC dan SMFA mengalami leleh terlebih dahulu sebelum balok mencapai kegagalan, dimana beton *crushed* dibagian tekan.



Gambar 4.26 Hubungan beban dan regangan tulangan

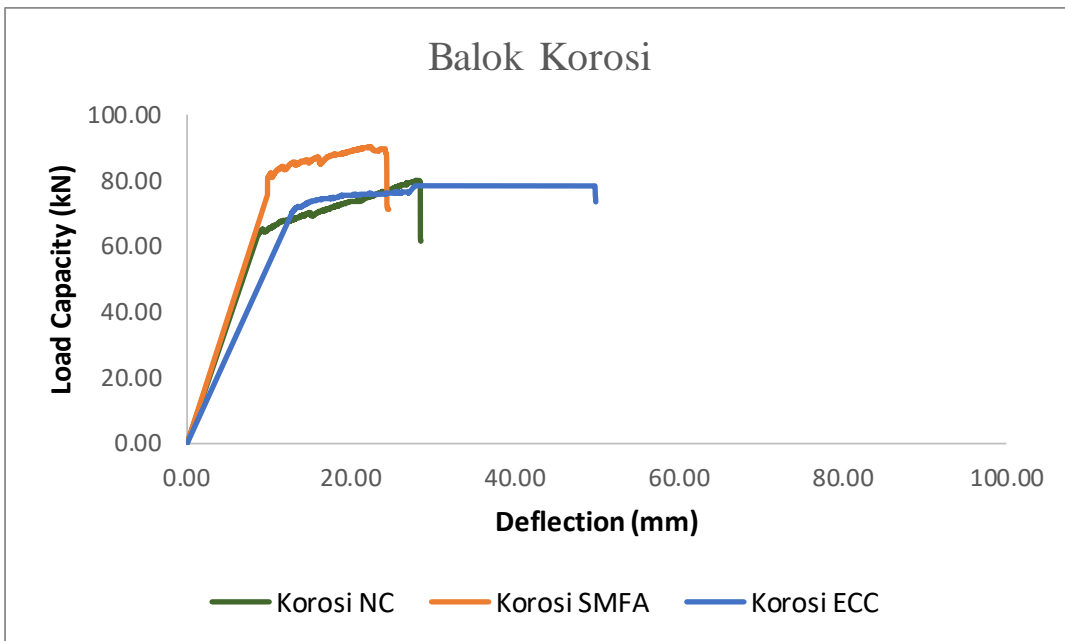
4.6.2 Kapasitas Lentur Balok Korosi

Pengujian lentur dilakukan menggunakan pengujian *four point bending* dengan lokasi pengujian berada di Laboratorium Beton dan Bangunan ITS seperti gambar 4.27. Jarak antara beban ke beban adalah 700 mm dan jarak antara beban ke tumpuan adalah 150 mm. *Load cell* untuk mengukur beban yang diterima balok selama pengujian diletakkan di bawah *hydraulic jack*. Sedangkan LVDT untuk mengukur defleksi balok yang terjadi akibat pembebanan diletakkan ditengah bentang.



Gambar 4.27 Pengujian *four point bending* di ITS

Setelah pengujian selesai, data beban dari *load cell* dan defleksi dari LVDT digabungkan menjadi gambar grafik hubungan beban dan defleksi yang dapat dilihat pada gambar 4.28.



Gambar 4.28 Hubungan *load-displacement* balok terkorosi

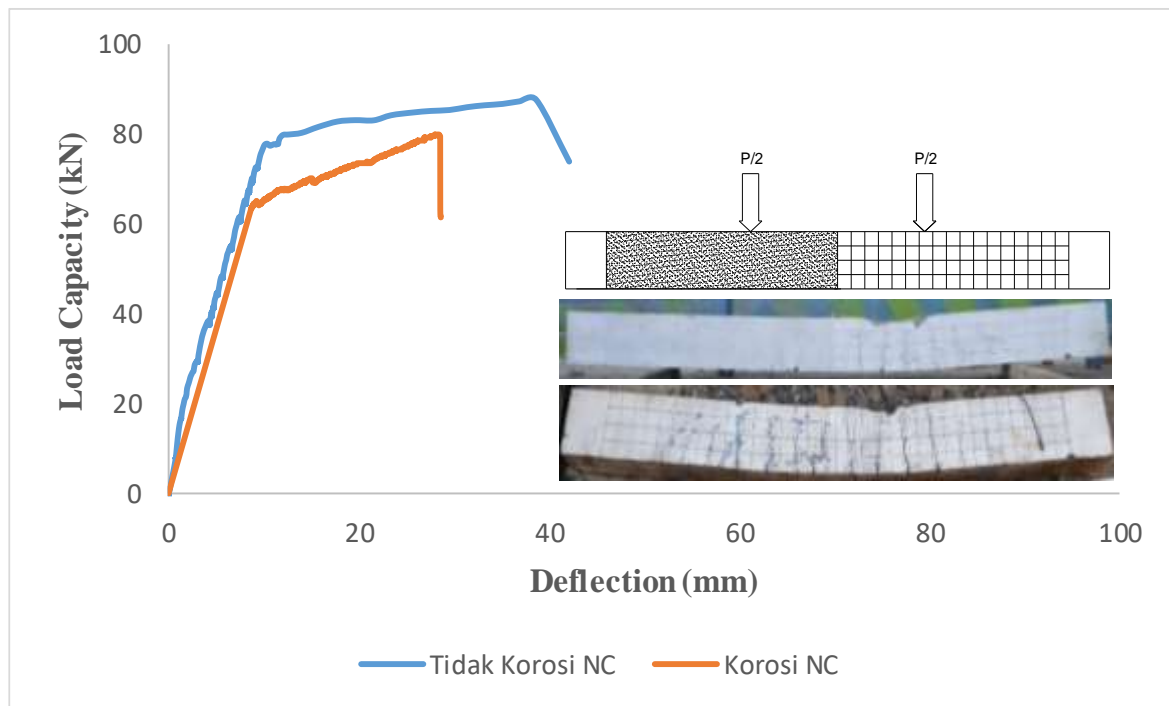
Gambar 4.28 didapatkan kapasitas balok korosi NC adalah 79,93 kN, balok SMFA adalah 88,86 kN dan balok ECC yaitu 78,65 kN. Berdasarkan grafik hubungan *load – deflection* pada gambar 4.34 didapatkan nilai daktilitas NC, SMFA dan ECC dapat dilihat pada tabel 4.24.

Tabel 4.24 Daktilitas balok korosi NC, SMFA dan ECC

Balok	Kondisi Leleh				Kondisi Ultimit				Daktilitas	
	P_y (kN)	Δ_y (m)	M_y (kN.m)	φ_y	P_u	Δ_u	M_u	φ_u	μ_Δ	μ_φ
NC	63,41	0,00867	15,8525	0,0010703	79,93	0,02773	18,06849	0,00400179	3,19	3,73
SMFA	81,47	0,001047	20,3675	0,001096	88,86	0,02425	22,215	0,00400179	2,31	3,74
ECC	69,58	0,01269	18,015	0,0009136	78,65	0,04978	19,6625	0,004009335	3,58	4,27

Dapat dilihat pada tabel 4.26 didapatkan daktilitas terbesar ada pada ECC. Walaupun terjadi korosi pada balok ECC, penyebaran serat pada ECC masih bekerja dan dapat membantu meningkatkan daktilitas balok sehingga balok korosi ECC masih lebih daktil dibandingkan balok NC dan balok SMFA.

Selanjutnya gambar 4.29, 4.30, 4.31, dan 4.32 menunjukkan perbandingan hubungan *load-deflection* beton kontrol dan beton korosi balok NC, balok SMFA dan balok ECC. Hasil yang didapatkan balok NC mengalami penurunan kapasitas sebesar 8,8% , balok SMFA terjadi penurunan 4,87% dan balok ECC terjadi penurunan sebesar 1,69%. Dapat dilihat penurunan kapasitas lentur dari terbesar hingga terkecil adalah balok NC, balok SMFA dan balok ECC.

