



TESIS - RC185401

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PRE-CRACK PADA
KAPASITAS GESER BALOK *ENGINEERED CEMENTITIOUS*
COMPOSITE YANG TERKOROSI

MERZY MOOY
03111750020002

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. PRIYO SUPROBO, MS., PhD
Ir. FAIMUN, MSc., PhD

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



TESIS - RC185401

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PRE-CRACK PADA
KAPASITAS GESER BALOK *ENGINEERED CEMENTITIOUS*
COMPOSITE YANG TERKOROSI

MERZY MOOY
03111750020002

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. PRIYO SUPROBO, MS., PhD
Ir. FAIMUN, MSc., PhD

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



THESIS - RC 185401

THE EXPERIMENTAL STUDY OF PRE-CRACK EFFECT ON
SHEAR CAPACITY OF CORRODED BEAM USING ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITE

MERZY MOOY
03111750020002

ADVISORS
Prof. Ir. PRIYO SUPROBO, MS., PhD
Ir. FAIMUN, MSc., PhD

DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENVIRONMENTAL AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

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

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Merzy Mooy

NRP:

03111750020002

Tanggal ujian : 6 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

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

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

Penguji:

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

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



Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dr. Ir. Lasminto, ST., M.Sc.
NIP: 19721202 199802 1 001

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH *PRE-CRACK* PADA KAPASITAS GESER BALOK *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE* YANG TERKOROSI

Mahasiswa Nama : Merzy Mooy
Mahasiswa ID : 03111750020002
Dosen Konsultasi I : Prof. Ir. Priyo Suprobo., MS., PhD
Dosen Konsultasi II : Ir. Faimun., MSc., PhD

ABSTRAK

Korosi yang terjadi pada tulangan memiliki pengaruh pada kapasitas lentur maupun geser pada beton bertulang karena adanya kehilangan diameter tulangan. Salah satu penyebab terjadinya korosi adalah munculnya keretakan pada beton. Oleh karena itu dilakukan upaya untuk meminimalkan keretakan yang terjadi yaitu dengan penambahan serat pada beton. Jenis serat yang dibutuhkan adalah serat yang memiliki kuat tarik yang tinggi serta tahan terhadap korosi. *Polyvinyl alcohol* (PVA) merupakan jenis serat memiliki sifat tersebut dan sering digunakan bahan campuran beton. ECC (*engineered cementitious composite*) berbahan PVA telah terbukti memiliki kapasitas regangan tarik lebih dari 3% dan lebar retakan kurang dari 100 μm , menghasilkan daktilitas tinggi, material yang ramah lingkungan, memiliki koefisien permeabilitas yang rendah, tahan terhadap cuaca panas dan memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kapasitas geser pada balok tinggi (*deep beam*) antara lain: balok normal, balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan balok ECC tanpa *pre-crack* dengan sengkang, tanpa *pre-crack* tanpa sengkang serta dengan sengkang dengan *pre-crack*; jumlah kehilangan massa pada tulangan sengkang maupun tulangan lentur pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC setelah korosi; serta besar laju, level dan waktu korosi menggunakan metode galvanostatik.

Berdasarkan pengujian geser yang dilakukan maka diketahui balok ECC dengan sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 2,32% yang lebih besar dibandingkan balok *supplementary* dengan sengkang serta 13,10% lebih besar dibandingkan balok normal dengan sengkang. Sedangkan balok ECC tanpa sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 1,95% lebih besar dibandingkan balok *supplementary* tanpa sengkang serta beban maksimum 11,38% lebih besar dibandingkan balok normal tanpa sengkang. Balok ECC setelah terjadi korosi mengalami penurunan kapasitas sebesar 23,72%; balok *supplementary* 24,59% dan balok normal 25,45%. Jumlah kehilangan massa tulangan geser $\phi 8$ paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* dan 5 kali lebih sedikit dari balok normal sedangkan jumlah kehilangan massa tulangan lentur D10 paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* dan 6 kali lebih sedikit dari balok normal. Selain itu, pada tulangan D10 memiliki laju dan level

korosi yang lebih kecil dibandingkan tulangan geser sengkang $\phi 8$ disertai dengan urutan yang sama yakni balok normal yang terbesar diikuti balok *supplementary* dan balok ECC. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk terjadi korosi adalah tulangan lentur D10 lebih lama dibandingkan tulangan geser sengkang $\phi 8$. Hal ini terjadi karena tebal selimut beton pada tulangan lentur lebih besar yaitu 30 mm dibandingkan dengan tebal selimut beton tulangan sengkang 15 mm.

Kata kunci: *pre-crack*, kapasitas geser, *engineered cementitious composite* (ECC), korosi

THE EXPERIMENTAL STUDY OF PRE-CRACK EFFECT ON SHEAR CAPACITY OF CORRODED BEAM USING ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE

By : MerzyMooy
Student Identity Number : 03111750020002
Supervisor : Prof. Ir. PriyoSuprobo., MS., PhD
Co-Supervisor : Ir. Faimun., MSc., PhD

ABSTRACT

The reinforcement corrosion has an influence on flexure and shear capacity due to weight loss of reinforcement diameter. One causes of the corrosion is the appearance of concrete cracks. Therefore an attempt is made to minimize concrete cracks by adding fiber. The type of fiber should has high tensile strength and corrosion resistance. Polyvynil alcohol (PVA) is a type of fiber that has these properties and used as a mixture of concrete. PVA-based ECC (engineered cementitious composite) has been proven that has tensile strain capacity more than 3% and crack widths less than 100 μm , produces high ductility, low permeability coefficient, hot weather resistance and high corrosion resistance.

This research aims to determine the shear capacity of deep beam with various type of concrete such as the normal beams, the supplementary beams (the beams with fly ash as cementitious material) and the ECC beams. The shear capacity of the beam was investigated with several configuration such as without pre-crack with stirrups, without pre-crack without stirrup and with pre-crack with stirrups; the mass loss of shear and flexure reinforcements was also investigated. The rate, level and time of corrosion was conducted by galvanostatic method.

The shear test result shows that the ECC beam with stirrups has maximum shear capacity 2,23% higher than the supplementary beam with stirrups and 13,10% higher than the normal beam with stirrups. Meanwhile, the ECC beam without stirrup has maximum shear capacity 1,95% higher than the supplementary beam without stirrup and 11,38% higher than the normal beam without stirrup. The ECC beam after corrosion has decreased capacity 23,72%; the supplementary beam 24,59% and the normal beam 25,45%. The least mass loss of shear reinforcement $\phi 8$ is produced by the ECC beam which is 2,5 times less than the supplementary beam and 5 times less than the normal beam. Meanwhile, the least mass loss of flexure reinforcement D10 is produced by the the ECC beam which is 2,5 times less than the supplementary beam and 6 times less than the normal beam. Furthermore, the flexure reinforcement D10 has the rate and level of corrosion lesser than the shear reinforcement with the same sequence i.e. the most on the normal beam followed by the supplementary beam and the ECC beam. The time of corrosion on flexure reinforcement D10 is longer than shear reinforcement $\phi 8$ due to concrete cover on flexure reinforcement D10 is 15 cm thicker than shear reinforcement $\phi 8$.

Key word: *pre-crack*, shear capacity, corrosion, *engineered cementitious composite* (ECC)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Bapa, Tuhan Yesus Kristus dan Roh Kudus atas kasih dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“Studi Eksperimental Pengaruh *Pre-Crack* Pada Kapasitas Geser Balok *Engineered Cementitious Composite* Yang Terkorosi”** tepat pada waktunya.

Adapun tujuan dari tesis ini adalah untuk menentukan besar kapasitas geser, perbandingan lebar dan pola retakan pada balok normal dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok ECC dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok normal *pre-crack* dengan sengkang, balok *supplementary pre-crack* dengan sengkang, balok ECC *pre-crack* dengan sengkang, balok normal tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, serta balok ECC tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, jumlah kehilangan massa pada tulangan sengkang maupun tulangan lentur pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC setelah korosi serta besar laju, level dan waktu korosi pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan menggunakan metode galvanostatik.

Terima kasih kepada papa, mama, kakak, adik, keluarga dan semua pihak yang telah memberikan dukungan moril maupun materil sehingga tesis ini dapat selesai. Ucapan terima kasih ini juga penulis tujukan kepada:

1. Prof. Ir. Priyo Suprobo., MS., PhD selaku Dosen Konsultasi I
2. Ir. Faimun., MSc., PhD selaku Dosen Konsultasi II
3. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA selaku Dosen Penguji I
4. Dr. Ir. Djoko Irawan, MS selaku Dosen Penguji II dan Dosen Wali
5. Ir.. I Putu Artama Wiguna, MT., PhD selaku Ketua Pasca Sarjana Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, ITS.

Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini berguna bagi para pembaca dan pihak-pihak lain yang berkepentingan.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah	6
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Beton Berserat (<i>Fiber Reinforced Concrete</i>)	7
2.2 <i>Engineered Cementitious Composite (ECC)</i>	8
2.3 Korosi	11
2.4 Metode Galvanostatik (<i>Galvanostatic Pulse Method</i>)	14
2.5 Beton <i>Pre-crack</i>	19
2.6 Kekuatan Geser Balok Tinggi (<i>Deep Beam</i>)	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Dimensi Benda Uji	33
3.3 Analisis Material	34
3.4 Perencanaan Campuran	34
3.4.1 Beton Normal	34
3.4.2 Beton <i>Supplementary</i>	35
3.3.1 <i>Engineered Cementitious Composite (ECC)</i>	36
3.5 Pembuatan dan Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	37

3.6	Analisa Teoritis Geser Balok	39
3.7	Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data	59
3.7.1	Pengujian Kuat Tekan Beton	59
3.7.2	Pengujian Kuat Tarik Uniaxial ECC	59
3.7.3	Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja	61
3.7.4	Analisa Kebutuhan Arus <i>Power Supply</i>	61
3.7.5	Pembuatan <i>Pre-Crack</i>	65
3.7.6	Pengujian Geser	66
BAB 4 HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN		71
4.1	Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan	71
4.2	Hasil <i>Slump</i>	72
4.3	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	72
4.3.1	Beton Normal	72
4.3.2	Beton <i>Supplementary</i>	73
4.3.3	ECC	73
4.4	Hasil Pengujian Kuat Tarik ECC	74
4.5	Pengujian Geser Tanpa <i>Pre-Crack</i>	76
4.5.1	Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	76
4.5.2	Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	81
4.6	Lebar Retak Balok Tanpa <i>Pre-Crack</i>	85
4.6.1	Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	85
4.6.2	Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	90
4.7	Pembuatan <i>Pre-Crack</i>	94
4.8	Pengujian Korosi Menggunakan Metode Galvanostatik	98
4.9	Pengujian Geser Setelah Korosi	101
4.10	Lebar Retak Balok Geser Setelah Korosi	104
4.11	Massa Tulangan Setelah Korosi	107
4.12	Laju, Level dan Waktu Korosi	109
4.12.1	Tulangan Sengkang $\phi 8$	109

4.12.2 Tulangan Memanjang D10	111
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	115
5.1 Kesimpulan	115
5.2 Saran	116
DAFTAR PUSTAKA	117
LAMPIRAN	123
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Reaksi Kimia Anoda dan Katoda pada Permukaan Baja Tulangan yang Menyebabkan Terjadinya Korosi	12
Gambar 2.2 Metode Galvanostatik Percepatan Korosi	19
Gambar 2.3 Perilaku Kegagalan Balok Beton Bertulang Tanpa Tulangan Geser.....	23
Gambar 2.4 Perilaku Kegagalan <i>Deep Beam</i> Tipe III	24
Gambar 2.5 Perilaku Kegagalan <i>Deep Beam</i> Tipe IV	24
Gambar 2.6 Perkiraan Daerah Geser Balok Ohno	28
Gambar 2.7 Pengujian Geser Balok Ohno	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.2 Dimensi Benda Uji	34
Gambar 3.3 Skema Pengujian Kuat Tarik <i>Dog Bone</i>	60
Gambar 3.4 Skema Pengujian Korosi Menggunakan Metode Galvanostatik	65
Gambar 3.5 Skema Pembuatan <i>Pre-Crack</i> Balok 200x10x20 cm	66
Gambar 3.6 Perkiraan Daerah Geser Balok Ohno 200x10x20 cm	66
Gambar 3.7 Skema Pemasangan <i>Strain Gauge</i> Pada Balok	67
Gambar 3.8 Skema Pengujian <i>Ohno Four Point Bending</i> Balok 200x10x20 cm	68
Gambar 3.9 Skema Pengujian <i>Three Point Bending</i> Balok 100x10x20 cm	69
Gambar 4.1 Grafik Hasil Pengujian Tarik Tulangan Geser $\phi 8$ dan Lentur D10	71
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Tegangan-Regangan <i>Dog Bone</i> 8x33x1 cm	74
Gambar 4.3 Pola Retak <i>Dog Bone</i> 8x33x1 cm	75
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	77

Gambar 4.5	Grafik Historisis Regangan Tulangan Geser dan Tulangan Lentur Balok Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	79
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Kapasitas Beban Geser-Lendutan Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	81
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	82
Gambar 4.8	Grafik Historisis Regangan Tulangan Geser Balok Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	83
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Kapasitas Beban Geser-Lendutan Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	85
Gambar 4.10	Lebar Retak Balok 200x10x20 cm dengan Sengkang	87
Gambar 4.11	Sketsa Pola Retak Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang Tanpa <i>Pre-Crack</i>	89
Gambar 4.12	Lebar Retak Balok 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	91
Gambar 4.13	Sketsa Pola Retak Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang Tanpa <i>Pre-Crack</i>	93
Gambar 4.14	Grafik Hubungan Beban-Lendutan <i>Pre-Crack</i> Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm .	95
Gambar 4.15	Lebar <i>Pre-Crack</i> Balok 200x10x20 cm	96
Gambar 4.16	Sketsa Pola Retak <i>Pre-Crack</i> Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm	97
Gambar 4.17	Lebar Retak Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC 200x10x20 cm Setelah Korosi	100
Gambar 4.18	Sketsa Pola Retak Setelah Korosi Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC 200x10x20 cm	101

Gambar 4.19	Grafik Hubungan Beban-Lendutan Geser Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Setelah Korosi	102
Gambar 4.20	Sketsa Pola Retak Geser Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC 200x10x20 cm Setelah Korosi	103
Gambar 4.21	Lebar Retak Geser Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC 200x10x20 cm Setelah Korosi	106
Gambar 4.22	Jumlah Kehilangan Massa Tulangan Geser $\phi 8$ Setelah Korosi	108
Gambar 4.23	Jumlah Kehilangan Massa Tulangan Memanjang D10 Setelah Korosi	109

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Arus Korosi <i>Icorr</i> dan Kondisi Tulangan	15
Tabel 2.2 Nilai Substitusi <i>Corrosion Rate</i>	17
Tabel 2.3 Kategori Laju Korosi (<i>Corrosion Rate</i>)	17
Tabel 2.4 Lebar Retak Beton Bertulang (ACI 224. 2R-92)	20
Tabel 3.1 Rasio Komposisi Material Beton Normal	35
Tabel 3.2 Rasio Komposisi Material Beton <i>Supplementary</i>	35
Tabel 3.3 Rasio Komposisi Material ECC	36
Tabel 3.4 Kebutuhan Benda Uji	38
Tabel 3.5 Regangan Tulangan Tekan Masing-Masing Balok	59
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan	71
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Normal	72
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton <i>Supplementary</i>	73
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton ECC	74
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kuat Tarik <i>Dog Bone</i> 8x3x1 cm	75
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	80
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	84
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang	85
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang	90
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Beban dan Lebar Retak <i>Pre-Crack</i> Balok ...	95
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Setelah Korosi	98
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Geser Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC Setelah Korosi	102
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Lebar Retak Geser Balok Normal, Balok <i>Supplementary</i> dan Balok ECC 200x10x20 cm Setelah Korosi	104

Tabel 4.14 Massa Tulangan Geser $\phi 8$ Pasca Korosi, Sebelum dan Setelah Dibersihkan	107
Tabel 4.15 Massa Tulangan Memanjang D10 Pasca Korosi, Sebelum dan Setelah Dibersihkan	108
Tabel 4.16 Rekapitulasi Laju, Level dan Waktu Korosi Tulangan Geser $\phi 8$	114
Tabel 4.17 Rekapitulasi Laju, Level dan Waktu Korosi Tulangan Lentur D10	114

DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
Lampiran 1 Pengujian Berat Jenis Semen	123
Lampiran 2a Pengujian Gradasi Agregat Kasar	124
Lampiran 2b Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar...	125
Lampiran 2c Pengujian Kadar Air Agregat Kasar	126
Lampiran 2d Pengujian Berat Volume Agregat Kasar	127
Lampiran 3a Pengujian Gradasi Agregat Halus	128
Lampiran 3b Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus...	129
Lampiran 3c Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus	130
Lampiran 3d Pengujian Kadar Air Agregat Halus	131
Lampiran 3e Pengujian Berat Volume Agregat Halus	132
Lampiran 4 Pengujian Berat Jenis <i>Fly Ash</i>	133
Lampiran 5 Perencanaan Campuran Beton	134
Lampiran 6 Foto Persiapan Material	143
Lampiran 7 Foto Pembuatan dan Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji	146
Lampiran 8 Foto Pengujian Kuat Tekan	149
Lampiran 9 Foto <i>Set-Up</i> Pengujian Tarik <i>Dog Bone</i>	151
Lampiran 10 Foto <i>Set-Up</i> Pengujian Korosi Metode Galvanostatik	152
Lampiran 11 Foto Pembuatan <i>Pre-Crack</i>	154
Lampiran 12 Foto Retak <i>Pre-Crack</i> Balok	155
Lampiran 13 Foto <i>Set-Up</i> Pengujian Geser Balok Kontrol	157
Lampiran 14 Foto Retak Balok Kontrol	158
Lampiran 15 Foto Korosi Yang Terjadi Pada Balok Sebelum Pengujian	162
Lampiran 16 Foto Pengujian Geser Setelah Korosi	163
Lampiran 17 Foto Massa Tulangan Setelah Korosi	165

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Korosi tulangan merupakan salah satu bentuk serangan utama yang terjadi pada beton bertulang karena berkurangnya massa tulangan akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya sehingga menyebabkan penurunan kapasitas beton. Korosi pada tulangan akan sulit dipantau secara visual jika terjadi dalam waktu singkat sehingga umumnya dapat diketahui jika struktur beton bertulang telah mengalami keretakan bahkan hingga *spalling*. Sahmaran et al., 2015 dalam penelitiannya menemukan bahwa lebar retakan balok beton yang dihasilkan oleh tulangan terkorosi adalah 0,48 mm dengan kehilangan massa 5%; 0,96 mm dengan kehilangan massa 10% dan 4,92 mm dengan kehilangan massa 15%. Sehingga diketahui semakin besar persentase kehilangan massa tulangan baja akibat korosi, maka lebar retakan yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Pada saat pembebanan diterapkan pada balok beton bertulang hingga terbentuknya retakan awal, maka akan terbentuk pola yang linear kemudian diikuti dengan terjadinya retakan hubungan beban perpindahan dalam bentuk nonlinear. Retakan akan terjadi pada saat kekuatan tarik beton lebih rendah dari tegangan tarik nominal beton. Retakan yang terjadi dalam jumlah yang banyak dan lebar disertai dengan lendutan dapat mempengaruhi ketahanan beton bahkan dapat mengakibatkan kegagalan lentur maupun geser pada beton bertulang (Saravanakumar & Govindaraj, 2016). Retakan diagonal geser dapat terjadi pada saat sebelum atau sesudah retak lentur pada balok bertulang (ACE-ACI Joint Committee 426). Pola retakan yang menyebabkan keruntuhan geser pada balok beton bertulang tanpa diberikan retakan awal (*pre-crack*) terjadi pada arah diagonal. Sedangkan pola retakan yang terjadi pada balok beton bertulang yang diberikan *pre-crack* akan membentuk pola *Z-crack*. Pola vertikal yang dihasilkan oleh *pre-crack* dapat mencegah terjadinya perambatan retak diagonal sehingga balok tersebut menghasilkan kapasitas geser yang lebih besar dibandingkan balok tanpa *pre-crack* (Pimanmas, A and Maekawa, 2001).

