



TESIS - RC 185401

STUDI EKSPERIMENTAL PENGGUNAAN *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* SEBAGAI ALTERNATIF PERKUATAN PADA STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG TERKOROSI

MARTHINUS ALEXANDER BASTIAN
03111750020015

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S., Ph.D

Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S

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

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Marthinus Alexander Bastian

NRP: 03111750020015

Tanggal Ujian : 31 Januari 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

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

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

Penguji:

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

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



Kepala Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Dr. Techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc.

NIP: 19721202 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: "Studi Experimental Penggunaan *Engineered Cementitious Composite* sebagai Alternatif Perkuatan pada Struktur Balok Beton Bertulang 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 plagiasi di dalam naskah tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, Februari 2020



Marthinus Alexander Bastian

NRP: 03111750020015

STUDI EKSPERIMENTAL PENGGUNAAN *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* SEBAGAI ALTERNATIF PERKUATAN PADA STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG TERKOROSI

Nama Mahasiswa: Marthinus Alexander Bastian

NRP: 03111750020015

Pembimbing 1: Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.

Pembimbing 2: Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

ABSTRAK

Balok bertulang merupakan elemen struktur yang rentan terhadap korosi apabila terpapar pada lingkungan laut. Metode perbaikan secara keseluruhan dirasa terlalu mahal, sehingga perlu adanya metode perbaikan terhadap daerah sensitif yang berkurang akibat korosi. *Engineered Cementitious Composite* (ECC) merupakan material yang memiliki kuat tarik tinggi dengan regangan mencapai 5.1%, yang dicapai dengan membentuk retak mikro yang banyak dan rapat. Retak mikro yang banyak dan rapat dapat mengekang pelebaran retak sehingga dapat meminimalisir proses terjadinya korosi. Penelitian ini bertujuan untuk melihat ketahanan material balok ECC yang dibandingkan dengan balok *Supplementary Concrete* (SC) dan balok *Normal Concrete* (NC) saat diberikan percepatan korosi, dan diukur berdasarkan tingkat kehilangan massa tulangan baja akibat korosi. Hasil yang didapatkan balok ECC menunjukkan tidak adanya *spalling* sehingga menghasilkan kehilangan massa baja tulangan paling kecil yakni pada tulangan transversal sebesar 3.83 % dan tulangan longitudinal sebesar 1.63 %. Balok NC dan SC mengalami tingkat kerusakan paling parah ditunjukkan dengan retak horisontal sejajar tulangan longitudinal hingga *spalling*. Retakan horisontal dan *spalling* mengakibatkan kehilangan massa baja tulangan yang tinggi pada balok NC dan SC yakni pada tulangan transversal sebesar 7.50 % dan 6.12 %, sedangkan pada tulangan longitudinal sebesar 3.28 % dan 2.88 %. Selain itu penelitian ini ingin melihat perilaku lentur balok NC dan SC terkorosi yang di-*repair* dengan lapisan ECC. Perilaku lentur balok NC dan SC terkorosi dengan lapisan ECC diuji dengan melakukan pengujian lentur *four point bending*. Hasil pengujian menunjukkan kinerja kuat tarik tinggi dari ECC dengan menciptakan retak mikro yang banyak dan rapat dapat memperbaiki performa lentur dan kapasitas beban mirip dengan balok NC dan SC tanpa korosi. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan faktor delaminasi antara sambungan beton lama dengan lapisan ECC tidak berpengaruh pada penurunan perilaku lentur balok. Hasil ini menunjukkan daya lekat antara lapisan ECC dengan beton lama NC dan SC sangat baik.

Kata kunci: ECC, korosi, *repairing*, perilaku lentur.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

EXPERIMENTAL STUDY OF THE USE OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE AS AN ALTERNATIVE OF STRENGTHENING IN CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAM STRUCTURES

Student Nama: Marthinus Alexander Bastian

NRP: 03111750020015

Supervisor 1: Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.

Supervisor 2: Dr. Ir. Djoko Irawan, MS.

ABSTRACT

Reinforced beams are structural elements that are susceptible to corrosion when exposed to the marine environment. The overall repair method is considered too expensive to be applied unless repairing only conducted in a sensitive area reduced due to corrosion. Engineered Cementitious Composite (ECC) is an alternative material that implies a high tensile strength with a strain reach up to 5.1%, which is achieved by forming a large and tight micro cracking. These cracks can constrain the widening of the crack, as a result, to significantly minimize the process of corrosion. These research aims are to obtain the durability of the implementation of ECC material within the Supplementary Concrete (SC) and the Normal Concrete (NC) as designated parameter. A series reinforced concrete beams with three designated parameters are presented. The beams comprised of similar reinforcement where the ratio of compression, tension, and transverse bars were 1.0%, 1.5%, and 1.0% respectively, were given accelerated corrosion. To this end, the beams were tested under four-point bending and they were intended to fail in flexure mode. It is found that ECC beams showing largest ductility compared to other two with no spalling indication. The steel mass loss of transversal and longitudinal are 3.83% and 1.63% respectively. NC and SC beams demonstrate a discernible ductile plateau with the severe damage with spalling after occurring horizontal cracks parallel to the longitudinal reinforcement. The steel mass loss for NC and SC of transversal and longitudinal reinforcement in order are 7.50%, 6.12% and 3.28%, 2.88%. The test also aims to provide improvement in the strengthening of the corroded beam by using ECC. All corroded beams are repaired within ECC patch and loaded under the same scheme to evaluate their performance. These results indicate the adhesion between the ECC layer with the old NC and SC concrete can meet in a good agreement. It is also found that the flexural cracks manifested in each beam after strengthening by ECC are less critical under a damage tolerance of composite.

Key Words: Engineered cementitious composite, corrosion, repairing, flexure behavior

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dihaturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatnya sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik. Adapun tujuan dari Tesis ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam memperoleh gelar Magister Teknik, Bidang Keahlian Teknik Struktur, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tak lupa penyusun ingin juga berterimakasih kepada semua pihak yang telah membantu, yakni kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S., Ph.D selaku pembimbing I yang telah banyak membantu mulai dari penyusunan proposal hingga Tesis ini selesai.
2. Bapak Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S selaku pembimbing II yang dengan penuh kesabaran dan kesediaan waktu, tenaga dan pikiran dalam memberikan arah untuk penyelesaian Tesis ini.
3. Bapak Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D dan Bapak Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA selaku dosen penguji atas masukan dan koreksi untuk kesempurnaan Tesis ini.
4. Bapak Dr. Asdam Tambusay ST., MT, Ibu Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, ST., MT, dan mas Indra Komara, ST., MT yang telah membantu selama ini dalam pengujian dan pengolahan data Tesis ini.
5. Seluruh dosen pengajar dan staff karyawan di Program Pascasarjana Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan-ITS, terimakasih atas ilmu dan kebaikan yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
6. Bapak Sandy, Bapak Isma dan semua pegawai PT. Wijaya Karya Beton Tbk. Pasuruan yang telah membantu dalam pembuatan benda uji dalam penelitian ini.
7. Kedua orang tuaku, terutama kepada almarhumah mama tercinta. Doaku terbaik untukmu semoga engkau tersenyum bahagia melihat anakmu telah mampu menyelesaikan perjuangan ini. Dan juga kepada adik-adikku (Roby, Andry, dan Mery) terimakasih buat dukungan dan doa dari kalian semua.

8. Marsya, terimakasih buat suport yang diberikan selama ini.
9. Teman-teman NTT (Om Goe, Mba Lili, Agel, Masry, Brill, Even, Orys, Budy, Paul, Games, Dedy) terimakasih buat dukungan dari kalian semua.
10. Teman-teman seperjuangan Teknik Struktur 2017 (Ali, Brill, Achan, Wawan, Ezra, Richo, Bang Hendry, Bernard, Winda, Mersy, Asti, Ilmi, Anisa, Okta), terimakasih atas dukungan dan persahabatan yang kita jalin selama ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang turut membantu selama masa perkuliahan hingga penulisan Tesis ini, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas jasa dan kebaikan kalian semua.

Dengan segala kerendahan hati penyusun menyadari penulisan Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk dari itu segala bentuk saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat diharapkan. Akhir kata semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Februari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2 STUDI LITERATUR	7
2.1. Balok Beton Bertulang	7
2.2. Korosi Baja Tulangan Beton	8
2.3. <i>Engineered Cementitious Composite</i> (ECC)	13
2.4. Aplikasi Peningkatan Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Lapisan ECC	16
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Bagan Alir Penelitian	21
3.2. Lingkup Penelitian	22
3.2.1. Studi literatur	23
3.2.2. Analisa material.....	23
3.2.3. Proporsi campuran.....	25
3.2.4. Perencanaan benda uji.....	25

3.2.5. Percepatan korosi.....	35
3.2.6. Metode <i>repairing</i> balok beton bertulang dengan lapisan ECC.....	38
3.2.7. Pengujian lentur balok.....	39
3.3. Analisa hasil pengujian.....	41
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Analisa Propertis Material Pembentuk Beton NC, SC dan ECC.....	43
4.2. Proporsi Campuran <i>Normal Concrete</i> (NC), Beton dengan <i>Suplementari material</i> (SC), dan <i>Engineered Cementitious</i> <i>Composite</i> (ECC).....	47
4.3. Pengujian Kuat Tekan.....	54
4.4. Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja.....	56
4.5. Pengujian Percepatan Korosi	58
4.6. Pengujian Lentur Balok	64
4.7. Pola Retak dan Kegagalan Balok.....	69
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1. Kesimpulan	75
5.2. Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Hubungan beban-lendutan balok beton bertulang.....	7
Gambar 2.2.	Ilustrasi konsep periode inisiasi dan propagasi korosi.....	9
Gambar 2.3.	Proses korosi pada baja tulangan beton	10
Gambar 2.4.	Perilaku tarik <i>stress-strain</i> dari matriks semen.....	13
Gambar 2.5.	Hubungan tarik <i>stress-strain-crack width</i> dari PVA-ECC.....	14
Gambar 2.6.	<i>Multiple Cracking in a Spectra ECC (V_f = 2%) Uniaxial Tensile Specimen</i>	14
Gambar 2.7.	Tipikal kurva (σ - δ) untuk <i>strain-hardening</i> komposit.....	15
Gambar 2.8.	Konsep perkuatan balok beton bertulang dengan lapisan ECC pada daerah tarik balok.....	17
Gambar 2.9.	Konsep perkuatan balok beton bertulang dengan menggunakan ECC sebagai selimut baja tulangan.....	18
Gambar 2.10.	Konsep perkuatan balok beton bertulangan dengan menggunakan lapisan external ECC dan BFRP grid.....	19
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.2.	Skema pengujian tarik <i>uniaxial Dogbone</i> dan detail spesimen <i>dog-bone</i>	26
Gambar 3.3.	<i>Setup</i> pengujian tarik <i>uniaxial dog-bone</i>	27
Gambar 3.4.	Penampang balok bertulang	28
Gambar 3.5.	Detail penulangan balok.....	34
Gambar 3.6.	Skema pengujian percepatan korosi metode <i>galvanostatik</i>	37
Gambar 3.7.	<i>Setup</i> pengujian korosi <i>galvanostatik</i>	38
Gambar 3.8.	Skema <i>repair</i> balok terkorosi.....	39
Gambar 3.9.	<i>Repair</i> balok beton terkorosi.....	39

Gambar 3.10. Skema uji lentur <i>Four Point Bending</i> , posisi penempatan LVDT.....	40
Gambar 3.11. Setup pengujian lentur <i>four point bending</i>	41
Gambar 4.1. Fiber PVA-RECS15	46
Gambar 4.2. Hubungan tegangan-regangan uji tarik <i>uniaxial</i> Spesimen <i>dog-bone</i> dari 9 variasi komposisi ECC	51
Gambar 4.3. Pola retak mikro spesimen <i>dog-bone</i> ECC.....	53
Gambar 4.4. Grafik uji tarik baja tulangan besi Ø8.....	56
Gambar 4.5. Grafik uji tarik baja tulangan besi D10	57
Gambar 4.6. Pola korosi: (a) Balok B1, (b) Detail-1, (c) Detail-2, (d) Detail-3	59
Gambar 4.7. Pola korosi: (a) Balok B2, (b) Detail-1, (c) Detail-2 (d) Detail-3	60
Gambar 4.8. Pola korosi: (a) Balok B3, (b) Detail.....	61
Gambar 4.9. Grafik hubungan beban-defleksi balok kontrol A1, A2, dan A3	64
Gambar 4.10. Grafik hubungan beban-defleksi balok A1 dan B1	66
Gambar 4.11. Grafik hubungan beban-defleksi balok A2 dan B2	67
Gambar 4.12. Grafik hubungan beban-defleksi balok A3 dan B3	69
Gambar 4.13. Pola retak dan kegagalan balok kontrol (a) Balok A1 (b) Balok A2, (c) Balok A3	70
Gambar 4.14. Pola retak dan kegagalan balok B1 terkorosi dengan lapisan ECC.....	71
Gambar 4.15. Pola retak dan kegagalan balok B2 terkorosi dengan lapisan ECC.....	72
Gambar 4.16. Pola retak dan kegagalan balok B3.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Konstanta <i>corrosion rate</i>	12
Tabel 2.2. Propertis Mekanik dan Geometrik serat PVA-RECS15	16
Tabel 3.1. Rekapitulasi analisis penampang balok	34
Tabel 3.2. Benda uji balok	34
Tabel 4.1. Propertis pasir Lumajang	44
Tabel 4.2. Propertis kerikil Pasuruan	44
Tabel 4.3. <i>Chemical propertis Fly ash</i> dan OPC	45
Tabel 4.4. Propertis serat PVA RECS-15 Kuraray Jepang	46
Tabel 4.5. Perencanaan campuran beton NC PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.	47
Tabel 4.6. Perencanaan campuran beton SC Pt. Wijaya Karya Beton, Tbk.....	48
Tabel 4.7. Komposisi per 1 m ³ beton NC.....	49
Tabel 4.8. Komposisi per 1 m ³ beton SC	49
Tabel 4.9. Rasio variasi trial campuran ECC	50
Tabel 4.10. Rekapitulasi hasil uji tekan dari 9 variasi komposisi ECC	51
Tabel 4.11. Rekapitulasi tegangan-regangan uji tarik <i>uniaxial</i> Spesimen <i>dog-bone</i> dari 9 variasi komposisi ECC	52
Tabel 4.12. Komposisi material per 1m ³ ECC	54
Tabel 4.13. Hasil pengujian kuat tekan NC	54
Tabel 4.14. Hasil pengujian kuat tekan SC	55
Tabel 4.15. Hasil pengujian kuat tekan ECC	55
Tabel 4.16. Uji tarik baja tulangan Ø8.....	57
Tabel 4.17. Uji tarik baja tulangan D10.....	57

Tabel 4.18. Rekapitulasi hasil percepatan korosi <i>galvanostatik</i>	63
Tabel 4.19. Rekapitulasi beban dan defleksi balok A1, A2 balok A3	64
Tabel 4.20. Rekapitulasi beban dan defleksi balok A1 dan B1	66
Tabel 4.21. Rekapitulasi beban dan defleksi balok A2 dan B2.....	67
Tabel 4.22. Rekapitulasi beban dan defleksi balok A3 dan B3.....	69

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Konstruksi bangunan daerah pantai penting untuk mendapat perhatian secara khusus dalam desain, pelaksanaan, dan pengawasan proses konstruksinya. Hal ini dikarenakan kegagalan struktur pada lingkungan laut beberapa tahun terakhir, kurang dari waktu perencanaan yang telah ditentukan di Indonesia. Standar Nasional Indonesia menyebutkan bahwa suatu struktur bangunan harus bertahan sampai 50 tahun lamanya, namun faktor lingkungan, penggunaan bahan baku dan spesifikasi yang tidak tepat dapat menyebabkan tidak capai sasaran umur rencana. Salah satu kegagalan struktur pada lingkungan laut yakni korosi (Tuutti & Kyosti, 1982). Metode perbaikan struktur dirasa terlalu mahal apabila harus mengganti secara keseluruhan, karena itu perlu adanya metode perbaikan terhadap daerah sensitif struktur untuk memperbaiki kinerja struktur yang berkurang akibat korosi.

Beton menjadi pilihan utama untuk diterapkan pada konstruksi bangunan pinggir pantai. Beton menjadi pilihan konstruksi pantai karena memiliki kelebihan mempunyai kuat tekan yang tinggi, mudah dibentuk, tahan terhadap temperatur dan awet. Di samping kelebihanannya, beton juga memiliki kekurangan yakni memiliki kuat tarik lemah, konstruksinya berat, dan daktilitas bahan rendah. Dalam praktik pada umumnya untuk meningkatkan kekuatan tarik pada beton digunakan perkuatan tarik berupa baja tulangan. Hal ini menjadi penting untuk diperhatikan mengingat baja tulangan rentan terhadap korosi apabila terpapar di lingkungan laut.

Balok merupakan salah satu elemen struktur yang pembentuknya adalah beton tulangan baja. Gaya yang terjadi pada balok dominan momen lentur dan momen geser. Dalam desain konstruksi balok biasanya didesain dominan terjadi gagal lentur sehingga beban lateral yang bekerja pada balok mengakibatkan balok akan melendut dan akan terciptanya retakan halus pada daerah tarik balok sebagai akibat lemahnya beton

menerima gaya tarik. Retakan halus pada balok memungkinkan proses korosi lebih cepat apabila balok terpapar dalam lingkungan laut. Proses ini memungkinkan penurunan kapasitas lentur balok. Selain lain itu faktor penggunaan bahan dan spesifikasi dalam pelaksanaan konstruksi menjadi penyebab terciptanya korosi.

Korosi terjadi akibat reaksi kimia atau elektrokimia antara material, biasanya logam, dengan lingkungannya yang menghasilkan kerusakan pada material dan propertinya. Intensitas serangan kimia tergantung komposisi kimia dari bagian yang agresif, konsentrasi, derajat keasaman (pH). Fenomena korosi berawal dari rusaknya lapisan pasif yang disebabkan oleh adanya infiltrasi ion klorida (Cl^-) ke dalam beton (Wong et. al, 2010). Hal ini dapat terjadi karena semen sebagai bagian terpenting pada beton merupakan material yang terdiri atas bahan-bahan kimia yang memungkinkan untuk bereaksi dengan zat-zat kimia di sekitarnya. Material pembentuk beton yang kurang baik dapat membentuk struktur dengan tingkat durabilitas dan permeabilitas beton rendah. Beton dengan tingkat permeabilitas yang rendah mengakibatkan beton berpori dan membuat zat-zat agresif mudah masuk dan melemahkan mutu beton sehingga mengakibatkan durabilitas beton menurun. Selain itu seperti dijelaskan sebelumnya retakan sebagai akibat dari serat beton tertarik pada balok dapat meningkatkan infiltrasi ion klorida. Lemahnya lapisan pasif menyebabkan baja tulangan memiliki kontak langsung dengan oksigen dan air, sehingga membentuk korosi pada tulangan baja. Lebih lanjut korosi yang terjadi pada baja akan mengalami peningkatan volume dan mengakibatkan tegangan yang cukup besar pada lapisan pasif sehingga terjadi retakan hingga *spalling* (Zhang et. al, 2010).

Dalam beberapa tahun terakhir, beton dengan mutu tinggi telah banyak digunakan dalam aplikasi teknik sipil. Awal 1970-an untuk pertama kalinya diperkenalkan *Fibre Reinforced Concrete* (FRC) dalam hal peningkatan kapasitas lentur balok dengan menggunakan serat gelas dan serat baja (Poon et. al, 2004). Pengembangan lebih lanjut telah digunakan serat *Polyvinyl Alcohol* (PVA) sebagai material FRC (Noushini et. al, 2013). Penelitian PVA sebagai perkuatan FRC mampu menunjukkan kinerja beton yang baik saat diberikan gaya tarik pada benda uji *dog-bone*.

Ditemukan bahwa penggunaan PVA dalam mix design FRC mampu menunjukkan *strain-hardening* saat diberikan gaya tarik dan diikuti oleh respon *tension softening* sebelum mengalami kegagalan (Li et. al, 2019; Homma et. al, 2009).

ECC pada dasarnya merupakan kelas unik *High-Performance Fibre Reinforced Cementitious composite* (HPFRCC) yang memiliki ciri regangan tinggi saat diberikan beban tarik, dan menciptakan respon *pseudo strain hardening* setelah retak pertama (Yu et. al, 2018; Komara et. al, 2019). Regangan ECC mencapai 3-6% yang artinya 300-600 kali lebih besar dari beton konvensional. Regangan tarik tercipta dengan adanya retak mikro dengan lebar retak tipikal di bawah 80 μm ketika diberikan beban (Huang et. al, 2014). Retak mikro secara drastis mengurangi permeabilitas dari ECC (Lepech & Li, 2009). Kinerja unik ECC telah dibuktikan mampu menahan lentur dan geser yang tinggi dalam aplikasi struktural (Shanour et. al, 2018). Selain itu, beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan balok ECC bervariasi dari berbagai jenis pembebanan seperti test *flexure monotonik* (Yuan et. al, 2013), geser berulang (Sahmaran et. al, 2015), fatigue (Liu et. al, 2019), dan siklus tetap (Tambusay et. al, 2015). Penelitian terbaru mengenai penerapan ECC telah diperkenalkan di Indonesia oleh Tambusay dkk (Tambusay et. al, 2015).

Penelitian mengenai ECC di Indonesia sendiri belum terlalu pesat, dan belum adanya standard yang membahas mengenai ECC. Sehingga dalam penelitian ini dilakukan modifikasi proporsi campuran ECC menggunakan bahan lokal dengan dasar penelitian terdahulu guna mendapatkan karakteristik unik ECC. Secara khusus, penelitian ini ingin mengeksplorasi sifat menarik dari ECC yang ditunjukkan pada skala material dapat diterjemahkan ke dalam kinerja yang lebih baik yakni sebagai bahan *repair* pada skala struktural. Peneliti sebelumnya telah melakukan penelitian mengenai penggunaan material ECC dengan campuran serat baja 1% dan serat PVA 1.5% sebagai bahan *repairing* pada balok bertulang yang terkorosi. Hasil pengujian menunjukkan tingkat kehilangan baja balok bertulang yang dilapisi ECC lebih rendah dari pada balok bertulang tanpa lapisan ECC. Hal ini berdampak pada kapasitas sisa

dan defleksi balok yang dilapisi ECC lebih besar daripada balok tanpa lapisan ECC (Maalej et. al, 2003).

Berdasarkan uraian di atas dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka dirasa perlu melakukan penelitian mengenai *repair* daerah tarik balok bertulang yang terkorosi menggunakan lapisan ECC berbahan dasar lokal yang lebih ekonomis yakni cukup menggunakan serat PVA 2%. Selain itu penggunaan serat berbahan dasar baja dalam *repair* seperti peneliti terdahulu memungkinkan lapisan ECC mudah kembali mengalami terkorosi dibandingkan dengan hanya menggunakan serat PVA. Maka dari itu dilakukan penelitian dengan judul “**Studi Experimental Penggunaan Engineered Cementitious Composite sebagai Alternatif Perkuatan pada Struktur Balok Beton Bertulang Terkorosi**” dengan menggunakan serat PVA.

1.2. Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan utama yang akan dibahas adalah:

- a. Bagaimana kerusakan akibat korosi antara balok *Normal Concrete* (NC), balok *Supplementary Concrete* (SC) dan balok ECC.
- b. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang yang mengalami *spalling* yang di-*repair* menggunakan lapisan ECC?
- c. Bagaimana pola retak dan kerusakan balok beton bertulang yang telah di-*repair* dengan ECC?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui kerusakan akibat korosi antara balok *Normal Concrete* (NC), balok *Supplementary Concrete* (SC) dan balok ECC.
- b. Mengetahui perilaku lentur balok beton bertulang yang mengalami *spalling* dan di-*repair* menggunakan lapisan ECC.
- c. Mengetahui pola retak dan kerusakan balok beton bertulang yang telah di-*repair* dengan ECC.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan dengan batasan sebagai berikut:

- a. Semen yang digunakan adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe-1.
- b. Hanya dilakukan investigasi terhadap lentur balok.
- c. Serat yang digunakan adalah *Polyvinyl Alcohol* (PVA).
- d. Percepatan korosi yang digunakan metode *galvanostatik*.
- e. Penelitian menggunakan larutan klorida 5 %.
- f. *High Range Water Reducer* (HRWR) yang digunakan Tancem 60 RA dan Consol SS-88.
- g. *Fly Ash* kelas F.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari keberhasilan penelitian ini adalah memberikan informasi kepada pihak jasa konstruksi dalam mengajukan bahan repair yang efektif dalam hal perbaikan terhadap balok beton bertulang yang terkorosi. Secara detail manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari analisa pemakaian bahan *repairing* dengan menggunakan lapisan ECC dapat dijadikan usulan dalam hal perbaikan balok bertulang yang mengalami korosi.
2. Dapat dijadikan acuan sebagai penelitian lebih lanjut pada element struktur lain, seperti penerapan *repair* lapisan ECC sebagai material tahan geser pada kolom yang mengalami *spalling* akibat korosi.