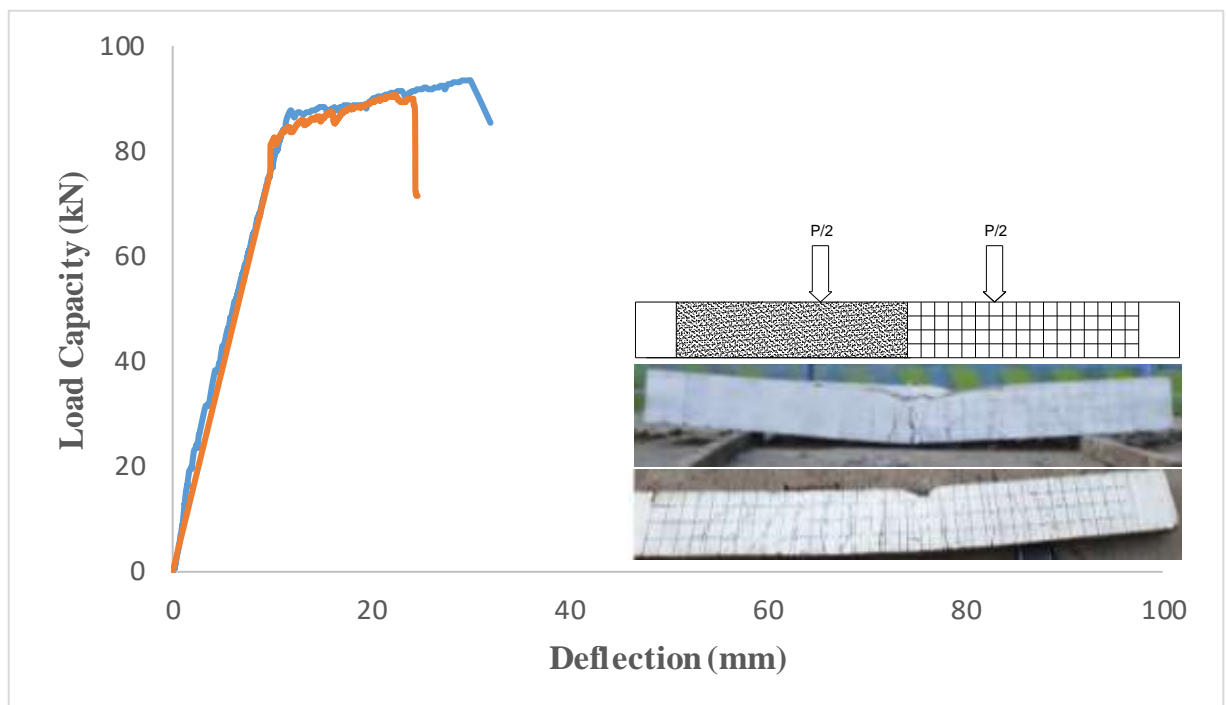


Gambar 4.29 Hubungan *load-displacement* balok kontrol dan balok korosi NC

Pada gambar 4.29 ditemukan penurunan pada kapasitas lentur, defleksi dan kekakuan saat terjadi korosi pada balok NC. Penurunan kapasitas terbesar ada pada balok NC. Hal ini dikarenakan Laju korosi balok NC lebih besar disebabkan oleh produk korosi yang larut dalam air yang larut dengan air melalui pori-pori kapiler dari beton penutup dan juga masuk melalui retak akibar *pre-crack*. Produk korosi menempati volume yang lebih besar dan ini menyebabkan tekanan pada beton penutup yang mengakibatkan retak dan lubang. Beton yang terkelupas/lubang menyebabkan tulangan terbuka dan tidak terlindung dari lingkungan yang korosif. Kondisi ini akan semakin meningkatkan kecepatan korosi, sehingga akan meningkatkan kecepatan penurunan kekuatan penampang.

Produk korosi (karat) hadir pada antarmuka antara tulangan sehingga mengurangi luasan tulangan sehingga menyebabkan terjadinya pengurangan kapasitas balok NC. Korosi pada tulangan baja akan mengurangi luasan tulangan dan menciptakan diskontinuitas local pada permukaan baja. Diskontinuitas didefinisikan sebagai ketidaksempurnaan atau gangguan dalam

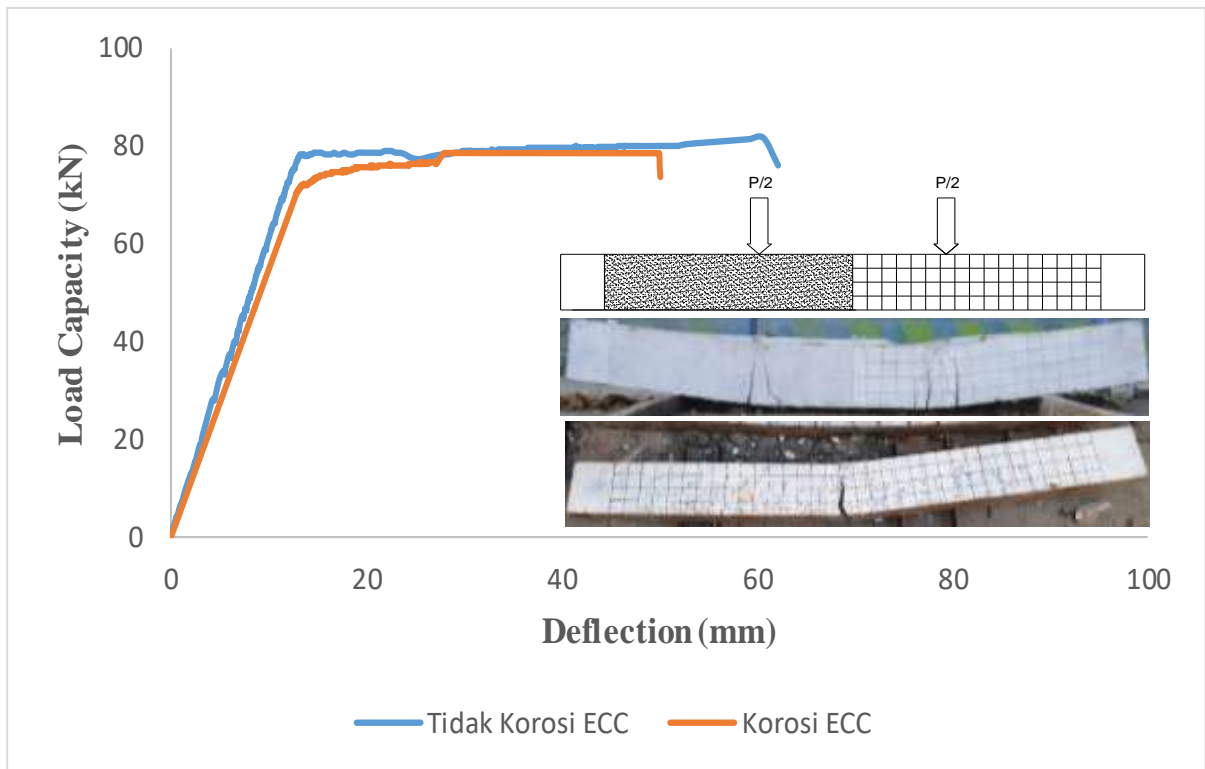
karakteristik fisik normal atau elemen struktur (Ala, 2006). Kapasitas tarik tulangan akan berkurang terus menerus seiring dengan semakin berkurangnya luasan tulangan baja. Selain itu hilangnya permukaan baja menyebabkan menurunnya lekatan antara tulangan dan beton. Semua hal yang dipaparkan tersebut berkontribusi pada berkurangnya kekakuan dan defleksi balok dan dengan demikian berpengaruh pada pengurangan kapasitas balok beton bertulang. Hal ini sesuai dengan yang ditemukan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada gambar 4.29 akibat korosi dapat menurunkan kekakuan dan defleksi sehingga menurunkan kapasitas balok NC.



Gambar 4.30 Hubungan *load-displacement* balok kontrol dan balok korosi SMFA

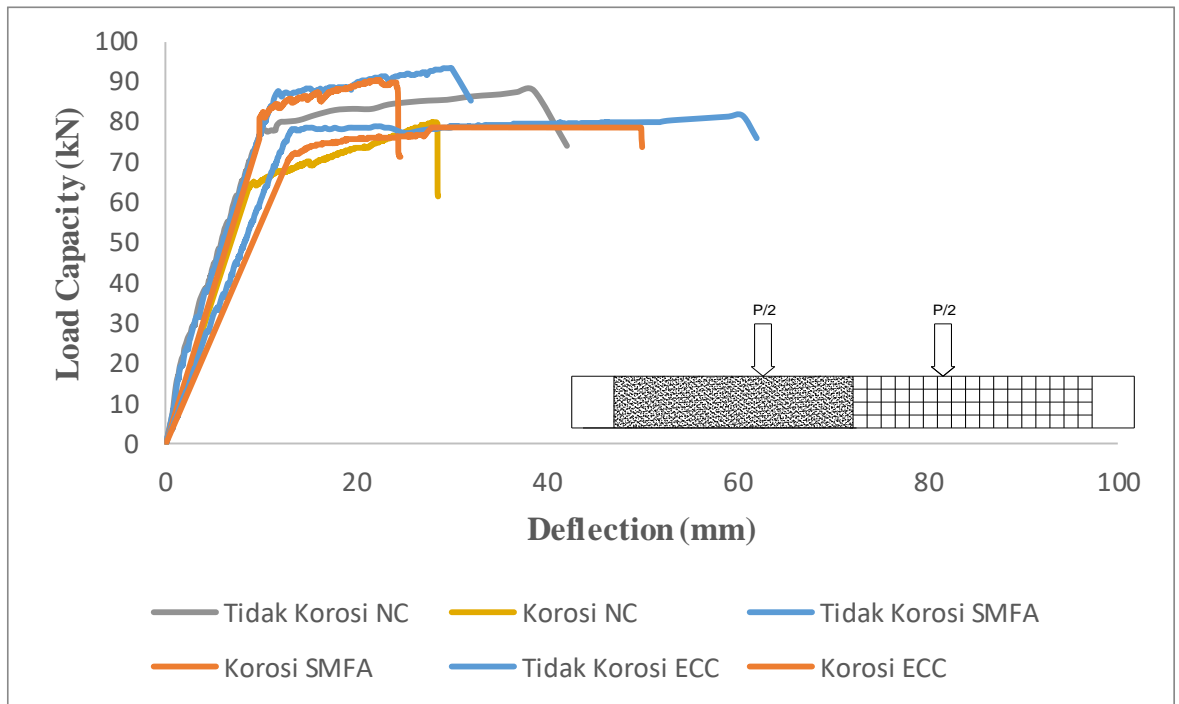
Pada gambar 4.30 tidak menunjukkan penurunan kapasitas balok SMFA, sebaliknya terjadi peningkatan kapasitas pada balok korosi. Sebelum terjadi korosi kapasitas lentur balok SMFA sebesar 93,41 kN, saat korosi kapasitas lentur balok SMFA menjadi sebesar 88,86 kN. Terjadi penurunan kapasitas lentur sebesar 4,87%. Hal ini dikarenakan laju korosi pada balok SMFA cukup besar. Semakin besar laju korosinya maka semakin besar pula pengurangan

luasan tulangnya sehingga berdampak pada penurunan kekakuan, defleksi dan kapasitas lentur balok SMFA.