Penelitian mengenai balok bertulang yang sengaja diberikan *pre-crack* dilakukan untuk mengetahui pengaruh retakan yang terjadi pada kapasitas lentur maupun geser dari balok bertulang tersebut. Jika lebar retakan yang dihasilkan akibat korosi pada tulangan baja sebesar 0,005-0,2 mm (Amesu, 2014), maka lebar *pre-crack* pada beton tidak boleh melebihi 0,35 mm karena maksimum lebar retakan yang dapat ditoleransi adalah sebesar 0,55 mm (ASTM D5045-14). Siad, Bencheikh, & Hussein, 2017 dalam penelitiannya menggunakan pembebanan 60% dari beban maksimum untuk menghasilkan lebar *pre-crack* sebesar 0,3 mm sehingga diketahui bahwa pada balok yang diberikan *pre-crack* dan laju korosi sebesar 15% menghasilkan kapasitas beban ultimit 8,7% lebih kecil dibandingkan balok tanpa *pre-crack* atau korosi. Hal ini membuktikan bahwa balok yang diterapkan *pre-crack* serta laju korosi yang semakin besar dapat menyebabkan penurunan kapasitas beban ultimit.

Berdasarkan penelitian-penelitian mengenai pengaruh dari retakan pada struktur balok bertulang, maka dilakukan upaya untuk meminimalkan retakan yang terjadi berupa penambahan serat pada balok. ACI C 544 membagi serat beton menjadi beberapa jenis yaitu serat logam (serat baja karbon atau serat baja tahan karat), serat sintesis (*acrylic, aramid, nylon, polyester, polypropylene, polyvinyl alcohol, carbon*), serta kaca (*glass fibre*) dan serat alami (serat ijuk, bamboo, rami, ampas kayu, jerami, sabut kelapa). *Polyvinyl alcohol* (PVA) memiliki kemampuan mengikat matriks semen lebih besar dibandingkan serat *polypropylene*. Kombinasi antara kuat lekat, ketahanan serta modulus yang tinggi pada PVA menghasilkan tingginya kuat tarik dan lentur pada beton bertulang. PVA juga menunjukkan ketahanan yang tinggi pada saat dilakukan perendaman dalam air panas bersuhu 80°C dan alkali dibandingkan dengan serat *polyester, alkali resistant (AR) glass fibre* dan *electrical (E) glass fibre*. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa jika PVA dibakar, akan menghasilkan air dan karbon dioksida yang aman bagi lingkungan. Hal ini disebabkan karena PVA hanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen (Horikoshi, Ogawa, Saito, & Hoshiro, 2006). PVA telah menjadi salah satu material pembentuk *engineered cement composite* (ECC) selain air, *high range water reducer* (HRWR), semen Portland, *fly ash* dan *silica sand*. ECC memiliki kapasitas regangan tarik lebih dari

3% dan lebar retakan kurang dari 100 μm (Reich, Carroll, & Zarembo, 1966). Penelitian yang dilakukan oleh Ranade, Basaran, & Fakhri, 2010 dengan melapisi penutup beton dengan bahan ECC kemudian mempercepat proses korosi dengan potentiostatik menunjukkan terjadinya pengurangan tingkat korosi sekitar 50% dibandingkan dengan balok beton bertulang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa keretakan beton dapat dikurangi dengan penggunaan material ECC.

Kegagalan geser merupakan masalah pada struktur bangunan yang hingga saat ini belum bisa dipahami sepenuhnya secara akurat oleh para peneliti (Tambusay, 2018). Berbagai metode perhitungan untuk memprediksi kegagalan geser pada struktur misalnya balok khususnya balok bertulang menghasilkan perbedaan hingga tingkat yang cukup besar dibandingkan kenyataan di lapangan. Hal ini disebabkan oleh adanya mekanisme internal seperti kedalaman efektif, jumlah dan regangan longitudinal serta tingkat retakan pada balok. Pada balok yang menggunakan tulangan longitudinal dan sengkang, retakan yang terjadi adalah seragam serta beban yang diberikan akan membentuk segitiga *truss* dimana gaya tekan (*strut*) akan terjadi pada beton sedangkan gaya tarik (*tie*) akan terjadi pada tulangan. Pada balok dengan sedikit atau tanpa sengkang, retakan yang terjadi umumnya secara lokal dan bergantung pada mekanisme beban yang diterima.

Meng, Lee, & Zhang, 2017 dalam penelitiannya menunjukkan bahwa balok konvensional tanpa sengkang memiliki kapasitas geser sebesar 50,2 kN sedangkan balok ECC 72,8 kN. Ini berarti, ECC memiliki kapasitas geser sebesar 1,5 kali lebih besar dibandingkan balok konvensional. Hal ini disebabkan karena tegangan tarik yang dimiliki oleh serat PVA dengan formasi retak mikro yang mampu menahan geser pada saat pembebanan terjadi. Penelitian yang dilakukan oleh Ayub, 2015 membuktikan bahwa beton dengan komposisi optimum serat PVA dan serat Basalt adalah sebanyak 1%. Beton dengan serat PVA meningkatkan kuat tekan hingga 17% dan 9% dibandingkan serat Basalt serta meningkatkan kuat tarik beton seiring dengan peningkatan volume serat hingga 3%. Reich, Carroll, & Zarembo, 1966 dalam penelitiannya menemukan bahwa penggunaan serat PVA pada ECC dapat menghasilkan kapasitas regangan melebihi 3%, kuat tarik lebih dari 5 MPa, kuat lentur lebih dari 15 MPa, kuat

tekan lebih dari 70 MPa serta retakan dibawah 60 μm . Meskipun memiliki susut kering yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, namun ECC dengan serat PVA memiliki ketahanan terhadap retak susut yang lebih baik dibandingkan beton konvensional. Kanakubo, Shimizu, & Kanda, 2007 juga menemukan bahwa ECC dengan volume PVA 2% memiliki kuat tekan yang lebih besar dibandingkan volume PVA 1% dan 1,5% serta memiliki regangan maksimum lebih besar yaitu 0,53%, kuat tarik lebih besar dan regangan ultimit lebih besar 1,07%.

Penelitian ini dilakukan untuk menindaklanjuti penelitian-penelitian sebelumnya yaitu membandingkan kapasitas geser akibat pengaruh *pre-crack* untuk mempercepat korosi pada balok ECC yang menggunakan sengkang maupun balok ECC yang tidak diberikan *pre-crack* tanpa menggunakan sengkang selanjutnya dibandingkan dengan balok konvensional *pre-crack* yang menggunakan sengkang dan balok konvensional tanpa *pre-crack*. Oleh karena itu, pada penelitian tesis ini akan dilakukan “**Studi Eksperimental Pengaruh Pre-Crack Pada Kapasitas Geser Balok Engineered Cementitious Composite Yang Terkorosi**”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar kapasitas geser balok normal dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok ECC dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok normal *pre-crack* dengan sengkang, balok *supplementary pre-crack* dengan sengkang, balok ECC *pre-crack* dengan sengkang, balok normal tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, serta balok ECC tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*?
2. Bagaimana perbandingan lebar dan pola retak yang terjadi pada balok normal dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok ECC dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok normal *pre-crack* dengan sengkang, balok *supplementary pre-crack* dengan sengkang, balok ECC *pre-crack* dengan sengkang, balok normal tanpa

- sengkang dan tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, serta balok ECC tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*?
3. Berapa jumlah kehilangan massa pada tulangan geser maupun tulangan lentur pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC setelah korosi?
 4. Berapa besar laju, level dan waktu korosi pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan menggunakan metode galvanostatik?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan besar kapasitas geser balok normal dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok ECC dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok normal *pre-crack* dengan sengkang, balok *supplementary pre-crack* dengan sengkang, balok ECC *pre-crack* dengan sengkang, balok normal tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, serta balok ECC tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*.
2. Membandingkan lebar dan pola retak yang terjadi pada balok normal dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok ECC dengan sengkang tanpa *pre-crack*, balok normal *pre-crack* dengan sengkang, balok *supplementary pre-crack* dengan sengkang, balok ECC *pre-crack* dengan sengkang, balok normal tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, balok *supplementary* tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*, serta balok ECC tanpa sengkang dan tanpa *pre-crack*.
3. Menentukan jumlah kehilangan massa pada tulangan geser maupun tulangan lentur pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC setelah korosi.
4. Menentukan besar laju, level dan waktu korosi pada balok normal dan balok ECC dengan menggunakan metode galvanostatik.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan pertimbangan mengenai komposisi campuran optimum balok konvensional, balok *supplementary*, maupun ECC.
2. Sebagai bahan pertimbangan perencanaan kapasitas geser balok khususnya di lingkungan yang mudah terjadi korosi.
3. Sebagai kontribusi pertimbangan perhitungan geser balok yang menggunakan sengkang maupun tanpa sengkang.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Balok yang digunakan adalah balok tinggi (*deep beam*) normal, *supplementary* dan *engineered composite cement* (ECC) dengan mutu f_c' 50 Mpa dengan ukuran 200x10x20 cm dan 10010x20 cm.
2. Kadar NaCl untuk mempercepat proses korosi tulangan adalah sebesar 3,5%.
3. Material yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - Semen yang digunakan adalah *ordinary portland cement* (OPC)
 - *Fly ash* kelas F sebanyak 20% dari berat total semen.
 - *High range water reducer* (HRWR) Tamcem 60 RA
 - Serat *polyvinyl alcohol* (PVA) dengan panjang serat 8 mm.
 - Tulangan lentur menggunakan tulangan baja ulir diameter 10 mm dan tulangan geser menggunakan tulangan sengkang polos diameter 8 mm.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Beton Berserat (*Fiber Reinforced Concrete*)

Beton Berserat (*fiber reinforced concrete*) merupakan jenis beton yang terbuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air dan sejumlah serat yang tersebar secara acak dalam matriks campuran beton. ACI Committee 544 (2002) menggolongkan jenis-jenis serat beton yaitu:

- Serat logam contohnya serat baja karbon atau serat baja tahan karat
- Serat sintetis contohnya *acrylic, aramid, nylon, polyester, polypropylene, polyvinyl alcohol* dan *carbon*
- Serat kaca (*glass fibre*)
- Serat alami contohnya serat ijuk, bambu, rami, ampas kayu, jerami dan sabut kelapa.

Perilaku beton berserat ditentukan oleh beberapa faktor berupa sifat fisik matriks dan serat, pengaruh panjang dan diameter serat, ukuran maksimum matriks, kontribusi serat terhadap peningkatan kuat lentur beton serta daktilitas. Hannant, 1978 mengungkapkan bahwa tegangan serat rata-rata adalah dua hingga tiga kali lebih besar dibandingkan tegangan runtuh matriks sehingga menyebabkan beton akan retak sebelum kuat tarik maksimum serat tercapai. Pengaruh panjang dan diameter (l/d) serat juga akan mempengaruhi lekatan antara serat dengan matriks. $l/d > 100$ memiliki lekatan beton lebih besar dibandingkan serat pendek dengan $l/d < 50$. Pada serat dengan $l/d < 50$, menyebabkan serat akan mudah tercabut sehingga kuat tarik maupun kuat lentur beton akan semakin kecil. Selain itu, ukuran maksimum agregat akan mempengaruhi distribusi dan kuantitas serat yang digunakan. Ukuran agregat maksimum 20 mm dan disarankan < 10 mm supaya serat dapat tersebar secara merata dan menghindari terbentuknya rongga. Kontribusi serat terhadap peningkatan kuat lentur beton dipengaruhi oleh volume fraksi dan aspek l/d .

Salah satu contoh beton berserat yaitu *high performance fibre reinforced cementitious composite* (HPFRCC) yang merupakan material dengan karakteristik

strain hardening di bawah tegangan tarik uniaksial karena diperkuat oleh serat-serat pendek (Japan Society of Civil Engineers, 2008). Contoh utama dari HPFRCC adalah *engineered cementitious composite* (ECC) dengan penggunaan serat *polyvinyl alcohol* (PVA). Perilaku tegangan tarik uniaksial pada saat setelah retakan pertama HPFRCC menunjukkan mekanisme yang hampir sama dengan perilaku *strain hardening* baja.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Horikoshi et al., 2006 menunjukkan bahwa PVA memiliki kemampuan mengikat matriks semen lebih kuat dibandingkan serat *polypropylene*. Kombinasi antara kuat lekat, ketahanan serta modulus yang tinggi pada PVA menghasilkan tingginya kuat tarik dan lentur pada beton bertulang konvensional. PVA juga menunjukkan ketahanan yang tinggi pada saat dilakukan perendaman dalam air panas bersuhu 80°C dan alkali dibandingkan dengan serat *polyester*, *alkali resistant (AR) glass fibre* dan *electrical (E) glass fibre*. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa jika PVA dibakar, akan menghasilkan air dan karbon dioksida yang aman bagi lingkungan. Hal ini disebabkan karena PVA hanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen.

2.2 *Engineered Cementitious Composite (ECC)*

Berbagai penelitian mengenai beton mutu tinggi telah banyak digunakan untuk aplikasi struktural selama beberapa dekade terakhir. Namun, sebagian besar bahan material yang digunakan menyebabkan beton menjadi rapuh seiring meningkatnya pembebanan sehingga diperlukan pengembangan material komposit yang memiliki daktilitas tinggi pada aplikasi struktural (Li, 1983). Beberapa tahun terakhir, Universitas Michigan telah melakukan penelitian mengenai material komposit yang kemudian dikenal sebagai *engineered cementitious composite* (ECC). Material ini memiliki karakteristik yang mirip dengan beton mutu sedang sampai tinggi namun memiliki kapasitas regangan tarik lebih dari 1%. Material penyusun ECC terdiri dari air, semen, pasir, serat dan bahan aditif umumnya serta menggunakan serat. Agregat kasar tidak digunakan sebagai material dalam ECC karena cenderung mempengaruhi daktilitas. ECC menggunakan rasio air dan semen (*w/c*) maksimum 0,5. Tidak seperti jenis beton berserat lainnya, ECC menggunakan serat dengan jumlah yang lebih sedikit

dengan volume maksimum 2%. Oleh karena itu, ECC juga bisa tergolong ekonomis karena penggunaan serat yang relatif sedikit. Berbagai jenis serat dapat diaplikasikan pada ECC namun komposisi yang digunakan melalui pertimbangan mikromekanik tetap harus dilakukan. Hal ini berarti serat, matriks semen dan ikatan antara permukaan serat dengan material lain harus memiliki kombinasi yang benar agar mencapai perilaku ECC dengan kapasitas regangan tarik melebihi beton konvensional.

Retak pertama pada ECC terjadi akibat meningkatnya tegangan yang diikuti oleh regangan kemudian memberikan respon tarik bagi serat sehingga menjadikan kurva tegangan regangan ECC memiliki bentuk yang mirip daktilitas baja. ECC juga tetap menunjukkan perilaku elastis sekalipun berada dalam pembebanan geser yang besar. Daktilitas ECC walaupun dengan volume serat maksimum 2% terjadi karena kesesuaian unsur-unsur komposit. Sifat-sifat serat berdasarkan panjang, diameter, kekuatan, modulus elastisitas dan lain-lain, serta sifat-sifat semen berdasarkan kekuatan dan modulus elastisitas yang dapat dikombinasikan dan dikontrol melalui analisis mikromekanis menyebabkan terjadinya ikatan dan gesekan yang bersesuaian sehingga menjadikan ECC sebagai material komposit daktil yang tepat dalam aplikasi struktural.

Li et al., 1994 dengan hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kapasitas regangan tarik ECC lebih dari 3% dan lebar retakan kurang dari 100 μm sedangkan lebar retak rata-rata lapisan ECC di bagian bawah balok akibat beban layan adalah sebesar 0,1 mm. Regangan yang dihasilkan ECC adalah 3-5% dibandingkan beton konvensional 0,01% dan 0,02-0,06% *reactive powder concrete* (Zych, 2014). Yang, Lepech, Yang, & Li, 2009 memberikan rasio proporsi massa campuran ECC yaitu semen : *fly ash* : *silica sand* : air adalah 1 : 1,2 : 0,8 : 0,55. Superplasticizer yang digunakan adalah sebanyak 3% dari berat semen, serta serat PVA dengan panjang 12 mm dan diameter 30 μm adalah sebanyak 2%. *Fly ash* yang digunakan adalah kelas F menurut ASTM C618 dengan kandungan minimal 70% $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dan maksimum sulfat SO_3 serta memiliki kehalusan tidak boleh melebihi 34%. Jumlah *fly ash* yang banyak dengan partikel lebih kecil dari semen dapat memberikan keseragaman pada matriks semen. Sedangkan penambahan serat dapat meningkatkan plastisitas

beton. Zych, 2014 mengungkapkan bahwa ECC memiliki volume campuran semen dan campuran serat yang rendah sehingga menghasilkan daktilitas tinggi, kuat tarik yang tinggi serta kemampuan menyembuhkan diri (*self healing*). Ukuran partikel material-material ECC tidak melebihi 200 μm dengan semen 1-100 μm , *fly ash* 1-45 μm , serta pasir hingga 200 μm .

Zych, 2014 dalam penelitiannya menemukan bahwa penggunaan PVA 12 mm dalam ECC menghasilkan lebar retak kurang dari 60 μm yakni sekitar setengah ukuran diameter rambut manusia setelah mengalami tegangan. Serat pada ECC hanya meningkatkan resistansi terhadap retak beton tanpa mempengaruhi daktilitas. Serat *polyvinyl alcohol* (PVA) merupakan serat yang terbuat dari polimerisasi vinil asetat menjadi polivinil asetat PVAc (Horikoshi et al., 2006). PVA pertama kali diteliti di Jepang pada tahun 1939, kemudian mulai diproduksi sebagai fiber organik sejak tahun 1950. Sejak saat itu PVA banyak diaplikasikan pada bidang industri, pertanian, perikanan dan sebagainya. PVA memiliki kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan serat *polypropylene*, *nylone* maupun *polyethylene* yaitu 880-1600 MPa, modulus young 25-40 GPa, perpanjangan 6-10% dan massa jenis 1,3 g/cm^3 . Jenis serat PVA halus yaitu RM182 telah diaplikasikan pada atap serat semen sebagai pengganti asbes. Sedangkan serat PVA yang lebih kasar telah banyak digunakan sebagai lapisan terowongan, lapisan lantai industri, *roadbed overlay* dan berbagai jenis *shotcrete*. Jenis serat PVA terbaru yang digunakan adalah jenis REC yaitu serat yang bersifat daktil, salah satu contohnya adalah jenis REC15 yang diaplikasikan pada mortar dan digunakan juga pada *engineered cementitious composite* (ECC). REC15 memiliki diameter 0,04 mm, kuat tarik 1600 MPa, modulus young 37 GPa serta perpanjangan serat mencapai 6%.