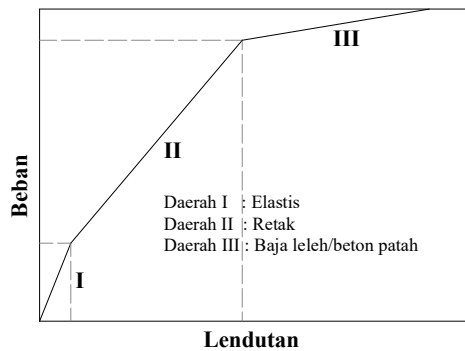
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1. Balok Beton Bertulang

Beton bertulang adalah kombinasi antara beton dengan tulangan baja, dimana baja memiliki kuat tarik yang baik dan tidak dimiliki beton. Praktik pada umumnya diberikan tulangan pada beton agar mampu bekerja maksimal. Balok dikenal sebagai element lentur yang dominan menerima momen lentur dan momen geser. Balok yang mengalami momen lentur akan mengalami tarikan pada daerah tarik balok dan menimbulkan retakan sebagai peringatan dini dan menghasilkan lendutan yang besar, sedangkan balok yang dominan momen geser akan mengalami keruntuhan secara tiba-tiba tanpa adanya peringatan.



Gambar 2.1. Hubungan beban-lendutan balok beton bertulang

Pada prinsipnya balok memiliki 3 fase saat diberikan beban lateral seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Fase pertama adalah fase *linear* dimana tegangan beton sebanding dengan regangan pada baja tulangan. Kondisi ini hanya akan terjadi apabila tegangan tarik pada baja berada di bawah modulus keruntuhan (*repture modulus*). Fase kedua adalah kondisi setelah retak dimana saat diberikan beban lebih kekuatan tarik beton akan terlampaui sehingga beton mengalami retakan. Kondisi ini kemudian

diambil alih oleh baja tulangan untuk menahan gaya tarik terjadi. Apabila beban ditingkatkan lagi maka baja tulangan akan mengalami kelelahan. Fase ke tiga adalah fase *nonlinear*. Fase ini terjadi apabila pembebanan diteruskan setelah baja tulangan leleh. Pada fase ini nilai regangan dan tekanan akan meningkat dan cenderung tidak sebanding lagi.

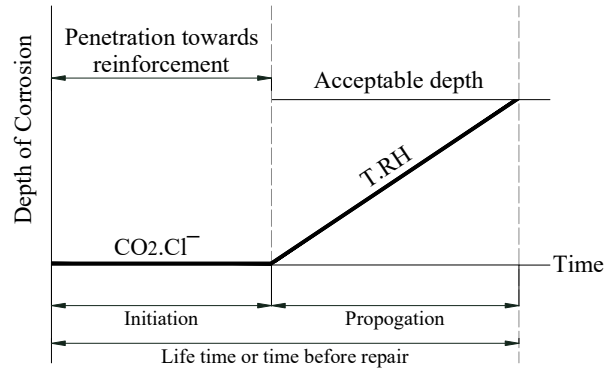
2.2. Korosi Baja Tulangan Beton

2.2.1. Proses korosi

Korosi merupakan reaksi elektrokimia antara material, biasanya logam, dengan lingkungannya yang menghasilkan kerusakan pada material dan propertinya (Capozucca 1995). Intensitas serangan kimia tergantung komposisi kimia dari bagian yang agresif, konsentrasi, derajat keasaman (pH). Ada 2 faktor penyebab korosi pada tulangan baja beton bertulang yakni induksi karbonasi dan induksi Klorida (CL). Karbonasi merupakan reaksi kimia antara zat-zat yang ada dalam beton dengan atmosfer (CO₂). Proses karbonasi berawal dari permukaan beton, lambat laun masuk dan sampai pada permukaan baja tulangan. Infiltrasi ion klorida (Cl⁻) sebagai faktor penyebab korosi yang paling sering terjadi. Masuknya ion klorida dalam beton dapat terjadi karena faktor internal yakni akibat proses pengerjaan beton itu sendiri, dan juga akibat faktor external yaitu berupa serangan lingkungan yang agresif.

Fenomena korosi berawal dari rusaknya lapisan pasif yang disebabkan oleh adanya infiltrasi ion klorida dan karbonasi yang menonaktifkan lapisan oksida pelindung di sekitar baja tulangan. Setelah lapisan pelindung larut, maka inisiasi korosi dimulai. Apabila konsentrasi klorida melebihi nilai ambang, oksigen yang cukup, dan kelembapan yang ada maka akan membentuk korosi. Sedangkan akibat karbonasi dapat menurunkan pH beton sehingga lapisan pasif tidak bekerja sempurna. Korosi menghasilkan pembentukan karatan yang memiliki tiga sampai enam kali volume baja asli, sehingga selimut beton mengalami tekanan dan akhirnya membentuk retakan dan *spalling* di permukaan beton. Penyebab korosi telah mulai pada tahap inisiasi yakni pada tahap infiltrasi zat-zat agresif yang menyebabkan pelindung baja larut. Pada fase

propagasi volume karat meningkat dan seiring waktu dan menyebabkan retakan dan *spalling* (Webster, 2000). Proses terjadinya korosi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Ilustrasi konsep periode inisiasi dan propagasi korosi (Tuutti & Kyosti, 1982).

Mekanisme korosi berupa pertukaran elektron yang terjadi dalam proses elektrokimia. Reaksi dari metal pada beton bentuk reaksinya pada persamaan (2.1) (Liu, 1996). Permukaan baja yang lapisan pasifnya hilang reaksinya dapat ditulis seperti persamaan (2.2)

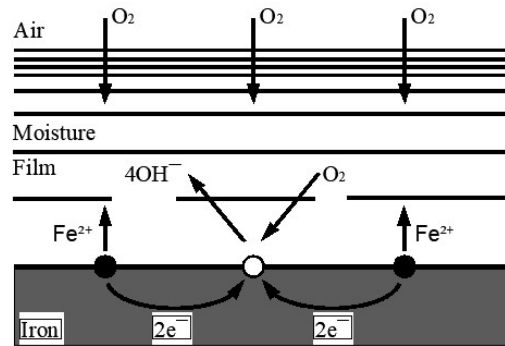


Lebih lanjut elektron yang dilepaskan dari reaksi anoda mengakibatkan O₂ dan air dalam beton bereaksi di permukaan baja tulangan. Bagian baja ini yang menjadi Kathoda, dan reaksinya dapat ditulis pada persamaan (2.3).



Korosi terbentuk akibat ion yang terjadi pada anoda dan katoda. Senyawa korosi yang dihasilkan dapat ditulis dengan persamaan (2.4) dan (2.5).





Gambar 2.3. Proses korosi pada baja tulangan beton (Capozucca, 1995).

2.2.2. Pengujian korosi

Pengujian korosi dapat dilakukan dengan 2 cara yakni pengujian dengan secara actual yakni spesimen langsung direndam pada air laut dan metode simulasi korosi dalam skala laboratorium. Metode perendaman langsung pada air laut biasanya membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan simulasi korosi di laboratorium. Simulasi korosi di laboratorium berupa percepatan korosi yang dilakukan dengan cara merekayasa proses korosi dengan cara pemberian arus listrik agar proses korosi dapat terjadi. Metode percepatan korosi dengan pemberian arus listrik adalah metode *galvanostatik*. Metode ini dilakukan dengan cara beton bertulangan direndam pada larutan NaCl dan diberikan arus listrik dengan tegangan tertentu pada tulangan (berperilaku Anoda) dan *stainless steel* (berperilaku Katoda). Pengujian percepatan korosi metode *galvanostatik* dilakukan berdasarkan ASTM G192-08 (2014). Kebutuhan arus listrik dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_{cor} = \frac{M_{act} - W_f}{v \times t} \quad (2.6)$$

dengan:

I_{cor} = Kebutuhan arus (*Amp*)

M_{act} = Masa baja terkorosi (*gr*)

W_f = Berat tulangan terkorosi (*gr*)

v = Berat atom valensi tulangan (*gr*)

t = Waktu korosi (*second*)

Hasil pengujian korosi ini dapat dilihat sejauh mana kehilangan volume laju baja tulangan dan laju korosi (*corrosion rate*) yang terjadi. Perhitungan kehilangan baja secara teoritis dapat menggunakan persamaan Faraday pada persamaan 2.7, sedangkan secara aktual dapat dilakukan pengukuran persentase kehilangan baja dengan persamaan 2.8 dan 2.9. Perhitungan kehilangan baja tulangan secara teoritis dengan persamaan Faraday, yakni:

$$M_{th} = \frac{W \cdot I_{app} \cdot T}{F} \quad (2.7)$$

dengan:

M_{th} = Massa teoritis dari karat per satuan luas permukaan baja (g/cm^2)

W = Berat ekuivalent dari baja yang diambil sebagai rasio berat atom besi terhadap valensi besi (27 g)

I_{app} = Kepadatan arus ($Ampere/cm^2$)

T = Durasi induksi korosi (*detik*)

F = Konstanta Faraday (96487 *Ampere.detik*)

Perhitungan kehilangan masa baja secara actual yakni dengan persamaan:

$$M_{ac} = \frac{W_i \cdot W_f}{\pi D L} \quad (2.8)$$

$$\rho = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2.9)$$

dengan:

M_{ac} = Masa aktual karat per satuan luas permukaan baja (g/cm^2)

W_i = Berat awal baja sebelum terkorosi (g)

W_f = Berat baja setelah terkorosi (g)

D = Diameter baja tulangan (cm)

L = Panjang baja tulangan (cm)

ρ = Persentase penurunan berat baja (%)

Setelah massa kehilangan baja akibat korosi diketahui dapat diketahui laju korosi. Perhitungan laju korosi dengan metode kehilangan baja adalah sebagai berikut:

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (2.10)$$

dengan:

CR = Corrosio rate ($gr/m^2 \cdot h$)

K = Konstanta (ditentukan berdasarkan Tabel 2.1)

W = Kehilangan berat (gr)

A = Luas tulangan (cm^2)

T = Waktu korosi

D = Massa jenis benda ($7.85 gr/cm^3$)

Nilai konstanta (K) ditentukan berdasarkan ASTM G 1-99 seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Konstanta *corrosion rate*

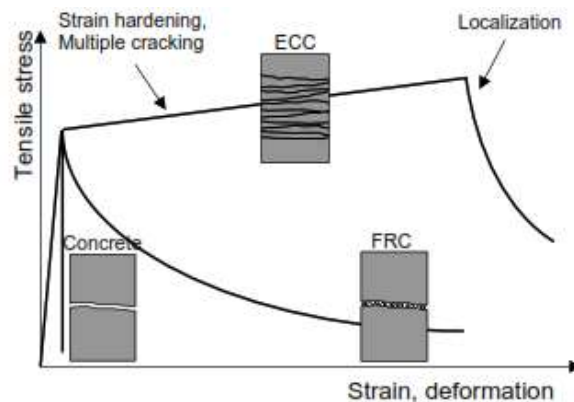
<i>Corrosion rate unit desired</i>	<i>Constant (K) in corrosion rate equation</i>
<i>Mils per yeas (mpy)</i>	3.45×10^6
<i>Inches per year (ipy)</i>	3.45×10^3
<i>Inches per mounth (ipm)</i>	2.87×10^2
<i>Milimeters per year (mm/y)</i>	8.76×10^4
<i>Micrometers per year (μ/y)</i>	8.76×10^7
<i>Picometers per second (pm/s)</i>	2.78×10^4
<i>Grams oer square per hour (g/m^2h)</i>	$1.00 \times 10^4 \times D$
<i>Miligrams per square decimeter per day (mdd)</i>	$2.40 \times 10^4 \times D$
<i>Micrograms per square meter per second (μ/m^2s)</i>	$2.78 \times 10^4 \times D$

Sumber: ASTM G 1-99

2.3. Engineered Cementitious Composite (ECC)

2.3.1. Pengertian ECC

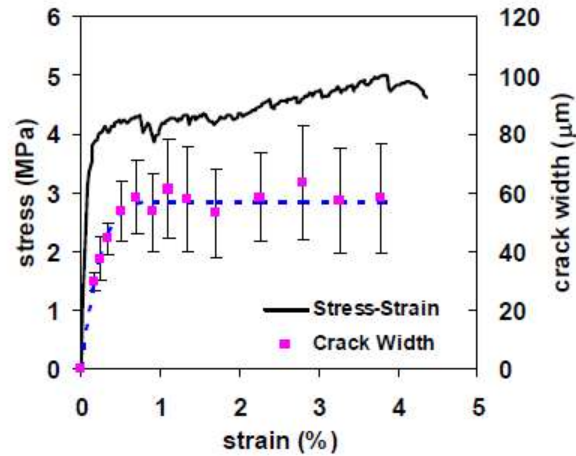
Engineered Cementitious Composite (ECC) merupakan tipe beton mutu tinggi yang diperkuat serat dengan daktilitas yang sangat tinggi, (Li, 2003; Fukuyama et. al, 2001; Yang et. al, 2008) dan dapat meningkatkan kinerja struktur yang mengalami kerusakan (Fukuyama et. al, 2001). Serat telah banyak digunakan dan didistribusikan dalam semen komposit. Penggunaan serat dalam semen komposit dapat mengurangi penetrasi air dalam beton karena permeabilitas rendah (Li, 1992a). Karakteristik ECC dengan campuran serat PVA yakni ditandai dengan *strain-hardening* dan retakan mikro (Li, 1993). Hasil ini jauh berbeda dengan *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) yang menunjukkan perilaku *tension-softening* saat setelah retak pertama, dan juga tidak seperti beton konvensional yang buruk terhadap gaya tarik sehingga langsung runtuh tanpa adanya daktilitas. Perbandingan perilaku tegangan-regangan beton konvensional, FRC, dan ECC dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Perilaku tarik *stress-strain* dari matriks semen (Li, 2001).

ECC dengan campuran fiber PVA telah banyak digunakan dalam penelitian terdahulu. Sifat mekanik ECC yakni regangan mencapai 4 %, dengan kekuatan ultimit mencapai 4.5 MPa (Li, 2001). ECC mengalami lebar retak 60 μm saat 1 % perpanjangan (Yang et. al, 2008), kemampuan untuk menyembuhkan diri (Liu et. al,

2017). Selain itu ECC menunjukkan perilaku *anti-spalling* dibandingkan dengan beton konvensional (Şahmaran & Li, 2010). Sifat khas dari ECC berupa hubungan antara tegangan, regangan dan kedalaman retakan pada ECC dapat dilihat pada Gambar 2.5. (Yang et. al, 2008). Selain itu Gambar 2.6 menunjukkan retakan mikro ECC saat dilakukan uji tarik *uniaxial*



Gambar 2.5. Hubungan uji tarik *stress-strain-crack width* dari PVA-ECC (Yang et. al, 2008).

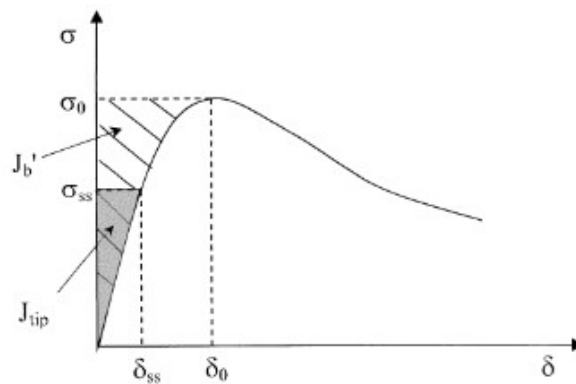


Gambar 2.6. *Multiple Cracking in a Spectra ECC (V_f = 2%) Uniaxial Tensile Specimen* (Li, 1993).

2.3.2. Konsep dasar desain ECC

Konsep dasar desain bahan pembentuk ECC berbasis Mikromekanik. Konsep mikromekanik berfungsi sebagai arah dalam desain untuk mencapai kinerja struktur

yang diinginkan, dan juga dapat berfungsi sebagai alat untuk mengoptimasi bahan (Li, 2003). Pengamatan utama dalam mikromekanik ialah hubungan antara tegangan (σ) dan lebar retak (δ) pada uji tarik *uniaksial*. Di dalam hubungan (σ - δ) terdapat 3 parameter utama yang mempengaruhi yakni, matrik, fiber dan permukaan serat-matrix dikombinasikan untuk mendapatkan tegangan retak pertama, dan retak *steady-state*, demi terciptanya kondisi *pseudo strain-hardening*, dengan ketentuan ketangguhan ujung retak (J_{tip}) menjadi kurang dari energy pelengkap (J_b') seperti pada persamaan 2.11.



Gambar 2.7. Tipikal kurva (σ - δ) untuk *strain-hardening* komposit.

$$J_{tip} = \frac{K^2 m}{E_m} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J_b' \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11), merupakan metode *J-integral* yang digunakan untuk melihat perubahan energi selama perpanjangan retak *steady-state*. Dimana, σ_0 adalah tegangan pehubung maksimum saat pembukaan celah maksimum δ_0 .

2.3.3. Material dasar pembentuk ECC

Material pembentuk ECC berupa matriks dan fiber. Matriks penyusun ECC meliputi *Ordinary Portland Cement (OPC)*, *fly ash*, *silica sand* yang dicampurkan dengan air dan *superplastiziser* untuk mengurangi penguapan air. Sedangkan serat yang digunakan dalam ECC biasanya berupa serat bermodulus rendah seperti *Polyvinyl*

Alcohol (PVA) dan *Pollypropoline* (PP), serta serat bermodulus tinggi yakni serat baja. Telah dilakukan penelitian sebelumnya bahwa serat PVA dalam ECC menunjukkan perilaku yang lebih baik dari serat PP (Shanour et. al, 2018). Serat PVA dalam ECC menunjukkan perilaku lebih baik yakni tetap tahan lama akibat serangan lingkungan yang panas (Li et. al, 2004), dan tetap tahan terhadap lingkungan sulfat klorida (Liu et.al, 2017). Fraksi serat dalam ECC hanya digunakan 2% dari jumlah seluruh pembentuk beton ECC (Li, 1993). Penggunaan fiber di bawah batas kritis perilaku ECC menyerupai FRC normal yakni *tension-softening*, sebaliknya penggunaan fiber di atas batas kritis berdampak pada biaya material (Li, 2003). Penelitian terdahulu menggunakan serat PVA-RECS15 sebagai perkuatan ECC menunjukkan perilaku yang baik sebagai perkuatan ECC (Tambusay et. al, 2015). Propertis serat PVA-RECS15 dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Propertis Mekanik dan Geometrik serat PVA-RECS15

Diameter	Panjang	Modulus Young	Tegangan tarik	<i>Spesific gravity</i>
38 mikron	8.0 mm	40 GPa	1600 MPa	1.30

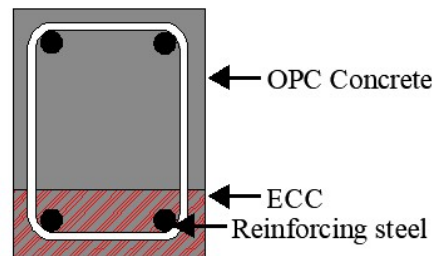
Sumber: Tambusay et.al, 2015

2.4. Aplikasi Peningkatan Kekuatan Balok Bertulang dengan Menggunakan Lapisan ECC.

Berbagai experimental maupun analisa *nonlinear* mengenai aplikasi ECC telah dilakukan oleh peneliti terdahulu sebagai bahan peningkatan kekuatan struktur. Di Indonesia sendiri peneliti sebelumnya yang dilakukan Tambusay tahun 2015 Telah membahas aplikasi ECC dalam skala structural (Tambusay et. al, 2015). Berikut beberapa penerapan ECC sebagai bahan perkuatan struktur khususnya balok beton bertulang, yakni sebagai berikut:

2.4.1. Peningkatan kapasitas balok bertulangan dengan lapisan ECC pada daerah tarik balok.

Balok umumnya dirancang agar mengalami gagal lentur. Hal ini menyebabkan daerah tarik pada balok akan mengalami retak halus sebagai akibat serat tarik pada balok tertarik karena adanya akibat beban lateral. Gagal geser perlu dihindari karena akan mengakibatkan keruntuhan tanpa adanya peringatan dini. Para peneliti sebelumnya telah melakukan penelitian mengenai aplikasi ECC sebagai bahan perkuatan daerah tarik pada balok beton bertulang. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kapasitas lentur balok.

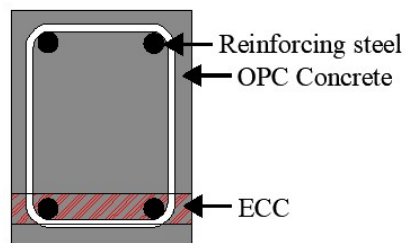


Gambar 2.8. Konsep perkuatan balok beton bertulang dengan lapisan ECC pada daerah tarik balok.

Maalej dan Li (2003) melakukan pengujian lentur balok RC dengan lapisan layer ECC terkorosi serta ingin melihat tingkat korosi pada balok tersebut. Serat yang digunakan dalam penelitiannya berupa serat PVA dan Serat baja. Hasil yang didapatkan kehilangan baja akibat korosi balok dengan lapisan ECC lebih sedikit dibandingkan balok normal concrete (NC) dengan jangka waktu 70 % lebih lama untuk mencapai tingkat kehilangan ECC seperti balok NC. Dalam kasus beban dan defleksi didapatkan adanya penurunan beban sebesar 4.7 % dengan kehilangan baja sebesar 6.6%, dan penurunan beban sebesar 11.1 % untuk kehilangan baja sebesar 10 %. Sedangkan dalam kasus displacementt menunjukkan penurunan tidak terlalu signifikan antar spesimen. Hasil yang didapatkan ini menunjukkan balok dengan lapisan ECC sangat efektif tahan terhadap korosi dan meminimalisir kapasitas beban dan defleksi yang hilang akibat korosi (Maalej et. al, 2003).

Berbeda dengan Maalej penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Shanour dkk (2018) melakukan beberapa variasi tebal lapisan ECC pada daerah tarik balok tanpa adanya perlakuan percepatan korosi terhadap spesimen. Spesimen lain berupa balok RC tanpa lapisan ECC dan balok *full*-ECC sebagai pembandingan hasil penelitian. Dalam penelitiannya digunakan fiber PVA panjang 12 mm, diameter 12 μ m dan dengan kadar 2% terhadap berat. Hasil yang didapatkan menunjukkan adanya peningkatan displacement sebesar 9 mm dan kapasitas beban sebesar 29 kN antara balok RC dengan balok RC berlapisan ECC setebal 100 mm pada daerah tarik. Bila dibandingkan RC dengan balok *full*-ECC adanya peningkatan displacement sebesar 17 mm dan peningkatan kapasitas beban sebesar 39 kN. Hasil penelitian menunjukkan korelasi baik antara pengujian experimental dengan analisa *nonliner* menggunakan program ANSYS (Shanour et. al, 2018).

2.4.2. Peningkatan kapasitas lentur balok dengan layer ECC sebagai selimut baja tulangan tarik.

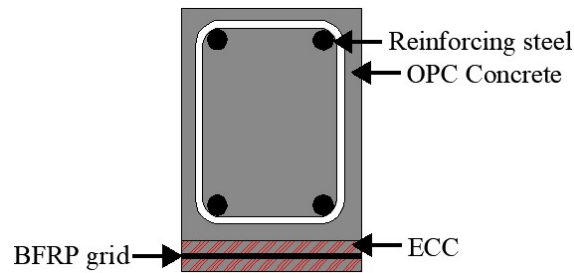


Gambar 2.9. Konsep perkuatan balok beton bertulang dengan menggunakan ECC sebagai selimut baja tulangan.