Gambar 4.31 Hubungan *load-displacement* balok kontrol dan balok korosi ECC

Pada gambar 4.31 juga menunjukkan penurunan kapasitas balok ECC setelah korosi akan tetapi tidak signifikan seperti NC dan SMFA. Sebelum terjadi korosi kapasitas lentur balok ECC sebesar 80,01 kN. Sedangkan saat korosi kapasitas lentur balok ECC menjadi sebesar 78,65. Terjadi penurunan kapasitas lentur sebesar 1,69%. Bicer et al (2018) membahas tentang pengaruh korosi terhadap kapasitas lentur balok fiber mendapatkan bahwa semakin besar laju korosi (*corrosion rate*) pada balok maka semakin besar juga penurunan kapasitas lenturnya. Laju korosi pada ECC lebih kecil dibandingkan balok NC dan SMFA sehingga penurunan kapasitas lentur lebih kecil dibandingkan keduanya.



Gambar 4.32 Hubungan *load-displacement* balok kontrol dan balok korosi semua tipe beton

Pada gambar 4.32 balok NC, SMFA dan ECC memiliki sama persamaan yaitu terjadi penurunan kapasitas dan defleksi. Akan tetapi penurunan kapasitas ECC lebih rendah dibandingkan NC dan SMFA karena ECC memiliki laju korosi terkecil dibandingkan NC dan SMFA. Hasil data perbandingan beton tidak korosi dan beton korosi dapat dilihat pada tabel 4.25.

Tabel. 4.25 Hasil data perbandingan beton tidak korosi dan beton korosi

Balok	Kapasitas lentur (kN)		Defleksi (mm)		Penurunan Perubahan kapasitas lentur	
	Sebelum korosi	Sesudah korosi	Sebelum korosi	Sesudah korosi	kN	%
NC	87,814	79,93	38,7	28,42	7.884	8,8%
SMFA	93,41	89,79	30,41	24,42	3,36	4,87%
ECC	80,01	78,65	60,62	49,78	1,28	1,69%

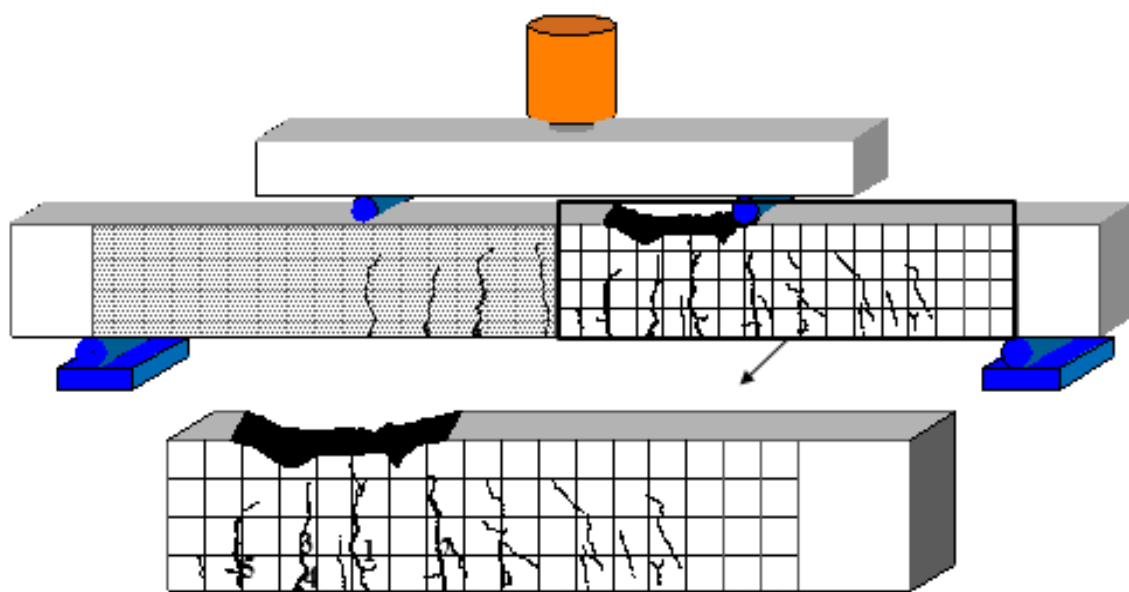
Korosi pada tulangan baja akan mengurangi luasan tulangan dan menciptakan diskontinuitas local pada permukaan baja. Diskontinuitas didefinisikan sebagai ketidaksempurnaan atau gangguan dalam karakteristik fisik normal atau elemen struktur. Kapasitas tarik tulangan akan berkurang terus menerus seiring dengan semakin berkurangnya luasan tulangan baja. Selain itu hilangnya permukaan baja menyebabkan menurunnya lekatan antara tulangan dan beton. Semua hal yang dipaparkan tersebut berkontribusi pada berkurangnya kekakuan dan defleksi balok dan dengan demikian berpengaruh pada pengurangan kapasitas balok beton bertulang.

4.7 Pola retak

4.7.1 Balok Kontrol (Tidak ada korosi)

Pengamatan pola retak dilakukan terhadap benda uji pada saat beban retak pertama sampai beban retak maksimum. Pengamatan pola retak hanya pada satu sisi balok dengan asumsi bahwa pola retak yang terjadi sama setiap sisinya. Pada penelitian ini, pola retak yang diamati merupakan representatif dari setiap variasi benda uji.

Pada balok kontrol pemberian tanda retak diberikan per kenaikan beban yaitu per 50 Psi atau sama dengan 6,8948 kN. Pola retak balok kontrol masing-masing tipe beton dapat dilihat pada gambar 4.33, 4.34, dan 4.35.



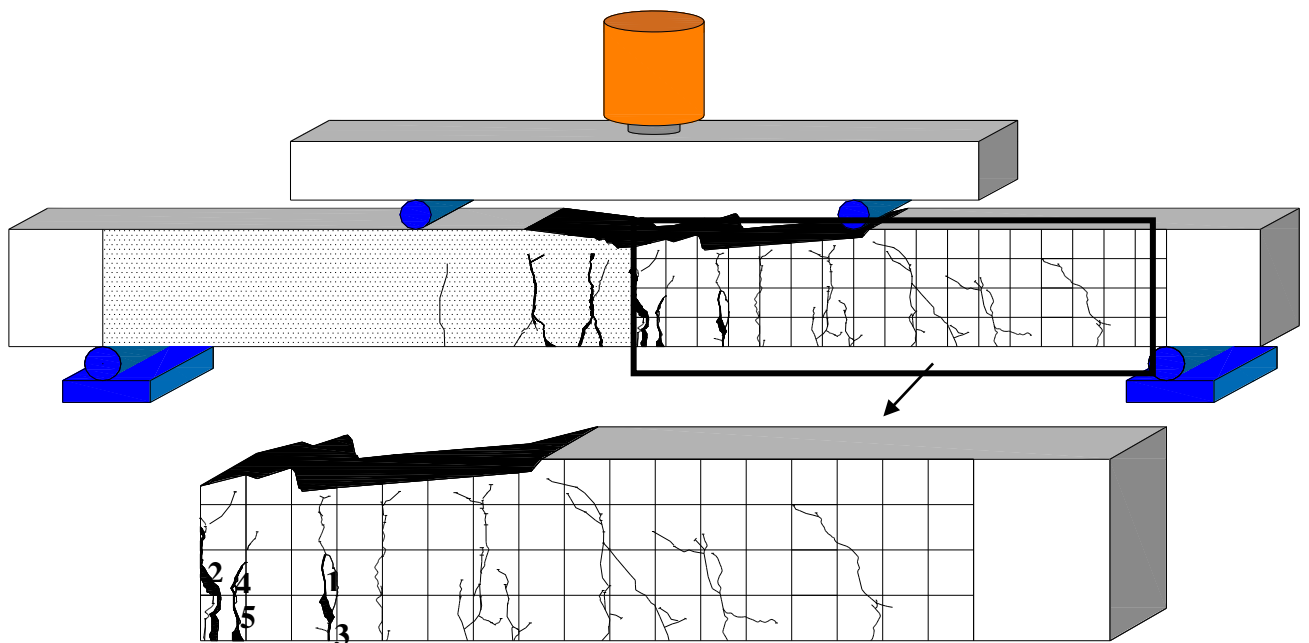
Gambar 4.33 Pola retak balok kontrol NC

Retak lentur merupakan retak memanjang vertikal dari sisi tarik dan mengarah ke sisi tekan (Mccromac, 2001). Dapat dilihat pada gambar 4.33 balok NC memiliki retak-retak yang arah vertikal dari sisi tarik menuju ke sisi tekan benda uji sehingga retak tersebut adalah retak lentur. Selain itu beton mengalami *crushing* disisi tekan sebelum balok runtuh. Setelah pengujian selesai dilakukan pengukuran lebar retak menggunakan dinolite yang dilakukan di beberapa tempat ditengah balok. Hasil pengukuran lebar retak balok NC dapat dilihat pada tabel 4.26.