ECC telah diaplikasikan pada pembangunan infrastruktur di beberapa tempat seperti bendungan Mitaka Hiroshima Jepang, dinding penahan tanah di Jepang, *coupling beams* bangunan bertingkat di Jepang, sebagai tambalan dek jembatan di AS dan sebagai pelat penghubung pada dek jembatan *Grove Street* di Michigan AS. Sifat *self healing* ECC menjadikannya sebagai material yang ramah lingkungan, memiliki koefisien permeabilitas yang rendah, tahan terhadap cuaca panas dan memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi. *Self healing* dapat dilakukan

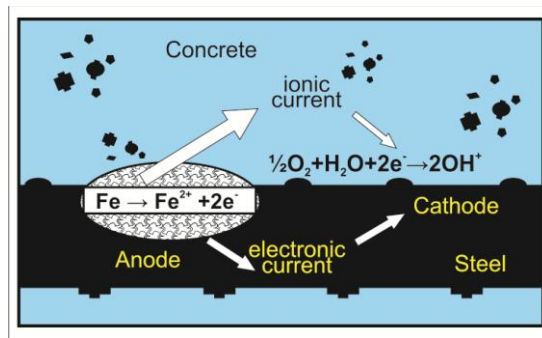
oleh ECC pada temperatur -14°C hingga 28°C bahkan dapat juga terjadi pada temperatur tinggi 200°C hingga 800°C . Hal ini disebabkan oleh *polyvinyl alcohol water-soluble films* yang bersifat mudah terdegradasi oleh air sehingga digunakan sebagai bahan baku pembuatan beton (Kewalramani, Mohamed, & Syed, 2017). Ketahanan termal dari serat *polyvinyl alcohol* (PVA) dalam ECC berada pada suhu 90°C hingga 250°C . Kekuatan tarik pada ECC akan berkurang sekitar 8% setelah pemanasan awal pada temperatur 90°C dan semakin berkurang sebesar 83% pada temperatur 145°C . Sedangkan pada temperatur 220°C hingga 250°C serat PVA akan meleleh.

Kim, Y., Kong, H. and Li, V., 2003 dalam penelitiannya menemukan bahwa komposisi ECC yang optimal berdasarkan pengujian *micromechanical* adalah rasio air dan semen (w/c) = 0,46 sedangkan rasio pasir silika dan semen (s/c) = 0,8 menggunakan diameter serat PVA (d_f) = 39 mm, volume serat (V_f) = 2% dan panjang serat = 8 mm.

2.3 Korosi

Korosi merupakan reaksi kimia atau elektrokimia antara material (biasanya terjadi pada logam) dengan lingkungannya sehingga menyebabkan kerusakan material dan sifat-sifatnya (Vavpetič, 2008). Korosi tulangan merupakan salah satu bentuk serangan utama yang terjadi pada beton bertulang. Hal ini terjadi karena korosi dapat membentuk karat pada tulangan, menghasilkan lubang pada permukaan tulangan serta mengurangi mutu tulangan akibat berkurangnya luas penampang tulangan. Pada saat terjadi korosi pada tulangan, pembentukan karat akan menyebabkan hilangnya ikatan antara tulangan dan beton kemudian terjadi pengelupasan lapisan permukaan beton (delaminasi) hingga mengakibatkan terjadinya kegagalan struktur (*spalling*).

Korosi yang terdiri dari oksida dan hidroksida di pori-pori beton sekitar tulangan baja dapat menghasilkan keretakan bahkan *spalling* pada beton (Shi, Yang, & Liaw, 2017). Adapun reaksi pada saat terjadi korosi dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.

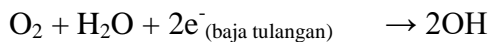


Gambar 2.1 Reaksi Kimia Anoda dan Katoda pada Permukaan Baja Tulangan yang Menyebabkan Terjadinya Korosi (Vavpetič, 2008)

Menurut Vavpetič, 2008, reaksi kimia tulangan baja yang teroksidasi pada bagian anoda (kutub negatif) saat terjadinya korosi adalah sebagai berikut :



Sedangkan reaksi kimia yang terjadi pada bagian katoda (kutub positif) adalah sebagai berikut :



Elektron yang dihasilkan dari reaksi kimia di atas diangkut oleh air yang berperan sebagai elektrolit. Laju korosi dikendalikan oleh banyak faktor seperti kandungan total ion klorida, tingkat pH, ketersediaan oksigen, kadar air, suhu dan sebagainya.

Francois dkk, 1999 membagi tahapan korosi dalam empat bagian yaitu inkubasi, inisiasi, induksi dan propagansi. Selama tahapan inkubasi, retakan pada arah melintang disebabkan oleh beban lentur sehingga memungkinkan ion klorida untuk masuk ke dalam beton. Oleh karena itu, tulangan baja yang akan kehilangan volume terlebih dahulu adalah tulangan dalam arah melintang. Korosi yang terjadi selalu dimulai pada daerah sekitar retak lentur, berapapun lebar beton. Tahapan inisiasi dimulai saat konsentrasi ion klorida pada saat terjadi retak lentur yang memecah permukaan beton. Tulangan baja yang tidak terlindungi bertindak sebagai anoda sementara yang terlindungi beton bertindak sebagai katoda. Oleh karena daerah anoda dan katoda terpisah, tulangan baja terkorosi dalam bentuk *macrocell* yaitu masuknya ion klorida melalui retak lentur pada beton. Ion klorida

yang masuk mengisi retak-retak lentur pada beton hingga mencapai tulangan baja. Tahapan induksi yang terjadi di sini berlangsung sangat lambat karena dibatasi oleh reaksi katoda. Penetrasi klorida yang terjadi akan semakin meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian diikuti oleh tahapan propagansi yaitu kerusakan struktur beton bertulang yang terjadi akibat menyebarnya korosi. Zhao, Yu, Hu, & Jin, 2012 menyatakan bahwa korosi yang terjadi pada tulangan baja tidak akan menembus hingga ke permukaan beton sebelum retakan tersebut sampai pada permukaan beton.

Korosi yang terjadi pada beton bertulang akan sulit dipantau secara visual jika terjadi dalam waktu singkat. Korosi umumnya dapat diketahui jika struktur beton bertulang telah mengalami keretakan bahkan *spalling*. Saat ini telah ditemukan beberapa metode untuk mempercepat dan memantau terjadinya korosi pada beton bertulang seperti metode pengukuran rangkaian potensial terbuka (*open circuit potential*), metode pengukuran potensial permukaan (*surface potential*), pengukuran resistivitas beton, pengukuran resistensi polarisasi linier, *tafel extrapolation*, metode galvanostatik (*galvanostatic pulse method*), spektroskopi impedansi elektrokimia, analisis harmonik, analisis kebisingan, *embeddable corrosion monitoring sensor*, pengukuran ketebalan permukaan, *ultrasonic pulse velocity technique*, pengukuran radiografi gamma x-ray, *infrared thermograph electrochemical* dan inspeksi visual (Velu, 2014).

Korosi tulangan pada beton terjadi dengan proses yang lambat karena adanya lapisan beton sebagai pelindung tulangan sehingga dibutuhkan waktu yang cukup lama untuk terjadinya proses inisiasi dan induksi (Ahmad, 2009). Oleh karena itu diperlukan metode percepatan agar proses korosi dapat diamati dalam rentang waktu yang diinginkan. Metode percepatan dan pengukuran korosi pada beton bertulang memiliki beberapa keuntungan seperti penghematan waktu dan uang, serta dapat mengendalikan laju korosi. Namun Ahmad, 2009 juga menjelaskan bahwa hilangnya massa tulangan baja pada saat dilakukan metode percepatan proses korosi tidak sama dengan kondisi aktual akibat korosi yang terjadi secara alami. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor seperti kebutuhan energi listrik untuk memulai proses korosi, ketahanan beton, komposisi tulangan, sifat mineral dalam beton dan sebagainya.

2.4 Metode Galvanostatik (*Galvanostatic Pulse Method*)

Secara umum, metode galvanostatik dapat dicirikan sebagai metode dengan memanfaatkan amplitudo kecil, interval arus listrik pendek pada kutub anoda serta menggunakan bantuan elektroda pada permukaan beton untuk menganalisis potensial pada tulangan baja (Sathiyarayanan, Natarajan, Saravanan, Srinivasan, & Venkatachari, 2006). Metode galvanostatik adalah metode yang sering digunakan dalam percepatan maupun pengukuran korosi pada beton bertulang. Metode ini memiliki keunggulan yaitu dapat menentukan korosi yang terjadi pada tulangan baja secara tepat. Galvanostatik sering digunakan pada laboratorium maupun lapangan terutama pada beton dengan selimut yang tebal. Kondisi optimal metode ini adalah pada saat durasi pulsa 10 s dan arus anoda 50 μA (Luo et al., 2018).

Arus yang dihasilkan oleh anoda pada tulangan baja dihitung oleh elektroda yang ditempatkan pada permukaan beton. Arus I_{app} yang diterapkan berkisar antara 5-100 A dengan durasi waktu 5-30 detik. Perubahan elektrokimia yang terjadi pada tulangan baja dicatat oleh elektroda.

Pada saat diterapkan metode galvanostatik, diperlukan perhatian khusus pada suhu dan kelembaban lingkungan pengujian. Benda uji harus senantiasa berada dalam keadaan basah untuk memastikan pengukuran dilakukan secara akurat.

Berdasarkan pengujian laboratorium maupun lapangan yang dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban, maka arus korosi I_{corr} dan kondisi tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Arus Korosi I_{corr} dan Kondisi Tulangan

Corrosion Curent (I_{corr})	Condition of The Rebar
$I_{corr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Passive condition
$I_{corr} 0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Low to moderate corrosion
$I_{corr} 0.5 - 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Moderate to high corrosion
The device without sensor control has the following recommended interpretation	
$I_{corr} < 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	No corrosion expected
$I_{corr} 0.2 - 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosion possible in 10-15 years
$I_{corr} 1.0 - 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosion possible in 2-10 years
$I_{corr} > 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Corrosion expected in 2 years or less

Sumber: Velu, 2014

Massa tulangan baja yang hilang akibat korosi dapat dihitung dengan metode *gravimetric weight loss* yaitu tulangan baja direndam selama 25 menit dalam larutan pembersih dari campuran 1000 mL HCl dengan 50 gr SnCl_2 dan 20 gr Sb_2O_3 untuk mengangkat karat pada tulangan, selanjutnya tulangan ditimbang. Setelah ditimbang, maka dihitung menggunakan Persamaan 2.1

$$M_{ac} = \frac{(W_i - W_f)}{\pi DL} \quad (2.1)$$

dengan:

M_{ac} = massa actual tulangan baja setelah terkorosi (gr/cm^2)

W_i = tulangan baja sebelum terkorosi (gr)

W_f = tulangan baja setelah terkorosi (gr)

D = diameter tulangan baja (cm)

L = panjang tulangan baja (cm)

Sedangkan persentase kehilangan massa tulangan baja dapat dihitung dengan Persamaan 2.2

$$\rho = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \quad (2.2)$$

Selain itu, kebutuhan arus I_{app} yang diterapkan pada metode galvanostatik dapat menggunakan Persamaan 2.3 hukum Faraday berikut ini.

$$I_{app} = \frac{M_{ac} F}{vt} \quad (2.3)$$

dengan:

- F = konstanta Faraday (96500 C)
- v = berat atom valensi baja (27,925 gr)
- t = rentang waktu terjadinya korosi (sec)

Level korosi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i} \quad (2.4)$$

Korelasi untuk menentukan kehilangan massa tulangan sebenarnya dengan kehilangan massa teoritis adalah seperti pada Persamaan 2.5.

$$Actual\ mass\ loss = 0,465 \times theoretical\ mass\ loss - 0,562 \quad (2.5)$$

Perhitungan laju korosi (*corrosion rate*) menurut Rohrbach Cosasco System, 1999 dapat dilihat pada Persamaan 2.6.

$$CR = \frac{22300 \times M_{ac}}{dAT} \quad (2.6)$$

dengan:

- CR = *corrosion rate* (mills/year)
- d = berat jenis tulangan (7,85 gr/cm³)
- A = luas tulangan (in²)
- T = lama waktu tulangan terpapar korosi (hari)

Substitusi pengukuran untuk nilai 22300 dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Nilai Substitusi *Corrosion Rate*

Satuan Pengukuran	Nilai Substitusi
<i>Corrosion rate</i> (mm/year), <i>Area</i> (in ²)	566
<i>Corrosion rate</i> (mils/year), <i>Area</i> (cm ²)	143700
<i>Corrosion rate</i> (mm/year), <i>Area</i> (cm ²)	3600

Sumber: Rohrback Cosasco System, 1999

Kategori laju korosi (*corrosion rate*) menurut Jones, 1996 dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kategori Laju Korosi (*Corrosion Rate*)

CR	mil/year	mm/year	µm/year	nm/hour	pm/second
Amat baik	< 1	< 0,025	< 25	< 2,89	< 0,8
Sangat baik	1-5	0,025-0,1	25-100	2,89-10	0,8-4,0
Baik	5-20	0,1-0,5	100-500	10-50	4-16
Sedang	20-50	0,5-1,0	500-1000	50-150	16-40
Buruk	50-200	1-5	1000-5000	150-500	40-161
Sangat buruk	> 200	> 5	> 5000	> 500	> 161

Sumber: Jones, 1996

Kestabilan korosi atau waktu perambatan korosi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.7 berdasarkan model Bazant dan Morinaga (Ranjith et al., 2016).

$$t_{corr} = \frac{Q_{cr}}{j_r} \quad (2.7)$$

dengan:

t_{corr} = waktu perambatan korosi (tahun)

Q_{cr} = jumlah korosi saat terjadi retak pada beton ($\times 10^{-4}$ gr/cm²)

j_r = laju korosi seketika (gr/m²-s)

Laju korosi seketika dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.8.

$$j_r = \frac{W}{F} i_{corr} \quad (2.8)$$

dengan:

W = berat ekuivalen tulangan (27,925)

F = konstanta Faraday (96500 C)

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

Jumlah korosi pada saat terjadi retak pada beton dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.9.

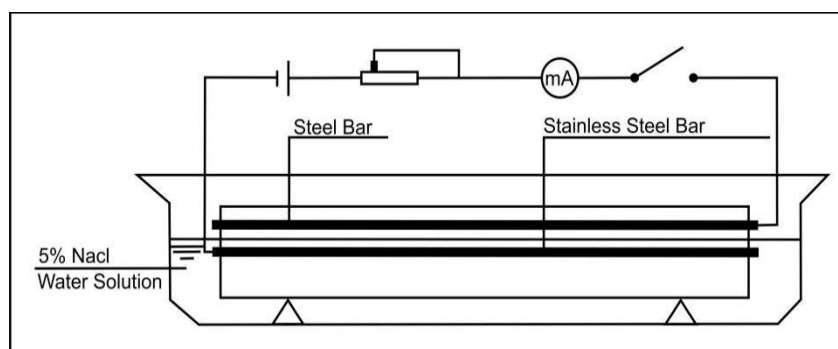
$$Q_{cr} = 0,602D \left(1 + \frac{2C_v}{D} \right)^{0,85} \quad (2.9)$$

dengan:

D = diameter tulangan (mm)

C_v = tebal selimut beton (mm)

Metode percepatan korosi yang dilakukan Yuan, Ji, & Shah, 2007 yaitu dengan menggunakan iklim buatan yang dikendalikan oleh sistem komputer. Suhu pada iklim buatan ini adalah sebesar 40°C dengan kelembaban relatif tinggi 80% dan menggunakan siklus basah-kering secara berulang. Siklus basah-kering yang dilakukan terdiri dari penyemprotan air yang mengandung garam (larutan NaCl 5%) selama satu jam serta menggunakan sinar infra merah selama tujuh jam. Hasil penelitian menunjukkan adanya lebar retak pada beton sebesar 0,8 mm selama tiga bulan. Skema metode galvanostatik yang digunakan oleh Yuan dkk dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Metode Galvanostatik Percepatan Korosi (Yuan, Ji, & Shah, 2007)

2.5 Beton *Pre-crack*

Chen, 1982 dan Kwak et al, 1990 membagi respon pada struktur beton bertulang menjadi tiga yaitu tahap elastis (*uncrack*), perambatan retak (*crack propagation*), serta tahapan saat tulangan leleh dan terjadi kehancuran beton pada daerah tekan. Bentuk linier terjadi pada tahap awal pembebanan sampai terbentuknya retak pertama. Setelah itu terjadi retak hubungan beban perpindahan dalam bentuk nonlinier.

Keretakan beton disebabkan oleh beberapa faktor seperti akibat proses internal atau proses kimia yang terjadi pada beton, faktor eksternal, kesalahan desain, serta faktor-faktor seperti penggunaan struktur yang tidak tepat, faktor atmosfer dan sebagainya. Faktor internal disebabkan karena adanya susut plastik (*plastic shrinkage*), migrasi air pada permukaan beton (*plastic settlement*), reaksi ekspansif berupa korosi atau serangan alkali maupun sulfat pada tulangan baja, serta faktor hidrasi semen (*thermal variation*). Sedangkan faktor eksternal disebabkan karena lendutan (*displacement*), temperatur, susut maupun rangkakan (Araújo, 2016).

Pada ASTM D5045-14, rasio panjang *pre-cracked* dan lebar (a/W) spesimen untuk pengujian *three point bending* adalah $0,45 < a/W < 0,55$. Retakan pada beton dapat dibagi menjadi retakan mikro $w < 0,05$ mm, retakan sedang $0,05 \leq w \leq 0,4$ mm dan retakan makro $w > 0,4$ mm (Araújo, 2016). Beton yang memiliki retakan lebih besar dari 0,5 mm disarankan untuk dilakukan perbaikan. Sedangkan lebar retakan pada beton yang ditimbulkan oleh korosi tulangan baja adalah 0,005-0,2 mm (Amesu, 2014).

Lebar retak balok bertulang menurut ACI 224. 2-92 setelah mengalami pembebanan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Lebar Retak Balok Bertulang (ACI 224. 2R-92)

Exposure condition	Crack width	
	in	mm
Dry air or protective membrane	0,016	0,41
Humidity, moist air, soil	0,012	0,30
Deicing chemicals	0,007	0,18
Seawater and seawater spray, wetting and drying	0,006	0,15
Water-retaining structures	0,004	0,10

Sejauh ini, penelitian mengenai *pre-crack* pada beton bertulang belum banyak dilakukan. Pimanmas, A and Maekawa, 2001 juga dalam penelitiannya mengenai keretakan beton akibat diberikan *pre-crack* pada balok beton bertulang dengan pembebanan *four point bending* kemudian diubah menjadi *three point bending* menemukan bahwa pola keretakan yang menyebabkan keruntuhan geser pada balok beton bertulang tanpa diberikan *pre-crack* adalah dalam arah diagonal. Keretakan diagonal terjadi pertama kali di bagian *web* balok dekat dengan pusat daerah geser kemudian menyebar ke titik beban lalu menuju ke daerah tumpuan. Sedangkan pola keretakan yang terjadi pada balok beton bertulang yang diberikan *pre-crack* akan membentuk pola *Z-crack*. Pola vertikal yang dihasilkan oleh *pre-crack* dapat mencegah terjadinya perambatan retak diagonal sehingga balok tersebut menghasilkan kapasitas geser yang lebih besar dibandingkan balok tanpa *pre-crack*.