Pengembangan ECC sebagai perkuatan balok yang dilakukan oleh Khan (2016) berupa peningkatan kapasitas lentur balok dengan cara penerapan ECC sebagai selimut baja tulangan tarik. Konsep penerapan ECC pada selimut baja tulangan dapat dilihat pada gambar 2.9, dengan menggunakan serat bermodulus tinggi yakni serat baja. Pengujian dilakukan untuk mengetahui perilaku lentur balok dengan variasi peningkatan serat. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan kapasitas beban

dan defleksi dengan menambahkan serat. Selain itu dikemukakan bahwa serat dapat mengurangi kekakuan pada balok.

2.4.3. Peningkatan kapasitas lentur balok RC dengan lapisan *external* ECC dan BFRP grid.



Gambar 2.10. Konsep perkuatan balok beton bertulangan dengan menggunakan lapisan external ECC dan BFRP grid.

Konsep peningkatan lentur balok yang dilakukan oleh Zheng et. al, 2016 sebagai perkuatan external balok bertulang menunjukkan adanya peningkatan kapasitas beban pada balok dengan perkuatan ECC dan BFRP grid bila dibandingkan dengan balok NC. Selain itu hasil penelitian didapatkan bahwa tidak adanya slip antar beton NC dengan lapisan external ECC dan BFRP grid dengan demikian menunjukkan bahwa daya ikat antara kedua material sangat baik (Zheng et. al, 2016).

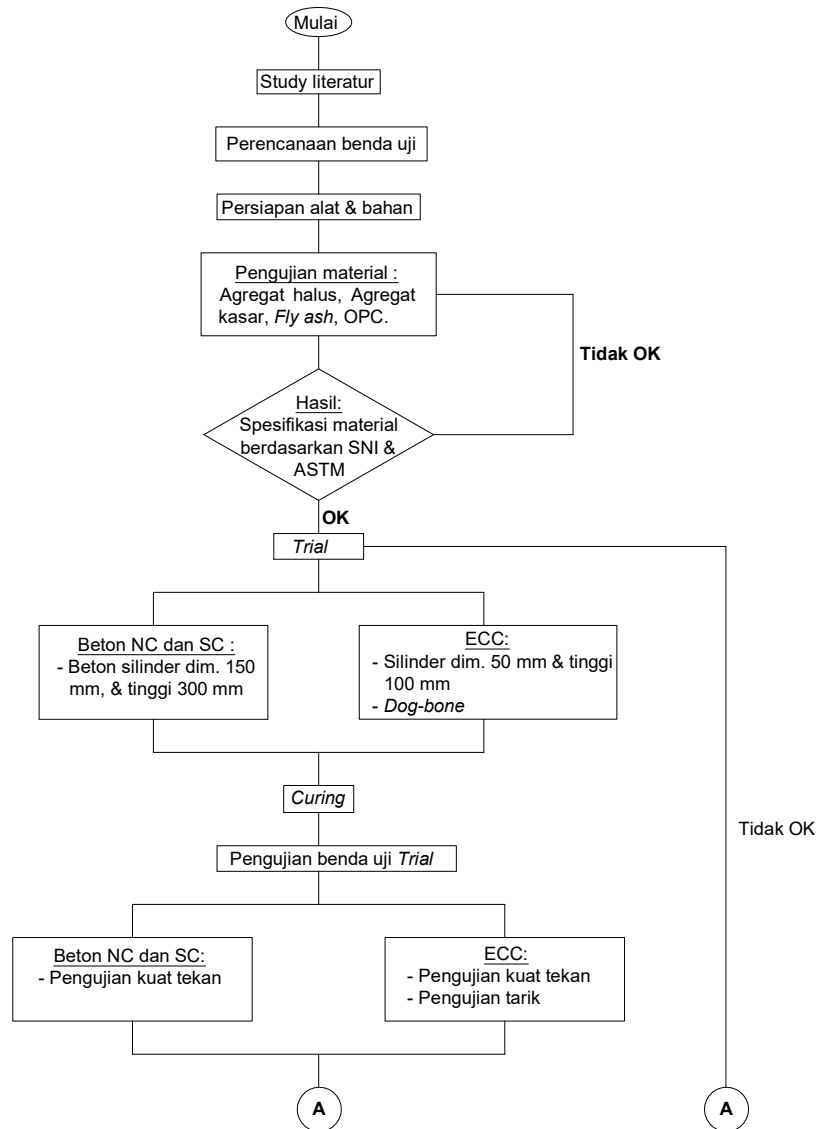
”Halaman ini sengaja dikosongkan”

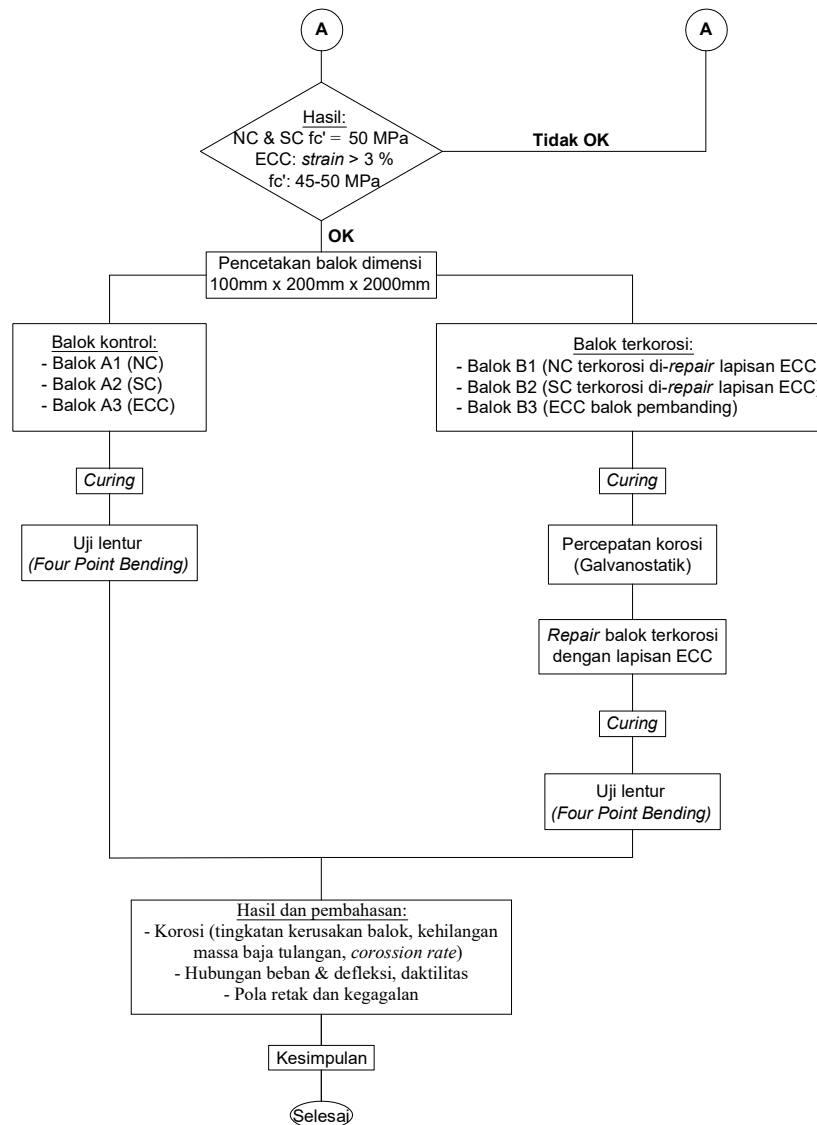
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Bagan Alir Penelitian

Bagan alir dari penelitian dibuat agar penelitian lebih terarah, sehingga hasil yang diperoleh merupakan hasil yang optimum dan sesuai dengan yang diharapkan. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2. Lingkup Penelitian

Penelitian ini menggunakan ECC sebagai bahan *repairing* pada balok beton bertulang yang mengalami *spalling* sebagai akibat dari korosi yang disimulasikan di laboratorium dengan tahapan sebagai berikut:

3.2.1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendalami teori guna menunjang penyusunan tesis ini. Adapun 3 hal yang menjadi pokok pembahasan yakni *Engineered Cementitious Composite* (ECC), korosi pada beton bertulang, dan perilaku lentur balok beton bertulang. Selain itu penelitian-penelitian yang terkait sangat diperlukan sebagai referensi dalam penulisan.

Studi literatur menjadi langkah awal karena sebagai acuan dalam eksperimen dan penulisan penelitian ini. Hal tersebut penting, mengingat penelitian yang dibuat saling berkaitan dengan penelitian sebelumnya sehingga dapat menjadi acuan terhadap hasil penelitian yang diperoleh.

3.2.2. Analisa material

Pada tahap ini dilakukan penentuan kelayakan terhadap agregat yang akan digunakan dalam campuran beton. Pengujian dan standar penentuan bahan adalah sebagai berikut:

a. Analisa agregat pasir

Pasir yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir Lumajang. Pengujian agregat pasir dilakukan di Laboratorium PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Jenis pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat pasir sebagai berikut:

- Pengujian gradasi berdasarkan SNI 03-2834-2000
- Pengujian kadar lumpur berdasarkan SNI 03-4428-1997
- Pengujian berat jenis berdasarkan SNI 03-1970-1990
- Pengujian penyerapan agregat pasir berdasarkan SNI 03-1970-1990
- Pengujian berat volume berdasarkan ASTM C29/C 29M-1997
- Pengujian kadar organik berdasarkan SNI 03-2816-1992
- Pengujian kadar air berdasarkan SNI 03-1970-1990

b. Analisa agregat kerikil

Kerikil yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kerikil Pasuruan. Pengujian dilakukan di Laboratorium PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Jenis pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat pasir sebagai berikut:

- Pengujian gradasi berdasarkan SNI 03-2834-2000
- Pengujian kadar lumpur berdasarkan SNI 03-4428-1997
- Pengujian berat jenis berdasarkan SNI 03-1970-1990
- Pengujian penyerapan agregat berdasarkan SNI 03-1970-1990
- Pengujian berat volume berdasarkan ASTM C29/C 29M-1997
- Pengujian abrasi berdasarkan SNI 2417:2008
- Pengujian kadar air berdasarkan SNI 03-1970-1990

c. Analisa *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe-1 dan *fly ash* kelas F

Pengujian OPC dan *fly ash* berupa berat jenis dan penyerapan air, dan berat volume agregat berdasarkan SNI 03-1979-1990 dan ASTM C29/C 29M-97-2003 dilakukan di PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Selain itu dilakukan pengujian *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kandungan kimia pada agregat berdasarkan ASTM 188-16 yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

d. Pengujian tarik baja tulangan

Pengujian tarik baja tulangan untuk mengetahui kuat tarik baja tulangan saat kondisi leleh, kondisi ultimit dan kondisi putus pada tulangan tersebut. Pengujian dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember berdasarkan SNI 07-2529-1991.

e. Pengujian *silica sand*

Pengujian *silica sand* berupa ukuran butir agregat dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pengujian berdasarkan para peneliti terdahulu yakni bahwa ukuran

butiran agregat yang digunakan sebagai bahan pembentuk ECC berukuran < 200 μm .

Hasil dari pengujian menunjukkan kelayakan dari bahan yang digunakan dalam penelitian. Bahan yang tidak memenuhi spesifikasi digantikan dengan bahan baru. Sedangkan bahan yang memenuhi spesifikasi dilanjutkan dengan penentuan proporsi campuran dan pembuatan benda uji.

3.2.3. Proporsi campuran

Proporsi campuran yang digunakan dalam penelitian ini terdapat 3 proporsi campuran yakni proporsi campuran *Normal Concrete* (NC), proporsi campuran beton dengan *Supplementary material* (SC) dan proporsi campuran ECC. Proporsi campuran beton NC dan beton SC berdasarkan yang ada pada PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Sedangkan proporsi campuran ECC berdasarkan komposisi terdahulu yang dilakukan oleh Benny Suryanto tahun 2015 dengan judul *Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures using locally available Material in the UK*. Langkah selanjutnya dilakukan percobaan untuk mendapatkan karakteristik tarik ECC terhadap perbandingan *Water to binder* (W/B). *Trial* dilakukan sebanyak 9 komposisi berbeda dimana terdapat 3 kelompok perbandingan W/B sebesar 0.26, 0.28 dan 0.3. Masing-masing kelompok tersebut terdapat 3 variasi perbandingan antara *Fly ash to cement* (F/C) sebesar 1.6; 1.8; dan 2. *Trial* dari ke-9 spesimen yang memenuhi karakteristik unik ECC yang dipakai untuk komposisi spesimen balok.

3.2.4. Perencanaan benda uji

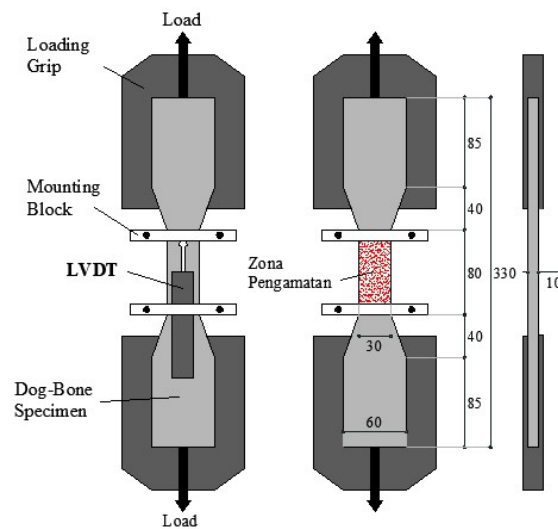
A. Benda uji silinder

Benda uji silinder diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm digunakan untuk pengujian tekan beton NC dan beton SC mengacu mengacu ASTM C39/C39M-99 dan silinder diameter 100 mm, dengan tinggi 200 mm mengacu ASTM C109/109M-01 untuk uji tekan mortar. Pengujian kuat tekan beton

dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM).

B. Benda uji *dog-bone*

Benda uji *dog-bone* digunakan untuk pengujian kuat tarik ECC dengan memberikan beban *uniaxial*. Pengujian kuat tarik *uniaxial* mortar *dog-bone* dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengacu ASTM C-307-03 dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 5 kN. Pembacaan displacement *dog-bone* digunakan *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) 50 mm agar lebih akurat. Pengukuran beban tarik digunakan *load-cell* pada mesin UTM. Spesimen *dog-bone* ECC diuji dengan kontrol displacement dengan kecepatan 0.5 mm/menit. Skema dan *setup* pengujian tarik *uniaxial dog-bone* gambar 3.2, dan gambar 3.3.



Gambar 3.2. Skema pengujian tarik *uniaxial dog-bone* dan detail spesimen *dog-bone*.



Gambar 3.3. Setup pengujian tarik *uniaxial dog-bone*.

Berdasarkan hasil 9 variasi komposisi dipakai komposisi yang paling efektif menciptakan karakteristik kuat tarik tinggi dari ECC untuk digunakan pada pencetakan balok ECC.

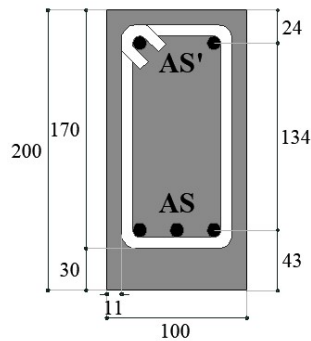
C. Benda uji balok.

Penentuan dimensi balok mengacu pada peraturan Beton Indonesia (1971) dan SK SNI T-15-1991-03 untuk pendekatan dimensi balok beton bertulang.

Lebar balok (b) $\rightarrow b \geq \frac{le}{50} = \frac{2000}{50} = 40 \text{ mm}$, dipakai $b = 100 \text{ mm}$.

Tinggi balok (h) $\rightarrow h \geq \frac{le}{16} = \frac{2000}{16} = 125 \text{ mm}$, dipakai $h = 200 \text{ mm}$.

Penelitian ini menggunakan balok beton bertulang, sehingga perlu memperhitungkan baja tulangan. Baja tulangan dirancang bertulang lemah (*under reinforced*) dengan metode kekuatan batas. Perhitungan kebutuhan tulangan baja untuk balok dengan dimensi $2000 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ sebagai berikut.



Gambar 3.4. Penampang balok bertulang

Data:

Tinggi balok (h)	= 200 mm
Lebar balok (b)	= 100 mm
Selimut beton (d')	= 43 mm
Tinggi efektif (d)	= 157 mm
Mutu baja (f_y)	= 600 Mpa
Mutu beton (f_c)	= 50 Mpa
Modulus Elastisitas baja (E_s)	= 200000 Mpa
Modulus Elastisitas beton (E_c)	= 33234,02 Mpa
Modulus reapture (f_r)	= 4.95 Mpa

Perhitungan:

- ✓ Menghitung kebutuhan baja tulangan:

Tulangan tekan: 2 D 10

$$A_s' = n \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \times 3,14 \times 5^2 = 157.079 \text{ mm}^2$$

Tulangan tarik: 3 D 10

$$A_s = n \cdot \pi \cdot r^2 = 3 \times 3,14 \times 5^2 = 235.62 \text{ mm}^2$$

- ✓ Menghitung rasio tulangan:

Rasio tulangan tekan:

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = \frac{157.079}{100 \times 157} = 0,010$$

Rasio tulangan tarik:

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{235.5}{100 \times 157} = 0,015$$

✓ Menghitung momen inersia:

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \times 200^3}{12} = 66666666,67 \text{ mm}^4$$

1. Saat retak:

✓ Menghitung rasio modular/angka ekuivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 6,018$$

✓ Menghitung garis netral

$$\begin{aligned} A &= b \times h + (n - 1)(A_s + A_s') \\ &= 100 \times 200 + (6.018 - 1)(235.62 + 157.079) = 21970.54 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{atas} &= \frac{\left((b \cdot h) \cdot \left(\frac{h}{2} \right) \right) + ((n - 1)A_s \cdot d) + ((n - 1)A_s' \cdot d')}{A} \\ &= \frac{\left((100 \cdot 200) \cdot \left(\frac{200}{2} \right) \right) + ((6.018 - 1)235.62 \times 157) + ((6.018 - 1)157.079 \times 43)}{21970.54} \\ &= 101 \text{ mm} \end{aligned}$$

✓ Menghitung momen Inersia

$$\begin{aligned} I &= \left(\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \right) + \left(b \cdot h \left(y - \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right) \right) + ((n - 1)A_s(d - y)^2) \\ &\quad + ((n - 1)A_s'(y - d')^2) \\ &= \left(\frac{1}{12} \cdot 100 \cdot 200^3 \right) + \left(100 \cdot 200 \left(101 - \left(\frac{200}{2} \right)^2 \right) \right) \\ &\quad + ((6.018 - 1)235.62(157 - 101)^2) \\ &\quad + ((6.018 - 1)157.079(101 - 43)^2) \\ &= 73045971 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

- ✓ Menghitung M-crack

$$M_{crack} = \frac{fr \times I}{y_{bawah}} = \frac{fr \times I}{h - y_{atas}} = \frac{4.95 \times 73045971}{200 - 101}$$

$$= 3652941.17 \text{ Nmm}$$

- ✓ Rencana pembebanan dalam penelitian adalah *Four point bending* sehingga didapatkan nilai P dengan persamaan:

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

dimana nilai L adalah jarak antar tumpuan yakni 1700 mm,

dan X adalah jarak pembebanan yakni 700 mm.

$$P = \frac{4 \cdot M_{crack}}{(L-X)} = \frac{4 \times 3652941,17}{(1700 - 700)} = 14611,765 \text{ N} = 14,61 \text{ kN}$$

2. Saat leleh

- ✓ Faktor garis netral

Asumsikan balok berperilaku elastis, maka:

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

$$= \left(((0.015 + 0.010)^2)6.018^2 + \frac{2(0.015 + 0.010 \times 43)}{157} \right) 6.6018^{\frac{1}{2}}$$

$$- (0.015 + 0.010)6.018$$

$$= 0.34$$

Jarak garis netral dari serat atas balok:

$$Kd = K \times d = 0.34 \times 157 = 52.68 \text{ mm}$$

- ✓ Regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_s = \frac{fy}{E_s} = \frac{600}{200000} = 0.003$$

- ✓ Regangan beton bagian tekan

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \times \left(\frac{Kd}{d - Kd} \right) = 0.0030 \times \left(\frac{52.68}{157 - 52.68} \right) = 0.0015$$

- ✓ Tegangan pada beton

$$f_c = \varepsilon_c \times E_c = 0.0015 \times 33234 = 50.35 \text{ MPa}$$

- ✓ Regangan tulangan tekan

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s'} &= \varepsilon_c \times \left(\frac{Kd - d'}{Kd} \right) = 0.0015 \times \left(\frac{52.68 - 43}{52.68} \right) \\ &= 0.00028 \end{aligned}$$

- ✓ Tegangan tulangan tekan

$$f_s = \varepsilon_{s'} \times E_s = 0.00028 \times 200000 = 55.68 \text{ MPa}$$

- ✓ Gaya tekan pada beton dan baja

$$C_c = \frac{1}{2} \times f_c \times b \times kd = \frac{1}{2} \times 50.35 \times 100 \times 52.68 = 132624.98 \text{ N}$$

$$C'_s = A_s' \times f'_s = 157.079 \times 55.68 = 8746.69$$

$$\text{Gaya tekan total } C_c + C'_s = 141371.67 \text{ N}$$

- ✓ Jarak total gaya tekan dari ujung tepi balok

$$\begin{aligned} y' &= (d' \times C'_s) + \left(C_c \times kd/3 \right) / (C_c + C'_s) \\ &= (43 \times 8746.69) + \frac{(132624.98 \times 52.68/3)}{(141371.67)} = 19.13 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dengan demikian jarak pusat gaya tekan ke pusat tulangan tarik adalah:

$$J_d = d - y' = 157 - 19.13 = 137.87 \text{ mm}$$

Momen saat leleh adalah:

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot J_d = 235,630 \times 600 \times 137,87 = 19490291,5 \text{ Nmm}$$

- ✓ Rencana pembebanan dalam penelitian adalah *Four point bending* sehingga didapatkan nilai P dengan persamaan:

$$P = \frac{4 \cdot M_{yield}}{(L-X)}; \text{ dimana nilai L adalah jarak antar tumpuan yakni 1700 mm,}$$

dan X adalah jarak pembebanan yakni 700 mm.

$$P = \frac{4 \cdot M_{yield}}{(L-X)} = \frac{4 \times 19490291,5}{(1700 - 700)} = 77961,166 \text{ N} = 77,961 \text{ kN}$$

3. Saat beban ultimit:

- ✓ Karena regangan pada tulangan tekan belum leleh, maka dicari dengan persamaan berikut:

$$f's = \varepsilon's \times Es, \text{ dimana } \varepsilon's = 0.003 \left(\frac{c - d'}{c} \right), \text{ maka}$$

$$f's = 0.003 \left(\frac{c - d'}{c} \right) \times Es \dots \dots \dots \text{Persamaan 1}$$

$$Cs = As' \times f's \dots \dots \dots \text{Persamaan 2}$$

Substitusi persamaan 1 ke persamaan 2, menjadi:

$$Cs = As' \times 0.003 \left(\frac{c - d'}{c} \right) \times Es \dots \dots \dots \text{persamaan 3}$$

Nilai $c = \frac{a}{\beta_1}$, sehingga didapatkan:

$$Cs = As' \times 0.003 \left(\frac{a - \beta_1 \times d'}{c} \right) \times Es \dots \dots \text{persamaan 4}$$

$$Cc = 0.85 \times f'c \times b \times a \dots \dots \text{persamaan 5}$$

$$T = As \times fy \dots \dots \dots \text{persamaan 6}$$

- ✓ Keseimbangan gaya adalah $Cc + Cs = T$, dengan persamaan ini dikalikan setiap sekmen dengan a , sehingga didapatkan fungsi kuadrat dari a .

$$(0.85 \cdot f'c \cdot b) a^2 + ((As' \cdot Es \cdot 0,003) - (As \cdot fy)) a - (As' \cdot Es \cdot 0,003 \cdot \beta_1 \cdot d') = 0$$

- ✓ Mutu beton 50 MPa, maka didapatkan $\beta_1 = 0.85 - 0.05 \cdot (f'c - 30) / 7 = 0.71$

- ✓ Untuk mendapatkan nilai a menggunakan persamaan ABC, maka didapatkan nilai $a = 32.1$

- ✓ Kontrol kondisi keseimbangan:

$$\begin{aligned} C_s &= As' \cdot 0.003 \left(\frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \right) Es \\ &= 157,079 \times 0.003 \left(\frac{28.3 - 0,71 \cdot 43}{32,1} \right) 200000 \end{aligned}$$

$$= 4961 \text{ N}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a = 0,85 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 32,1 = 134610,7 \text{ N}$$

$$T = A_s \cdot f_y = 235,620 \cdot 600 = 1413731 \text{ N}$$

$$T - C_c - C_s = 4961 - 134610,7 - 1413731 = 0 \dots \dots \dots OK$$

✓ Menghitung momen ultimit:

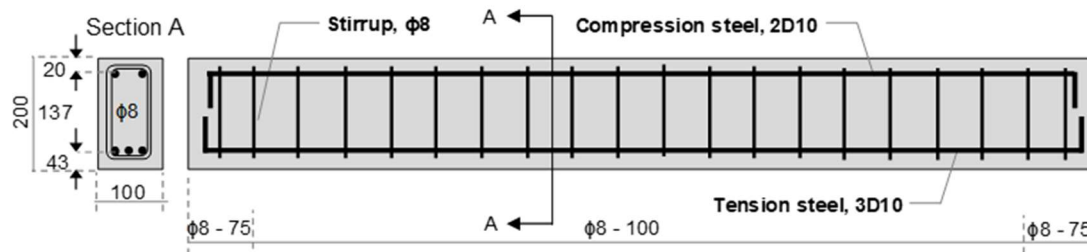
$$\begin{aligned} M_u &= 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a \left(d - \frac{1}{2} \cdot a \right) + A_s' \cdot 0,003 \left(\frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \right) E_s (d - d') \\ &= 0,85 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 32,1 \left(157 - \frac{1}{2} \cdot 32,1 \right) \\ &\quad + 157,079 \cdot 0,003 \left(\frac{32,1 - 0,71 \cdot 43}{32,1} \right) 200000 (157 \\ &\quad - 43) \\ &= 19792868,1 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Rencana pembebanan dalam penelitian adalah *Four point bending* sehingga didapatkan nilai P dengan persamaan:

$P = \frac{4 \cdot M_u}{(L - X)}$; dimana nilai L adalah jarak antar tumpuan yakni 1700 mm, dan X adalah jarak pembebanan yakni 700 mm.

$$P = \frac{4 \cdot M_u}{(L - X)} = \frac{4 \times 19792868,1}{(1700 - 700)} = 79171,5 \text{ N} = 79,17 \text{ kN}$$

Perhitungan analisa penampang disimpulkan dalam detail penulangan balok seperti pada gambar 3.5. Hasil perhitungan berupa momen dan beban dijadikan sebagai kontrol untuk pengujian lentur balok uji beton normal (NC). Rekapitulasi perhitungan Momen dan beban untuk setiap kondisi dapat dilihat pada tabel 3.2.