Tabel 4.26 Ukuran lebar retak balok NC

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,731	0,732	0,694	0.617	0,501
Rata-rata	0,655 mm				

Berdasarkan tabel 4.26 didapatkan hasil ukuran lebar retak lentur rata-rata NC adalah 0,655 mm.



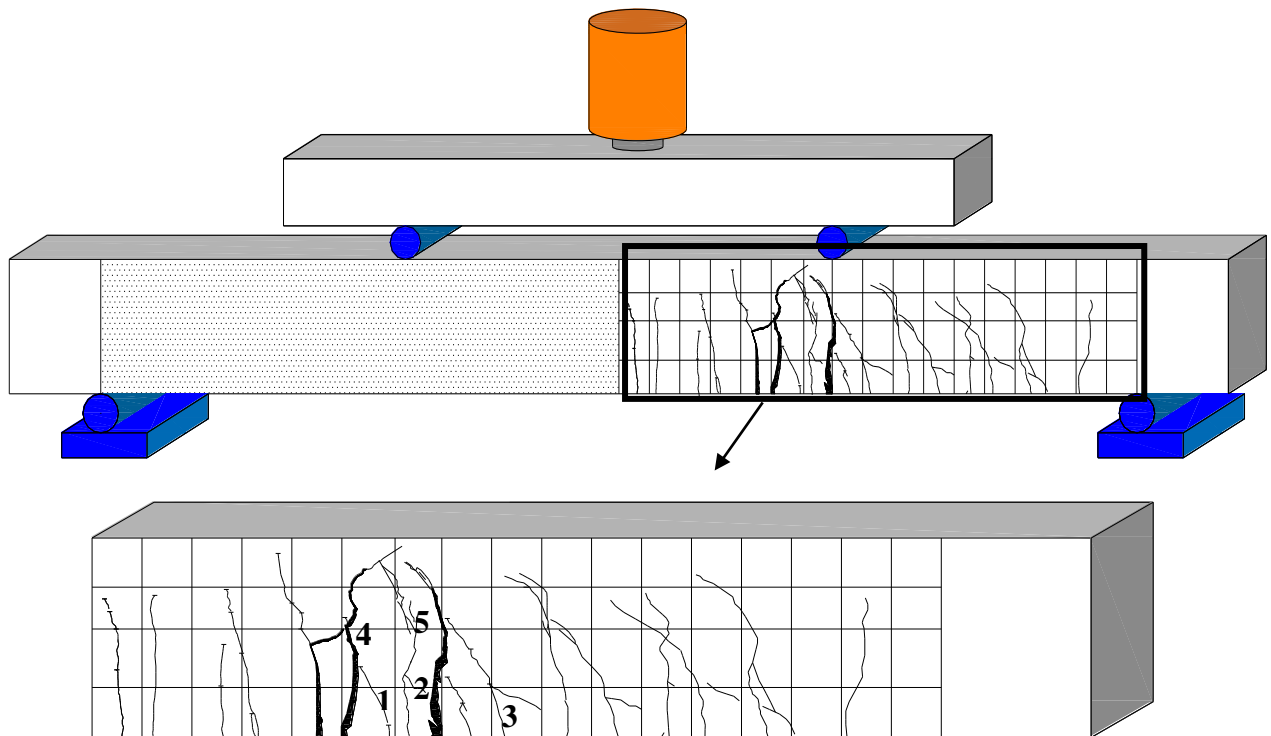
Gambar 4.34 Pola retak balok kontrol SMFA

Gambar 4.34 balok SMFA juga mengalami retak lentur dan terjadi *crushing* disisi tekan sebelum balok mengalami keruntuhan. Ukuran lebar retak SMFA dapat dilihat pada tabel 4.27.

Tabel 4.27 Ukuran lebar retak balok SMFA

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,486	0,709	0,559	0,597	0,650
Rata-rata	0,600 mm				

Berdasarkan tabel 4.27 didapatkan hasil ukuran lebar retak lentur rata-rata SMFA adalah 0,600 mm.



Gambar 4.35 Pola retak balok kontrol ECC

Pada gambar 4.35 menunjukkan bahwa balok ECC mengalami retak lentur. Balok ECC memiliki retak lentur terbanyak dibandingkan balok NC dan SMFA. Retak yang terjadi pada ECC adalah retak mikro. Pembentukan retak mikro yang banyak diperlukan ECC untuk mencapai daktilitas yang tinggi (Li, 2008). Ukuran lebar retak ECC dapat dilihat pada tabel 4.28.

Tabel 4.28 Ukuran lebar retak balok ECC

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,253	0,265	0,279	0,116	0,126
Rata-rata	0,208 mm				

Berdasarkan tabel 4.28 didapatkan hasil ukuran lebar retak lentur rata-rata ECC adalah 0,208 mm.

Untuk menghitung lebar retak yang terjadi, ACI 318-95 merekomendasikan rumus lebar retak lentur berdasarkan persamaan Gergely-Lutz:

$$W = 0,011 \cdot \beta \cdot fs \cdot \sqrt[3]{d_c A} \cdot 10^{-3}$$

Dimana :

W = *Most probable crack width* (mm)

β = *Ratio of distance between neutral axis and tension face to distance between neutral axis and centroid of reinforcing steel*

$$= \frac{(d-x)+d'}{(d-x)} = \frac{154,243}{130,243} = 1,184$$

fs = *tensile stress of steel*

d_c = *Thickness of cover from tension face to center of closest bar* (mm)

A = *Area of concrete symmetric with reinforcing steel divide by the number of bars* (mm²)

$$= \frac{2 \cdot d_c \cdot b}{n}$$

$$W = 0,011 \cdot \beta \cdot fs \cdot \sqrt[3]{d_c A} \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,011 \cdot 1,184 \cdot 1016,598 \cdot \sqrt[3]{43 \cdot \frac{2 \cdot 43 \cdot 100}{3}} \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,660 \text{ mm}$$

Jadi kemungkinan lebar retak yang terjadi adalah 0,660 mm.

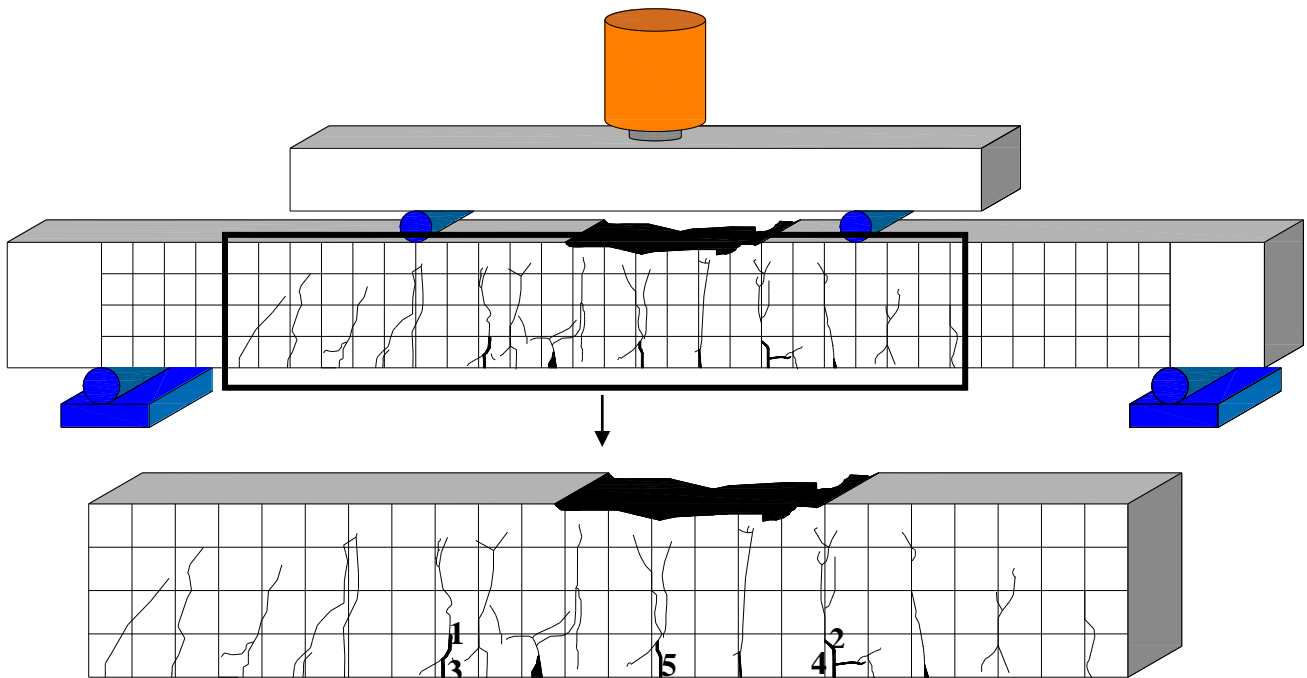
Dari perhitungan lebar retak teoritis didapatkan nilai lebar retak sebesar 0,660 mm. Hasil lebar retak teoritis ini mendekati hasil lebar retak yang

didapatkan pada penelitian ini dimana balok NC memiliki lebar retak sebesar 0,655 mm, balok SMFA dengan lebar retak sebesar 0,600 mm dan balok ECC dengan lebar retak sebesar 0,208 mm.