Yu, François, Dang, L'Hostis, & Gagné, 2015 mencatat dalam penelitiannya mengenai metode *wet-dry corrosion* selama 19 bulan menghasilkan bahwa pada jumlah konsentrasi klorida 1,2% hingga 1,5% dari berat semen pada balok yang diberikan *pre-crack* dapat menyebabkan kehilangan diameter tulangan tekan maksimum sebesar 35% serta kehilangan luas penampang tulangan tarik sebesar 1,8%.

2.6 Kekuatan Geser Balok Tinggi (*Deep Beam*)

Komponen struktur beton bertulang dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu Bernoulli *region* (*B-region*) dan *discontinue region* (*D-region*). *B-region* merupakan komponen struktur dimana teori balok bertulang konvensional dapat diterapkan termasuk distribusi regangan linier dan sebagainya. Sedangkan *D-region* merupakan komponen struktur balok yang berada pada kondisi terganggu atau diskontinu serta teori balok bertulang konvensional tidak dapat diterapkan (Cook & Mitchell, 1991). Diskontinu pada *D-region* terjadi karena adanya lubang pada balok, terjadi perubahan penampang atau arah, maupun diskontinu statik pada daerah di dekat beban terpusat maupun tumpuan. Oleh karena pada balok dengan *D-region* tidak dapat menerapkan teori balok konvensional, maka diperlukan metode *strut and tie model* (STM) untuk menganalisa dan menghitung tulangan tarik *d-region* pada balok tinggi (*deep beam*).

Balok tinggi (*deep beam*) merupakan balok yang mengalami pembebanan dengan rasio panjang bentang L_n terhadap tinggi $h \leq 4$ serta rasio panjang bentang geser a dan tinggi $h \leq 2$ (ACI 2008). Sedangkan Eurocode 2 (EC2) mendefinisikan balok tinggi sebagai balok dengan $a/d < 3$. Balok tinggi umumnya digunakan sebagai elemen struktur penyalur beban seperti *transfer girder*, *pile cap*, *foundation wall* dan struktur lepas pantai.

Perilaku balok tinggi (*deep beam*) memiliki perbedaan yang signifikan dengan balok konvensional sehingga memerlukan pertimbangan khusus dalam desain, analisis dan perincian tulangan karena cenderung dikendalikan oleh geser (Patil & Baghban, 2018). Selain itu, kekuatan balok tinggi cenderung jauh lebih besar dari prediksi yang dilakukan dengan persamaan biasa. Lentutan yang terjadi disebabkan karena besarnya tegangan geser sehingga tegangan lentur tidak didistribusikan secara linear. Kekuatan geser yang dihasilkan pada balok tinggi juga 2 hingga 3 kali lebih besar dari hasil prediksi menggunakan persamaan balok konvensional. Beban geser yang terjadi pada balok langsung ditransfer ke tumpuan dengan arah diagonal. Menurut Indian Standard (IS 456;2000), tulangan longitudinal diletakkan pada jarak $0,25D-0,05L$ berdekatan dengan permukaan bawah balok, dengan D adalah kedalaman balok dan L adalah panjang bentang

efektif. Regangan pada garis yang menghubungkan titik pembebanan dan tumpuan berbentuk parabola serta memiliki nilai maksimum pada sumbu netral.

Persamaan ACI 318 untuk mendapatkan kekuatan geser nominal pada balok tinggi dapat dilihat pada Persamaan 2.10

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.10)$$

dengan:

V_c = kekuatan geser yang berasal dari beton (N)

V_s = kekuatan geser yang berasal dari tulangan (N)

$$V_c = \left(3,5 - 2,5 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right) \left(1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho \cdot \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b \cdot d \leq 6 \sqrt{f_c' b_w d} \quad (2.11)$$

dengan:

ρ_w = rasio tulangan longitudinal A_s/bd

M_u = momen terfaktor pada daerah kritisal (Nmm)

V_u = gaya geser terfaktor pada daerah kritisal (N)

f_c = kekuatan tekan beton (MPa)

$$\frac{M_u}{V_u d} \leq 2,5$$

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + \frac{L_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \left(\frac{11 - \frac{L_n}{d}}{12} \right) \right] f_y d \quad (2.12)$$

dengan:

A_v = luas tulangan sengkang arah vertikal (mm^2)

s_v = spasi tulangan arah vertikal (mm)

A_{vh} = luas tulangan sengkang arah horizontal (mm^2)

s_{vh} = spasi tulangan arah horizontal (mm)

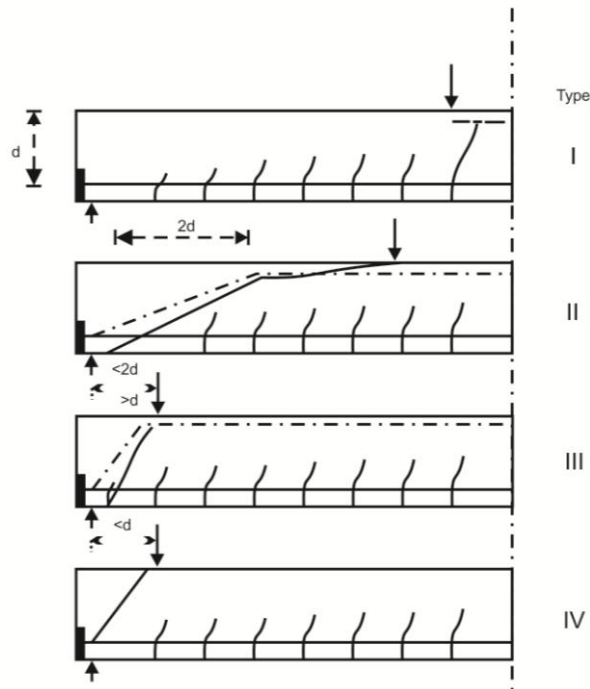
f_y = kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

$$V_n \leq 8 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \Rightarrow \frac{L_n}{d} < 2,0 \quad (2.13)$$

$$V_n < \frac{2}{3} \left(10 + \frac{L_n}{d} \right) \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \Rightarrow 2,0 \leq \frac{L_n}{d} \leq 5,0 \quad (2.14)$$

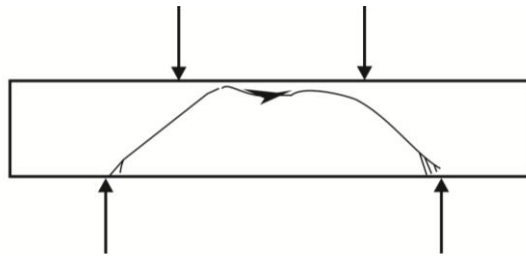
$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.15)$$

Terdapat empat jenis perilaku kegagalan balok beton bertulang tanpa tulangan geser dengan dua pembebanan titik menurut Kani, 1964 dalam (Kong, F.K., Chemrouk, 2002). Perilaku kegagalan ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



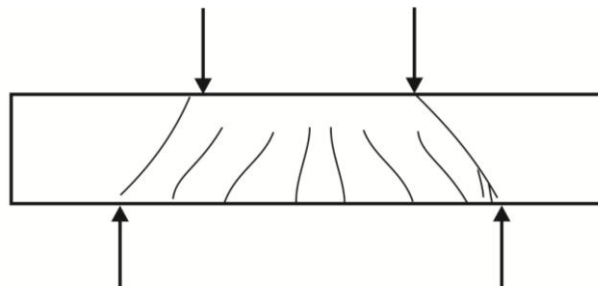
Gambar 2.3 Perilaku Kegagalan Balok Beton Bertulang Tanpa Tulangan Geser (Kani, 1964 dalam Kong, F.K., Chemrouk, 2002)

Berdasarkan Gambar 2.4, balok beton bertulang tipe III dan IV umumnya dianggap mewakili perilaku *deep beam*. Balok tipe III mengalami pembebanan dua titik dengan $a/d = 1,5$ (Leonhardt dan Walther, 1962 dalam Kong, F.K., Chemrouk, 2002). Keretakan miring dimulai pada permukaan bawah balok dekat tumpuan kemudian memanjang ke atas di daerah titik beban dan akhirnya menyebabkan kegagalan daerah tekan di tengah balok. Perilaku kegagalan *deep beam* tipe III dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pada *deep beam* tipe ini menunjukkan bahwa kondisi paling kritis berkembang pada bagian horizontal balok.



Gambar 2.4 Perilaku Kegagalan *Deep Beam* Tipe III (Leonhardt dan Walther, 1962 dalam Kong, F.K., Chemrouk, 2002)

Berbeda dengan tipe III, keretakan pada *deep beam* tipe IV dengan $a/d = 1$ tepat berada pada garis yang menghubungkan antara titik beban dan tumpuan. Biasanya keretakan dimulai dari dalam *web* balok kemudian mengalami peningkatan perambatan keretakan akibat meningkatnya pembebanan hingga menyebabkan keruntuhan akibat tegangan tekan serta perpanjangan keretakan ke arah atas maupun bawah balok di daerah beban dan tumpuan dalam bidang geser. Perilaku kegagalan *deep beam* tipe IV dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Perilaku Kegagalan *Deep Beam* Tipe IV (Leonhardt dan Walther, 1962 dalam Kong, F.K., Chemrouk, 2002)

Kani, 1964 melakukan penelitian yang memprediksi kekuatan geser *d-region* serta rasio lengan geser dan tinggi efektif a/d menggunakan metode STM. Rasio a/d yang digunakan adalah 1 hingga 7. Pada rasio a/d lebih dari 2,5 daerah terganggu berada jauh pada tumpuan dan beban sehingga memiliki sedikit pengaruh pada kapasitas geser balok. Sedangkan pada rasio a/d kurang dari 2,5 kegagalan terjadi akibat adanya daerah *strut* pada beban yang berada dekat dengan daerah *tie* pada tumpuan

Menurut Nawy, 1990, keruntuhan tekan geser (*shear compression*) dapat terjadi pada balok yang memiliki perbandingan lengan geser dan tinggi efektif

(a/d) antara 1 sampai 2,5 untuk beban terpusat. Keruntuhan geser dimulai saat munculnya retak lentur halus pada arah vertikal di tengah bentang yang semakin menjalar. Hal ini disebabkan oleh hilangnya lekatan antara tulangan longitudinal dengan beton di sekitar perletakan kemudian diikuti oleh retak miring yang lebih curam dari pada retak diagonal menuju sumbu netral beton. Kecepatan retak yang menjalar ini akan semakin berkurang akibat hancurnya beton pada tepi tertekan dan adanya tegangan yang terdistribusi.

Menurut Dipohusodo, 1994, kerusakan yang terjadi saat keruntuhan geser pada beton bertulang berada di daerah sepanjang kurang lebih tiga kali tinggi efektif balok yang disebut bentang geser. Retak miring akibat geser di badan balok dapat terjadi tanpa disertai retak akibat lentur di sekitarnya. Jika konsep lebar daerah geser lebih besar dari pada lebar efektif, maka kapasitas geser balok akan semakin menurun dan sebaliknya jika lebar daerah geser lebih kecil dari lebar efektif maka kapasitas geser balok akan semakin meningkat (Lansoght, 2014). Selain itu, rasio panjang bentang geser dan tinggi balok (L_n/h) juga berpengaruh terhadap kapasitas geser. Semakin besar rasio panjang bentang geser dan tinggi balok (L_n/h), maka kapasitas geser yang dihasilkan akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya. Hal ini terjadi karena pada saat rasio panjang bentang geser dan tinggi balok (L_n/h) meningkat, sudut tarik yang terbentuk untuk membawa beban ke tumpuan akan semakin panjang sehingga akan menciptakan lebih banyak retak lentur pada balok (Appiah, 2013).

Pada tahun 1960-an pendekatan desain berdasarkan mekanika keruntuhan pada beton berserat diusulkan oleh Romualdi dan Batson. Namun adanya keterbatasan dalam penggunaan serat hingga saat ini oleh karena diperlukan biaya bahan yang cukup tinggi serta pengetahuan yang terbatas mengenai perilaku aktual serat pada beton bertulang (Shahnewas, Md., Alam, 2014). Pada beton dengan tulangan sengkang yang saling berdekatan akan mengakibatkan adanya rongga-rongga di dalam beton serta buruknya ikatan antara tulangan dan beton. Oleh karena itu, serat yang tersebar secara acak di dalam beton akan dapat membantu meningkatkan kekuatan geser maupun daktilitas beton tersebut. Penggunaan serat dapat membantu meningkatkan perilaku beton pasca-retak yaitu meningkatkan daktilitas dalam matriks beton. De Hanai dan Holanda

menunjukkan bahwa serat dapat menggantikan jumlah sengkang minimum pada beton bertulang. Beberapa faktor yang mempengaruhi kapasitas geser beton berserat adalah:

- Rasio bentang geser dan tinggi efektif (a/d). Narayanan dan Darwish menyatakan bahwa semakin besar a/d , maka kekuatan geser akan semakin menurun.
- Kekuatan tekan beton (f_c'). Khuntia et al., menemukan bahwa semakin besar kekuatan tekan beton, maka kekuatan geser akan semakin besar.
- Rasio tulangan longitudinal (ρ). Li et al., mengungkapkan bahwa kekuatan geser beton akan meningkat saat $\rho \geq 3,6\%$.
- Bentuk serat. Berdasarkan hasil pengujian jenis serat berbentuk kait, berkerut dan polos diketahui bahwa serat dengan bentuk kait dan berkerut menghasilkan kekuatan geser lebih besar dibandingkan bentuk polos. Hal ini disebabkan karena bentuk serat juga mempengaruhi ikatan antar serat.
- Rasio panjang serat dan diameter serat (l_f/d_f). Berdasarkan ACI 544, jika $l_f/d_f \leq 100$ maka akan dapat meningkatkan kekuatan geser beton berserat. Namun jika $l_f/d_f > 100$ maka kekuatan geser beton akan menurun karena serat akan cenderung menggumpal menyerupai bola.
- Volume serat (V_f). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa jika $V_f \leq 1$, maka kekuatan geser betona akan meningkat, dan akan mulai menurun jika $V_f > 1$
- Faktor serat (F). Kekuatan geser beton akan meningkat pada faktor serat yang mencapai 0,75 namun akan menurun jika faktor serat melebihi 0,75.

Penelitian yang dilakukan oleh Yuan et al., 2014 mengenai kapasitas beban balok bertulang, balok ECC dan balok bertulang yang dilapisi 90 mm ECC membuktikan bahwa kapasitas beban ECC 8,8% lebih besar dari balok bertulang sedangkan kapasitas beban balok bertulang yang dilapisi ECC 7,7% lebih besar dari balok bertulang. Selain itu, daktilitas maksimum μ balok bertulang adalah sebesar 3,0 sedangkan daktilitas maksimum balok ECC dan balok yang dilapisi ECC masing-masing sebesar 3,8 dan 2,8. ECC juga memiliki disipasi energi sebesar 400% sehingga dapat disimpulkan bahwa ECC lebih baik dalam hal kapasitas pembebanan, daktilitas dan penyerapan energi.

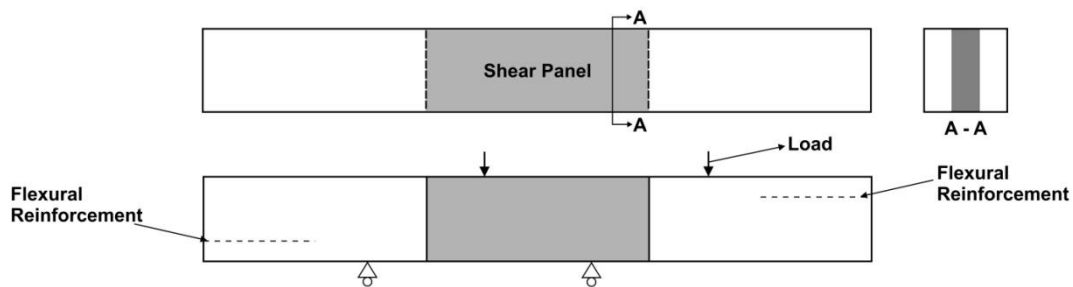
Meng, Lee, & Zhang, 2017 juga melakukan penelitian untuk mengetahui kapasitas geser dari balok konvensional dan balok ECC tanpa sengkang dengan sistem pembebanan *four bending point*. Hasilnya menunjukkan bahwa balok konvensional tanpa sengkang memiliki kapasitas geser sebesar 50,2 kN sedangkan balok ECC 72,8 kN. Ini berarti, ECC memiliki kapasitas geser sebesar 1,5 kali lebih besar dibandingkan balok konvensional. Hal ini disebabkan karena tegangan tarik yang dimiliki oleh serat PVA dengan formasi retak mikro yang mampu menahan geser pada saat pembebanan terjadi.

Sahmaran et al., 2015 melakukan pengujian pada balok NC maupun ECC yang terkorosi. Hasilnya menunjukkan ECC menghasilkan kapasitas menahan beban yang jauh lebih besar hingga 58% dibandingkan NC pada saat level korosi 5% dan 10% namun pada saat mencapai level 15% dan 20%, balok berubah menjadi getas dan mengalami kegagalan geser. Pada saat pengujian awal dengan level korosi 5% dan 10%, NC menghasilkan kekakuan yang lebih yaitu 32%, 14% dan 26% dibandingkan ECC. Namun pada saat level korosi 15% dan 20%, kekakuan NC menurun menjadi 32% dan 28% dibandingkan ECC. Selain itu, lendutan yang dihasilkan NC rata-rata 45% lebih tinggi dibandingkan ECC.

Pengujian kapasitas geser pada balok juga dilakukan oleh Tambusay, Suryanto, & Suprobo, 2018. Pengamatan pada balok dilakukan dengan metode *digital image correlation* (DIC) yaitu kamera digital yang dihubungkan dengan *smartphone* menggunakan WLAN. Kamera diletakkan pada jarak 500 mm dari depan balok. Sebelum dilakukan pengujian, sisi lebar balok dilapisi cat putih kemudian diberikan pola titik-titik secara acak menggunakan spidol permanen ukuran *fine* dan medium pada daerah yang akan diamati perilaku geser, sedangkan sisi sebelah balok akan digambarkan bentuk kotak ukuran 5 x 5 cm agar dapat mempermudah pengamatan serta penggambaran pola keretakan yang terjadi pada daerah geser balok. Hasil pengujian menunjukkan bahwa retak diagonal pertama terjadi pada saat beban mencapai 45 kN dan mengalami kegagalan geser pada saat mencapai beban 64 kN. Ini berarti, retakan pertama akibat geser yang menjadi tanda kegagalan struktur terjadi pada saat mencapai 42,2% dari beban maksimum.