Gambar 3.5. Detail penulangan balok

Tabel 3.1. Rekapitulasi analisis penampang balok.

Kondisi	Momen (M) ($kN.m$)	Beban (P) (kN)
Saat retak	3.65	14.61
Saat leleh	19.49	77.96
Saat ultimit	19.79	79.17

Proporsi campuran yang telah ditentukan kemudian selanjutnya dilakukan pencetakan benda uji balok dengan dimensi 2000 mm x 100 mm x 200 mm. Benda uji balok dicetak di PT. Wijaya Karya Beton, Tbk agar mutu masing-masing spesimen terkontrol. Penelitian ini menggunakan 6 buah balok beton bertulang, dengan rincian fungsi dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. Benda uji balok

Nama balok	Tipe	Fungsi	Storing Procedure	Jlh	Model kegagalan
Balok A1	NC	Balok kontrol	<i>Moist curing</i>	1	Lentur
Balok A2	SC	Balok kontrol	<i>Moist curing</i>	1	Lentur
Balok A3	ECC	Balokn kontrol	<i>Moist curing</i>	1	Lentur
Balok B1	NC	<i>Repair</i>	<i>Accelerated</i>	1	Lentur
Balok B2	SC	<i>Repair</i>	<i>Accelerated</i>	1	Lentur
Balok B3	ECC	Balok pembanding	<i>Accelerated</i>	1	Lentur

Benda uji yang telah dicetak kemudian dilepas dari cetakan setelah 24 jam, dan dilakukan *curing* selama 28 hari guna mencapai kekuatan ultimit. Metode *curing* dalam penelitian ini menggunakan metode *moist curing* yakni dengan cara membungkus balok dengan karung basah. Tujuannya adalah untuk menjaga kelembapan pada beton.

3.2.5. Percepatan korosi

Percepatan korosi pada penelitian ini menggunakan metode *galvanostatik*. Hasil pengujian korosi ini dapat dilihat sejauh mana kehilangan volume baja tulangan sebagai akibat dari korosi. Metode *galvanostatik* dilakukan dengan cara menghubungkan kutub negatif *power supply* pada tulangan baja yang berperilaku sebagai anoda, dan kutub positif dihubungkan pada *stainless steel* yang berperilaku sebagai katoda. Balok kemudian direndam di dalam larutan klorida setinggi 5 cm dengan kandungan NaCl 5%.

Untuk mensimulasikan proses terjadinya korosi tersebut pertama perlu diketahui kebutuhan arus yang digunakan. Perhitungan kebutuhan arus dihitung berdasarkan hukum Faraday pada persamaan (3.1), yakni sebagai berikut:

Diketahui:

Tingkatan korosi (γ)	= 50%
Diameter tulangan D_{10}	= 1 cm
Panjang tulangan (L)	= 200 cm
Berat jenis tulangan (B_J)	= 7,850 g/cm ³
Kandungan NaCl	= 5%
Rencana waktu korosi (f)	= 30 hari
Berat atom valensi tulangan (v)	= 27,925 gr
Jumlah ion (Fe)	= 2
Konstanta Faraday (F)	= 96,487 amp.s

Luas tulangan:

$$\begin{aligned} A &= (\pi \times D \times L) + \left(2 \times \left(\frac{1}{4}\right) \times \pi \times D^2\right) \\ &= (3,14 \times 10 \times 2000) + \left(2 \times \left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 10^2\right) \\ &= 629,57 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Berat tulangan awal:

$$\begin{aligned} W_i &= \left(\frac{1}{4} \times \pi \times D^2\right) \times BJ \times L \\ &= \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2\right) \times BJ \times L \\ &= 1232,45 \text{ gr} \end{aligned}$$

Berat setelah korosi:

$$\begin{aligned} W_f &= W_i - \left(\frac{\gamma \times W_i}{100}\right) \\ &= 1232,45 - \left(\frac{50 \times 1232,45}{100}\right) \\ &= 616,225 \text{ gr} \end{aligned}$$

Masa actual tulangan akibat korosi persatuan luas luas:

$$\begin{aligned} M_{act} &= \frac{(W_i - W_f)}{\pi \times D \times L} \\ &= \frac{(1232,45 - 616,225)}{3,14 \times 1 \times 200} \\ &= 0,981 \text{ gr/cm}^2 \end{aligned}$$

Kebutuhan arus:

$$\begin{aligned} I_{cor} &= \frac{M_{act} \times F}{v \times t} \\ &= \frac{0,981 \times 96487}{27,925 \times 2592000} \\ &= 0,0013 \text{ Amp/cm}^2 \end{aligned}$$

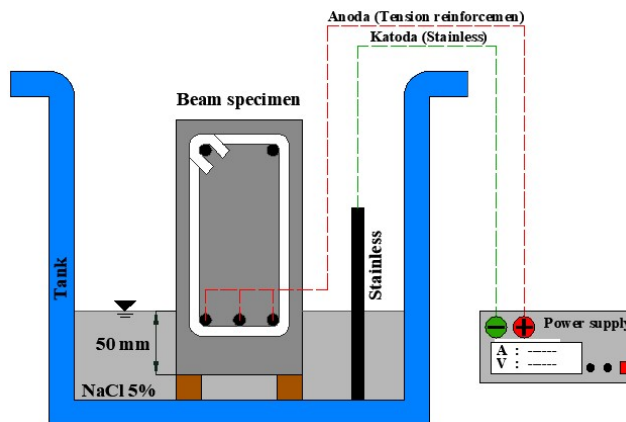
Kebutuhan arus total:

$$\begin{aligned} I_{tot} &= A \times I_{cor} \\ &= 629,57 \times 0,0013 \\ &= 0,8 \text{ Amp} \end{aligned}$$

Dengan demikian didapatkan kuat arus sebesar 0,8 Amp untuk waktu korosi dengan lama korosi 1 bulan (31 hari). Setelah didapatkan besar arus selanjutnya dapat diprediksi kehilangan masa baja secara teoritis dengan menggunakan persamaan (3.2). Hasil perhitungan kehilangan masa secara teoritis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_{th} &= \frac{W \times I_{app} \times T}{F} \\ &= \frac{27 \times 0,0013 \times 2825361646}{96487} \\ &= 1027,809 \text{ g/cm}^2 \end{aligned}$$

Direncanakan bahwa dengan kuat arus sebesar 0,8 ampere dalam jangka waktu 1 bulan besi terkorosi mengalami kehilangan baja sebesar 1027,809 g/cm². Skema dan setup pengujian percepatan korosi dengan metode *galvanostatik* dapat dilihat pada gambar 3.6 dan 3.7.



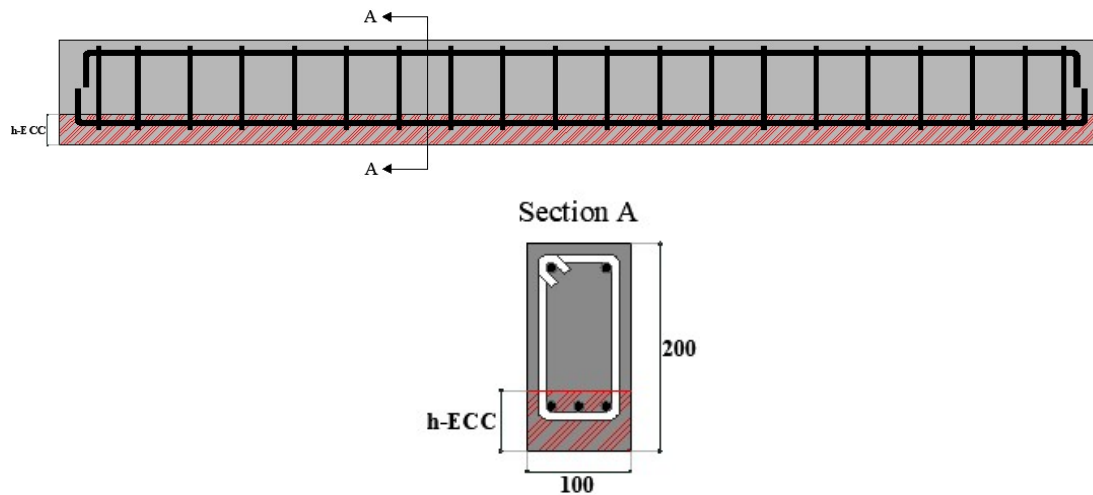
Gambar 3.6. Skema pengujian percepatan korosi metode *galvanostatik*.



Gambar 3.7. Setup pengujian korosi galvanostatik.

3.2.6. Metode *repairing* balok beton bertulang dengan lapisan ECC.

Balok beton bertulang yang telah terkorosi yang mengalami *spalling* kemudian selanjutnya dilakukan *repair* pada daerah tarik balok seperti ditunjukkan pada gambar 3.8. Lokasi perbaikan hanya dilakukan pada daerah tarik balok karena balok direncanakan agar terkorosi pada daerah tarik seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.8. Skema *repair* balok terkorosi.



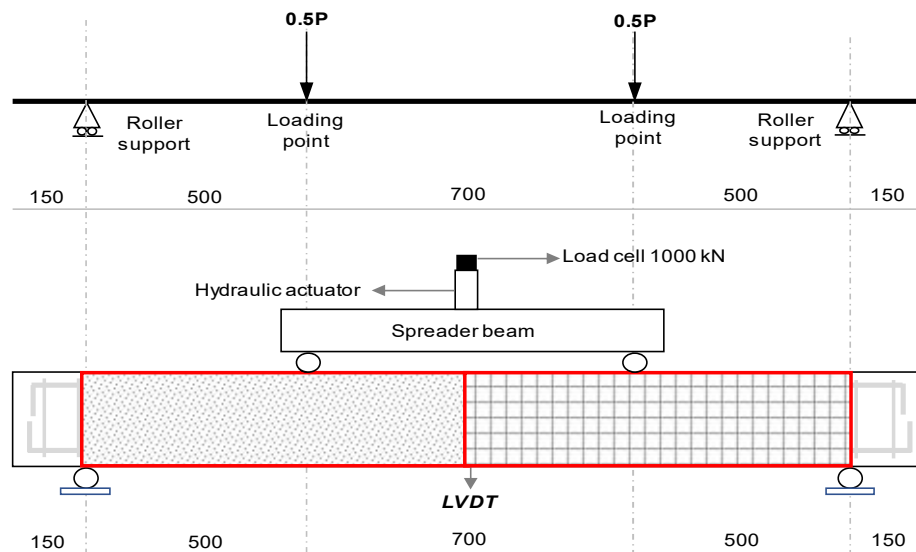
Gambar 3.9. *Repair* balok beton terkorosi.

Metode *repairing* balok beton bertulang setelah terkorosi dilakukan dengan cara membersihkan daerah tarik beton bertulang yang mengalami *spalling*. Beton terkorosi dan *spalling* dilepas sampai tidak adanya beton lemah yang menempel agar tidak lemah antar sambungan beton lama dan layer ECC. Tahapan lebih lanjut korosi yang terjadi pada baja tulangan dibersihkan dengan menggunakan sikat besi sampai tidak adanya korosi pada baja tulangan sehingga tidak mengurangi daya ikat antara tulangan dan lapisan ECC.

3.2.7. Pengujian lentur balok

Tahap ini melakukan pengujian lentur terhadap 6 buah balok beton bertulang dengan pembagian fungsi masing-masing balok dapat dilihat pada tabel 3.3. Tujuan pengujian ini untuk mengetahui kapasitas lentur dari balok dari setiap spesimen. Balok A1, A2, dan A3 adalah balok kontrol tanpa dilakukan pengujian percepatan korosi, sedangkan balok B1, B2 dilakukan pengujian lentur setelah melalui tahapan percepatan korosi dan di-*repair* dengan menggunakan lapisan ECC. Balok B3 adalah balok ECC

terkorosi sebagai spesimen pembanding. Pengujian dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM). Tahapan pengujian mengacu pada SNI 4431-2011 untuk pengujian kuat lentur dengan dua titik pembebanan di laboratorium. Terdapat 2 hasil yang ingin diperoleh dari pengujian lentur ini yakni nilai defleksi dan beban yang terjadi. Untuk pembacaan defleksi diberikan *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) 100 mm pada tengah bentang balok di mana momen lentur maksimum terjadi, sedangkan data beban diperoleh dari *load sel*. Data beban dan defleksi diperoleh terus menerus pada laju sampling 1 Hz menggunakan Data logger TDS-630. Selama pengujian retakan diamati dan ditandai menggunakan spidol permanen. Skema dan *setup* pengujian lentur *four bending point* dapat dilihat pada gambar 3.10, dan gambar 3.11.



Length unit is in 'milimetre'

Gambar 3.10. Skema uji lentur *Four Point Bending*, dan posisi penempatan LVDT.



Gambar 3.11. Setup pengujian lentur *four point bending*

3.3. Analisis hasil pengujian

Analisa terhadap hasil pengujian diperoleh berdasarkan hasil uji ekperimental di laboratorium dengan mengacu pada standar peraturan yang ada seperti SNI dan ASTM sehingga didapatkan hasil yang optimal. Selain itu perlu adanya analisa detail terhadap penelitian terdahulu karena adanya saling keterkaitan, dan juga dapat sebagai kontrol terhadap hasil yang didapatkan.

Beberapa aspek yang akan ditinjau pada analisa perilaku lentur balok terkorosi yang dilapisi ECC adalah sebagai berikut:

1. Korosi

Korosi yang terjadi pada setiap spesimen antara balok beton normal (NC), balok dengan bahan pengganti semen (SC) dan balok ECC tentunya berbeda karena material yang pembentuknya berbeda. Karena itu perlu dilakukan analisa kerusakan korosi masing-masing tipe beton, analisa kehilangan berat baja tulangan akibat korosi dengan jangka waktu korosi yang sama dan *corrosion rate*.

2. Perilaku kuat tarik tinggi ECC

ECC dalam penelitian ini adalah material utama sehingga perlu adanya analisa secara khusus berupa perilaku daktail ECC dan pola retak ECC saat diberikan beban tarik *uniaxial*. Hasil pengujian tarik ECC berupa grafik

hubungan beban dan defleksi didapatkan dari bacaan *load cell* dan LVDT yang dihubungkan dengan *data logger*, serta pola retak yang diperoleh dengan pengambilan gambar saat pengujian.

3. Hubungan beban dan defleksi spesimen balok

Hubungan beban dan defleksi biasanya berupa kurva yang didapatkan dari bacaan *data logger*. Bacaan beban yang bekerja didapatkan dari *load cell* dan bacaan defleksi yang terjadi akibat beban didapatkan dari alat LVDT. Hasil hubungan beban dan defleksi dilakukan analisa untuk masing-masing spesimen karena tentunya memiliki perilaku yang berbeda-beda antar spesimen.

4. Pola retak dan kerusakan

Pola retak masing-masing spesimen diamati secara langsung dan dibuatkan dalam bentuk sketsa pada spesimen. Selain itu untuk memperjelas pola retak masing-masing spesimen dibuatkan dalam sketsa gambar sehingga detail pola retak masing-masing spesimen dapat terlihat jelas. Pola kerusakan masing-masing spesimen tentunya berbeda karena material yang berbeda. Pola kerusakan antar spesimen dibuatkan dalam bentuk foto gabungan hasil pengujian lentur akhir dan dianalisa satu terhadap yang lain.

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah analisa propertis material yang akan digunakan. Hal ini menjadi penting untuk menentukan material yang digunakan layak digunakan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau *American Standard for Testing Material* (ASTM). Material yang tidak memenuhi standar akan digantikan dengan yang baru, sedangkan material yang memenuhi spesifikasi kemudian dilakukan penentuan komposisi campuran yang paling efektif berasarkan propertis material. Selanjutnya berdasarkan komposisi yang ada, dilakukan pencetakan benda uji dalam skala structural yakni balok *Normal Concrete* (NC), balok *Supplementary Concrete* (SC), balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC) dengan dimensi 100 mm x 200 mm x 2000 mm. Tahapan selanjutnya yakni simulasi korosi dalam skala laboratorium pada balok yang telah dicetak. Balok terkorosi yang mengalami *spalling* kemudian dilakukan *repair* dengan lapisan ECC dan diuji lentur untuk mengetahui kapasitas lentur balok tersebut.

Pencetakan benda uji balok pada penelitian ini dilakukan di PT. Wijaya Karya Beton. Untuk spesimen balok NC dan SC menggunakan propertis dan komposisi PT. Wijaya Karya sesuai dengan analisa yang ada dalam perusahaan. Sedangkan untuk balok ECC menggunakan hasil analisa propertis dan komposisi yang dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

4.1. Analisa Propertis Material Pembentuk Beton NC, SC dan ECC

Analisa material merupakan langkah awal sebelum dilakukan pembuatan benda uji. Pada tahap ini material diuji kelayakan material sesuai standar yang berlaku. Hasil analisa material untuk bahan beton NC, beton SC dan ECC adalah sebagai berikut:

4.1.1. Pasir Lumajang

Tabel 4.1. Propertis pasir Lumajang

Parameter pengujian	Hasil pengujian	Standar	Referensi
Pemeriksaan gradasi	2.77	2.10-3.37	SNI 03-2834-1993
Kadar lumpur	3.73	≤ 5%	SNI 03-4428-1997
Berat jenis	2.73	> 2.5	SNI 03-1970-1990
Penyerapan	1.28%		SNI 03-1970-1990
Berat volume	1.405		ASTM C 29-97
Kadar organik	No.1	No. 3	SNI 03-2816-1992
Kandungan batu	1.16%		
Kadar air	Terlampir		

Hasil pengujian analisa propertis pasir Lumajang menunjukkan bahwa material layak digunakan dalam penelitian ini karena hasil yang didapatkan memenuhi standar peraturan yang ada. Detail hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran 1-5.

4.1.2. Agregat kasar (kerikil) Pasuruan

Tabel 4.2. Propertis kerikil Pasuruan

Parameter pengujian	Hasil	Standar	Referensi
Pemeriksaan gradasi	6.78	6.85-7.60	SNI 03-2834-1993
Kadar lumpur	2.44	≤ 5 %	SK SNI S-04-1998-F
Berat jenis	2.68	>2.5	SNI 03-1970-1990
Penyerapan	1.08		SNI 03-1970-1990
Berat volume	1.393		ASTM C 29-97
Kepipihan	4.8%	< 20 %	
Abrasi	5.87%	< 40 %	AASHTO96-77
Kadar air asli-SSD	Terlampir		

Hasil pengujian analisa propertis kerikil Pasuruan menunjukkan bahwa material layak digunakan dalam penelitian ini karena hasil yang didapatkan memenuhi standar peraturan yang ada. Detail hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran 6-11.

4.1.3. Chemical properties Fly ash dan OPC

Tabel 4.3. Chemical propertis Fly ash dan OPC

<i>Fly ash</i>		OPC	
<i>Compound</i>	<i>Content (%)</i>	<i>Compound</i>	<i>Content (%)</i>
CaO	9.32	CaO	62.87
SiO ₂	43	SiO ₂	20.33
Al ₂ O ₃	12.8	Al ₂ O ₃	3.1
Fe ₂ O ₃	26.8	Fe ₂ O ₃	4.81
MgO	0.17	MgO	0.1
P ₂ O ₅	0.81	SO ₃	2.5
K ₂ O	2.36	K ₂ O	0.45
TiO ₂	1.47	TiO ₂	0.43
V ₂ O ₅	0.074	V ₂ O ₅	0.02
Cr ₂ O ₃	0.044	CuO	0.075
CuO	0.05	ZnO	0.027
MoO ₃	3	SrO	0.053
BaO	0.25	ZrO ₂	0.03
		BaO	0.06

Hasil pada tabel 4.3 menunjukkan kandungan *Silicon dioxide* (SiO₂), *aluminium oxide* (Al₂O₃) dan *iron oxide* (Fe₂O₃) yang apabila ditotalkan menjadi 82.6 %. Dengan demikian berdasarkan ketentuan ASTM C618-12a, *fly ash* Paiton yang digunakan termasuk kelas F.

4.1.4. Propertis mekanik dan geometric fiber PVA

Fiber merupakan material penting dalam menunjang karakteristik ECC. Dalam penelitian ini menggunakan fiber PVA RECS-15 dari Kuraray-Jepang. Karakteristik fiber PVA RECS-15 yang digunakan dapat dilihat tabel 4.4.



Gambar 4.1. Fiber PVA-RECS15

Tabel 4.4. Propertis fiber PVA RECS-15 Kuraray Jepang

Diameter (μm)	Panjang (mm)	Spesific Gravity (g/cm^3)	Tegangan tarik (MPa)	Elongation (%)	Modulus Young (GPa)
40	8.0	1.3	1600	6	41

Fiber merupakan bahan penting dalam menciptakan kuat tarik yang tinggi dari ECC. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tambusay et. al, 2015 menunjukkan fiber dengan tipe PVA RECS-15 menghasilkan kuat tarik yang tinggi dari ECC (Tambusay et. al, 2015). ECC dengan serat PVA menunjukkan performa lebih baik bila dibandingkan dengan serat *Polypropoline* (PP) dan serat bermodulus tinggi yakni serat baja (Shanour et. al, 2018). Selain itu penentuan serat PVA dalam penelitian ini karena lebih tahan terhadap korosi bila dibandingkan dengan serat baja yang merupakan logam sehingga sangat rentan terhadap korosi.