4.7.2 Balok Korosi

Pengamatan pola retak juga dilakukan pada balok korosi. Pengamatan retak balok diamati dari beban retak pertama hingga balok mengalami keruntuhan. Pada balok korosi pemberian tanda retak diberikan per kenaikan beban yaitu per 5 kN. Pada balok korosi terdapat kesamaan pola retak dengan balok kontrol yaitu terjadi pola retak lentur.

Saat pengujian balok korosi didapatkan retak yang terjadi lebih banyak dibandingkan balok kontrol. Menurut Wibowo (2007) selama proses korosi menyebabkan penambahan volume korosi pada beton sehingga menyebabkan ekspansi beton dan keretakan akibat desakan dari karat yang dihasilkan selama korosi. Hal ini biasa ditandai dengan retak sejajar pada selimut beton. Pola retak balok kontrol masing-masing tipe beton dapat dilihat pada gambar 4.36, 4.37, dan 4.38.



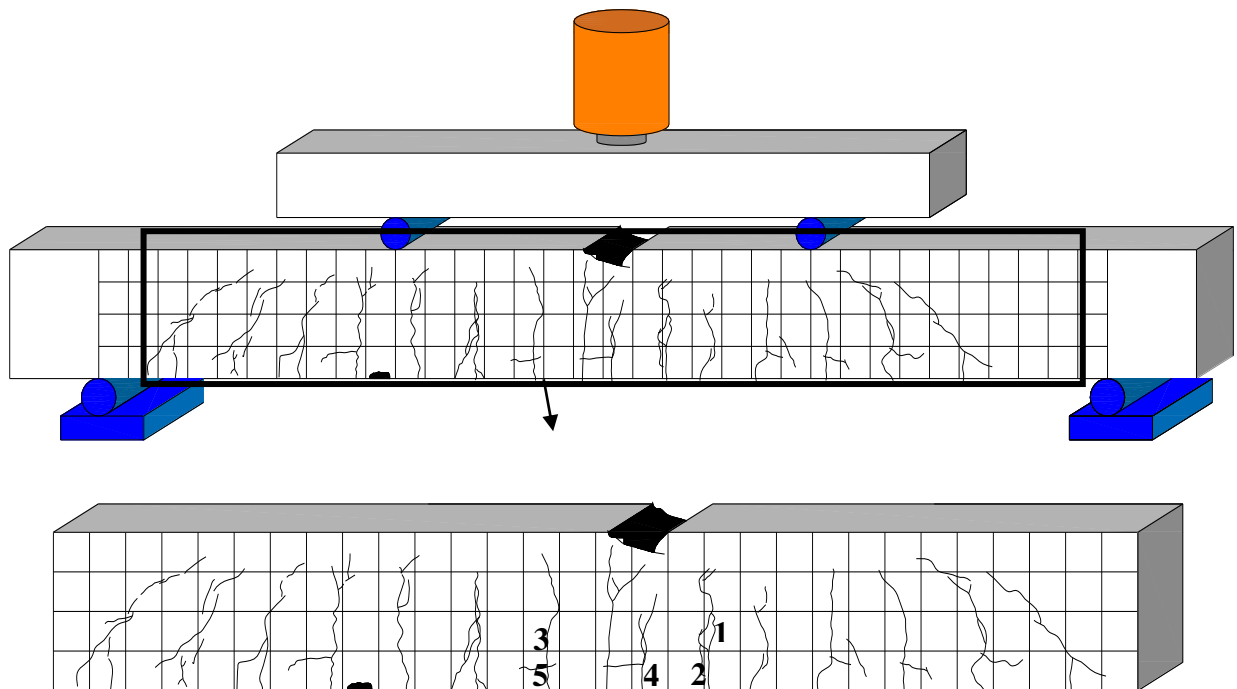
Gambar 4.36 Pola retak balok korosi NC

Pada balok korosi NC seperti pada gambar 4.36 mengalami retak lentur dimulai dari sisi tarik dan retak semakin menyebar dengan beban yang semakin meningkat hingga retak-retak tersebut mencapai daerah tekan. Pada balok korosi NC terjadi *crushing* disisi tekan sebelum balok mengalami keruntuhan. Ukuran lebar retak balok korosi NC dapat dilihat pada tabel 4.29.

Tabel 4.29 Ukuran lebar retak balok korosi NC

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,598	0,64	1,341	0,683	1,265
Rata-rata	0,9054 mm				

Berdasarkan tabel 4.29 didapatkan hasil ukuran lebar retak lentur rata-rata NC adalah 0,9054 mm.



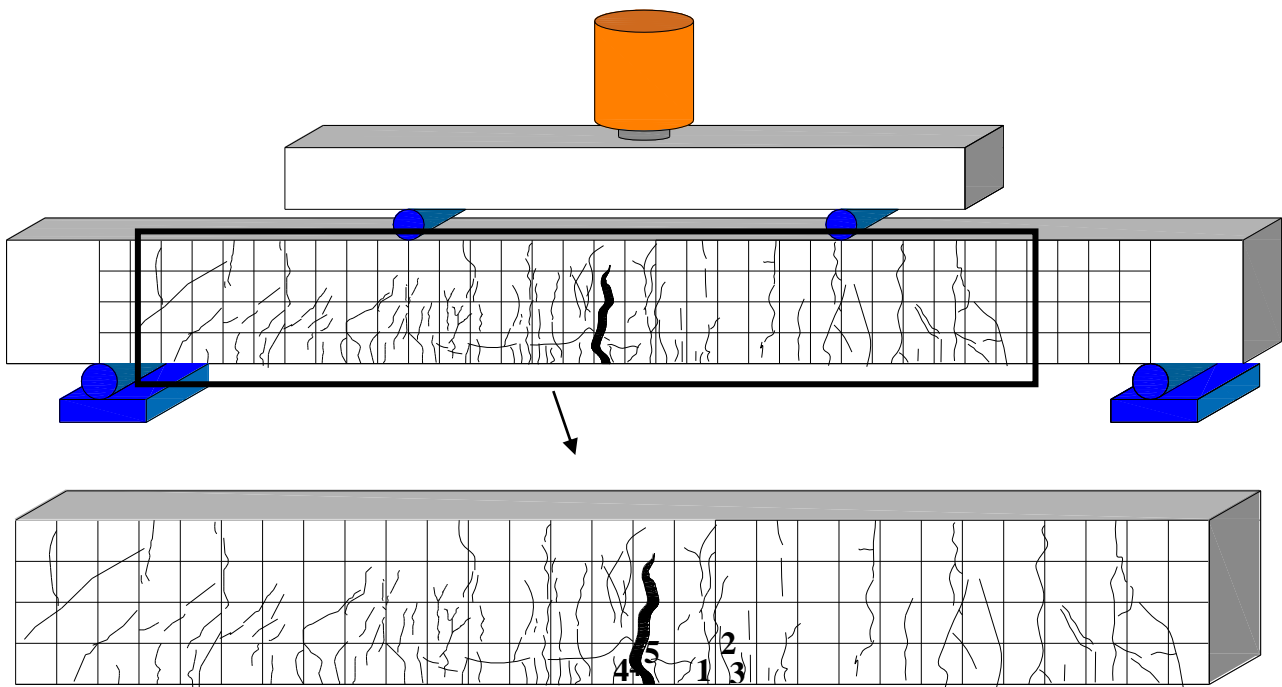
Gambar 4.37 Pola retak balok korosi SMFA

Gambar 4.37 menunjukkan balok SMFA memiliki retak lentur dari sisi tarik menuju ke sisi tekan balok. Selain itu balok SMFA juga mengalami *crushing* disisi tekan sebelum balok runtuh. Ukuran lebar retak balok korosi SMFA dapat dilihat pada tabel 4.30.