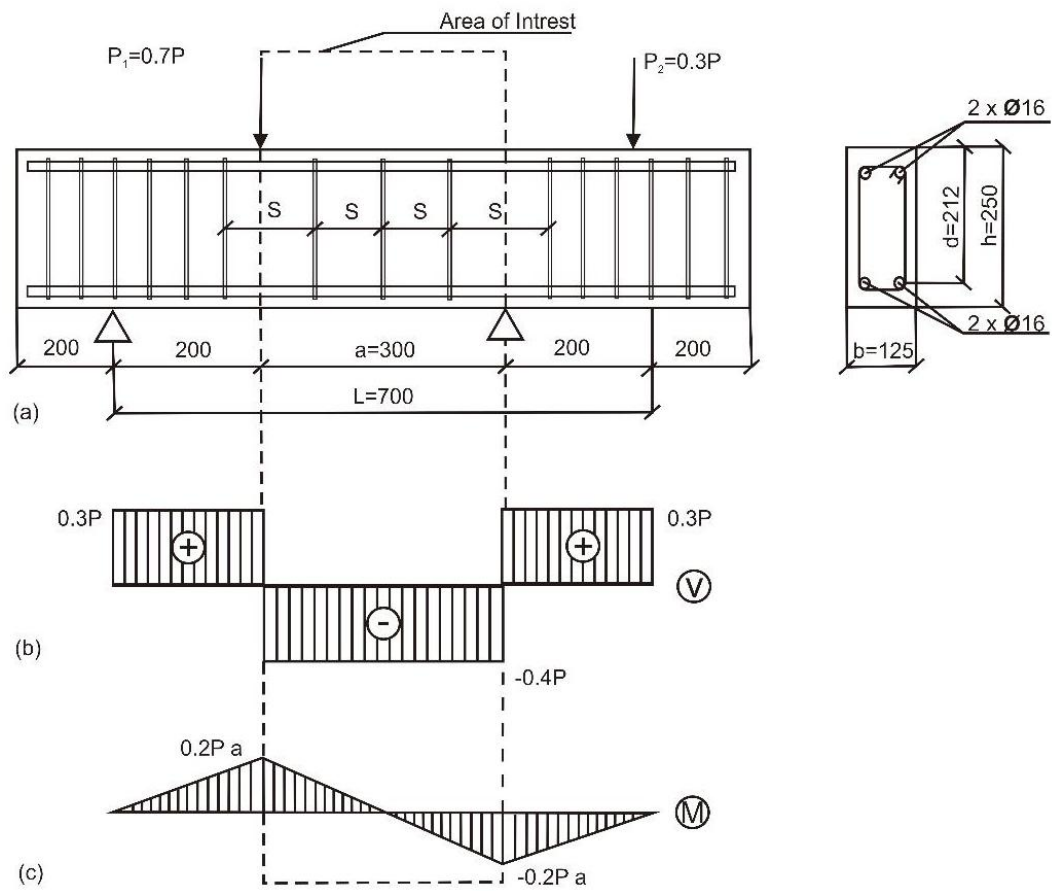
Pada penelitian ini, digunakan pengujian geser menggunakan metode balok Ohno. Metode pengujian ini pertama kali dilakukan di Jepang oleh Ohno

pada tahun 1957 untuk memperkirakan zona geser murni pada balok (Shang, 2006). Konsep ini mewakili keadaan geser murni yang berada di antara dua titik pembebanan dimana momen lentur sama dengan nol. Momen lentur ($P.a/2$) maksimum dan momen lentur minimum adalah nol di antara dua titik pembebanan. Pada saat pola kegagalan balok menjadi tidak pasti, maka kegagalan geser, kegagalan lentur atau kombinasi antara kegagalan geser dan lentur akan terjadi. Kekuatan geser rata-rata balok Ohno diperkirakan sebagai gaya geser pada garis tengah dibagi luas daerah geser. Retak pada balok akan terjadi dalam arah melintang di titik tengah daerah geser. Daerah geser yang terjadi pada balok Ohno diperkirakan berada pada jarak $1/3$ hingga $2/3$ dari ujung balok (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Perkiraan Daerah Geser Balok Ohno (Li et al., 1994)

Paegle & Fischer, 2016 dalam penelitiannya menggunakan konsep Ohno pada balok ECC (Gambar 2.7) dengan tulangan $4\phi 16$ pada jarak 25 mm dari selimut beton menghasilkan retak geser pertama balok ECC lebih kecil 10 kali dibandingkan balok beton bertulang. Selain itu, deformasi balok ECC juga tiga sampai lima kali lebih kecil dibandingkan balok beton bertulang sehingga dapat disimpulkan bahwa balok ECC memberikan ketahanan geser yang lebih baik dan keretakan yang lebih kecil dibandingkan beton bertulang.



Gambar 2.7 Pengujian Geser Balok Ohno (Paegle & Fischer, 2016)

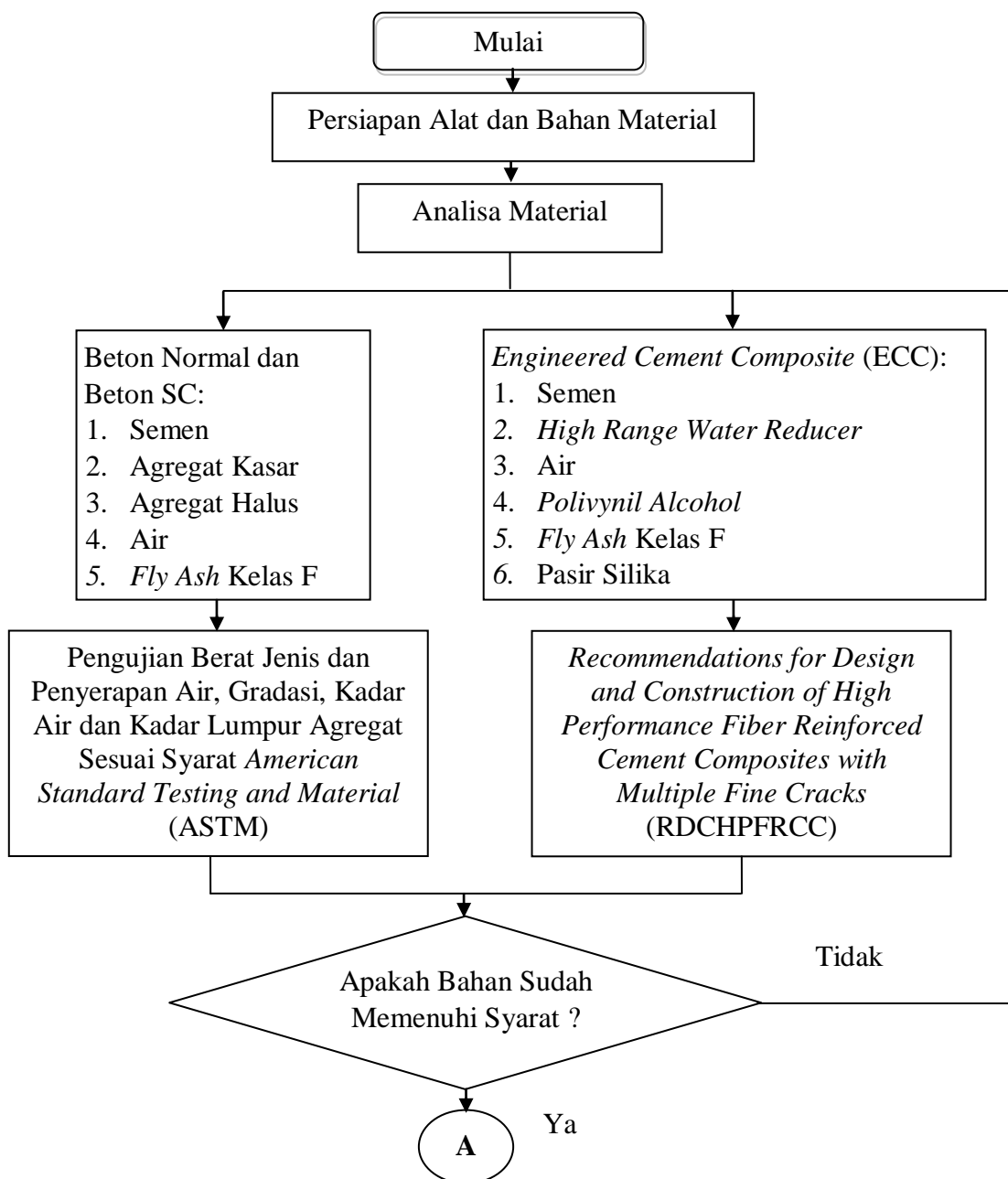
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

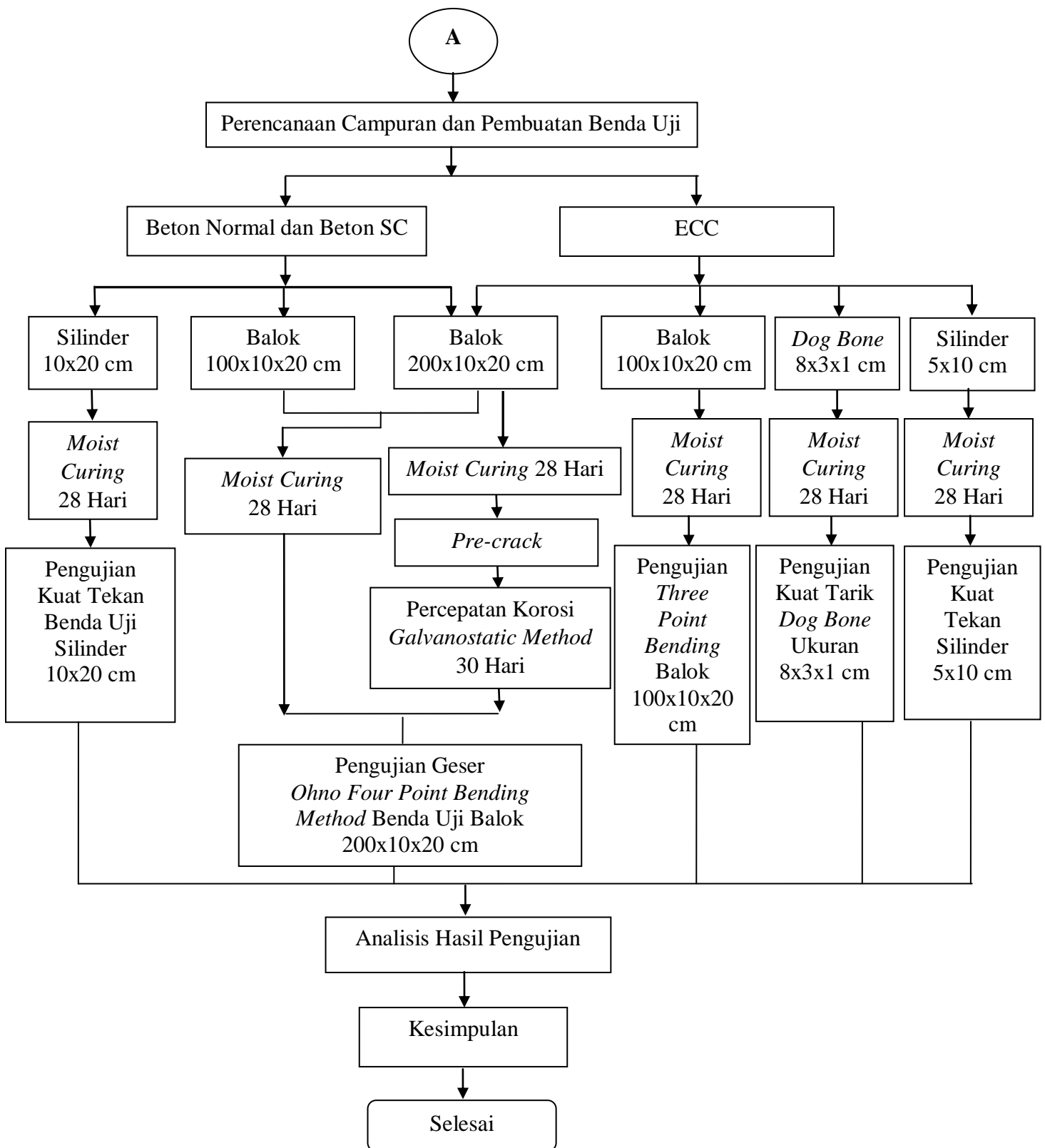
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian yang dilakukan adalah seperti terdapat pada Gambar 3.1 di bawah ini:

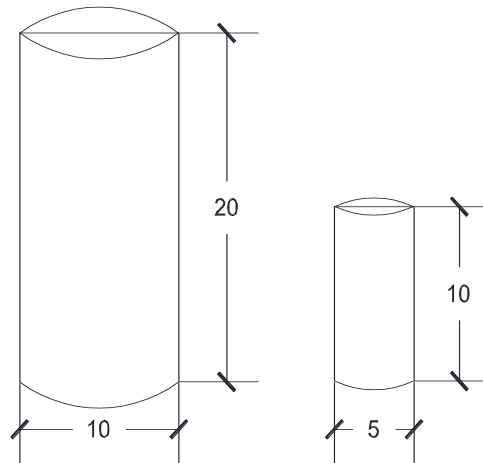




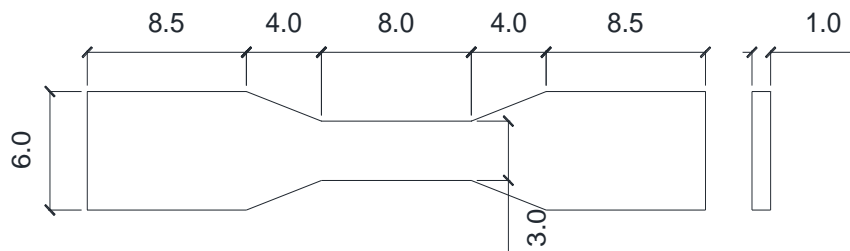
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Dimensi Benda Uji

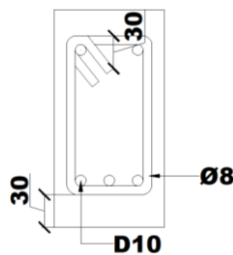
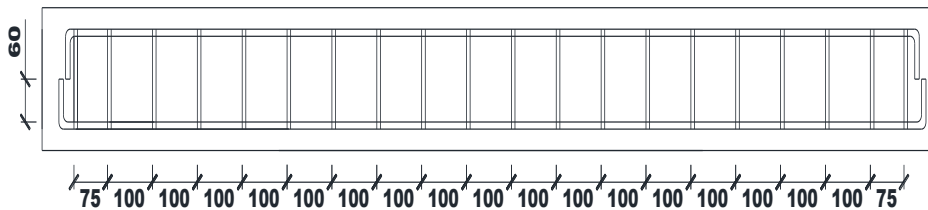
Pada penelitian ini digunakan beberapa benda uji pada masing-masing pengujian antara lain: silinder, *dog bone* dan balok beton bertulang. Adapun dimensi benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



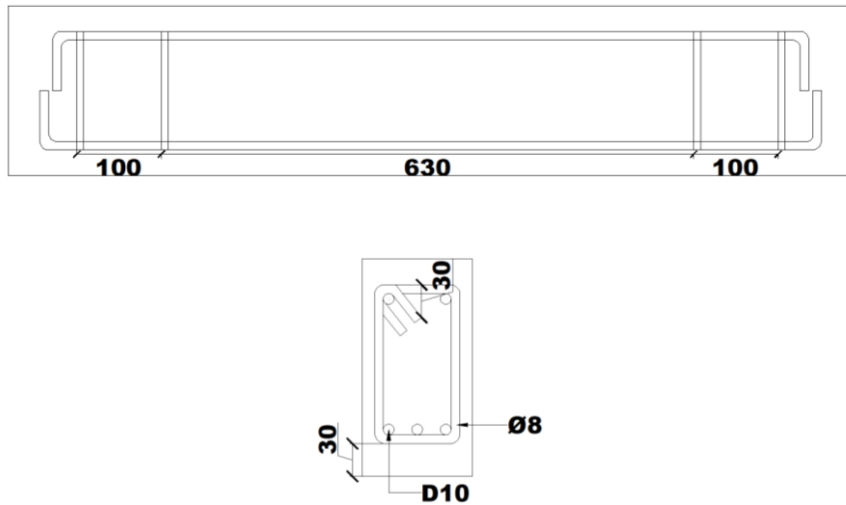
(a) Silinder 10 x 20 cm dan 5 x 10 cm Untuk Pengujian Kuat Tekan



(b) *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm Untuk Pengujian Kuat Tarik



(c) Balok 200 x 10 x 20 cm Untuk Pengujian Geser dan *Pre-Cracked*



(d) Balok 100 x 10 x 20 cm Untuk Pengujian Geser

Gambar 3.2 Dimensi Benda Uji

3.3 Analisa Material

Analisa material dimaksudkan agar benda uji yang digunakan dalam penelitian telah memenuhi persyaratan berdasarkan standar yang digunakan. Analisa material dilakukan berdasarkan persyaratan dari *American Standard Testing and Materials* (ASTM). Hasil analisa material dapat dilihat pada Lampiran 1 hingga Lampiran 4.

3.4 Perencanaan Campuran

3.4.1 Beton Normal

Perhitungan campuran beton (*mix design*) dilakukan berdasarkan *American Concrete Institute*(ACI 211). Rasio komposisi material beton normal dapat dilihat pada Tabel 3.1. Perhitungan komposisi material beton normal terdapat dalam Lampiran 5.