4.2. Proporsi Campuran *Normal Concrete* (NC), *Beton Supplementary Material* (SC) dan *Engineered Cementitious Composite* (ECC).

4.2.1. Proporsi Campuran *Normal Concrete* (NC), *Beton Supplementary Material* (SC)

Proporsi campuran untuk beton NC dan beton SC menggunakan proporsi yang ada pada PT. Wijaya Karya Beton, Tbk. Penentuan proporsi direncanakan berdasarkan SNI 03-2834-2000 dengan mutu beton yang ingin dicapai adalah 52 MPa seperti pada tabel 4.5 dan tabel 4.6. Berdasarkan perencanaan campuran kemudian dibuatkan rekapan komposisi campuran beton NC dan SC yang dapat dilihat pada tabel 4.7 dan tabel 4.8.

Tabel 4.5. Perencanaan campuran beton NC PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.

No.	Urain	Tabel/grafik perhitungan	Nilai
1.	Kuat tekan karakteristik	Ditetapkan	52 MPa
2.	Standard deviasi	Butir 4.3.2.1.1	6 MPa
3.	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2	$1.64 \times 6 = 9$ MPa
4.	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.2	$52 + 9 = 61$ MPa
5.	Jenis semen	Ditetapkan	OPC tipe 1
6.	Jenis admixture		
7.	Jenis agregat halus	Pasir Lumajang	
8.	Jenis agregat kasar	Kerikil Pasuruan	
9.	Faktor air semen bebas	Tabel-2, Grafik-2	0.3
10.	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0.6
11.	Slump	Ditetapkan	20-24 cm
12.	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	20 mm
13.	Kadar air bebas	Ayat 3.3.5	156 kg/m^3
14.	Kadar semen	11:8 atau 7	$156/0.298 = 525 \text{ kg/m}^3$
15.	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	325 kg/m^3
16.	Jumlah semen minimum		525 kg/m^3
17.	Faktor air semen		0.3
18.	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3-6	Daerah gradasi susunan butir zona 2

19.	Persen agregat halus		42 %
20.	Berat jenis relative agregat gabungan (kering permukaan)		2.71 t/m^3
21.	Berat jenis beton	Grafik 16	2400 kg/m^3
22.	Kadar mixture	Ditetapkan	1.1 % = 5.5 ltr/m^3
23.	Kadar agregat 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

Tabel 4.6. Perencanaan campuran beton SC PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.

No	Urain	Tabel/grafik perhitungan	Nilai
1.	Kuat tekan karakteristik	Ditetapkan	52 MPa
2.	Standard deviasi	Butir 4.3.2.1.1	6 MPa
3.	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2	1.64 x 6 = 9 MPa
4.	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.2	52 + 9 = 61 MPa
5.	Jenis semen	Ditetapkan	OPC tipe 1
6.	Jenis admixture		
7.	Jenis agregat halus	Pasir Lumajang	
8.	Jenis agregat kasar	Kerikil Pasuruan	
9.	Faktor air semen	Tabel-2, Grafik-2	0.3
10.	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0.6
11.	Slump	Ditetapkan	20-24
12.	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	20 mm
13.	Kadar air bebas	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		0.3
18.	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3-6	Daerah gradasi susunan butir zona 2
19.	Persen agregat halus		41 %

20.	Berat jenis relative agregat gabungan (kering permukaan)		2,71 t/m^3
21.	Berat jenis beton	Grafik 16	2400 kg/m^3
22.	Kadar mixture	Ditetapkan	1,1 % = 5,5 ltr/m^3
23.	Kadar agregat 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

Dosis *fly ash* (15 %) = 78.75 Kg

Jumlah semen = 446.25 Kg

Tabel 4.7. Komposisi per 1 m³ beton NC.

Material	satuan	Komposisi
OPC	kg/m^3	525
Kerikil	kg/m^3	1054
Pasir	kg/m^3	764
Air	ltr/m^3	156
Admixture	ltr/m^3	5.5
<i>Fly ash</i>	-	-
Berat beton	<i>Kg</i>	2505
slump	<i>Cm</i>	20-24

Tabel 4.8. Komposisi per 1 m³ beton SC

Material	Satuan	Komposisi
OPC	kg/m^3	446.25
Kerikil	kg/m^3	1052
Pasir	kg/m^3	731
<i>Fly ash</i>	kg/m^3	78.75
Air	ltr/m^3	156
Admixture	ltr/m^3	5.5
Berat beton	<i>Kg</i>	2505
Slump	<i>Cm</i>	20-24

4.2.2. Proporsi Campuran *Engineered Cementitious Composite* (ECC).

Penentuan proporsi campuran ECC dilakukan dengan percobaan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember berdasarkan penelitian terdahulu yang berjudul *Development of Engineered Cementitious Composite Mixtures using locally available Material in the UK* (Pourfalah & Suryanto, 2013). Terdapat 9 variasi campuran *trial* untuk spesimen *dog-bone*, dengan ratio masing-masing dapat dilihat pada tabel 4.9. Ratio proporsi digunakan adalah yang menunjukkan karakteristik terbaik dari ECC berdasarkan kuat tarik *uniaxial dog-bone* dan kuat tekan beton silinder. Rekapitulasi hasil uji kuat tekan dari ke-9 variasi dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.9. Rasio variasi trial campuran ECC

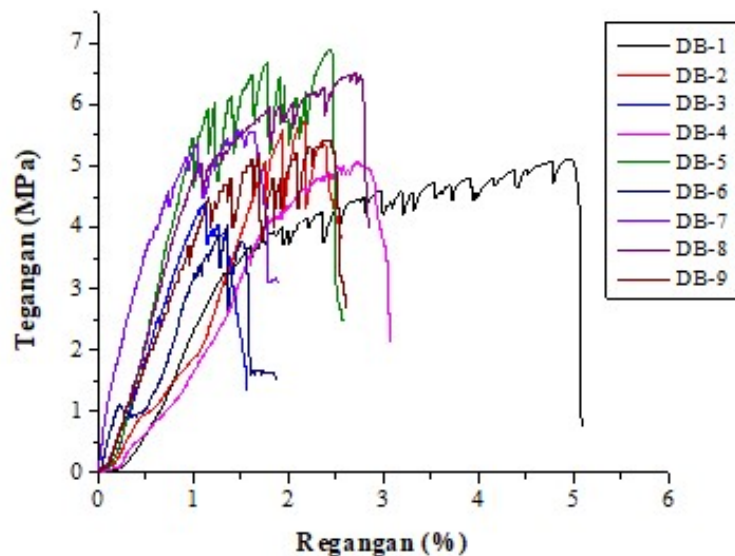
Komposisi	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fa/C	1.6	1.8	2	1.6	1.8	2	1.6	1.8	2
S/C	0.837	0.901	0.966	0.838	0.901	0.966	0.838	0.901	0.966
W/(C+Fa)	0.28	0.28	0.28	0.3	0.3	0.3	0.26	0.26	0.26
F	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %
HRWR/C	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

Catatan: Semen (C); *Fly ash* (FA); Pasir silica (S); Air (W); *High Range Water Reducer* (HRWR), *Dog-bone* (Db).

Tabel 4.10. Rekapitulasi hasil uji tekan dari 9 variasi komposisi ECC

Komposisi	Teg. ultimit (N)	Mutu, f_c (MPa)
Silinder-1	368000	46.9
Silinder-2	387000	49.3
Silinder-3	404000	51.5
Silinder-4	354000	45.1
Silinder-5	385000	49.0
Silinder-6	378000	48.2
Silinder-7	372000	47.4
Silinder-8	368000	46.9
Silinder-9	386000	49.2

Pengujian tarik ECC dilakukan untuk mengetahui kualitas tarik ECC dalam pengujian ini. Hasil pengujian tarik *dog-bone* ECC dari ke-9 variasi ditunjukkan dalam bentuk hubungan tegangan-regangan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Hubungan tegangan dan regangan uji tarik *uniaxial* spesimen *dog-bone* dari 9 variasi komposisi ECC.

Tabel 4.11. Rekapitulasi tegangan dan regangan uji tarik *uniaxial* spesimen *dog-bone* dari 9 variasi komposisi ECC.

Tipe <i>Dog-bone</i>	Retak pertama		Ultimit	
	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Tegangan (MPa)	Regangan (%)
DB-1	3.13	1.35	4.99	5.1
DB-2	3.13	1.35	5.75	2.56
DB-3	2.46	0.63	4.37	1.57
DB-4	3.57	1.62	5.02	3.09
DB-5	5.30	0.97	6.84	2.52
DB-6	2.93	0.95	4.00	1.89
DB-7	3.80	0.55	5.51	1.80
DB-8	4.95	1.09	6.35	2.82
DB-9	3.5	0.96	5.4	2.57

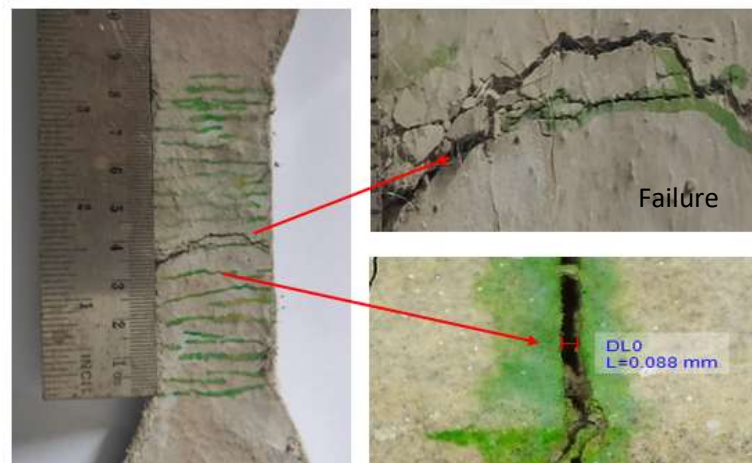
Catatan: *Dog-bone* (DB)

Hasil uji tarik *uniaxial* dari 9 tipe *dog-bone* ECC menunjukkan bahwa DB-1 menghasilkan regangan paling tinggi yakni sebesar dan 5.1 % dengan tegangan yang dihasilkan 4.99 MPa. Hasil ini menunjukkan ECC memiliki regangan 500 kali lebih besar dari beton konvensional. Sedangkan kuat tekan yang dihasilkan Silinder-1 yang juga sama-sama menggunakan komposisi-1 dapat mencapai 46.9 Mpa. Hasil yang didapatkan dari 9 variasi komposisi ECC sangat dipengaruhi oleh proporsi *fly ash*. Kandungan *fly ash* makin tinggi menghasilkan kuat tekan menjadi lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh kandungan silica dan kalsium pada *fly ash* dapat memberikan peningkatan kekuatan (Chen, 2013). Hasil kuat tekan berbanding terbalik dengan kuat tarik yang dihasilkan. Mutu kuat tekan ECC semakin tinggi menghasilkan regangan menjadi lebih kecil.

Para peneliti sebelumnya telah melakukan berbagai pengujian tarik dari ECC dengan hasil regangan yang didapatkan antara 3 % sampai 6 % (Li, 2001; Yang et. al, 2008; Huang et. al, 2014; Tambusay et. al, 2015). Penelitian ECC di Indonesia yang diperkenalkan oleh Tambusay et. al, tahun 2015 mendapatkan regangan ultimit sebesar 3.5 % dengan kandungan serat fiber 2%. Perbedaan ini jelas terjadi karena karakteristik

material yang digunakan berbeda. Faktor lainnya berupa kandungan *fly ash* dalam penelitian ini menggunakan rasio perbandingan *fly ash* terhadap semen (Fa/C) sebesar 1.6 sedangkan penelitian yang dilakukan sebelumnya menggunakan rasio (Fa/C) sebesar 1.2 (Tambusay et. al, 2015). Hasil yang didapatkan adanya peningkatan tegangan dengan kandungan *fly ash* yang lebih banyak.

Kuat tarik tinggi ECC tercipta karena pelebaran retak tertahan dengan adanya serat sehingga menghasilkan retak mikro yang tipikal dan rapat. Pola retak yang diciptakan spesimen *dog-bone* setelah pengujian tarik *uniaxial* dapat dilihat paa gambar 4.3.



Gambar 4.3. Pola retak mikro spesimen *dog-bone* ECC

Gambar di atas memperlihatkan retak mikro yang banyak dan rapat saat spesimen *dog-bone* saat diberikan beban *uniaxial*. Jarak retakan antar hampir sama yakni sebesar 4 mm dengan lebar retak yang dihasilkan mencapai 0,008 mm atau 80 μm . Hasil yang didapatkan tidak jauh berbeda yang dihasilkan oleh Li 2003 yang mendapatkan lebar retakan sebesar $< 100 \mu\text{m}$ (Li, 2003). Kegagalan ECC saat terjadi retak lebar yang menandakan hubungan antar serat telah gagal.

Hasil *trial* didapatkan komposisi-1 dengan rasio *water to binder* sebesar 0,28 menghasilkan daktilitas paling tinggi. Berdasarkan komposisi tersebut kemudian dikalkulasikan komposisi per 1 m^3 untuk pencetakan balok uji pada tabel 4.12.

Tabel 4.12. Komposisi material per 1 m^3 ECC

Material	Satuan	Komposisi
OPC (C)	kg/m^3	465
<i>Fly ash</i> (Fa)	kg/m^3	744
<i>Silica sand</i> (S)	kg/m^3	390
Air (W)	kg/m^3	338
Fiber	kg/m^3	26
HRWR	kg/m^3	3.25
Fa/C		1.6
S/C		0.837
W/(C+Fa)		0.28
HRWR/C		0.007

Catatan: HRWR (*High Range Water Reducer*)

4.3. Pengujian Kuat Tekan

Pada tahap ini sampel beton dari balok *normal concrete* (NC), beton dengan *supplementary material* (SC), dan ECC diambil untuk pengujian kuat tekan setelah melewati masa perawatan 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton untuk masing-masing balok dapat dilihat pada Tabel 4.13, 4.14, dan 4.15.

Tabel 4.13. Hasil pengujian kuat tekan NC

Benda uji	Umur beton (Hari)	Beban (N)	Luas penampang (mm^2)	Berat (kg)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
Silinder-1	28	900000	17662.5	13.580	50.90	
Silinder-2	28	890000	17662.5	13.530	50.36	
Silinder-3	28	903260	17662.5	13.440	51.14	51.424
Silinder-4	28	880000	17662.5	13.240	49.80	
Silinder-5	28	970000	17662.5	13.210	54.95	

Tabel 4.14. Hasil pengujian kuat tekan SC

Benda Uji	Umur beton (Hari)	Beban (N)	Luas penampang (mm^2)	Berat (kg)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
Silinder-1	28	940000	17662.5	13.680	53.230	
Silinder-2	28	953976	17662.5	13.480	54.011	
Silinder-3	28	965818	17662.5	13.520	54.680	55.154
Silinder-4	28	988100	17662.5	13.500	55.940	
Silinder-5	28	1022819	17662.5	13.562	57.909	

Tabel 4.15. Hasil pengujian kuat tekan ECC

Benda Uji	Umur beton (Hari)	Beban (N)	Luas penampang (mm^2)	Berat (kg)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
Silinder-1	28	89938	1962.500	0.4325	45.805	
Silinder-2	28	90906	1962.500	0.422	46.298	
Silinder-3	28	89281	1962.500	0.4195	45.471	46.235
Silinder-4	28	92875	1962.500	0.4234	47.30	
Silinder-5	28	90910	1962.500	0.4236	46.30	

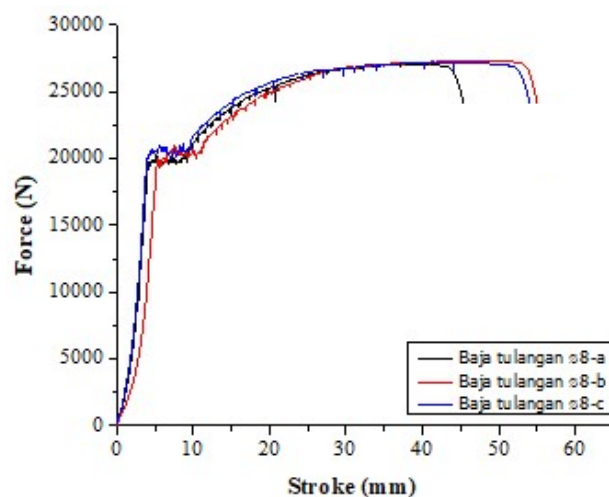
Kuat tekan beton yang didapatkan berbeda antara ke-5 benda uji karena distribusi agregat tidak selalu sama antar benda uji. Karena itu diambil 5 sampel dan rata-rata dari ke-5 sampel yang dipakai dalam analisa. Berdasarkan hasil pengujian Pada tabel 4.10, 4.11, dan 4.12 didapatkan kuat tekan rata beton NC sebesar 51.424 MPa, beton SC kuat tekan beton sebesar 55.154 Mpa, dan ECC mutu kuat tekan sebesar 46.947 Mpa. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen pada beton SC mampu menciptakan kuat tekan yang tinggi. Hal ini disebabkan ukuran butiran dari *fly ash* yang lebih kecil dari OPC sehingga pori pada beton menjadi lebih kecil dan manghasikan penambahan kekuatan pada beton (Leung, 2016). Selain itu faktor silica

dan kalsium pada *fly ash* menghasilkan kalsium silikat C-S-H yang memberikan peningkatan kekuatan pada beton (Chen, 2013).

Ada perbedaan mutu yang cukup signifikan antara ECC dengan beton NC dan SC. Hal ini disebabkan mutu beton ECC perlu dijaga antara 45 Mpa-50 MPa karena hasil *trial* yang dilakukan dengan rasio *water to binder* (W/B) 0.26, 0.28 dan 0.3 menunjukkan semakin tinggi mutu ECC perilaku ECC menjadi getas dan daktilitas menurun. Oleh sebab itu komposisi dengan rasio (W/B) 0.28 dengan kuat tekan yang dihasilkan sebesar 46.235 MPa dirasa paling efektif untuk menciptakan daktilitas pada ECC. Hasil ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tambusay tahun 2015 yang mendapatkan mutu tekan ECC sebesar 48.70 Mpa (Tambusay et. al, 2015).

4.4. Pegujian Kuat Tarik Tulangan Baja

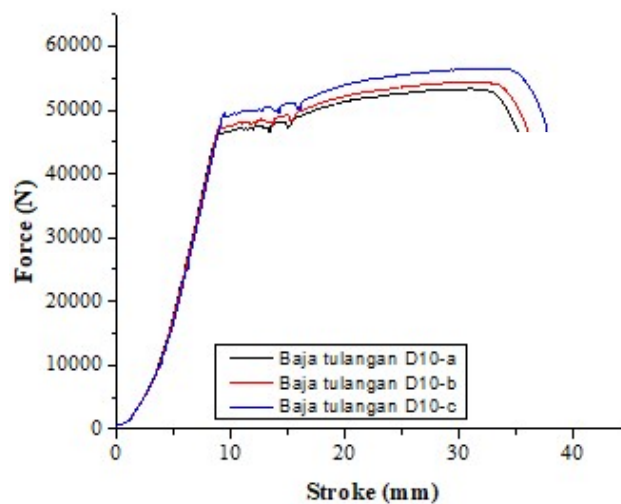
Pengujian kuat tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui kuat tarik tulangan yang akan digunakan pada benda uji balok. Metode pengujian mengacu SNI 07-2529-1991 untuk baja tulangan beton. Sampel pengujian kuat tarik tulangan baja sebanyak 3 buah untuk masing-masing diameter tulangan Ø8 dan D10 yang digunakan. Nilai mutu yang dipakai adalah rata-rata dari ke-3 sampel seperti yang ada pada tabel 4.16 dan 4.17.



Gambar 4.4. Grafik uji tarik baja tulangan besi Ø8

Tabel 4.16. Uji tarik baja tulangan Ø8

Diameter	Tegangan leleh, f_y (MPa)	Tegangan ultimit, f_u (MPa)	Max. strain (%)	Elongation (%)
Ø8-a	393.659	537.210	37.234	30.964
Ø8-b	398.218	543.924	46.758	39.37
Ø8-c	399.566	540.816	44.332	38.356
Rata-rata	397.146	540.650		

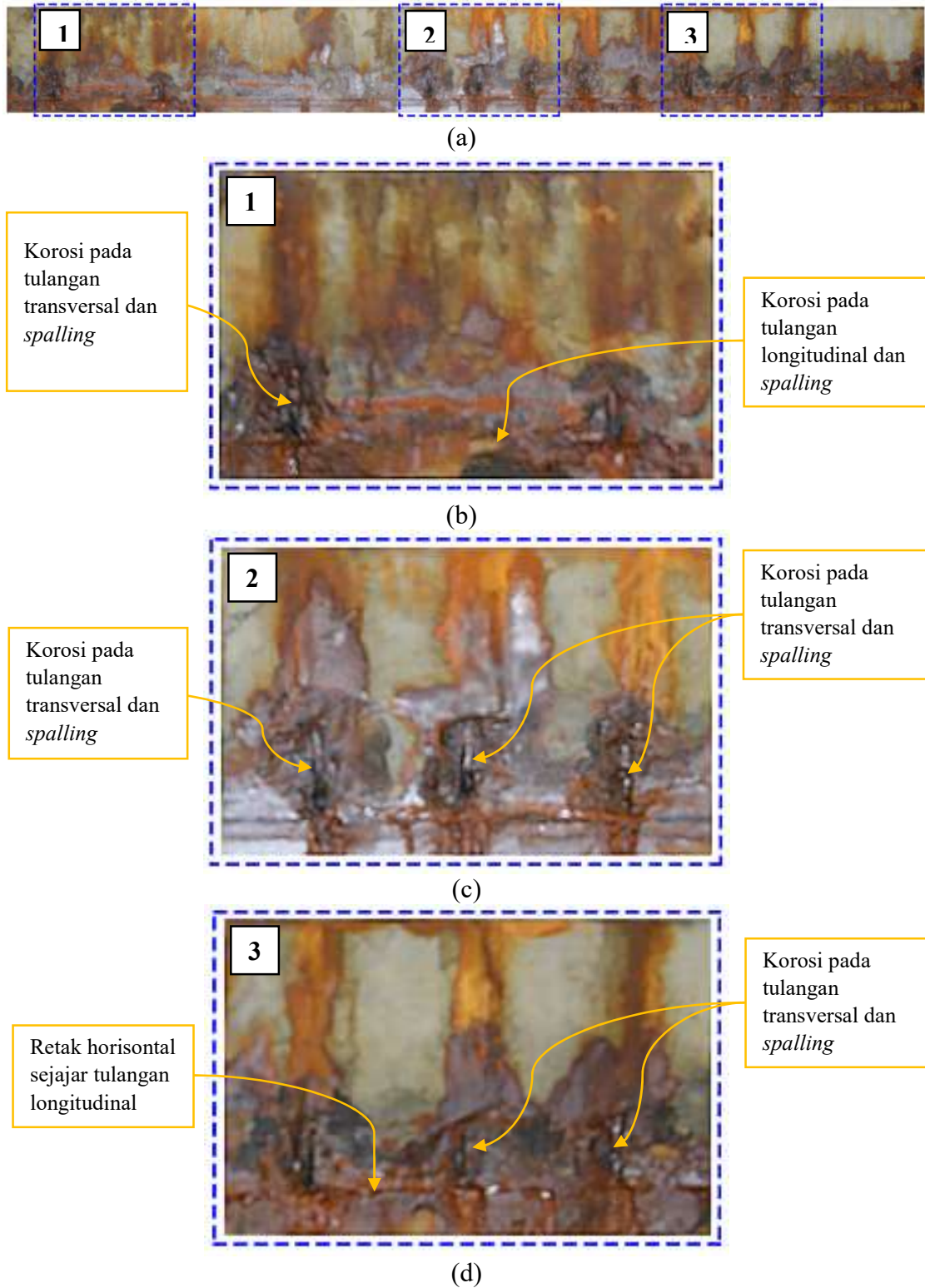
**Gambar 4.5** Grafik uji tarik baja tulangan besi D10**Tabel 4.17.** Uji tarik baja tulangan D10

Diameter	Tegangan leleh, f_y (MPa)	Tegangan ultimit, f_u (MPa)	Max. strain (%)	Elongation (%)
D10-a	588.87	679.458	15.412	4.401
D10-b	600.65	693.048	15.720	4.475
D10-c	623.87	720.769	16.349	4.493
Rata-rata	604.463	679.757		

Berdasarkan hasil pengujian tarik tulangan, nilai kuat tarik leleh (f_y) dan kuat tarik ultimit (f_u) setiap tulangan tidak jauh berbeda. Karena itu diambil nilai rata-rata sebagai nilai yang akan dipakai untuk analisa. Didapatkan rata-rata f_y untuk besi Ø8 adalah 397.146 MPa, dan besi D10 sebesar 604.463 MPa. Sedangkan f_u untuk tulangan Ø8 adalah 540.650 MPa dan D10 adalah 679.757 MPa.