Tabel 4.30 Ukuran lebar retak balok korosi SMFA

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,619	0,661	0,724	0,997	1,400
Rata-rata	0,8762 mm				

Berdasarkan tabel 4.30 didapatkan hasil ukuran lebar retak rata-rata lentur balok korosi SMFA adalah 0,8762 mm.



Gambar 4.38 Pola retak balok korosi ECC

Walaupun terjadi korosi pada balok ECC pada gambar 4.38., balok ECC masih memiliki retak-retak mikro yang banyak sehingga ECC memiliki daktilitas yang tinggi dibandingkan yang lain. Ukuran lebar retak balok korosi ECC dapat dilihat pada tabel 4.31.

Tabel 4.31 Ukuran lebar retak balok ECC

Retak	1	2	3	4	5
Ukuran retak (mm)	0,351	0,332	0,114	0,124	1,117
Rata-rata	0,4076 mm				

Berdasarkan tabel 4.31 didapatkan hasil ukuran lebar retak rata-rata lentur balok korosi ECC adalah 0,4076 mm.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa data yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan antara lain:

1. Metode *pre-crack* akan menghasilkan retak pada balok sehingga retak tersebut akan memberikan celah masuk zat agresif ke dalam beton. Pada penelitian ini didapatkan laju korosi terbesar ada pada balok konvensional (NC) dengan nilai sebesar 5,311 mm/year untuk tulangan utama dan 7,11 mm/year untuk sengkang. Laju korosi balok *Supplementary Material Fly Ash* (SMFA) sebesar 2,52 mm/year untuk tulangan utama dan 3,45 mm/year. Laju balok balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC) merupakan laju korosi terkecil yaitu 1,36 mm/year untuk tulangan utama dan 1,78 mm year untuk sengkang.
2. Retak *pre-crack* pada balok mempengaruhi laju korosi setiap balok. Semakin besar laju korosi maka akan banyak mengurangi luasan tulangan beton dan berdampak pada berkurangnya kapasitas balok. Pada penelitian ini didapatkan penurunan balok konvensional (NC) sebesar 8,8 % dari balok control (sebelum korosi), balok *Supplementary Material Fly Ash* (SMFA) terjadi penurunan sebesar 4,87% dari balok control (sebelum korosi) dan balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC) terjadi penurunan sebesar 1,69% dari balok control (sebelum korosi).
3. Pola retak sebelum dan sesudah korosi memiliki persamaan yaitu semua benda uji dominan retak lentur. Hal ini dapat dilihat dengan adanya retak arah vertikal di mulai dari sisi tarik dan terus mengarah ke sisi tekan. Pada balok kontrol (sebelum korosi) dan korosi balok konvensional (NC) dan balok *Supplementary Material Fly Ash* (SMFA) juga ditemukan terjadi *crushing* pada sisi tekan sebelum

balok mengalami keruntuhan. Sedangkan balok kontrol dan korosi *Engineered Cementitious Composite* (ECC) tidak terdapat *crushing* hingga balok runtuh. Ukuran lebar retak balok kontrol (sebelum korosi) konvensional (NC) adalah 0,655 mm, balok kontrol (sebelum korosi) *Supplementary Material Fly Ash* (SMFA) sebesar 0,600 mm dan balok kontrol (sebelum korosi) *Engineered Cementitious Composite* (ECC) sebesar 0,208 mm. Hasil lebar retak teoritis menggunakan ACI 318-95 adalah sebesar 0,6600 mm, nilai lebar retak teoritis mendekati hasil lebar retak eksperimental. Selanjutnya ukuran lebar retak balok korosi konvensional (NC) sebesar 0,9054 mm, balok korosi *Supplementary Material Fly Ash* (SMFA) sebesar 0,8762 mm dan balok korosi *Engineered Cementitious Composite* (ECC) sebesar 0,4076 mm.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian dan analisa data yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat diambil beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Penelitian selanjutnya diperlukan dengan mempertimbangkan variasi panjang fiber (seperti RECS 12/mm) dan jenis fiber berbeda (seperti fiber *polypropylene*) dapat membandingkan karakteristik ECC dengan variasi panjang fiber yang berbeda-beda.
2. Penelitian selanjutnya diperlukan dengan mempertimbangkan variasi benda uji dapat juga menggunakan *silica sand* dengan ukuran butiran yang berbeda-beda.
3. Sebaiknya juga perlu ditinjau balok korosi yang tidak ada *pre-crack* untuk bisa juga menjadi pembanding laju korosi dan kapasitas lenturnya dengan balok *pre-crack* korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 224. (1990). Control of cracking in concrete structures (ACI 224R-90). *American Concrete Institute*, pp. 43.
- ACI Committee 318. (1995). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95). *American Concrete Institute*, 369.
- Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji, A. (2015). Analisa laju korosi pada pelat baja karbon dengan variasi ketebalan coating. *Jurnal Teknik Sipil ITS*, 1(4), G1-5.
- Aidil, A. (2011). Analisa pengaruh pengurangan mutu beton ($f'c$) terhadap kapasitas momen lentur pada balok beton bertulang.
- Akbar, A. (2017). *Pengaruh Percepatan Korosi Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang*, Skripsi., Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Ala, H. (2006), Introduction to non-destructive testing techniques. *Defects and Discontinuities*, 1-12.
- Ali, Y. and Khan, S. W., (2017), Experimental study on the flexural behavior of composite RC beams having an Engineered Cementitious Composite Layer At The Bottom", *Proceedings of The IIER International Conference*.
- Apriyanto, H., (2009), "Kapasitas lentur balok beton bertulang dengan polypropylene fiber sebesar 6% dari berat semen", *Jurnal Volume 11 No. 2*.
- ASTM G1 (1999). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Speciment*, ASTM International, (G). <https://doi.org/10.1520/G0001-90R99E01>
- ASTM E8M (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. ASTM International, (E). <https://doi.org/10.1520/E0008M-04>
- ASTM D638 (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International, (D). <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- ASTM C188 (2016). *Standard Test Method for for Density of Hydraulic Cement*, ASTM International, (C). <https://doi.org/10.1520/C0188-16>
- ASTM C33 (2018). *Standard Spesification for Concrete Aggregates*, ASTM

- International, (C). [https://doi.org/ 10.1520/C0033_C0033M-18](https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18)
- ASTM C29 (1997). *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*, ASTM International, (C). [https://doi.org/ 10.1520/C0029_C0029M-97](https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-97)
- Bicer, K., Yalciner, H., Balkis, A. P., & Kumbasaroglu, A. (2018). Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers. *Construction and Building Material*, 574-588.
- Berrocal, C. G., Löfgren, I., & Lundgren, K. (2018). The effect of fibres on steel bar corrosion and flexural behaviour of corroded RC beams. *Engineering Structures*, 163, 409–425. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.068>
- Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete—understanding, investigation, and repair*. E & FN Spon.
- Cairns, J., Du, Y., & Law, D. (2008). Structural performance of corrosion-damaged concrete beams. *Mag. Concr. Res.* 60 359–370
- Chudley, R. and Greeno, R. (2008) *Building construction handbook*, 7 edn, Oxford: Elsevier
- Chung, K. L., Ghannam, M., & Zhang, C., (2017). Effect of Specimen Shapes on Compressive Strength of Engineered Cementitious Composites (ECCs) with Different Values of Water-to-Binder Ratio and PVA Fiber. *Arab J Sci Eng.* <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2776-8>
- Dady, Y.T., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R.S. (2015). Pengaruh kuat tekan terhadap kuat lentur balok beton bertulang. 3(5), 341-350.
- De Koker, D., and Van Zijl, G. (2004). Extrusion of engineered cement-based composite material. *Proceedings of BEFIB*, 1301-1310.
- Dong, J., Zhao, Y., Wang, K., & Jin, W. (2017). Crack propagation and flexural behaviour of RC beams under simultaneous sustained loading and steel corrosion. *Construction and Building Materials*, 151, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.193>
- El Maaddawy, T., Soudki, K., & Topper, T. (2005). Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 102(4), 550
- Fu, C., Jin, N., Ye, H., Jin, X., & Dai, W. (2017). Corrosion characteristics of a 4-

- year naturally corroded reinforced concrete beam with load-induced transverse cracks. *Corrosion Science*, 117, 11–23.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.01.002>
- Ginting, A. (2011). *Kuat lentur pada berbagai umur beton*. 7(55), 110–125.
- Hasib, M. S. (2016). *Shear and Flexure Behavior of Hybrid Composite Beams with High Performance Concretes*.
- Käthler, A.C.B., Angst U.M., Wagner, M., Larsen, C. K., & Elsener, B. (2017). Effect of cracks on chloride- induced corrosion of steel in concrete - a review.
- Krishnaraja, A.R. & Kandasamy, DR.S., (2017), Flexural performance of engineered cementitious composite layered reinforced concrete beams", *Archives of Civil Engineering Volume 63*, 173-189.
<https://doi.org/10.1515/ace-2017-0048>
- Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A. (2007). Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Materials J.30*
- Li, V. C. (2003). On engineered cementitious composite (ECC) a review of the material and its applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3),215-230.
- Li, V. C. (2008). Engineered cementitious composite (ecc): Material, structural, and durability performance. *Concrete Construction Engineering Handbook, Second Edition*, 1001–1048.
- Li, L., Mahmoodian, M. & Li C. Q. (2017). Structural assessment of an in-service steel viaduct using time variant reliability analysis. *12th International Conference on Structural Safety and Reliability*
- Lu X. Z., Teng J. G., & Jiang J. J. (2007). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete, *Engineered Structures*,27,920-937
- Maalej, M., Leong, K. S. (2005). Engineered cementitious composites for effective FRP-Strengthening of RC beams. *Composites Science and Technology*,65(7), 1120–1128.
- Maalej, M., Ahmed, S. F. U., & Paramasivam, P. (2003). Corrosion Durability and Structural Response of Functionally-Graded Concrete Beams. 1(3), 307–316.