Tabel 3.1 Rasio Komposisi Material Beton Normal

Material	Rasio Material
C	1,00
S/C	1,38
CA/C	3,66
W/C	0,44

Keterangan:

<i>C</i>	= <i>Cement</i>
<i>S</i>	= <i>Sand</i>
<i>CA</i>	= <i>Coarse aggregate</i>
<i>W</i>	= <i>Water</i>

3.4.2 Beton *Supplementary*

Mix design beton *supplementary* mengikuti *mix design* beton normal namun dilakukan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen sebanyak 20% dari berat semen yang digunakan. Sedangkan untuk rasio *w/c* digunakan rasio $w/(C+FA)$ dan jumlah semen yang digunakan merupakan jumlah semen semula dikurangi jumlah *fly ash* yang digunakan. Rasio komposisi material beton *supplementary* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rasio Komposisi Material Beton *Supplementary*

Material	Rasio Material
C	1,00
S /C	1,41
CA/C	3,55
W/B	0,53
FA	20%.C

Keterangan:

<i>C</i>	= <i>Cement</i>
----------	-----------------

<i>S</i>	= <i>Sand</i>
<i>CA</i>	= <i>Coarse aggregate</i>
<i>W</i>	= <i>Water</i>
<i>B</i>	= <i>Binder (Cement + Fly Ash)</i>
<i>FA</i>	= <i>Fly Ash</i>

3.4.3 Engineered Cementitious Composite (ECC)

Perhitungan *mix design* terhadap material ECC dilakukan berdasarkan pengembangan hasil percobaan rasio *fly ash* dan semen serta rasio air dan *high range water reducer* (HRWR) yang berbeda kemudian dilakukan pengujian untuk memperoleh daktilitas regangan ECC oleh tim riset Institut Teknologi Sepuluh Nopember bersama pakar ECC dari United Kingdom namun tetap mengacu pada *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks* (RDCHPFRCC). Tahapan dari komposisi material adalah menggunakan sistem *trial-error* yaitu dengan terlebih dahulu menentukan mariks (kadar air, rasio *aggregate-binder*, dan rasio *water-binder*) menggunakan contoh komposisi material yang disediakan pada RDCHPFRCC-Tabel 3.2.1 serta syarat *slump* < 45 cm (RDCHPFRCC 11.3.2). Rasio komposisi pada material-material ECC dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Rasio Komposisi Material ECC

Material	Rasio Material
FA /C	1,60
W/B	0,27
HRWR /C	0,006
S /C	0,84
F	2%

Keterangan:

<i>FA</i>	= <i>Fly Ash</i>
<i>C</i>	= <i>Cement</i>

<i>W</i>	= <i>Water</i>
<i>B</i>	= <i>Binder (Cement + Fly Ash)</i>
<i>HRWR</i>	= <i>High Range Water Reducer</i>
<i>S</i>	= <i>Silica Sand</i>
<i>F</i>	= <i>Fibre PVA</i>

3.5 Pembuatan dan Perawatan (*Curing*) Benda Uji

Benda uji dibuat dengan mutu beton f_c' rencana yang sama yaitu 50 MPa untuk beton normal, beton *supplementary* maupun ECC. Proses pengecoran dan pembuatanserta perawatanbeton normal dan beton *supplementary* dilakukan berdasarkan ASTM C 31 serta pengujian *slump* dilakukan berdasarkan ASTM C143.

Proses pembuatan benda uji ECC dapat diurutkan sebagai berikut:

- Semen, *silica sand* dan *fly ash* dimasukkan ke dalam *mixer* kemudian dicampur manual sampai merata.
- Mesin *mixer* dengan kapasitas *bowl* 30 liter dinyalakan dengan kecepatan awal 65 rpm, kemudian air sebanyak 70% dimasukkan secara perlahan. Proses ini membutuhkan waktu selama ± 5 menit
- HRWR dan sisa air dimasukkan ke dalam material yang sudah dicampur sebelumnya selama ± 2 menit
- Kecepatan mesin *mixer* dinaikkan menjadi 102 rpm agar material tercampur merata. Proses ini berlangsung selama ± 2 hingga 3 menit
- Serat PVA dimasukkan secara perlahan dan dibiarkan selama ± 3 menit
- Mesin dimatikan kemudian dilakukan pengecekan viskositas material agar tidak terdapat *bleeding* maupun *fibre ball* atau gumpalan serat
- Kecepatan mesin *mixer* dinaikkan menjadi 296 rpm agar material tercampur secara merata. Proses ini membutuhkan waktu selama ± 5 menit. Jika masih terdapat *fibre ball* di dalam material, maka akan ditambahkan waktu pengecoran selama ± 2 hingga 3 menit hingga seluruh material tercampur merata.

Setelah beton mencapai *setting time* kurang lebih 24 jam, benda uji dilepaskan dari bekisting kemudian dilakukan *initial curing* pada suhu 16 - 27°C

menggunakan kain basah yang menutupi beton selama 28 hari pada benda uji silinder, *dog bone* dan balok beton normal, beton *supplementary* maupun ECC dengan ukuran masing-masing 200 x 10 x 20 cm serta 100 x 10x 20 cm (karena berdasarkan syarat RDCHPFRCC 10.8 bahwa suhu *curing* ECC harus dibawah 40°C maka disamakan dengan suhu *curing* beton normal dan *supplementary*).Kemudian dilakukan pengujian geser *ohno four point bending method* pada benda uji balok beton normal, beton *supplementary* maupun ECC dengan ukuran masing-masing 200 x 10 x 20 cm serta 100 x 10x 20 cm .

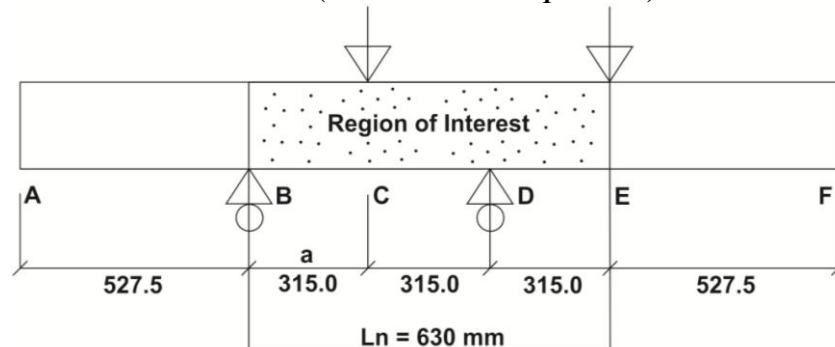
Curing yang dilakukan pada balok beton normal, beton *supplementary* dan ECC lainnya masing-masing ukuran 200 x 10 x 20 cm menggunakan *moist curing* selama 28 hari kemudian dilakukan pembuatan *pre-crack*, diikuti pengujian percepatan korosi menggunakan metode galvanostatik dengan NaCl 3,5% selama 30 hari lalu dilakukan pengujian geser *ohno four point bending method*. Adapun jumlah benda uji dan pengujian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Kebutuhan Benda Uji

No.	Benda Uji	Ukuran (cm)	Jumlah			Pengujian
			Normal	SC	ECC	
1	Silinder	10 x 20	5	5	-	Kuat Tekan
2	Silinder	5 x 10	-	-	5	Kuat Tekan
3	<i>Dog Bone</i>	8 x 3 x 1	-	-	2	Kuat Tarik
4	Balok	200x10x20	1	1	1	Geser <i>Moist Curing</i>
5	Balok	100x10x20	1	1	1	Geser <i>Moist Curing</i>
6	Balok	200x10x20	1	1	1	<i>Pre-crack</i> Geser Metode Galvanostatik

3.6 Analisa Teoritis Geser Balok

a. Balok 200 x 10 x 20 cm (*Ohno Shear Deep Beam*)



$$\frac{a}{h} = \frac{315}{200} = 1,575 < 2(OK)$$

Ditentukan:

Panjang balok	= 2000	mm
Tinggi balok (h)	= 200	mm
Lebar balok (b_w)	= 100	mm
Selimut beton (d')	= 35	mm
Tinggi efektif (d)	= 165	mm
Tegangan leleh (f_y)	= 400	MPa
Mutu beton (f_c')	= 50	MPa
Tulangan tekan	= 2D10	
Tulangan tarik	= 3D10	
Tulangan Geser	= D8	
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000	MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= 33234,02	MPa

$$\sqrt{f_c'} = \sqrt{50} = 7,07 < 8,3MPa(OK)$$

I. Menghitung Proporsi Tulangan

$$A_{s_{\min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4f_y} bd = \frac{7,07}{4 \times 400} \times 100 \times 165 = 72,92 mm^2$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{1,4}{f_y} bd = \frac{1,4}{400} \times 100 \times 165 = 57,75 \text{ mm}^2$$

Dipilih $A_{s_{\min}} = 72,92 \text{ mm}^2$

$$\rho_w = \frac{A_s}{bd} = \frac{72,92}{100 \times 165} = 0,0044$$

The Critical Section for Concentrated Loading

$$a = 315 \text{ mm}$$

$$z = 0,5a = 0,5 \times 315 = 157,5 \text{ mm}$$

$$z < d \Leftrightarrow 157,5 \text{ mm} < 165 \text{ mm} (\text{OK})$$

Positive Reinforced Distribution

$$y = 0,25h - 0,05b = 0,25(200) - 0,05 \times (100) = 45 \text{ mm}$$

Tulangan longitudinal didistribusikan dengan jarak $y = 40 \text{ mm}$ dari bawah lebar balok.

Digunakan tulangan memanjang 3D10

Web Reinforcement

Digunakan tulangan *web* horizontal 3D10

$$s_v = \frac{d}{5} \Leftrightarrow s_v = \frac{165}{5} \Leftrightarrow s_v = 33 \text{ mm}$$

$$A_v = 0,0015 b s_v = 0,0015 \times 100 \times 33 = 4,95 \text{ mm}^2$$

$$s_{vh} = \frac{d}{3} \Leftrightarrow s_{vh} = \frac{165}{3} \Leftrightarrow s_{vh} = 55 \text{ mm}$$

$$A_{vh} = 0,0025 b s_{vh} = 0,0025 \times 100 \times 55 = 13,75 \text{ mm}^2$$

$$A_{vh} > A_v (\text{OK})$$

$$13,75\text{mm}^2 > 4,95\text{mm}^2 \text{ (OK)}$$

$$\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + \frac{L_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \left(\frac{11 - \frac{L_n}{d}}{12} \right) = \frac{4,95}{33} \left(\frac{1 + \frac{630}{165}}{12} \right) + \frac{13,75}{55} \left(\frac{11 - \frac{630}{165}}{12} \right) = 0,21$$

$$A_v = 4,95\text{mm}^2$$

$$s_v = \frac{4,95}{0,21} = 23,59\text{mm} < 33\text{mm} \text{ (OK)}$$

Strength from Shear Reinforcement

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + \frac{L_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \left(\frac{11 - \frac{L_n}{d}}{12} \right) \right] f_y d$$

$$V_s = \left[\frac{4,95}{23,59} \left(\frac{1 + \frac{630}{165}}{12} \right) + \frac{13,75}{55} \left(\frac{11 - \frac{630}{165}}{12} \right) \right] \times 400 \times 165 = 15435,98\text{N}$$

II. Menghitung Yield Point

Diambil $a = 315 \text{ mm}$

$$M_n = A_s f_y (d - 0,5a) = 72,92 \times 400 (165 - (0,5 \times 315)) = 218761,16\text{Nmm}$$

III. Menghitung Ultimit Point

Dengan $L_n = 630 \text{ mm}$

$$L_n / d = 630 / 165 = 3,82 > 2 < 5$$

V_u untuk $2 \geq L_n/d \geq 5$

$$V_u = \phi \left[\frac{1}{18} \left(10 + \frac{L_n}{d} \right) \sqrt{f'_c} b d \right] = 0,85 \left[\frac{1}{18} \left(10 + \frac{630}{165} \right) \times 7,07 \times 100 \times 165 \right] = 76131,83\text{N}$$

Moment

$$M_B = 0 \Leftrightarrow 76131,83(315) - 630R_D = 0$$

$$R_B = 0N$$

$$R_D = 76131,83N$$

Diperoleh $M_u = 11990764,80$ N.mm

$$3,5 - 2,5 \frac{M_u}{V_u d} = 2,5$$

$$3,5 - 2,5 \frac{11990764,80}{76131,83 \times 165} = 1,11 < 2,5 (OK)$$

$$M_u = 11990764,80 \text{ Nmm} > M_n = 218761,2 \text{ Nmm} (OK)$$

IV. Menghitung Tulangan Geser

$$V_n = V_c + V_s$$

Strength Attributable to The Concrete

$$V_c = \left(3,5 - 2,5 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right) \left(1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b.d$$

$$V_c = \left(3,5 - 2,5 \left(\frac{11990764,80}{76131,83 \times 165} \right) \right) \left(1,0 \times 7,07 + 2500 \times 0,0044 \times \frac{76131,83 \times 165}{11990764,80} \right) \times 100 \times 165$$

$$V_c = 190994,76N$$

$$\phi V_c = 0,85 \times 190994,76 = 162345,55N$$

$$0,5 \phi V_c = 0,5 \times 162345,55 = 81172,78N$$

$$V_u = 76131,83N < 0,5 \phi V_c = 81172,78N (OK)$$

Shear strength of unreinforced web at critical section

$$v_c = 2,5 \left(1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho_w \frac{1}{0,316} \right)$$

$$v_c = 2,5 \left(1,9 \times 7,07 + 2500 \times 0,0044 \frac{1}{0,316} \right) = 68,55 N$$

$$\text{Max } v_c = 6\sqrt{f'_c} = 6 \times 7,07 = 42,43 N (\text{Kontrol})$$

Maksimum v_n yang diijinkan untuk $Ln/d = 1,74 < 2$ adalah

$$v_n = \frac{V_u}{\phi b d} = \frac{76131,83}{0,85 \times 100 \times 165} = 5,43 N$$

$$v_n = 8\sqrt{f'_c}$$

$$v_n = 42,43 > 5,43 \text{ (OK)}$$

Gaya geser yang dihasilkan oleh tulangan V_s

$$V_s = 15435,98 N$$

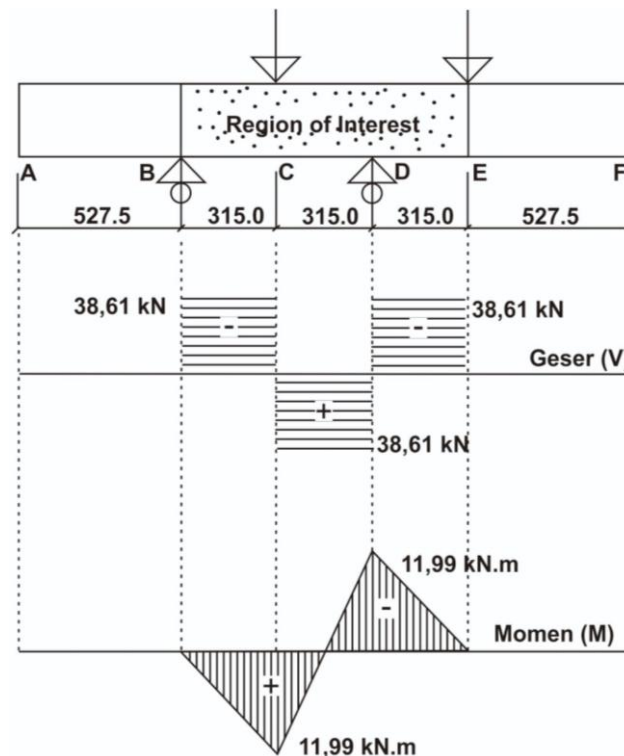
Gaya geser nominal yang dihasilkan oleh beton V_c dan tulangan V_s

$$V_c = 190994,76 N$$

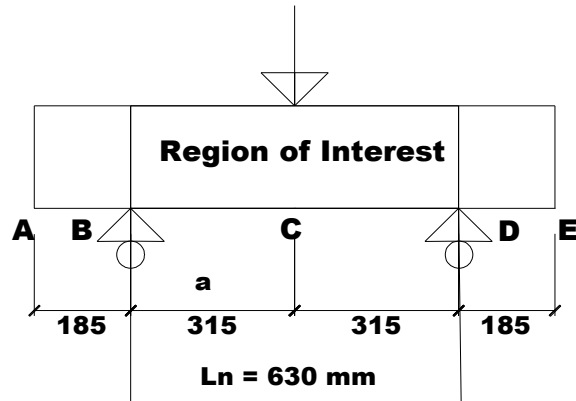
$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_n = 190994,76 + 15435,98 = 206430,75 N$$

Gambar diagram geser dan momen yang terjadi pada balok adalah:



b. Balok 100 x 10 x 20 cm (*Deep Beam*)



$$\frac{a}{h} = \frac{315}{200} = 1,575 < 2(OK)$$

Ditentukan:

Panjang balok	= 1000	mm
Tinggi balok (h)	= 200	mm
Lebar balok (b_w)	= 100	mm
Selimut beton (d')	= 35	mm
Tinggi efektif (d)	= 165	mm
Tegangan leleh (f_y)	= 400	MPa
Mutu beton (f_c')	= 50	MPa
Tulangan tekan	= 2D10	
Tulangan tarik	= 3D10	
Tulangan Geser	= D8	
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000	MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= 33234,02	MPa

$$\sqrt{f_c'} = \sqrt{50} = 7,07 < 8,3MPa(OK)$$

I. Menghitung Proporsi Tulangan

$$A_{s_{min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4f_y} bd = \frac{7,07}{4 \times 400} \times 100 \times 165 = 72,92mm^2$$

$$A_{s_{min}} = \frac{1,4}{f_y} bd = \frac{1,4}{400} \times 100 \times 165 = 57,75mm^2$$

Dipilih $A_{s_{min}} = 72,92 \text{ mm}^2$

$$\rho_w = \frac{A_s}{bd} = \frac{72,92}{100 \times 165} = 0,0044$$

The Critical Section for Concentrated Loading

$$a = 315 \text{ mm}$$

$$z = 0,5a = 0,5 \times 315 = 157,5 \text{ mm}$$

$$z < d \Leftrightarrow 157,5 \text{ mm} < 165 \text{ mm} (\text{OK})$$

Positive Reinforced Distribution

$$y = 0,25h - 0,05b = 0,25(200) - 0,05 \times (100) = 45 \text{ mm}$$

Tulangan longitudinal didistribusikan dengan jarak $y = 40 \text{ mm}$ dari bawah lebar balok.