4.5. Pengujian Percepatan Korosi

Berdasarkan komposisi beton NC, SC dan ECC kemudian dilakukan pencetakan benda uji balok tipe-A dan tipe-B. Balok dengan tipe-B dilakukan percepatan korosi pada penelitian ini. Terdapat 3 balok tipe-B yang akan dilakukan pengujian percepatan korosi yakni balok B1 dengan material penyusunnya adalah beton NC, balok B2 dengan material penyusunnya adalah beton SC, dan balok B3 dengan material penyusunnya adalah ECC. Pengujian dilakukan selama 31 hari dengan menggunakan kuat arus sebesar 0.8 ampere sesuai perhitungan kebutuhan arus aktual menggunakan persamaan 2.6. Pengujian ini dilakukan untuk melihat tingkat kerusakan yang ditimbulkan masing-masing balok. Hasil pengujian percepatan korosi untuk balok B1, B2, dan B3 dapat dilihat pada gambar 4.6, 4.7, dan 4.8.



Gambar 4.6. Pola korosi: (a) Balok B1, (b) Detail-1, (c) Detail-2, (d) Detail-3.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.7. Pola korosi: (a) Balok B2, (b) Detail-1, (c) Detail-2, (d) Detail-3.



(a)



(b)

Gambar 4.8. Pola korosi: (a) Balok B3, (b) Detail

Gambar di atas menunjukkan tingkat kerusakan akibat korosi paling parah terjadi pada balok B1 dan balok B2. Korosi yang terjadi mengakibatkan balok B1 dan balok B2 menciptakan retak horizontal pada beton yang memiliki pola sejajar dengan tulangan longitudinal hingga mengalami *spalling*. Hal ini terjadi karena induksi arus listrik pada baja tulangan mengakibatkan korosi terjadi lebih cepat dan menghasilkan produk korosi menimbulkan tegangan di dalam beton sehingga terjadi retak pada permukaan beton hingga *spalling* (Li, 2003; Maalej et. al, 2003). Hasil berbeda diperlihatkan balok B3. Terjadi retak minor pada permukaan balok B3 dan tidak sampai mengakibatkan *spalling* (Maalej et. al, 2003). Balok B3 mengandung fiber 2% sehingga retak pada permukaan ECC tidak sebesar pada permukaan beton. Hal ini dikarenakan fiber mampu mengontrol retak dan meningkatkan pengekanan pada ECC disekitar tulangan baja sehingga tidak adanya *spalling* (Li, 2003; Li, 2004; Sahmaran et. al, 2008). Tingkat kerusakan korosi yang diperlihatkan masing-masing balok menunjukkan B3 dengan ECC sebagai material penyusun utama lebih tahan terhadap retak akibat korosi (Liu et. al, 2017).

Salah satu indikator untuk menunjukkan ketahanan material beton bertulang terhadap induksi krosi akibat penetrasi klorida adalah nilai *corrosion rate*. Nilai *corrosion rate* dapat dicari berdasarkan kehilangan massa tulangan dalam beton yang diakibatkan oleh korosi. Pengukuran kehilangan massa tulangan dilakukan dengan cara mengeluarkan tulangan dari badan beton dan dilakukan pembersihan pada bagian tulangan yang terkorosi dengan menggunakan larutan pembersih karat dan sikat besi. Setelah proses pembersihan selesai, dilakukan penimbangan terhadap baja tulangan tersebut. Selisih nilai berat tulangan baja yang sudah dibersihkan dari produk korosi dan berat tulangan baja awal merupakan kehilangan berat aktual. Berdasarkan kehilangan berat tulangan aktual juga dapat dihitung laju korosi (*corrosion rate*) dengan persamaan (2.10). Berikut diberikan perhitungan persentasi kehilangan tulangan dan laju korosi salah satu contoh balok B1, yakni sebagai berikut:

Diketahui:

Berat tulangan awal (W_0)	= 4211 gr
Berat tulangan terkorosi (W_1)	= 316.02 gr
Konstanta (K)	= 8.76×10^4 (nilai K berdasarkan tabel 2.1)
Luas tulangan Ø8 (cm^2)	= $78.5 mm^2$
Waktu korosi (T)	= 31 hari
Massa jenis benda (D)	= $7.85 gr/cm^3$

Perhitungan:

Perhitungan persentasi kehilangan aktual (ρ):

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \\ &= \frac{4211 - 316.02}{4211} \times 100 \\ &= 7.50 \% \end{aligned}$$

Perhitungan laju korosi (CR)

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

$$= \frac{8,76 \times 10^4 \times 316,02}{78.5 \times 31 \times 7.85}$$

$$= 60,382 \text{ mm/y}$$

Tabel 4.18. Rekapitulasi hasil percepatan korosi *galvanostatik*.

Baja tulangan	Tipe balok	Berat awal tulangan (gr)	Berat kehilangan tulangan (gr)	Persentase kehilangan tulangan (%)	<i>Corossion rate</i> (mm/y)
Transversal (Ø8)	B1-NC	4211.00	316.02	7.50	62.395
	B2-SC	4062.40	248.42	6.12	49.048
	B3-ECC	4380.60	167.70	3.83	33.110
Longitudinal (D10)	B1-NC	6074.25	192.99	3.18	38.104
	B2-SC	6119.80	175.2	2.88	34.591
	B3-ECC	6039.00	98.60	1.63	19.467

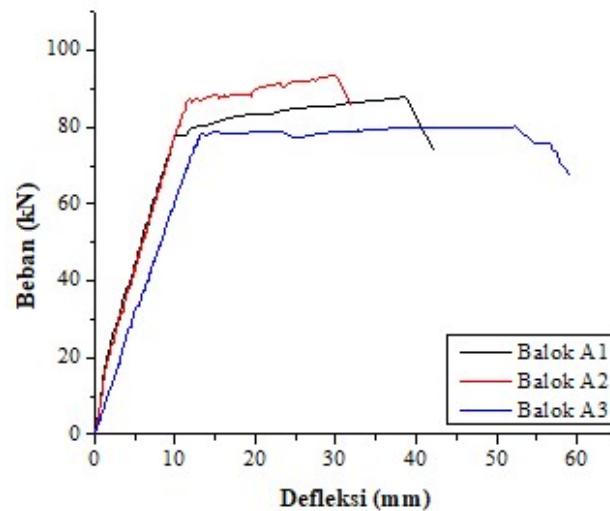
Korosi pada balok B1, B2, dan B3 mengakibatkan kehilangan baja tulangan pada masing-masing balok. Kehilangan massa baja paling besar terdapat pada balok B1, dengan rincian pada tulangan transversal sebesar 316.02 gram dan tulangan longitudinal sebesar 192.99 gram. Nilai *corrosion rate* pada balok B1 adalah sebesar 62.395 mm/y pada tulangan transversal dan 38.104 mm/y pada tulangan longitudinal. Kehilangan massa baja pada balok B2 dengan rincian, pada tulangan transversal sebesar 248.42 gram dan tulangan longitudinal sebesar 175.2 gram. Nilai *corrosion rate* pada balok B2 adalah 49.048 mm/y pada tulangan transversal dan 34.591 mm/y pada tulangan longitudinal. Kehilangan massa baja pada balok B3 dengan rincian, pada tulangan transversal sebesar 167.70 gram dan tulangan longitudinal sebesar 98.60 gram. Nilai *corrosion rate* balok B3 adalah 33.11 mm/y pada tulangan transversal dan 19.467 mm/y pada tulangan longitudinal.

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa balok B3 dengan material penyusun utamanya adalah ECC memiliki nilai *corrosion rate* paling kecil yang berarti lebih tahan terhadap korosi (Liu et. al, 2017).

4.6. Pengujian Lentur Balok

4.6.1. Balok kontrol

Balok tipe-A merupakan balok kontrol pada penelitian ini. Terdapat 3 balok tipe-A yakni balok A1 dengan material penyusunnya beton NC, balok B2 dengan material penyusunnya beton SC, dan balok B3 dengan material penyusunnya adalah ECC. Ketiga balok dilakukan pengujian lentur dengan metode *four point bending* untuk mengetahui perilaku lentur masing-masing balok. Hasil pengujian balok A1, A2 dan A3 berupa hubungan beban dan defleksi dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9. Grafik hubungan beban (P) - defleksi (δ) balok kontrol A1, A2, dan A3

Tabel 4.19. Rekapitulasi P dan δ balok A1, A2, dan A3.

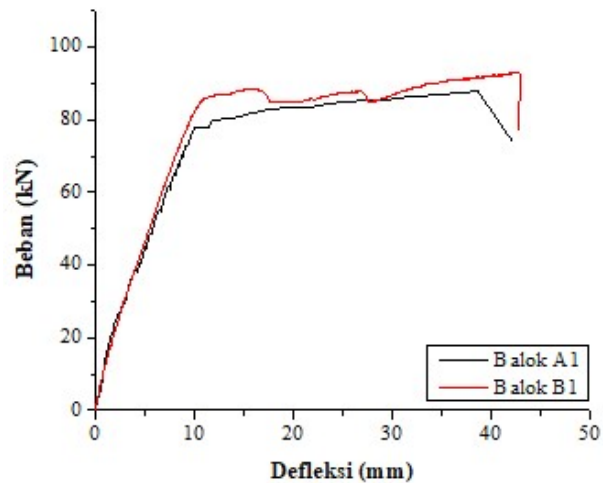
Tipe balok	Kondisi leleh		Kondisi ultimit		Daktilitas $\delta_{ultimit} / \delta_{leleh}$
	P (kN)	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	
A1	77.169	10.040	87.814	45.560	4.50
A2	77.984	11.520	93.410	34.00	2.95
A3	75.940	12.700	80.010	58.870	4.64

Balok A1 dan A2 menunjukkan kesamaan respon saat beban awal diberikan sampai pada tulangan baja leleh. Namun perbedaan terjadi saat kondisi leleh. Hal ini terjadi karena kuat tekan beton balok A2 yang lebih tinggi dari balok A1 sehingga kapasitas beban saat leleh balok A2 lebih tinggi yakni sebesar 77.984 kN, sedangkan balok A1-NC leleh saat beban sebesar 77.169 kN. Berbeda dengan kedua balok lainnya, balok A3 menghasilkan respon lebih landai. Hal ini disebabkan kekakuan balok A3 tanpa agregat kasar lebih kecil. Selain itu mutu tekan ECC yang lebih kecil menghasilkan beban saat leleh lebih kecil yakni sebesar 75.94 kN. Respon kedua terjadi setelah tulangan baja leleh dan berakhir saat terjadi kondisi ultimit. Pada fase ini beban ultimit yang terjadi pada balok A1, A2, dan A3 masing-masing 87.814 kN, 93.41 kN dan 80.01 kN, dengan defleksi ultimit untuk masing-masing sebesar 38.7 mm, 30.04 mm, dan 51.87 mm. Perbedaan mutu kuat tekan beton setiap balok juga berpengaruh pada perbedaan ini. Mutu kuat tekan beton yang lebih tinggi dari balok menghasilkan defleksi yang lebih rendah pada balok. Pada fase ini balok A3 menunjukkan defleksi paling tinggi dibandingkan kedua tipe balok lain. Hasil yang didapatkan dari performa lentur yang diperlihatkan masing-masing balok menunjukkan balok A3 memiliki daktilitas paling tinggi yakni 4.64, diikuti oleh balok A1 dengan daktilitas sebesar 4.50 dan yang terakhir balok A2 dengan nilai daktilitas terendah yakni sebesar 2.95. Perbedaan yang cukup signifikan terjadi pada balok A3, hal ini disebabkan ECC sebagai material penyusun utamanya memiliki kuat tarik yang jauh lebih tinggi daripada beton.

4.6.2. Balok terkorosi dengan lapisan ECC.

- a. Perbandingan balok B1 terkosori dengan lapisan ECC terhadap balok kontrol A1

Balok B1 merupakan balok terkorosi yang menggunakan material beton NC dan dilakukan *repair* menggunakan lapisan ECC. Sedangkan balok A1 merupakan balok kontrol tanpa korosi yang juga menggunakan beton NC. Perbandingan kedua tipe balok berupa hubungan beban dan defleksi dapat dilihat pada gambar grafik 4.10.



Gambar 4.10. Grafik hubungan beban (P) - defleksi (δ) balok A1 dan B1

Tabel 4.20. Repitulasi P dan δ balok A1 dan balok B1

Tipe balok	Kondisi leleh		Kondisi ultimit		Daktilitas
	P	δ	P	δ	$\delta_{ultimit} / \delta_{leleh}$
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	
A1	78.083	10.320	87.814	42.780	4.15
B1	82.660	10.120	92.740	42.980	4.25

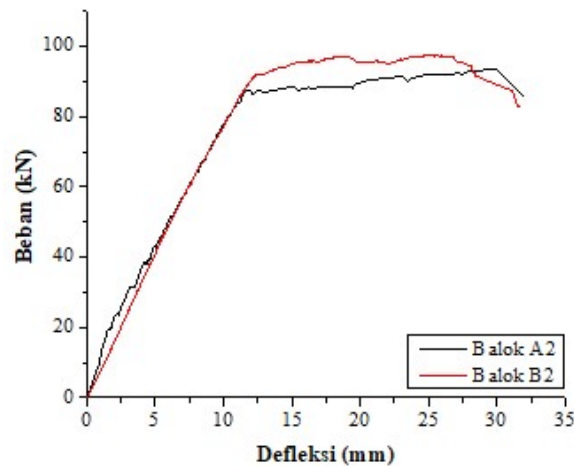
Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan menggunakan ECC sebagai bahan *repair* dapat membuat balok B1 yang telah terkorosi memiliki daktilitas mirip kondisi balok A1 tanpa korosi. Hal ini dapat terjadi karena selain peranan tulangan baja dalam menciptakan defleksi, lapisan ECC pada daerah tarik balok dengan kandungan serat secara efektif mampu menahan mekanisme transfer beban dengan menciptakan retak mikro yang banyak dan rapat (Maalej, 1995; Shanour et. al, 2018).

Selain menghasilkan performa lentur dan daktilitas yang mirip kondisi awal penggunaan ECC juga menghasilkan peningkatan kapasitas beban yang dapat diterima balok. Pada tabel 4.17, dapat dilihat bahwa beban ultimit balok A1 dan B1 masing-masing sebesar 92.74 kN dan 87.814 kN, yang artinya ada

peningkatan sebesar 5.31 %. Hal ini disebabkan ECC dapat menahan beban tarik setelah retak sehingga terjadi peningkatan beban (Shanour et. al, 2018). Hasil ini tidak jauh berbeda dengan penelitian yang dilakukan Maalej et. al, 2003 mengenai balok terkorosi dengan lapisan ECC dapat meningkatkan kapasitas beban (Maalej, 2003).

- b. Perbandingan balok B2 terkorosi dengan lapisan ECC terhadap balok kontrol A2

Balok B2 merupakan balok terkorosi yang menggunakan material beton SC dan dilakukan *repair* menggunakan lapisan ECC. Sedangkan balok A2 merupakan balok kontrol tanpa korosi yang juga menggunakan beton SC. Perbandingan kedua tipe balok berupa hubungan beban dan defleksi dapat dilihat pada gambar grafik 4.11.



Gambar 4.11. Grafik hubungan beban (P) - defleksi (δ) balok A2 dan B2

Tabel 4.21. Repitulasi P dan δ balok A2 dan B2

Tipe balok	Kondisi leleh		Kondisi Ultimit		Daktilitas
	P (kN)	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	$\delta_{ultimit} / \delta_{leleh}$
A2	77.984	11.520	93.410	34.000	2.95
B2	91.390	12.200	96.770	32.060	2.63

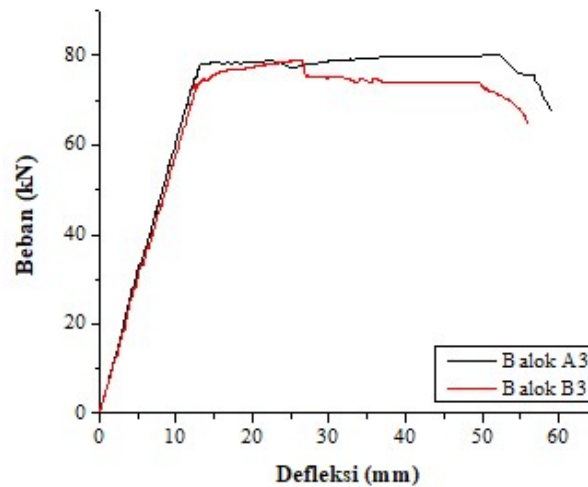
Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan menggunakan ECC sebagai bahan *repair* dapat membuat balok B2 yang telah terkorosi memiliki daktilitas mirip kondisi awal sebelum terkorosi. Hal ini dapat terjadi karena selain peranan tulangan baja dalam menciptakan defleksi, lapisan ECC pada daerah tarik balok dengan kandungan serat secara efektif mampu menahan mekanisme transfer beban dengan menciptakan retak mikro yang banyak dan rapat (Maalej, 1995; Shanour et. al, 2018).

Selain menghasilkan performa lentur yang mirip kondisi awal penggunaan ECC juga menghasilkan peningkatan kapasitas beban yang dapat diterima balok. Pada tabel 4.17 dapat dilihat bahwa beban ultimit balok B1 dan B2 masing-masing sebesar 93.410 kN dan 96.77 kN, yang artinya ada peningkatan sebesar 5.59 %. Hal ini disebabkan ECC dapat menahan beban tarik setelah retak sehingga terjadi peningkatan beban (Shanour et. al, 2018). Hasil ini tidak jauh berbeda dengan penelitian yang dilakukan Maalej et al, 2003 yakni balok terkorosi dengan lapisan ECC dapat meningkatkan kapasitas beban dan defleksi balok (Maalej, 2003). Hasil lain juga dibuktikan secara numerikal yang yakni terjadi peningkatan beban dan defleksi saat diberikan lapisan ECC pada daerah tarik balok (Shanour et. al, 2018).

Terdapat sedikit perbedaan peningkatan beban pada balok B1 dan B2. Pada balok B2 mengalami peningkatan beban lebih tinggi dari balok B1. Hal ini disebabkan karena tingkat kerusakan dan kehilangan baja pada balok B2 yang lebih kecil dari balok B1.

4.6.3. Perbandingan balok pembanding B3 terhadap balok kontrol A3.

Balok B3 merupakan balok terkorosi yang menggunakan material ECC. Sedangkan balok A3 merupakan balok kontrol tanpa korosi yang juga menggunakan material ECC. Perbandingan kedua tipe balok berupa hubungan beban dan defleksi dapat dilihat pada gambar grafik 4.12.



Gambar 4.12. Grafik hubungan beban (P) - defleksi (δ) balok A3 dan balok B3

Tabel 4.22. Repitulasi P dan δ balok A3 dan B3

Tipe balok	Kondisi leleh		Kondisi ultimit		Daktilitas
	P	δ	P	δ	$\delta_{ultimit} / \delta_{leleh}$
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	
A3	75.940	12.700	80.010	58.870	4.64
B3	74.72	13.566	77.740	55.94	4.12

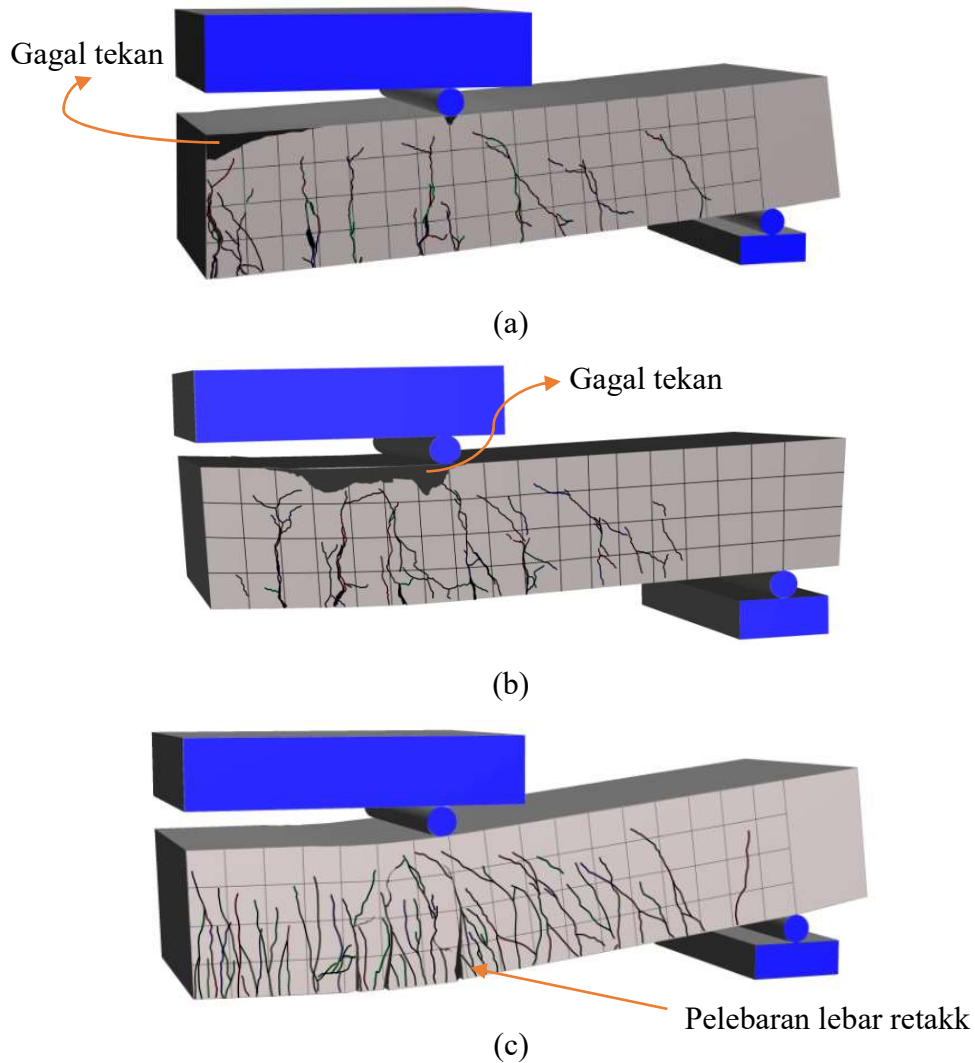
Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa korosi pada balok A3 menghasilkan terjadi sedikit penurunan daktilitas pada balok. Hal ini terjadi karena korosi pada balok A3 yang material penyusunnya adalah ECC mengalami berkurangnya jumlah retak pada ECC (Liu et. al, 20017). Selain itu terjadi penurunan kapasitas beban yang disebabkan oleh berkurangnya kekuatan ECC akibat korosi.

4.7. Pola Retak dan Kegagalan Balok

4.7.1. Balok kontrol

Pola retak dan kegagalan kontrol balok A1, A2, dan A3 tentunya berbeda karena terbentuk oleh material yang berbeda. Perbandingan pola rotak masing-masing

balok kontrol dibuatkan dalam sketsa pola retak seperti pada gambar 4.13. Sedangkan bentuk kondisi balok sebenarnya dapat dilihat pada lampiran 15.



Gambar 4.13. Pola retak dan kegagalan balok kontrol (a) Balok A1, (b) Balok A2, dan (c) Balok A3.