- Mardani, A. . (2017). *Perilaku lentur balok beton bertulang dengan besi yang terkorosi*.
- Mccormac, J.(2000). *Desain beton bertulang jilid I*, Erlangga, Jakarta.
- Negrutiu, C., Sosa, I., & Heghes, B. (2019). Flexure Behaviour of Reinforced High Strength Concrete Elements Affected by Corrosion. *MATEC Web of Conferences*, 289, 10009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928910009>
- Noh, M. H., Idris, N., Md Noor, N., Sarpin, N., Zainal, R., & Kasim, N. (2018). Structural Effects of Reinforced Concrete Beam Due to Corrosion. *E3S Web of Conferences*, 34, 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401024>
- Pacheco, J., & Polder, R. (2012). *Advances in Modeling Concrete Service Life*. 85–93. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2703-8>
- Patil, A. N., Birajdar, B. G., & Dawari, B. M. (2017). Influence of additives on flexural strength of concrete. *MATEC Web of Conferences*, 116(January). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601019>
- Pimanmas, A. and Maekawa, K. (2001). Multi-directional fixed crack approach for highly anisotropic shear behavior in *pre-cracked* RC members. *J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE*, 50, N0.669, 293-307.
- Pourfalah, S., & Suryanto, B. (2013), "Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures Using Locally Available Materials in The UK", *The Infrastructure and Environment Scotland 1st Postgraduate Conference*, (January), 75–78.
- Pramudiyanto, (2011). Pengaruh Tebal Selimut Beton Normal Pada Laju Korosi Baja Tulangan.
- Rodriguez, D.J., Ortega, L.M., & Casal, J. (1997). Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Material*, 11(4), 239-248. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3)
- Qin, F., Zhang, Z., Xie, B., & Sun, R. (2019). Experimental study on damage detection in ecc-concrete composite beams using piezoelectric transducers. *Sensors (Switzerland)*, 19(12). <https://doi.org/10.3390/s19122799>
- Sahamaran M, Li VC, Andrade C. (2008). Corrosion resistance performance of steel reinforced engineered cementitious composites beams. *ACI Mater J*,

105, 243–250

- Samsuddin, S., Parung, H., & Amiruddin, A. A. (2009). Studi karakteristik kuat tekan dan kua tarik beton PVA-ECC. *Jurnal Unhas*, 1-10
- Shaikh, F.U.A., Mihashi, H., & Kobayakawa, A. (2015). Corrosion durability of reinforcing steel in cracked high-performance fiber-reinforced cementitious composite beams.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001191](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001191)
- Shaikh, F.U.A. (2018). Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete. *Int J Concr Struct Mater* 12: 3. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0234-y>
- Shanour, A.S., Said, M., Arafa, A. I., & Maher, A. (2018). Flexural performance of concrete beams containing engineered cementitious composites, *Construction and Building Materials* 180, 23–34
- Sherir, M. A. A., Hossain, K.M.A., & Lachemi, M. (2014) Fracture Energy Characteristic of Engineered Cementitious Composites Incorporating Different Aggregates. *4th International Structural Specialty Conference(CSCE)*, 40, 1-10.
- Shih, J. Y., Chang, T. P., & Hsiao, T. C. (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering A*, 424(1–2), 266–274.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.010>
- Shin, K. J., Jang, K. H., Choi, Y. C., & Lee, S. C. (2015). Flexural behavior of HPRCC members with inhomogeneous material properties. *Materials*, 8(4), 1934–1950. <https://doi.org/10.3390/ma8041934>
- Siad, A., Bencheikh, M., & Hussein, L. (2017). Effect of combined *pre-cracking* and corrosion on the method of repair of concrete beams. *Construction and Building Materials*, 132, 462–469.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.020>
- SNI 1969 (1990). *Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat*, Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- SNI 2834 (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*, Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- SNI 1974 (2011). *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. Standar

- Nasional Indonesia, Indonesia.
- SNI 4431 (2011). *Cara uji kuat lentur beton normal (NC) dengan dua titik pembebanan*. Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- SNI 2052 (2017). *Baja tulangan beton*. Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- Suryanto, B., Nagai, K., & Maekawa, K.(2010). Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 239-258. <https://doi.org/10.3151/jact.8.239>
- Swamy, R. S., and Stavrides, H. (1979),"Influence of Fiber Reinforcement on Restraining Shrinkage and Cracking", *J. ACI*, 75, 443–460.
- Szerszen, M. M., Szwed, A., & Li, V. C. (2007). Flexural Response of Reinforced Beam with High Ductility Concrete Material. In *Brittle Matrix Composites 8*. <https://doi.org/10.1533/9780857093080.263>
- Tambusay, A., Suprobo, P., Faimun, F., & Amiruddin, A. (2015). Finite element analysis on the behavior of slab-column connection using PVA-ECC material. *Jurnal Teknologi*, 5(5), 239–244
- Teng, J.G., Huang, Y.L., Lam, L., and Ye, L.P. (2007). Theoretical model for fiber reinforced polymer confined concrete, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 11(2), 201-210.
- Thulasi, T. K, Subartha, S., & Meikandaan T. P. (2018). An experimental study of crack patterns on reinforced concrete beam. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 5,3195-3202.
- Torigoe, S., Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T. & Hamada, T. 2003. Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite. *J. Adv. Concr. Tech.* 1(3): 265-268.
- Upadhyay, A. and Kamal, M. 2007. Characterisation and utilisation of fly ash. B.Tech Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha.
- Wang, S. and Li, V.C. (2003). Materials design of lightweight PVA-ECC. In *Proc., HPFRCC, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds.*, pp.379-390.
- Wang, S. and Li, V.C., (2007). Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances, in *Proc., Int'l RILEM Workshop HPFRCC in*

Structural Applications, Eds. Fischer, G., and V.C. Li, published by RILEM SARL, pp. 65-73.

Wang, Y.T., Du, X.L., Fu, X.J., & Zhang, W. (2012). The flexural performance of pre-damaged reinforced concrete beam strengthened with CFRP in seawater enviromental. *Applied Mechanism and Materials*, 1736-1739.

Weimann, M.B. & Li, V.C. 2003. Hygral behavior of engineered cementitious composite (ECC). *Int. J. for Restora- tion of Buildings and Monuments* 9(5):513-534

Yang, Y., Yang, E. H., & Li, V. C. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research*, 41(2), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.002>

Yuan, Y., Ji, Y., & Shah, S.P. (2007), “Comparision of Two Accelarated Corrosion Techniques for Concrete Structures”, *ACI Strcutural Journal May-June 2007*.

Zhang J, Leung C K Y, Gao Y. (2011) Simulation of crack propagation of fiber reinforced cementitious composite under direct tension. *Eng Fract Mech*, 78: 2439–2454.

Zhou, J., Pan, J., & Leung, C. K. Y. (2014). Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 04014111. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001034](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001034)

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Winda Nur Oktaviani dilahirkan di Samarinda, 14 Oktober 1994. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 002 Samarinda. Pendidikan menengah ditempuh di SMP Negeri 2 dan SMA Negeri 2 Samarinda. Gelar Sarjana bidang teknik sipil diperolehnya di Institut Teknologi Nasional Malang pada tahun 2016. Gelar Magister bidang teknik sipil diperolehnya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2020.