Digunakan tulangan memanjang 3D10

Web Reinforcement

Digunakan tulangan *web* horizontal 3D10

$$s_v = \frac{d}{5} \Leftrightarrow s_v = \frac{165}{5} \Leftrightarrow s_v = 33 \text{ mm}$$

$$A_v = 0,0015 b s_v = 0,0015 \times 100 \times 33 = 4,95 \text{ mm}^2$$

$$s_{vh} = \frac{d}{3} \Leftrightarrow s_{vh} = \frac{165}{3} \Leftrightarrow s_{vh} = 55 \text{ mm}$$

$$A_{vh} = 0,0025 b s_{vh} = 0,0025 \times 100 \times 55 = 13,75 \text{ mm}^2$$

$$A_{vh} > A_v (\text{OK})$$

$$13,75 \text{ mm}^2 > 4,95 \text{ mm}^2 (\text{OK})$$

$$\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + \frac{L_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \left(\frac{11 - \frac{L_n}{d}}{12} \right) = \frac{4,95}{33} \left(\frac{1 + \frac{630}{165}}{12} \right) + \frac{13,75}{55} \left(\frac{11 - \frac{630}{165}}{12} \right) = 0,21$$

$$A_v = 4,95 \text{ mm}^2$$

$$s_v = \frac{4,95}{0,21} = 23,59 \text{ mm} < 33 \text{ mm (OK)}$$

Strength from Shear Reinforcement

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + \frac{L_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \left(\frac{11 - \frac{L_n}{d}}{12} \right) \right] f_y d$$

$$V_s = \left[\frac{4,95}{23,59} \left(\frac{1 + \frac{630}{165}}{12} \right) + \frac{13,75}{55} \left(\frac{11 - \frac{630}{165}}{12} \right) \right] \times 400 \times 165 = 15435,98 \text{ N}$$

II. Menghitung Yield Point

Diambil $a = 315 \text{ mm}$

$$M_n = A_s f_y (d - 0,5a) = 72,92 \times 400 (165 - (0,5 \times 315)) = 218761,16 \text{ Nmm}$$

III. Menghitung Ultimit Point

Dengan $L_n = 630 \text{ mm}$

$$L_n / d = 630 / 165 = 3,82 > 2 < 5$$

V_u untuk $2 \geq L_n/d \geq 5$

$$V_u = \phi \left[\frac{1}{18} \left(10 + \frac{L_n}{d} \right) \sqrt{f_c'} b d \right] = 0,85 \left[\frac{1}{18} \left(10 + \frac{630}{165} \right) \times 7,07 \times 100 \times 165 \right] = 76131,83 \text{ N}$$

Moment

$$M_B = 0 \Leftrightarrow 76131,83(315) - 630 R_D = 0$$

$$R_D = 38065,915N$$

$$R_B = R_D = 38065,915N$$

Diperoleh $M_u = 11990764,80$ Nmm

$$3,5 - 2,5 \frac{M_u}{V_u d} = 2,5$$

$$3,5 - 2,5 \frac{11990764,80}{76131,83 \times 165} = 1,11 < 2,5 (OK)$$

$$M_u = 11990764,80 \text{ Nmm} > M_n = 218761,2 \text{ Nmm} (OK)$$

IV. Menghitung Tulangan Geser

$$V_n = V_c + V_s$$

Strength Attributable to The Concrete

$$V_c = \left(3,5 - 2,5 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \right) \left(1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b.d$$

$$V_c = \left(3,5 - 2,5 \left(\frac{11990764,80}{76131,83 \times 165} \right) \right) \left(1,0 \times 7,07 + 2500 \times 0,0044 \times \frac{76131,83 \times 165}{11990764,80} \right) \times 100 \times 165$$

$$V_c = 190994,76N$$

$$\phi V_c = 0,85 \times 190994,76 = 162345,55N$$

$$0,5 \phi V_c = 0,5 \times 162345,55 = 81172,78N$$

$$V_u = 76131,83N < 0,5 \phi V_c = 81172,78N (OK)$$

Shear strength of unreinforced web at critical section

$$v_c = 2,5 \left(1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho_w \frac{1}{0,316} \right)$$

$$v_c = 2,5 \left(1,9 \times 7,07 + 2500 \times 0,0044 \frac{1}{0,316} \right) = 68,55N$$

$$\text{Max } v_c = 6 \sqrt{f_c'} = 6 \times 7,07 = 42,43N (\text{Kontrol})$$

Maksimum v_n yang diijinkan untuk $L_n/d = 1,74 < 2$ adalah

$$v_n = \frac{V_u}{\phi b d} = \frac{76131,83}{0,85 \times 100 \times 165} = 5,43 N$$

$$v_n = 8\sqrt{f_c}$$

$$v_n = 42,43 > 5,43 \text{ (OK)}$$

Gaya geser yang dihasilkan oleh tulangan V_s

$$V_s = 15435,98 N$$

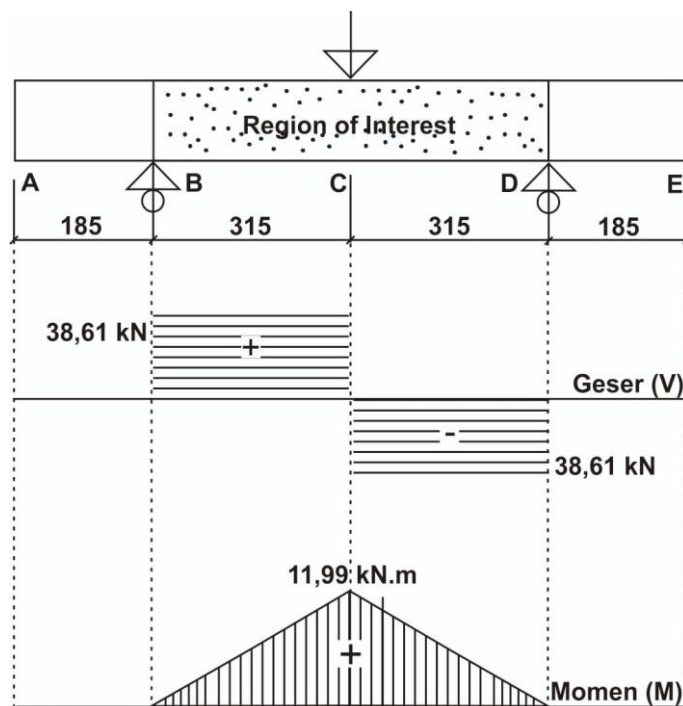
Gaya geser nominal yang dihasilkan oleh beton V_c dan tulangan V_s

$$V_c = 190994,76 N$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_n = 190994,76 + 15435,98 = 206430,75 N$$

Gambar diagram geser dan momen yang terjadi pada balok adalah:



c. Lebar Retak Balok Ukuran 200 x 10 x 20 cm (ACI 224. 2R-92)

Ditentukan:

Panjang balok	= 2000	mm
Tinggi balok (h)	= 200	mm
Lebar balok (b_w)	= 100	mm
Selimit beton (d')	= 35	mm
Tinggi efektif (d)	= 165	mm
Tegangan leleh (f_y)	= 400	MPa
Mutu beton (f_c')	= 50	MPa
Tulangan tekan	= 2D10	
Tulangan tarik	= 3D10	
Tulangan Geser	= D8	
Jarak tulangan sengkang	= 100	mm
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000	MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= 33234,02	MPa
Modulus <i>rupture</i> (f_r)	= $0,62\sqrt{f_c'}$	= 4,38MPa
Momen hasil perhitungan	= 12250624,05	N.mm

$$\sqrt{f_c'} = \sqrt{50} = 7,07 < 8,3MPa(OK)$$

I. Menghitung Momen Inersia Balok

$$I_g = \frac{bh^3}{12}$$

$$I_g = \frac{100 \times 200^3}{12} = 66666667mm^4$$

$$y_t = \frac{h}{2}$$

$$y_t = \frac{200}{2} = 100mm$$

II. Menghitung Momen Crack

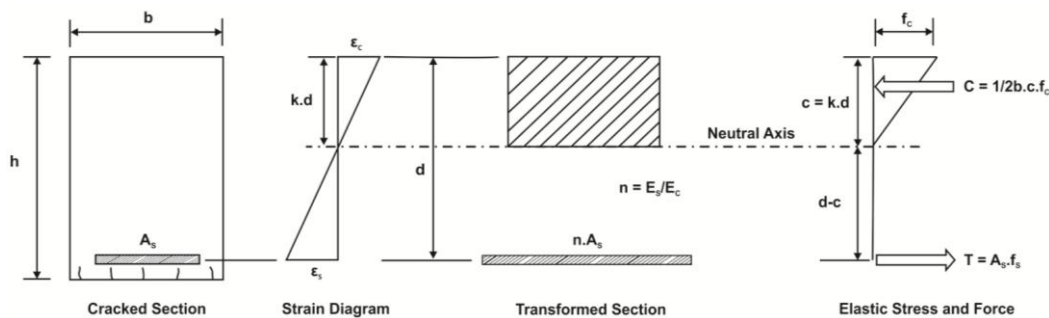
$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{4,38 \times 666666667}{100} = 2922708 \text{ N.mm}$$

$$A_{s_{min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} b d = \frac{7,07}{4 \times 400} \times 100 \times 165 = 72,92 \text{ mm}^2$$

$$A_{s_{min}} = \frac{1,4}{f_y} b d = \frac{1,4}{400} \times 100 \times 165 = 57,75 \text{ mm}^2$$

Dipilih $A_{s_{min}} = 72,92 \text{ mm}^2$



$$B = \frac{b}{n A_s}$$

$$B = \frac{100}{3 \times 72,92} = 0,457 \text{ mm}$$

$$c = \frac{\sqrt{2 B d + 1} - 1}{B}$$

$$c = \frac{\sqrt{2 \times 0,457 \times 165 + 1} - 1}{0,457} = 24,762 \text{ mm}$$

III. Menghitung Momen Inersia Crack

$$I_{cr} = \frac{b c^3}{3} + n A_s (d - c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{100 \times 24,762^3}{3} + 3 \times 72,92 (165 - 24,762)^2 = 4808408,869 \text{ mm}^4$$

IV. Menghitung Tegangan Tulangan

$$f_{s1} = \frac{M_{sv}}{A_s \left(d - \frac{c}{3} \right)}$$

$$f_{s1} = \frac{12250624,05}{72,92 \left(165 - \frac{24,762}{3} \right)} = 1071,798 MPa$$

$$f_{s2} = \frac{M_{sv}}{I_{cr}} n(d - c)$$

$$f_{s2} = \frac{12250624,05}{4808408,869} 3(165 - 24,762) = 1071,873 MPa$$

$$f_{s1} \approx f_{s2} (OK)$$

V. Menghitung Tegangan Beton

$$f_c = \frac{M_{sv}}{I_{cr}} c$$

$$f_c = \frac{12250624,05}{4808408,869} 24,762 = 63,088 MPa$$

Kontrol:

$$T = A_s f_s$$

$$T = 72,92 \times 1071,798 = 78155,913 N$$

$$C = 0,5 b c f_c$$

$$C = 0,5 \times 100 \times 24,762 \times 50 = 61905,255 N$$

$$M = T \left(d - \frac{c}{3} \right)$$

$$M = 78155,913 \left(165 - \frac{24,762}{3} \right) = 12250624,05 N.mm$$

$$M = M_{sv} (OK)$$

VI. Menghitung Lebar Retak

$$\beta = \frac{h - c}{d - c}$$

$$\beta = \frac{200 - 24,762}{165 - 24,762} = 1,250$$

$$w = 0,02 f_s d_c \sqrt{1 + \left(\frac{s}{4d_c}\right)^2} \times 10^{-3}$$

$$w = 0,02 \times 1071,798 \times 35 \sqrt{1 + \left(\frac{100}{4 \times 35}\right)^2} \times 10^{-3} = 0,922 \text{ mm}$$

Jadi, lebar retak yang terjadi pada balok ukuran 200 x 10 x 20 cm diperkirakan adalah 0,922 mm.

d. Lebar Retak Balok Ukuran 100 x 10 x 20 cm (ACI 224. 2R-92)

Ditentukan:

Panjang balok	= 1000	mm
Tinggi balok (h)	= 200	mm
Lebar balok (b_w)	= 100	mm
Selimut beton (d')	= 35	mm
Tinggi efektif (d)	= 165	mm
Tegangan leleh (f_y)	= 400	MPa
Mutu beton (f_c')	= 50	MPa
Tulangan tekan	= 2D10	
Tulangan tarik	= 3D10	
Tulangan Geser	= D8	
Jarak tulangan sengkang	= 0	mm (tanpa sengkang)
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000	MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= 33234,02	MPa
Modulus <i>rupture</i> (f_r)	= $0,62 \sqrt{f_c'}$	= 4,38 MPa
Momen hasil perhitungan	= 11990763,23	N.mm

$$\sqrt{f_c'} = \sqrt{50} = 7,07 < 8,3 \text{ MPa (OK)}$$

I. Menghitung Momen Inersia Balok

$$I_g = \frac{bh^3}{12}$$

$$I_g = \frac{100 \times 200^3}{12} = 66666667 \text{ mm}^4$$

$$y_t = \frac{h}{2}$$

$$y_t = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}$$

II. Menghitung Momen Crack

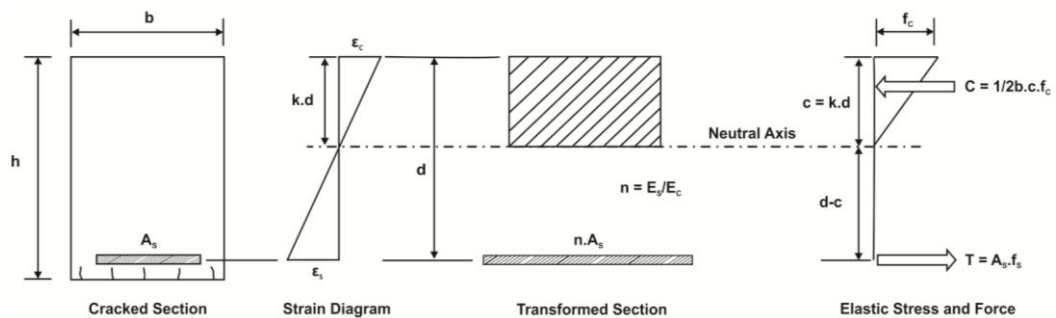
$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{4,38 \times 66666667}{100} = 2922,71 \text{ N.mm}$$

$$A_{s_{min}} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} bd = \frac{7,07}{4 \times 400} \times 100 \times 165 = 72,92 \text{ mm}^2$$

$$A_{s_{min}} = \frac{1,4}{f_y} bd = \frac{1,4}{400} \times 100 \times 165 = 57,75 \text{ mm}^2$$

Dipilih $A_{s_{min}} = 72,92 \text{ mm}^2$



$$B = \frac{b}{nA_s}$$

$$B = \frac{100}{3 \times 72,92} = 0,457 \text{ mm}$$

$$c = \frac{\sqrt{2Bd+1}-1}{B}$$

$$c = \frac{\sqrt{2 \times 0,457 \times 165 + 1} - 1}{0,457} = 24,762 \text{ mm}$$

III. Menghitung Momen Inersia Crack

$$I_{cr} = \frac{bc^3}{3} + nA_s(d-c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{100 \times 24,762^3}{3} + 3 \times 72,92(165 - 24,762)^2 = 4808408,869 \text{ mm}^4$$

IV. Menghitung Tegangan Tulangan

$$f_{s1} = \frac{M_{srv}}{A_s \left(d - \frac{c}{3} \right)}$$

$$f_{s1} = \frac{11990763,23}{72,92 \left(165 - \frac{24,762}{3} \right)} = 1049,063 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = \frac{M_{srv}}{I_{cr}} n(d-c)$$

$$f_{s2} = \frac{11990763,23}{4808408,869} 3(165 - 24,762) = 1049,137 \text{ MPa}$$

$$f_{s1} \approx f_{s2} (\text{OK})$$

V. Menghitung Tegangan Beton

$$f_c = \frac{M_{srv}}{I_{cr}} c$$

$$f_c = \frac{11990763,23}{4808408,869} 24,762 = 61,750 \text{ MPa}$$

Kontrol:

$$T = A_s f_s$$

$$T = 72,92 \times 1049,137 = 76498,066 \text{ N}$$

$$C = 0,5bcf_c$$

$$C = 0,5 \times 100 \times 24,762 \times 50 = 61905,255 N$$

$$M = T \left(d - \frac{c}{3} \right)$$

$$M = 76498,066 \left(165 - \frac{24,762}{3} \right) = 11990763,23 N.mm$$

$$M = M_{sv} (OK)$$

VI. Menghitung Lebar Retak

$$\beta = \frac{h - c}{d - c}$$

$$\beta = \frac{200 - 24,762}{165 - 24,762} = 1,250$$

$$w = 0,02 f_s d_c \sqrt{1 + \left(\frac{s}{4d_c} \right)^2} \times 10^{-3}$$

$$w = 0,02 \times 1049,06 \times 35 \sqrt{1 + \left(\frac{100}{4 \times 35} \right)^2} \times 10^{-3} = 0,902 mm$$

Jadi, lebar retak yang terjadi pada balok ukuran 100 x 10 x 20 cm diperkirakan adalah 0,902 mm.

e. Regangan Tulangan Tekan Balok Ukuran 200 x 10 x 20 cm

Ditentukan:

Panjang balok	= 2000	mm
Tinggi balok (h)	= 200	mm
Lebar balok (b_w)	= 100	mm
Selimut beton (d')	= 35	mm
Tinggi efektif (d)	= 165	mm
Tegangan leleh (f_y)	= 400	MPa
Mutu beton (f_c')	= 35,32	MPa
Tulangan tekan	= 2D10	

Tulangan tarik	= 3D10	
Tulangan Geser	= D8	
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000	MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= 27932,40	MPa

$$\sqrt{f_c'} = \sqrt{50} = 7,07 < 8,3 \text{MPa} (\text{OK})$$

$$\text{Modulusrupture} = 0,62\sqrt{f_c'} = 0,62\sqrt{50} = 4,38 \text{MPa}$$

I. Menghitung Proporsi Tulangan

$$A_{s' \min} = n \frac{1}{4} \pi D^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 = 157 \text{mm}^2$$

$$A_{s \min} = n \frac{1}{4} \pi D^2 = 3 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 = 236 \text{mm}^2$$

$$\rho' = \frac{A_{s'}}{bd} = \frac{157}{100 \times 165} = 0,0095$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{236}{100 \times 165} = 0,0143$$

II. Sebelum Retak

Rasio modular / angka ekuivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27932,40} = 7,16$$

Jarak garis netral

$$A = bh + (n-1)(A_s + A_{s'})$$

$$A = 100 \times 200 + (7,16 - 1)(236 + 157) = 22417,90 \text{mm}^2$$

Maka nilai y dihitung dari serat atas balok:

$$y = \frac{(bh)\left(\frac{h}{2}\right) + ((n-1)A_s d) + ((n-1)A_{s'} d')}{A}$$

$$y = \frac{(100 \times 200)\left(\frac{200}{2}\right) + ((7,16 - 1)236 \times 165) + ((7,16 - 1)157 \times 35)}{22417,90}$$

$$y = 101,40mm$$

Momen inersia dan momen crack

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

$$I = \left(\frac{1}{12}100 \times 200^3\right) + \left(100 \times 200\left(101,40 - \left(\frac{200}{2}\right)^2\right)\right) + \left((7,16-1)236(165-101,40)^2\right) + \left((7,16-1)157(101,40-35)^2\right)$$

$$I = 76838040,30mm^4$$

Cracking akan terjadi ketika modulus rupture mencapai serat bawah penampang sehingga:

$$M_{crack} = \frac{f_r I}{y_{bottom}}$$

$$M_{crack} = \frac{4,38 \times 76838040,30}{200 - 101,40} = 2871512,20N.mm$$

Kurvatur crack

$$\varphi_{crack} = \frac{f_r E_c}{y_{bottom}}$$

$$\varphi_{crack} = \frac{4,38 \times 27932,40}{200 - 101,40} = 0,00000134 rad/mm$$

III. Setelah retak saat leleh pertama

Faktor garis netral

Asumsi beton berperilaku elastic sehingga:

$$k = \left[\left((\rho + \rho')^2 \right) n^2 + 2(\rho + (\rho' d') / d) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n$$

$$k = 0,512$$

Maka jarak garis netral dari serat atas balok:

$$kd = 0,512 \times 165 = 84,50 \text{ mm}$$

Regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s}$$

$$\varepsilon_s = \frac{400}{200000} = 0,0020$$

Regangan tekan beton

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \left(\frac{kd}{d - kd} \right)$$

$$\varepsilon_c = 0,002 \left(\frac{84,50}{165 - 84,50} \right) = 0,00210$$

Tegangan pada beton

$$f_c = \varepsilon_c E$$

$$f_c = 0,00210 \times 27932,40 = 58,64 \text{ MPa}$$

Regangan tulangan tekan

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_c \left(\frac{kd - d'}{kd} \right)$$

$$\varepsilon_s' = 0,00210 \left(\frac{84,50 - 35'}{84,50} \right) = 0,001229$$

Tegangan tulangan tekan

$$f_s' = \varepsilon_s' E_s$$

$$f_s' = 0,001229 \times 200000 = 245,98 \text{ MPa}$$

Jika masing-masing mutu beton hasil pengujian disubstitusikan ke dalam perhitungan analisa ini, maka regangan tulangan tekan masing-masing beton dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Regangan Tulangan Tekan Masing-Masing Balok

Ukuran Balok	Beton	Regangan Tulangan Tekan Beton
		(ϵ_s') x 10 ⁻⁶
200x10x20 cm	NC	1229,90
	SC	991,01
	ECC	936,60
100x10x20 cm	NC	1219,89
	SC	964,34
	ECC	842,73

3.7 Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengumpulan data berupa pengujian-pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

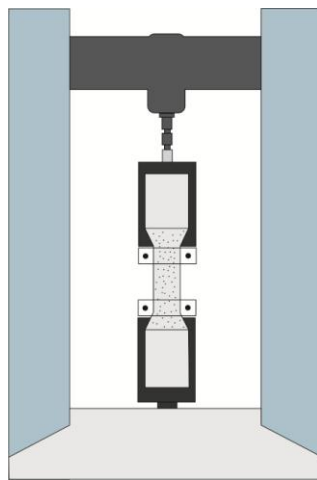
3.7.1 Pengujian Kuat Tekan Beton

Sebelum dilakukan uji kuat tekan, dilakukan pembuatan kaping (*capping*) berdasarkan ASTM C 617 untuk memberi lapisan perata bagi permukaan tekan beton dengan bahan gypsum atau dengan menggunakan mortar sulfur. Sedangkan pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan ASTM C 39. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada silinder beton ukuran 10 x 20 cm dan 5 x 10 cm setelah *curing* benda uji selama 28 hari.