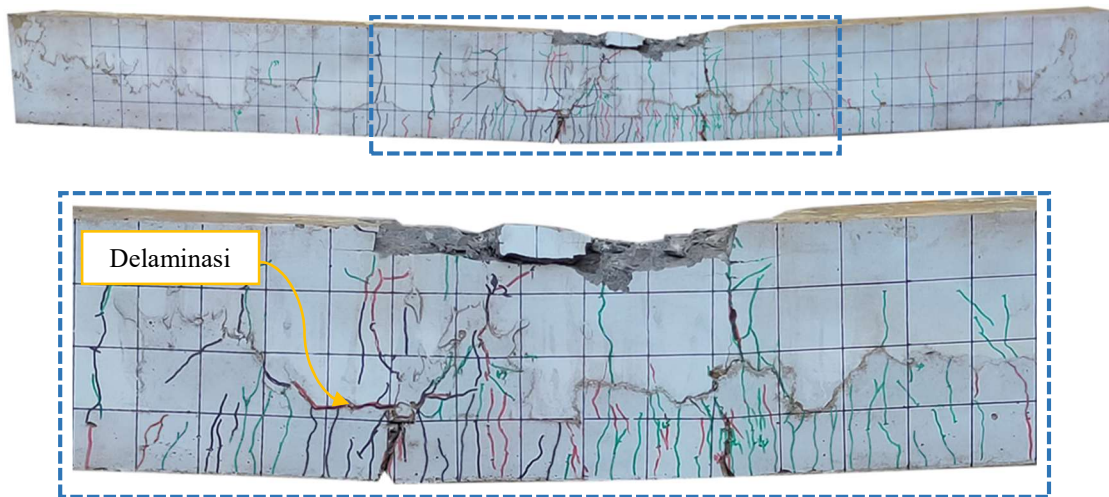
Jumlah retakan yang ditunjukkan balok A1 dan balok A2 menghasilkan 7 retakan vertikal mengarah pada pusat pembebanan. Namun pola retak yang diperlihatkan masing-masing berbeda. Balok A2 menunjukkan retak mendasar yang menunjukkan bahwa beton SC lebih getas. Hal ini disebabkan mutu kuat tekan beton SC yang

digunakan pada balok A2 lebih tinggi dari beton NC yang digunakan balok A1. Selain itu, dapat dilihat juga bahwa kegagalan atau keruntuhan yang ditunjukkan balok A1 dan A2 saat terjadi gagal tekan.

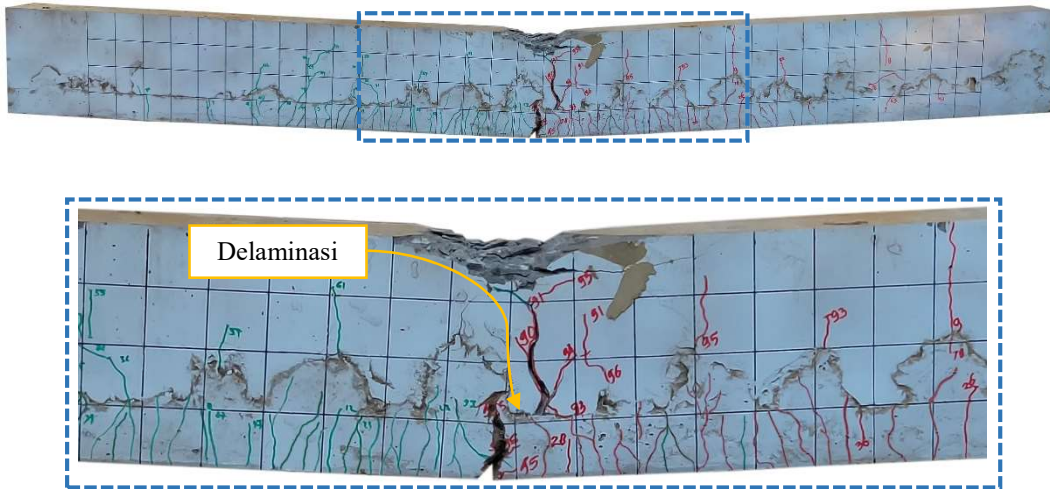
Balok A3 menunjukkan pola retak yang banyak dan rapat. Hasil ini menunjukkan karakteristik unik dari ECC yang ada pada balok A3 yakni menciptakan retakan mikro yang banyak dengan lebar tipikal (Huang et. al, 2014). Retak mikro yang banyak dan rapat mengakibatkan balok A3 tetap mempertahankan kegagalan lentur tanpa mengalami gagal tekan. Kondisi kegagalan pada balok A3 ditandai saat hubungan antar serat telah gagal sehingga terjadi pelebaran retak mengarah pada pusat pembebanan.

4.7.2. Pola retak balok terkorosi dengan lapisan ECC

Balok terkorosi B1 dan B2 dengan lapisan ECC dilakukan analisa pola retak dan keruntuhan setelah dilakukan uji lentur *four point bending*. Pola kerusakan dan keruntuhan balok dapat dilihat pada gambar gambar 4.14 dan 4.15.



Gambar 4.14. Pola retak dan kegagalan balok B1 terkorosi dengan lapisan ECC



Gambar 4.15. Pola retak dan kegagalan balok B2 terkorosi dengan lapisan ECC

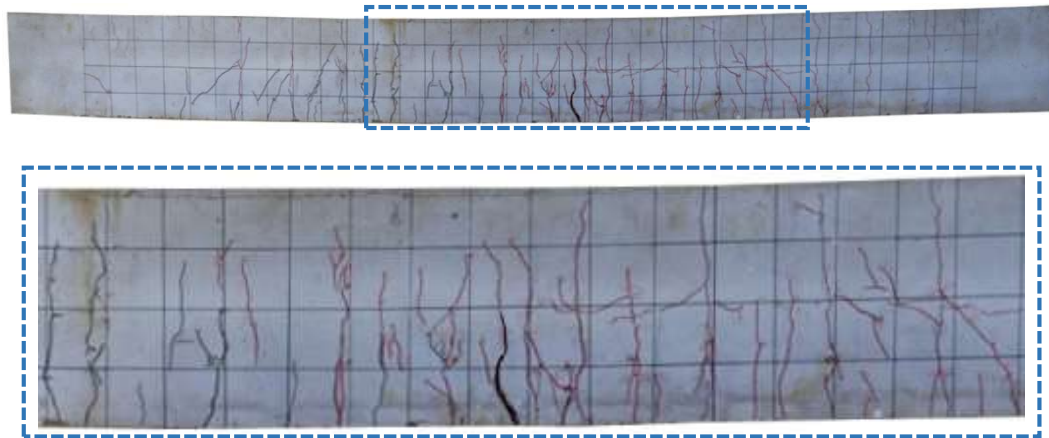
Balok B1 dan B2 terkorosi dengan lapisan ECC terjadi pola retakan yang hampir sama. Retak awal dimulai pada daerah lapisan ECC pada daerah tarik balok. Dapat dilihat bahwa lapisan ECC pada daerah tarik balok bekerja efektif dalam menerima tarikan yang terjadi pada balok dengan menciptakan retak mikro yang banyak. Lapisan ECC pada balok B1 dan B2 akan gagal setelah terjadi pelebaran retakan sebagai bentuk telah terjadi kegagalan pada hubungan antar serat. Kegagalan pada lapisan ECC mengakibatkan retak vertikal pada beton lama yang mengarah pada daerah tekan balok dan pada akhirnya balok akan runtuh setelah terjadi gagal tekan.

Delaminasi menjadi perhatian khusus saat melakukan teknik perbaikan dengan lapisan beton baru. Ini menjadi penting, karena beton lama memiliki susut lebih kecil dibandingkan dengan lapisan beton segar sebagai bahan *repair*. Hal ini berdampak pada deformasi susut lapisan ECC tertahan oleh beton lama dan akan berimbas pada retakan dan delaminasi. Peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa susut dapat dihindari dengan lapisan ECC. Kapasitas regangan tarik yang tinggi dari ECC dapat mengurangi tegangan geser pada permukaan sambungan beton lama dengan lapisan ECC sehingga dapat meminimalisir retak dan delaminasi pada sambungan beton (Li, 2004). Dapat dilihat juga bahwa terdapat sedikit delaminasi sambungan di daerah momen terbesar beton lama dengan lapisan ECC. Ini mungkin terjadi sebab lapisan ECC mengalami

kegagalan pada hubungan antar serat sehingga terjadi pelebaran retak dan beton lama telah mengalami retakan vetikal ke arah daerah tekan. Hal ini dibuktikan dengan hasil uji lentur yang menunjukkan balok dapat menciptakan beban dan defleksi yang tinggi. Hasil ini menunjukkan daya lekat lapisan ECC dengan lapisan beton lama sangat baik sehingga tidak adanya slip antara beton normal dengan lapisan ECC (Zheng et. al, 2016).

4.7.3. Pola retak dan kegagalan balok pembanding.

Balok pembanding B3 merupakan balok terkorosi dengan material pembentuknya adalah ECC. Pola retak dan kegagalan balok B3 dapat dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.16. Pola retak dan kegagalan balok B3.

Balok B3 terkorosi dengan menggunakan material ECC masih tetap menunjukkan pola retak mikro yang banyak dan rapat. Apabila dibandingkan dengan balok kontrol A1 nampak bahwa terjadi sedikit pengurangan jumlah retakan pada balok B3. Hasil peneliti sebelumnya juga menunjukkan korosi pada ECC mengakibatkan kurangnya jumlah retak (Liu et. al, 2017). Hal ini menjadi sebab berkurangnya performa lentur pada balok B3, karena daktilitas ECC yang tinggi dipengaruhi oleh retak mikro yang banyak dan rapat.

Kegagalan balok B3 terjadi saat terjadi pelebaran retak yang menandakan telah terjadi kegagalan pada hubungan antar serat. Dapat dilihat juga bahwa, kegagalan balok B3 tetap mengalami kegagalan lentur. Hal ini menunjukkan balok B3 terkorosi pada penelitian ini masih mampu menunjukkan perilaku lentur yang baik.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa:

1. Balok *Normal Concrete* (NC) mengalami tingkatan kerusakan akibat korosi paling parah diikuti oleh balok *Supplementary Concrete* (SC) dan balok *Engineered Cementitious Composite* (ECC). Korosi pada balok NC dan SC mengakibatkan kerusakan berupa retak horisontal sejajar tulangan longitudinal hingga *spalling*. Kerusakan pada balok NC dan SC mengakibatkan kehilangan massa tulangan baja transversal untuk masing-masing 7.50 % dan 6.12 % dan pada tulangan longitudinal untuk masing-masing sebesar 3.18 % dan 2.88 %. Berbeda dengan kedua balok lainnya, balok ECC mengalami tingkatan kerusakan paling minim dengan menunjukkan tidak adanya *spalling*. Serat pada ECC mampu mengekang pelebaran retak sehingga korosi pada balok ECC menghasilkan kehilangan massa baja lebih kecil, yakni pada tulangan transversal sebesar 3.83 % dan pada tulangan longitudinal sebesar 1.63 %.
2. Perilaku lentur balok NC dan balok SC terkorosi dengan lapisan ECC menyerupai balok kontrol NC dan balok SC tanpa korosi. Hasil ini menunjukkan bahwa lapisan ECC sebagai bahan *repairing* balok NC dan SC terkorosi pada daerah tarik balok secara efektif dapat memperbaiki perilaku lentur balok tersebut, yang ditunjukkan dengan kapasitas beban dan defleksi yang dihasilkan mirip dengan balok NC dan balok SC tanpa korosi.
3. Balok terkorosi NC dan SC dengan menggunakan lapisan ECC menghasilkan retak mikro yang banyak dan rapat pada daerah tarik balok. Proses kegagalan lapisan ECC akan terjadi saat terjadi pelebaran retak, apabila diberikan peningkatan beban. Setelah itu, apabila beban ditingkatkan lagi maka akan terjadi retakan tunggal pada beton lama NC dan SC yang mengarah pada pusat

pembebanan, dan runtuh setelah balok mengalami gagal tekan. Berdasarkan hasil yang didapatkan bahwa delaminasi antara beton lama dan lapisan ECC tidak berpengaruh dalam penurunan kinerja perilaku lentur balok. Hasil ini menunjukkan bahwa daya lekat antara material ECC dengan beton lama NC dan SC sangat baik.

5.2. Saran

Konstruksi bangunan pantai perlu mendapat perhatian khusus dalam desain, pelaksanaan dan pengawasan karena sangat rentan terhadap korosi. Kerusakan akibat korosi dapat mengurangi kinerja struktur secara keseluruhan dan upaya perbaikan dirasa terlalu mahal apabila harus mengganti secara keseluruhan. Berdasarkan hasil eksperimen pada penelitian ini, dapat diberi masukan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan perilaku ECC mampu memperbaiki kinerja balok terkorosi sehingga metode perbaikan dengan lapisan ECC dapat dijadikan usulan sebagai bahan *repairing*.
2. Penggunaan lapisan ECC secara efektif dapat memperbaiki perilaku lentur balok terkorosi namun perlu adanya penelitian lanjutan mengenai balok terkorosi yang di-*repair* ECC dan dilakukan korosi lagi pada balok yang di-*repair* tersebut sebelum dilakukan pengujian lentur balok. Pengujian demikian dilakukan agar dapat dilihat sejauh mana kekuatan daya lekat balok yang di-*repair* ECC.
3. Lama percepatan korosi yang direncanakan dalam penelitian ini adalah 1 bulan, namun disarankan adanya penelitian lanjutan dengan jangka waktu yang lebih panjang sehingga ada trend pola kerusakan akibat korosi dan pola perubahan perilaku lentur balok yang di-*repair* lapisan ECC.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C618-12a (2014). “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, (C).
- ASTM C29/C 29M-97 (2003). “Standard Test Method for Bulk Density (“Unit weight”) and Voids in Aggregate”, (C).
- ASTM C 307-03 (2012). “Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing”, (C).
- ASTM C33-03 (1997). “Standard Specification for Concrete Aggregates”, (C).
- ASTM C307-03 (2012). “Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing”. *ASTM Internasional*, (C).
- ASTM C39/C39M-99. “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, (C).
- ASTM C109/C109M-01. “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”, (C).
- SNI 07-2529 (1991). “Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton”. Standar Nasional Indonesia.
- SNI 07-2529 (1991). “Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton”. Standar Nasional Indonesia.
- SNI 03-1970 (1990). “Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Standar Nasional Indonesia.
- SNI 03-2834 (2000). “Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal”. Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- SNI 4431 (2011). “Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan”. Standar Nasional Indonesia, Indonesia.
- Capozucca, R. (1995), “Damage to Reinforced Concrete due to Reinforcement Corrosion”, *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 5, hal. 295–303.

- Chen, X., Wu, S., and Zhou, J. (2013), "Influence of Porosity on Compressive and Tensile Strength of Cement Mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 869-874.
- Fukuyama, H., Sato, Y., Li, V. C., and Matsuzaki, Y., Mihashi, H. (2001), "Ductile Engineered Cementitious Composite Elements for Seismic Structural Application", 1–8.
- Huang, T and Zhang, Y. X. (2014), "Simulation of Material Behaviour of Engineered Cementitious Composites under Uniaxial Tension (Woodhead Publishing Limited)", p 539-43.
- JSCE (2008), Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan Society of Civil Engineers.
- Khan, M. I., Abbass, W. (2016), "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams Reinforced With a Strain Hardening Cement-Based Composite Layer", *Construction and Building Materials* 125 927-935.
- Lepech, M. D., & Li, V. C. (2009), "Water Permeability of Engineered Cementitious Composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 10, hal. 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.002>.
- Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., and Anwar, M. P. (2019), "Sorptivity of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume", *Constr, Build. Mater*, vol 113, pp. 369-375.
- Komara, I., Tambusay, A., Sutrisno, W and Suprobo, P. (2019), "Engineered Cementitious Composite as an Innovative Durable Material": *A review ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 14 822–33.
- Homma, D., Mihashi, H and Nishiwaki, T. (2009), "Self-healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites", *J. Adv. Concr. Technol.* 7 217–28.
- Li, V. C. (1992a), "Performance Driven Design of Fiber Reinforced Cementitious Composites", *Advanced Civil Engineering Material Research Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas of Michigan*,

Ann Arbor, MI, USA, (E & FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN. ISBN 0 419 18130 X).

- Li, V. C. (1993), "From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious for Civil Engineering Application", *Advanced Civil Engineering Material Research Laboratory*, Vol. 10, No. 2, hal. 37s-48s.
- Li, V. C. (2001), "Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC", *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 6, hal. 483-492.
- Li, V. C. (2003), "On Engineered Cementitious Composites (ECC)", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No.3, hal. 215–230.
- Li, V. C., Horikoshi, T., Ogawa, A, Torigoe, S and Saito, T. (2004), "Micromechanics-Based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite", *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 3, hal. 242–248.
- Li, V. C. (2004), "High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair", *International Journal for Restoration*, Vol. 10, No. 2, 163-180.
- Li, W. Q., Zhu, J. H., Chen, P. Y., Xing, F., Li, D and Su, M. (2019), "Evaluation of carbon fiber reinforced cementitious matrix as a recyclable strengthening material, *J. Clean. Prod.* 217 234–43.
- Liu, H., Zhang, Q., Gu, C., Su, H and Li, V. (2017), "In Fluence of Microcrack Self-Healing Behavior on the Permeability of Engineered Cementitious Composites", *Cement and Concrete Composites*, 82, 14–22.
- Liu, Y., Zhang, Q., Bao, Y and Bu, Y. (2019), "Static and Fatigue Push-Out Tests of Short Headed Shear Studs Embedded in Engineered Cementitious Composites (ECC)", *Eng. Struct.* 182 29–38.
- Liu, H., Zhang, Q., Li, V., Su, H and Gu, C. (2017), "Durability Study on Engineered Cementitious Composite (ECC) Under Sulfat and Chloride Environmen", *Construction and Building Materials*, 133 171-181.

- Maalej, M and Li, V. C. (1995), "Introduction of Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites in Design of Reinforced Concrete Flexural Members for Improved Durability", *ACI structural Journal*, V. 92, No. 2.
- Maalej, M., Ahmed, S. F. U and Paramasivam, P. (2003), "Corrosion Durability and Structural Response of Functionally-Graded Concrete Beams", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, hal. 307–316.
- Noushini, A., Samali, B and Vessalas, K. (2013), "Effect of Polyvinyl Alcohol (PVA) Fibre on Dynamic and Material Properties of Fibre Reinforced Concrete Constr", *Build. Mater.* 49 374–83.
- Pourfalah, S and Suryanto, B. (2013), "Development of Engineered Cementitious Composite Mixture using Locally Available Materials in the UK", *Infrastructure and Environment Scotland 1st Postgraduate Conference 3rd June 2013*.
- Poon, C. S., Shui, Z. H and Lam, L. (2004), "Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures", *Cem. Concr. Res.* 34 2215–22.
- Şahmaran, M and Li, V. (2010), Engineered Cementitious Composites, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2164, 1–8.
- Sahmaran, M., Anil, O., Lachemi, M., Yildirim, G., Ashour, A. F and Acar, F. (2015), "Effect of Corrosion on Shear Behavior of Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams", *ACI Struct. J.* 112 771–82.
- Shanour, A. S., Said, M., Arafa, A. I and Maher, A. (2018), "Flexural Performance of concrete beams containing engineered cementitious composites", *Constr. Build. Mater.* 180 23–34.
- Shanour, A. S., Said, M., Arafa, A. I and Maher, A. (2018), "Flexural Performance of Concrete Beams Containing Engineered Cementitious Composites", *Construction and Building Materials*, 180, 23–34.
- Tambusay, A., Suprobo, P., Faimun., Arwin, A. (2015), "Finite Element Analysis on the Behavior of Slab-Column Connections Using PVA-ECC Material", *Jurnal Teknologi*, Vol. 79, No. 5, hal. 23-32.

- Tuutti, Kyosti, (1982), Corrosion of Steel in Concrete Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. <https://doi.org/10.1520/STP629-EB>.
- Webster, M. P. (2000), "The Assessment of Corrosion-Damaged Concrete Structures", Disertasi Ph.D, University of Birmingham UK.
- Wong, H. S., Zhao, Y. X., Karimi, A. R, Buenfeld, N. R and Jin, W. L. (2010), "On the Penetration of Corrosion Products from Reinforcing Steel into Concrete due to Chloride-Induced Corrosion", *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 7, hal. 2469–2480.
- Chen, X., Wu, S and Zhou, J. (2013), "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar", *Constr. Build. MASTER*, Vol. 40, pp. 869-874.
- Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y and Li, V. C. (2008), "Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 1, hal. 181–193.
- Yu, K. Q., Yu, J. T, Dai, J. G., Lu, Z. D and Shah, S. P. (2018), "Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers", *Constr. Build. Mater.* **158** 217–27.
- Yuan, F., Pan, J and Leung, C. K. Y. (2013), "Flexural behaviors of ECC and concrete/ECC composite beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer", *J. Compos. Constr.* 17 591–602.
- Zhang, R., Castel, A and François, R. (2010), "Cement and Concrete Research Concrete Cover Cracking with Reinforcement Corrosion of RC Beam During Chloride-Induced Corrosion Process", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 3, hal. 415–425.
- Zheng, Y. Z., Wang, W. W and Brigham, J. C. (2016), "Flexural behavior of reinforced beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC", *Construction and Building Materials*, 115 424-437.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1



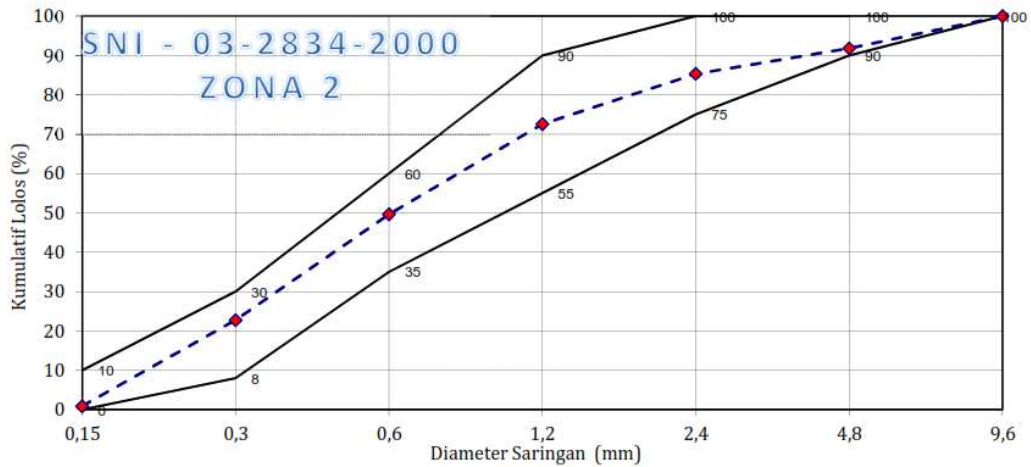
PEMERIKSAAN SUSUNAN GRADASI AGREGAT HALUS

(Standar : SNI (03-2834-2000))

Asal Material : Lumajang
 Jenis Material : Pasir
 Tanggal Uji : 02 April 2019

Asli : Manajer Teknik dan Mutu

DIAMETER SARINGAN (mm)	BERAT TERTAHAN		KUMULATIF TERTAHAN (%)	KUMULATIF LOLOS (%)
	Gram	%		
38,00				
19,00				
9,60				
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	100,00	0,00
JUMLAH BERAT :	2288	gram	FM :	2,77



Kesimpulan : Dari hasil pengujian gradasi pasir diatas termasuk pada zona 2
 "terdapat kandungan batu pada pasir (Grafel) = 1,16%

Mengetahui

 Isma Sofjanto, S.T
 Manajer Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019
 Diuji Oleh,

 M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 2



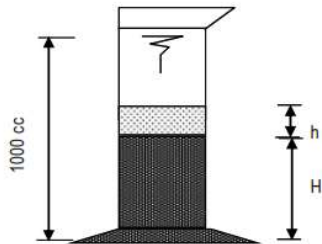
PEMERIKSAAN KADAR LUMPUR AGREGAT HALUS (PASIR) (SNI-4428-1997)