Selama masa perkuliahan sarjana penulis sangat aktif mengikuti organisasi dan kegiatan di lingkungan kampus. Selain aktif berorganisasi penulis sudah membuat paper ilmiah berjudul *Flexural Behavior of A Reinforced Concrete Beam Blended with Fly Ash as Supplementary Material* yang akan diterbitkan pada tahun 2020.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1
FOTO PENGECORAN BENDA UJI



(a)



(b)

Gambar Mixer untuk pengecoran (a) beton NC dan SMFA: (b) ECC

Foto Material ECC:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar Material ECC (a) Semen; (b) Fly Ash kelas F; (c) Silica Sand; (d) Fiber PVA;
(e) Air; (f) HRWR Tancem 60 RA



Gambar Letak Strain Gauge pada Balok



(a)



(b)

Gambar (a) dan (b) Penempatan tulangan dalam cetakan balok



Gambar Pengecoran Balok NC dan balok SMFA



Gambar Pengecoran Balok ECC



Gambar hasil pengecoran untuk silinder, dogbone dan balok ECC



Gambar Balok setelah dikeluarkan dari cetakan



Gambar Moist Curing Benda Uji

LAMPIRAN 2
FOTO PENGUJIAN KUAT TEKAN



Gambar Silinder beton NC dan beton SMFA



Gambar Pengujian Kuat Tekan Silinder beton NC dan beton SMFA



Gambar Silinder setelah Pengujian Kuat Tekan Silinder beton NC dan beton SMFA



Gambar Silinder ECC



Gambar Pengujian Kuat Tekan Silinder ECC



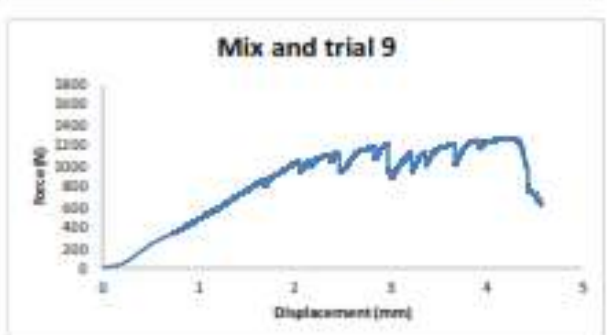
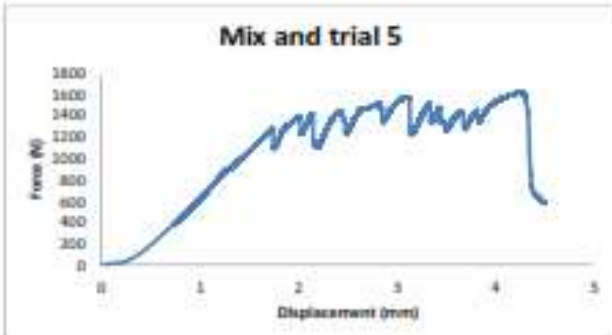
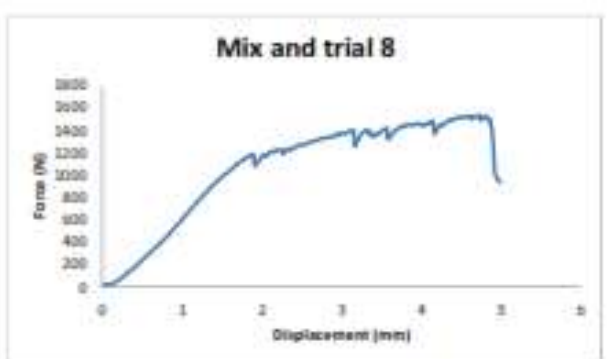
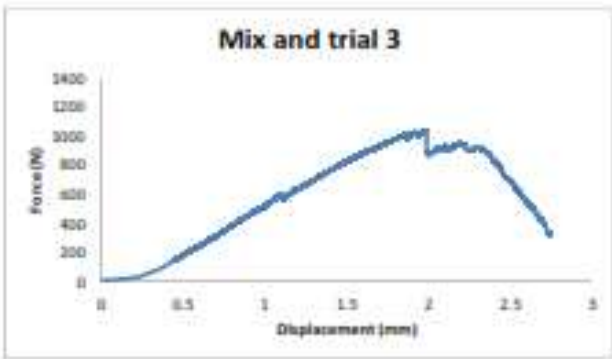
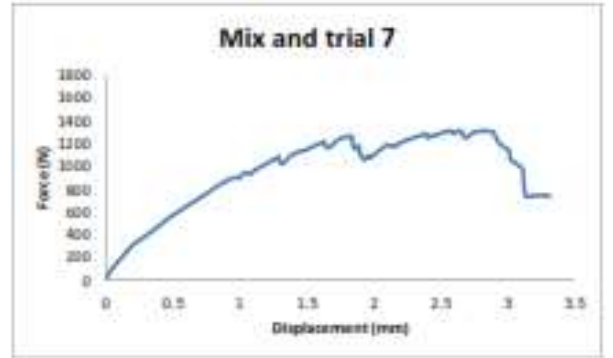
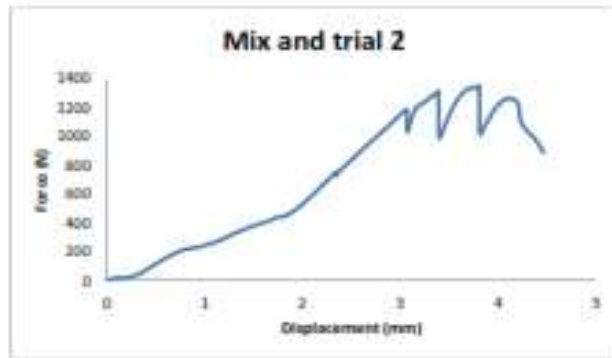
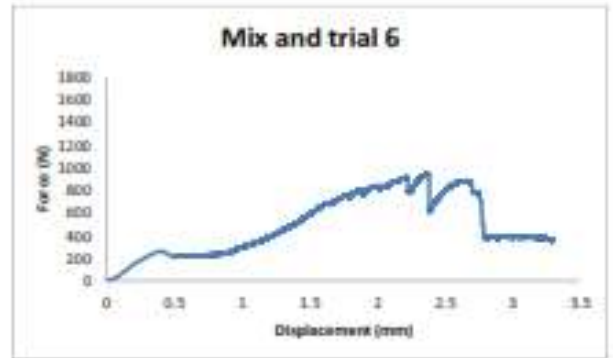
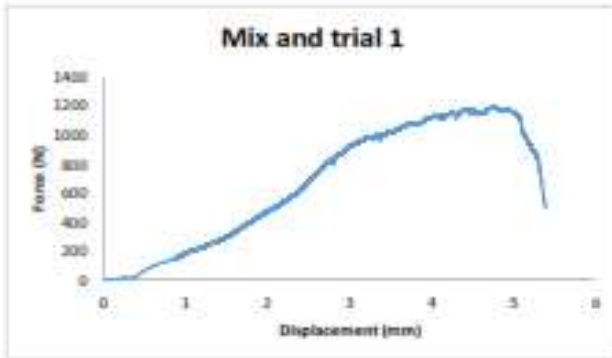
Gambar Silinder setelah Pengujian Kuat Tekan Silinder ECC

LAMPIRAN 3
FOTO PENGUJIAN KUAT TARIK ECC



Gambar Pengujian Kuat Tarik ECC

LAMPIRAN 4
HASIL MIX AND TRIAL ECC



LAMPIRAN 5
FOTO PRE-CRACK BALOK



Gambar uji bending untuk memberikan retak (pre-crack) pada beton

LAMPIRAN 6
FOTO PERCEPATAN KOROSI



Gambar Instalasi Pengujian Percepatan Korosi



Gambar Mengatur Arus di Power Supply



Gambar Balok Korosi NC

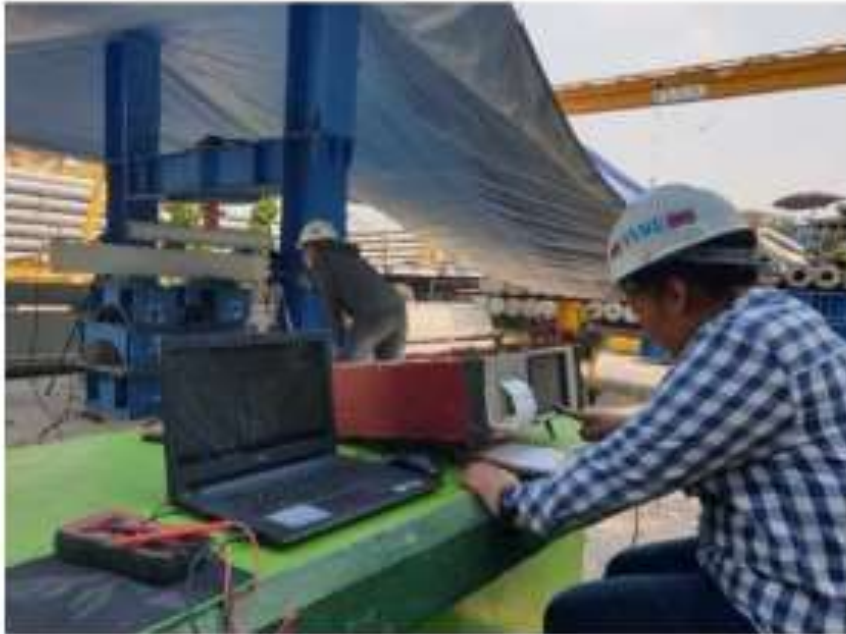


Gambar Balok Korosi SMFA



Gambar Balok Korosi ECC

LAMPIRAN 7
FOTO PENGUJIAN FOUR POINT BENDING



Gambar Pengujian Four Point Bending di PT. Wijaya Karya BEton, Tbk.



Gambar Balok Beton konvensional (NC) setelah Pengujian Four Point Bending



Gambar Balok Beton SMFA setelah Pengujian Four Point Bending



Gambar Balok ECC setelah Pengujian Four Point Bending



Gambar Pengujian Four Point Bending di ITS



Gambar Balok NC setelah pengujian four point bending



Gambar Balok SMFA setelah pengujian four point bending



Gambar Balok ECC setelah pengujian four point bending