Asal Material : Lumajang

Asli : Manajer Teknik dan Mutu

Jenis Material : Pasir

Tanggal Uji : 02 April 2019



Syarat Kualitas

1. Kadar Lumpur < 5 % volume (waktu pengendapan ± 10 menit)
2. Pasir secara visuil bersih (tidak bercampur kotoran)

Pengujian kadar lumpur agregat halus

No. Penelitian		I	II	III	Rata - rata	
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	3,73

Kesimpulan : Dari pengujian kadar lumpur pasir diatas "OK"

Mengetahui,

Isma Scifianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 3



PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS (STANDAR : SNI 03-1970-1990)

Asal Material : Lumajang
 Jenis Material : Pasir
 Tanggal Uji : 03 April 2019

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

No. Penelitian			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 oven	W3	(gr)	493	494	494
Berat tabung + air	W4	(gr)	1303,5	1302,5	1301,8

No. Penelitian		I	II	III	Rata - rata
1. Berat Jenis Agregat Halus Curah Kering = $\frac{W3}{W1 + W4 - W2}$ (gram/cm ³)		2,69	2,70	2,70	2,70
2. Berat Jenis Agregat Halus SSD = $\frac{W1}{W1 + W4 - W2}$ (gram / cm ³)		2,72	2,73	2,74	2,73
3. Berat Jenis Agregat Halus Semu = $\frac{W3}{W4 + W3 - W2}$ (gram/cm ³);		2,79	2,79	2,79	2,79
4. Penyerapan Agregat Halus = $\frac{W1 - W3}{W3} \times 100\%$		1,42%	1,21%	1,21%	1,28%

Mengetahui

Isma Sofianto, S.T
 Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh

M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 4



PEMERIKSAAN BERAT VOLUME SPLIT (STANDAR : ASTM C 29 - 97)

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Asal Material : Lumajang
 Jenis Material : Pasir
 Tanggal Uji : 03 April 2019

Penelitian	I	II	III
Berat tempat (gr) W1	700	700	700
Volume tempat contoh (gr) V	5000	5000	5000
Berat Volume Padat / Compact			
Berat tempat + contoh (gr) W2	7820	7940	7950
Berat contoh padat (gr) W3 = W2 - W1	7120	7240,000	7250
Berat volume padat (gr/cm ³) W3 / V	1,424	1,448	1,450
Berat volume padat rata-rata (gr/cm ³ = ton/m ³) BI	1,44		
Berat Volume Gembur			
Berat tempat + contoh (gr) W2	7540	7540	7560
Berat contoh gembur (gr) W3 = W2 - W1	6840	6840	6860
Berat volume gembur (gr/cm ³) W3 / V	1,368	1,368	1,372
Berat volume gembur rata-rata (gr/cm ³ = ton/m ³) BII	1,37		
Berat volume rata - rata	= (BI + BII) / 2 = 1,4050 gr/cm³ = ton/m³		

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T.
 Manager Teknik dan Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 5




PEMERIKSAAN KOTORAN ORGANIK PADA AGREGAT HALUS

Asal Material : Lumajang
Jenis Material : Pasir
Tanggal Uji : 04 April 2019

Pasir = 130 cc
Lauran NaOH 3% = 200 cc
Pasir dicampur dengan larutan NaOH dan didiamkan selama 24 jam

Warna cairan yang terlihat setelah 24 jam = **Standart no 1**

Mengetahui,



Isma Sofianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji oleh



M. Sandy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 6

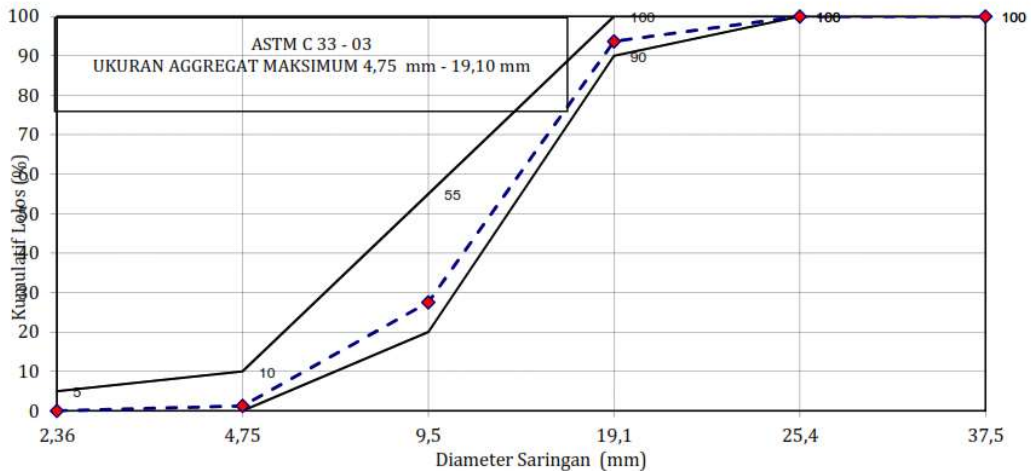


PEMERIKSAAN SUSUNAN GRADASI AGREGAT KASAR (Standar : ASTM (C 33-03))

Asal Material : Pasuruan
 Jenis Material : Split
 Tanggal Uji : 02 April 2019

Asli : Manajer Teknik dan Mutu

DIAMETER SARINGAN (mm)	BERAT TERTAHAN		KUMULATIF TERTAHAN %	KUMULATIF LOLOS %
	Gram	%		
76,00	0,00	0,00	0,00	100,00
37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
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	100,00	0,00
1,18	0,00	0,00	100,00	0,00
0,60	0,00	0,00	100,00	0,00
0,30	0,00	0,00	100,00	0,00
0,15	0,00	0,00	100,00	0,00
PAN	0,00	0,00	100,00	0,00
JUMLAH BERAT :	9792	gram	FM : 6,78	



Kesimpulan : Susunan Gradasi Batu Pecah kasar termasuk pada sususna butiran 20mm.

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
 Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019
 Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 7



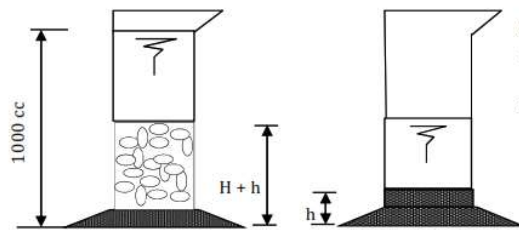
PEMERIKSAAN KADAR LUMPUR AGREGAT KASAR (SPLIT / KORAL) (SNI-4428-1997)

Asal Material : Pasuruan

Asli : Manajer Teknik dan Mutu

Jenis Material : Split (Quarry Sesudah dihidrand)

Tanggal Uji : 02 April 2019



Syarat Kualitas

1. Kadar Lumpur < 3 % volume (waktu pengendapan ± 10 menit)
2. Split / Koral secara visual bersih (tidak bercampur kotoran)

Pengujian kadar lumpur agregat kasar (split / koral)

No. Penelitian		I	II	III	Rata - rata
Tinggi Split / Koral (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	2,44

Kesimpulan : Dari hasil pengujian kadar lumpur split diatas " OK "

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
Manajer Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 8



PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT KASAR **(STANDAR : SNI 03-1969-1990)**

Asal Material : Pasuruan
 Jenis Material : Split
 Tanggal Uji : 03 April 2019

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

No. Penelitian		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 uji SSD dalam air	W3 (gr)	3140	3130	3142

No. Penelitian		I	II	III	Rata - rata
1. Berat Jenis Agregat Kasar Curah Kering =	$\frac{W1}{W2 - W3}$ (gram / cm3)	2,66	2,65	2,66	2,66
2. Berat Jenis Agregat Kasar SSD =	$\frac{W2}{W2 - W3}$ (gram / cm3)	2,69	2,67	2,69	2,68
3. Berat Jenis Agregat Kasar Semu =	$\frac{W1}{W1 - W3}$ (gram / cm3)	2,74	2,72	2,74	2,73
4. Penyerapan Agregat Kasar =	$\frac{W2 - W1}{W1} \times 100\%$	1,21	1,01	1,01	1,08

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
 Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019
 Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 9



PEMERIKSAAN BERAT VOLUME SPLIT (STANDAR : ASTM C 29 - 97)

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Asal Material : Pasuruan
 Jenis Material : Split
 Tanggal Uji : 03 April 2019

Penelitian	I	II	III
Berat tempat (gr) W1	702	702	702
Volume tempat contoh (gr) V	5000	5000	5000
Berat Volume Padat / Compact			
Berat tempat + contoh (gr) W2	7900	7890	7890
Berat contoh padat (gr) W3 = W2 - W1	7198	7188	7188
Berat volume padat (gr/cm ³) W3 / V	1,440	1,438	1,438
Berat volume padat rata-rata (gr/cm ³ = ton/m ³) BI	1,44		
Berat Volume Gembur			
Berat tempat + contoh (gr) W2	7430	7410	7480
Berat contoh gembur (gr) W3 = W2 - W1	6728	6708	6778
Berat volume gembur (gr/cm ³) W3 / V	1,346	1,342	1,356
Berat volume gembur rata-rata (gr/cm ³ = ton/m ³) BII	1,35		
Berat volume rata - rata	= (BI + BII) / 2 = 1,39 gr/cm³ = ton/m³		

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T.
 Manager Teknik dan Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
 Teknik Lab

LAMPIRAN 10



PEMERIKSAAN KEAUSAN AGREGAT DENGAN MESIN ABRASI LOS ANGELES

Asal Material : Pasuruan

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Jenis Material : Split

Tanggal Uji : 04 April 2019

Gradasi Pemeriksaan			
Saringan		I (gram)	II (gram)	III (gram)
Lolos mm (in.)	Tertahan mm (in.)	Berat sebelum (a)	Berat sebelum (a)	Berat sebelum (a)
75 (3)	62 (2 1/2)			
62 (2 1/2)	50 (2)			
50 (2)	37.5 (1 1/2)			
37.5 (1 1/2)	25 (1)			
25 (1)	19 (3/4)			
19 (3/4)	12.5 (1/2)			
12.5 (1/2)	9.5 (3/8)			
9.5 (3/8)	6.3 (1/4)			
6.3 (1/4)	4.75 (No. 4)			
4.75 (No. 4)	2.36 (No. 8)			
Jumlah Berat (A)		5002	5000	5000
Berat tertahan saringan No. 12 (B)		4722	4700	4700
Jumlah Bola (Biji)		11	11	11
Keausan = $\frac{A - B}{A} \times 100\%$		5,60%	6,00%	6,00%
Keausan rata-rata (%)		5,87%		

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Gandy Fauzi
Teknik Lab

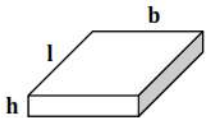
LAMPIRAN 11



PEMERIKSAAN PANJANG / PIPIH AGREGAT (STANDAR : ASTM D 4791 - 899)

Asal Material : Pasuruan
Jenis Material : Split
Jenis Material : 04 April 2019

Asli : Manager Teknik dan Mutu

No.	Berat Materai Uji (gr)	Berat Material Yang Pipih (gr)	Prosentase (%)	Keterangan
1	2500	120	4,8	Material / Split yang dinyatakan panjang / pipih bila : $l > 3 b$ $b > 3 h$ Jumlah Max. 20 % 

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Dibuat Oleh,

M. Sandy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 12



PEMERIKSAAN BERAT JENIS SEMEN PORTLAND (STANDAR : ASTM C 188 - 89)

Asal Material : Gresik

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Jenis Material : Semen

Tanggal Uji : 3 April 2019

No. Penelitian			I	II	III	Rata - rata
1. Berat semen	(A)	(gr)	500	500	500	500
2. Berat semen + solar + labu	(B)	(gr)	1510	1518	1514	1514
3. Berat labu + solar	(C)	(gr)	1142	1150	1146	1146
4. Berat jenis semen	$\frac{A}{(A + C) - B} \times 0,83$ atau $\frac{A}{A - (B - C)} \times 0,83$	(gr/cm ³)	3,15	3,15	3,14	3,15
Catatan : Berat jenis solar :			=			0,83

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sa'dy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 13



PEMERIKSAAN BERAT JENIS SEMEN PORTLAND (STANDAR : ASTM C 188 - 89)

Asal Material : Paiton

Asli : Manager Teknik dan Mutu

Jenis Material : Fly Ash

Tanggal Uji : 3 April 2019

No. Penelitian			I	II	III	Rata - rata
1. Berat semen	(A)	(gr)	500	500	500	500
2. Berat semen + solar + labu	(B)	(gr)	1475	1470	1470	1472
3. Berat labu + solar	(C)	(gr)	1147	1142	1144	1144
4. Berat jenis semen	$\frac{A}{A - (B - C)} \times 0,83$ atau $\frac{A}{(A + C) - B} \times 0,83$	(gr/cm ³)	2,41	2,41	2,39	2,40
Catatan : Berat jenis solar :			= 0,83			

Mengetahui,

Isma Sofianto, S.T
Manager Teknik & Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Diuji Oleh,

M. Sandy Fauzi
Teknik Lab

LAMPIRAN 14

PEMERIKSAAN BERAT VOLUME SEMEN DAN FLY ASH (STANDAR : ASTM C 29 - 97)

Asli : Manager Teknik dan Mutu

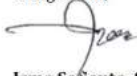
Asal Material : Semen
Jenis Material : Gresik
Tanggal Uji : 04 April 2019

Penelitian			I	II	III
Berat tempat	(gr)	W1	701	701	701
Volume tempat contoh	(gr)	V	5000	5000	5000
Berat Volume Padat / Compact					
Berat tempat + contoh	(gr)	W2	7180	7190	7190
Berat contoh padat	(gr)	W3 = W2 - W1	6479	6489	6489
Berat volume padat	(gr/cm ³)	W3 / V	1,296	1,298	1,298
Berat volume padat rata-rata	(gr/cm ³ = ton/m ³)	BI		1,30	
Berat Volume Gembur					
Berat tempat + contoh	(gr)	W2	6730	6770	6720
Berat contoh gembur	(gr)	W3 = W2 - W1	6029	6069	6019
Berat volume gembur	(gr/cm ³)	W3 / V	1,206	1,214	1,204
Berat volume gembur rata-rata	(gr/cm ³ = ton/m ³)	BII		1,21	
Berat volume rata - rata			= (BI + BII) / 2 = 1,25 gr/cm ³ = ton/m ³		

Asal Material : Palton - Probolinggo
Jenis Material : Fly Ash
Tanggal Uji : 04 April 2019

Penelitian			I	II	III
Berat tempat	(gr)	W1	700	700	700
Volume tempat contoh	(gr)	V	5000	5000	5000
Berat Volume Padat / Compact					
Berat tempat + contoh	(gr)	W2	5900	5810	5820
Berat contoh padat	(gr)	W3 = W2 - W1	5200	5110	5120
Berat volume padat	(gr/cm ³)	W3 / V	1,040	1,022	1,024
Berat volume padat rata-rata	(gr/cm ³ = ton/m ³)	BI		1,029	
Berat Volume Gembur					
Berat tempat + contoh	(gr)	W2	5730	5680	5700
Berat contoh gembur	(gr)	W3 = W2 - W1	5030	4980	5000
Berat volume gembur	(gr/cm ³)	W3 / V	1,0	1,0	1,0
Berat volume gembur rata-rata	(gr/cm ³ = ton/m ³)	BII		1,00	
Berat volume rata - rata			= (BI + BII) / 2 = 1,01 gr/cm ³ = ton/m ³		

Mengetahui,



Isma Sofianto, S.T.
Manager Teknik dan Mutu

Pasuruan, 05 April 2019

Ditest oleh,



M. Sandy Fauzi
Teknik Lab.

LAMPIRAN 15

GAMBAR PENGUJIAN

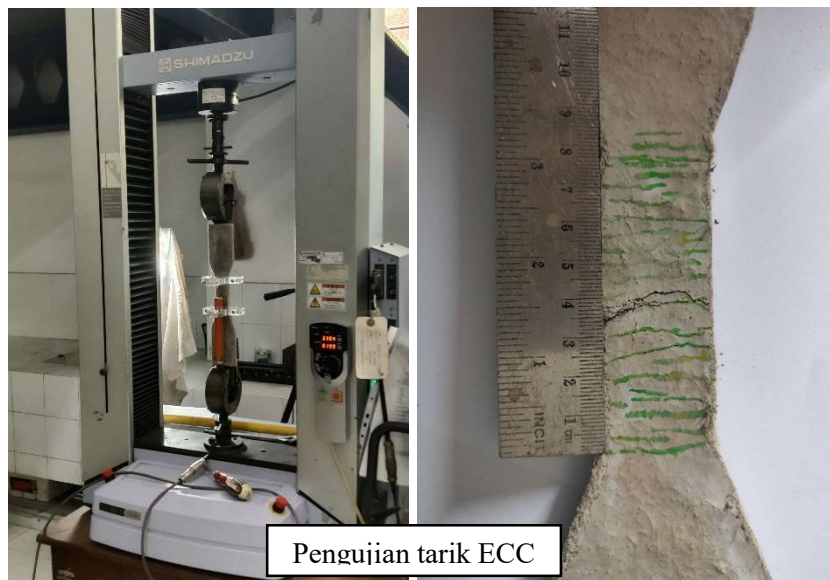
1. Material ECC



2. *Trial mix ECC*



3. Pengujian kuat tekan dan kuat tarik beton



4. Pencetakan balok 2000 mm x 200 mm x 100 mm



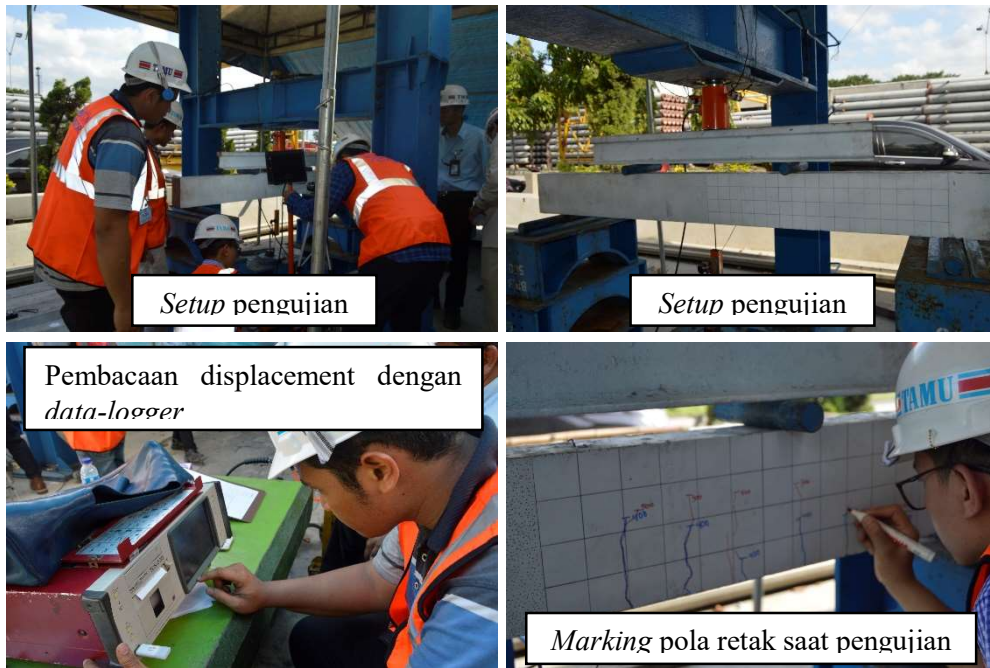
5. *Curring (moist curring)*



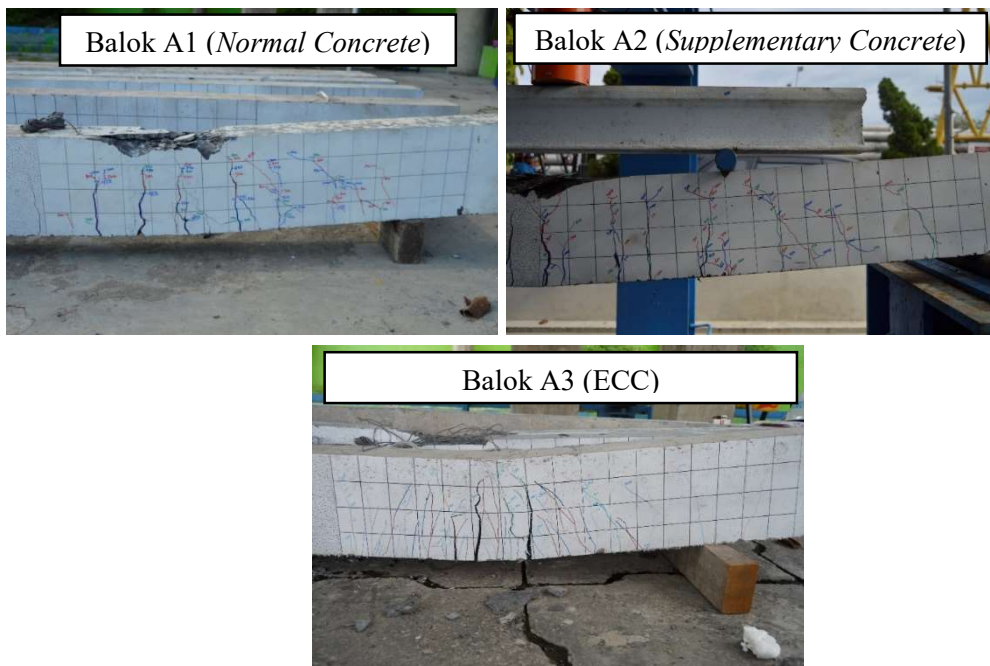
6. Pengecatan beda uji dan *marking* kotak-kotak pada balok dengan dimensi 5 cm x 5 mm (untuk mengambar pola retakan saat uji bending).



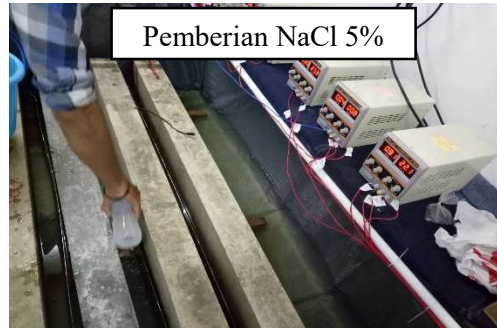
7. *Setup dan pengujian lentur four point bending.*



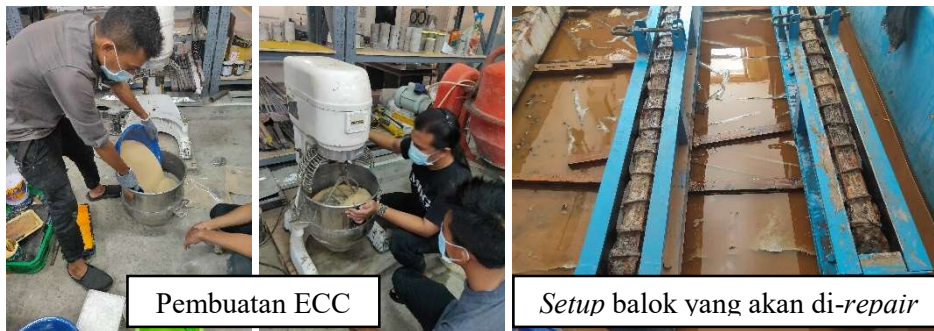
8. *Pola retak dan kegagalan balok kontrol (setelah pengujian lentur four point bending).*



9. Pengujian percepatan korosi (metode Galvanostatik).



10. *Repair* balok terkorosi dengan lapisan ECC.



11. Pengujian lentur balok terkorosi yang di-repair dengan lapisan ECC (menggunakan metode *four point bending*).



Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Nama : Marthinus Alexander Bastian
Tempat, Tanggal lahir : Kefamenanu, 22 Februari 1992
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Alamat : Kota Kefamenanu, Kabupaten Timor Tengah Utara,
Nusa Tenggara Timur
Email : Alexsandrobastian@gmail.com
Pendidikan Formal : SDN Gua Aplasi Kefamenanu (tamat 2004)
SMPK Sto. Antonius Padua kefamenanu (tamat 2007)
SMA Negeri 2 Kefamenanu (tamat 2011)
Universitas Katolik Widya Mandira Kupang (2015)
Publikasi Jurnal : *Earth and Environmental Science*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”