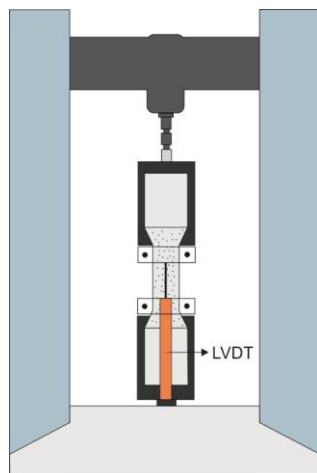
3.7.2 Pengujian Kuat Tarik Uniaxial ECC

Pengujian kuat tarik uniaxial ECC dilakukan berdasarkan *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks* (RDCHPFRCC-Testing Method 2) untuk mengevaluasi ketahanan tarik serta regangan beton yang dihasilkan. Pengujian kuat tarik dalam penelitian ini menggunakan benda uji *dog bone* dengan ukuran panjang 8 cm, lebar 3 cm dan tebal 1 cm di bagian tengah. Sebelum dilakukan pengujian, sisi depan *dog bone* dilapisi cat putih kemudian diberikan pola titik-titik secara acak menggunakan spidol permanen ukuran *fine* pada daerah yang akan mengalami retak akibat tarik. Pemberian pola ini

dimaksudkan agar dapat mempermudah pengamatan serta penggambaran pola keretakan yang terjadi pada *dog bone*. Pengambilan gambar pada saat pengujian dilakukan dengan menggunakan kamera digital yang dihubungkan *wireless local area network* (WLAN) pada *smartphone*. Kamera diletakkan pada tripod dengan jarak 40 cm dari sisi depan balok yang akan diamati. Skema pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 3.3.



(a) Tampak Depan Pengujian Kuat Tarik *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm



(b) Tampak Belakang Pengujian Kuat Tarik *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm

Gambar 3.3 Skema Pengujian Kuat Tarik *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm

3.7.3 Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja

Pengujian kuat tarik tulangan baja dilakukan berdasarkan ASTM A 615 yaitu terdiri dari penarikan batang uji secara terus menerus dengan gaya yang bertambah besar sampai putus dengan tujuan untuk menentukan nilai-nilai tarik. Pengujian dilakukan pada tulangan baja ulir diameter 10 mm dan polos diameter 8 mm.

3.7.4 Analisa Kebutuhan Arus Power Supply

Metode galvanostatik dilakukan selama 30 hari pada balok normal dan balok ECC dengan ukuran 200 x 10 x 20 cm untuk mempercepat proses korosi menggunakan larutan NaCl konsentrasi 3,5%. Adapun analisa kebutuhan arus yang dihasilkan *power supply* dihitung menggunakan Persamaan 2.3 sebagai berikut:

1. Tulangan Polos 8 mm

Diketahui:	asumsi level korosi (γ)	= 20 %
	diameter (D) tulangan D8	= 0,8 cm
	panjang (L) tulangan D8	= 12 cm
	berat jenis tulangan (ρ)	= 7,850 gr/cm ³
	konsentrasi NaCl	= 3,5 %
	lama waktu korosi rencana (t)	= 30 hari
	berat atom valensi tulangan (v)	= 27,925 gr
	jumlah ion Fe (z)	= 2
	konstanta Faraday (F)	= 96,487 amp.s

Luas Permukaan Tulangan

$$A = (\pi DL) \left(2x \frac{1}{4} \pi D^2 \right)$$

$$A = (3,14 \times 0,8 \times 12) \left(2x \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,8^2 \right) = 31,15 \text{ cm}^2$$

Berat Awal Tulangan

$$W_i = \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) \rho L$$

$$W_i = \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,8^2 \times 7,85 \times 12 = 47,33 \text{ gr}$$

Berat Akhir Tulangan Setelah Korosi

$$W_f = W_i - \left(\frac{\gamma W_i}{100} \right)$$

$$W_f = 47,33 - \frac{20 \times 47,33}{100} = 37,86 \text{ gr}$$

Massa Aktual Tulangan Akibat Korosi Per Satuan Luas Permukaan

$$M_{ac} = \frac{(W_i - W_f)}{\pi DL}$$

$$M_{ac} = \frac{(47,33 - 37,86)}{3,14 \times 0,8 \times 12} = 0,314 \text{ gr/cm}^2$$

Kebutuhan Arus Power Supply

$$I_{app} = \frac{M_{ac} F}{vt}$$

$$I_{app} = \frac{0,314 \times 96,487}{27,925 \times 2592000} = 0,000419 \text{ Amp/cm}^2$$

$$I_{app} = A I_{app}$$

$$I_{app} = 31,15 \times 0,000419 = 0,013 \text{ Amp} \approx 0,01 \text{ Amp}$$

Jadi, dalam penelitian ini membutuhkan arus *power supply* sebesar 0,3 Amp. Berdasarkan perencanaan kuat arus yang diperoleh yaitu $I_{corr} < 1,0 \mu\text{A/cm}^2$, yaitu kondisi pasif (berdasarkan Tabel 2.1)

2. Tulangan Ulir 10 mm

Diketahui:	asumsi level korosi (γ)	= 20 %
	diameter (D) tulangan D10	= 1 cm
	panjang (L) tulangan D10	= 200 cm
	berat jenis tulangan (ρ)	= 7,850 gr/cm ³
	konsentrasi NaCl	= 3,5 %
	lama waktu korosi rencana (t)	= 30 hari
	berat atom valensi tulangan (v)	= 27,925 gr

jumlah ion Fe (z)	= 2
konstanta Faraday (F)	= 96,487 amp.s

Luas Permukaan Tulangan

$$A = (\pi DL) \left(2x \frac{1}{4} \pi D^2 \right)$$

$$A = (3,14x1x200) \left(2x \frac{1}{4} x3,14x1^2 \right) = 629,57 \text{ cm}^2$$

Berat Awal Tulangan

$$W_i = \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) \rho L$$

$$W_i = \left(\frac{1}{4} x3,14x1^2 \right) x7,85x200 = 1232,45 \text{ gr}$$

Berat Akhir Tulangan Setelah Korosi

$$W_f = W_i - \left(\frac{\gamma W_i}{100} \right)$$

$$W_f = 1232,45 - \left(\frac{20x1232,45}{100} \right) = 985,96 \text{ gr}$$

Massa Aktual Tulangan Akibat Korosi Per Satuan Luas Permukaan

$$M_{ac} = \frac{(W_i - W_f)}{\pi DL}$$

$$M_{ac} = \frac{(1232,45 - 985,96)}{3,14x1x200} = 0,3925 \text{ gr/cm}^2$$

Kebutuhan Arus Power Supply

$$I_{app} = \frac{M_{ac} F}{vt}$$

$$I_{app} = \frac{0,3925x96487}{27,925x2592000} = 0,000523 \text{ Amp/cm}^2$$

$$I_{app} = AI_{app}$$

$$I_{app} = 629,57 \times 0,000523 = 0,329 \text{ Amp} \approx 0,3 \text{ Amp}$$

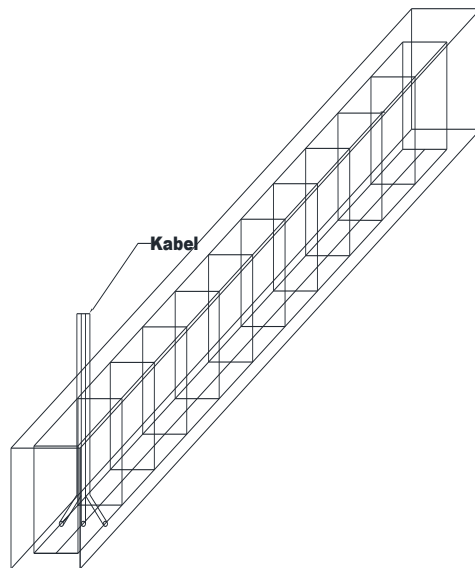
Laju Korosi

$$CR = \frac{3650 \times M_{ac}}{dAT}$$

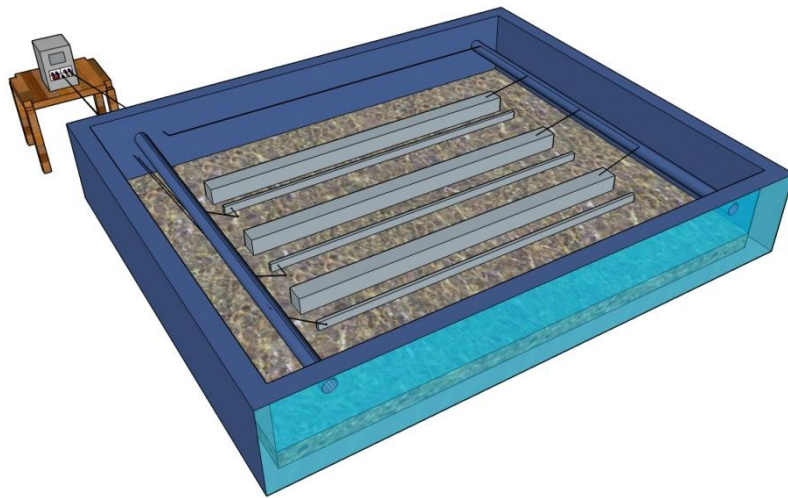
$$CR = \frac{3600 \times 0,3925}{7,85 \times 8,19 \times 30} = 0,7428 \text{ mm / tahun}$$

Oleh karena tulangan sengkang berada pada kondisi pasif korosi maka kabel akan dipasang pada tulangan memanjang 10 mm sehingga membutuhkan arus *power supply* sebesar 0,3 Amp. Berdasarkan perencanaan kuat arus yang diperoleh yaitu $I_{corr} 0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, yaitu rendah hingga sedang (berdasarkan Tabel 2.1)

Adapun skema pengujian korosi menggunakan metode galvanostatik dapat dilihat pada Gambar 3.4.



(a) Skema Posisi Kabel Untuk Pengujian Galvanostatik



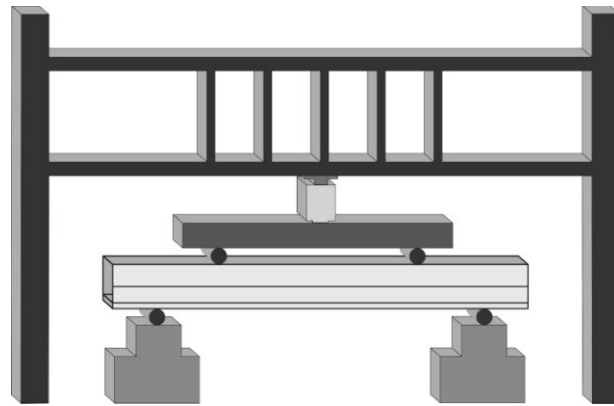
(b) *Set Up* Metode Galvanostatik

Gambar 3.4 Skema Pengujian Korosi Menggunakan Metode Galvanostatik

Balok diletakkan di atas kayu ukuran 200 x 4 x 4 cm di dalam bak *fibreglass* ukuran 250 x 300 cm yang terisi larutan NaCl 3,5% dari volume air hingga mencapai tinggi selimut bawah balok yaitu 3 cm. Penggunaan kayu bertujuan agar bagian bawah balok tidak langsung bersentuhan dengan bak sehingga larutan NaCl dapat terinduksi dengan mudah ke dalam balok. Kemudian kabel yang dililitkan pada tulangan longitudinal balok dihubungkan pada kutub positif *power supply* sedangkan kutub negatif dihubungkan pada *stainless steel* lalu diterapkan arus listrik dari *power supply* sebesar 0,3 Amp.

3.7.5 Pembuatan *Pre-Crack*

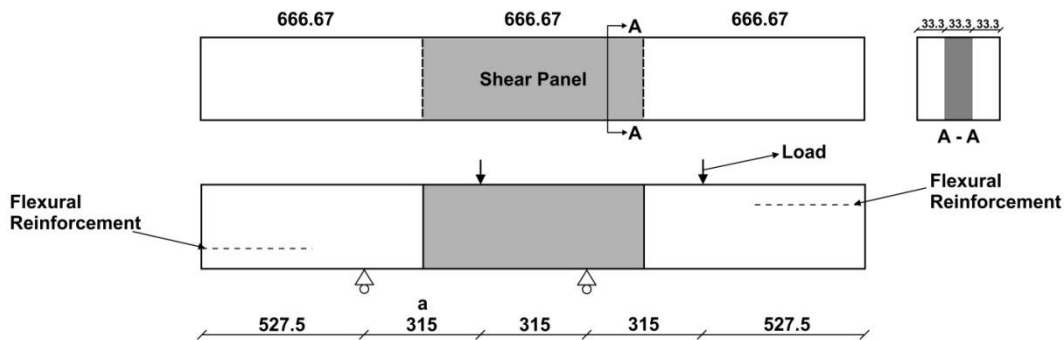
Pembuatan *pre-crack* dalam penelitian ini menggunakan *four point bending method* dengan dua titik pembebanan pada benda uji balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan ukuran 200 x 10 x 20 cm. Pembebanan dilakukan hingga balok mengalami retak sebelum mencapai garis netral balok yaitu pada jarak 10 cm dari bawah balok namun melebihi selimut beton 30 cm dari bawah balok. Skema pembuatan *pre-crack* maupun geser balok dapat dilihat pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Skema Pembuatan *Pre-Crack* Balok 200 x 10 x 20 cm

3.7.6 Pengujian Geser

Pengujian geser digunakan *ohno beam four point bending method* yaitu dengan dua titik pembebanan pada benda uji balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan ukuran 200 x 10 x 20 cm serta pengujian *three point bending* pada balok ukuran 100 x 10 x 20 cm seperti yang terlihat pada Gambar 3.8 dan 3.9. Perkiraan daerah geser pada balok Ohno ukuran 200 x 10 x 20 cm dapat dilihat pada Gambar 3.6.

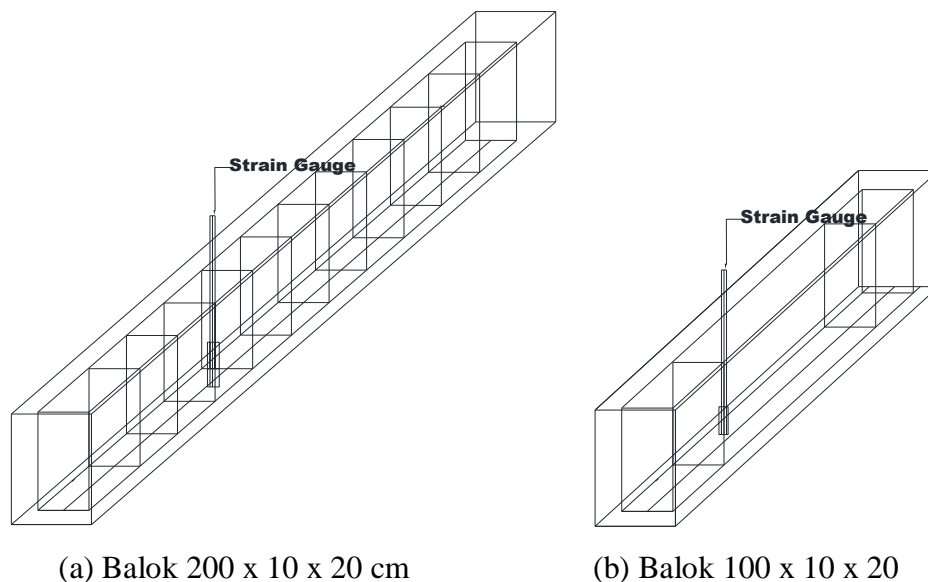


Gambar 3.6 Perkiraan Daerah Geser Balok Ohno Ukuran 200 x 10 x 20 cm

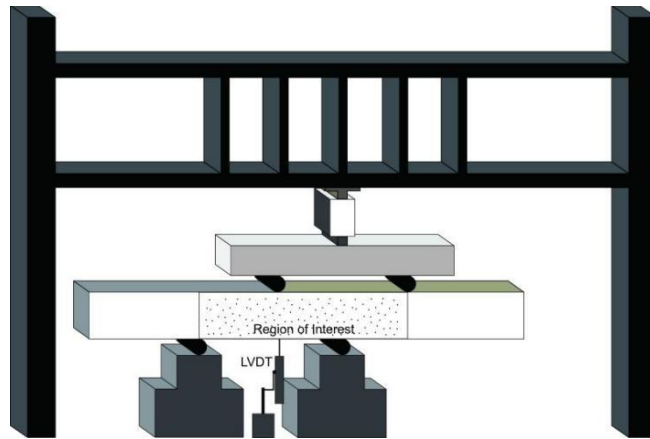
Sebelum dilakukan pengujian, sisi panjang balok dilapisi cat putih kemudian diberikan pola titik-titik secara acak menggunakan spidol permanen ukuran *fine* dan *medium* pada daerah yang akan diamati perilaku geser, sedangkan sisi sebelah balok akan digambarkan bentuk kotak ukuran 5 x 5 cm pada daerah yang akan diamati perilaku geser. Pemberian pola ini dimaksudkan agar dapat mempermudah pengamatan serta penggambaran pola retak yang terjadi pada

daerah geser balok. Pengambilan gambar pada saat pengujian dilakukan dengan menggunakan kamera digital yang dihubungkan *wireless local area network* (WLAN) pada *smartphonedan* dilakukan setiap kenaikan beban sebesar 50 Psi = $50 \times 0,703 \text{ kg.cm}^2 \times 102,60 \text{ cm}^2$ piston area = 3,61 kN \approx 4 kN. Kamera diletakkan pada tripod dengan jarak 94 cm dari sisi depan balok yang akan diamati. Posisi pemasangan *strain gauge* adalah pada sengkang jarak 55cm dari ujung balok untuk balok ukuran 200 x 10 x 20 cm dan 18,5 cm dari ujung balok untuk balok ukuran 100 x 10 x 20 cm seperti yang terlihat pada Gambar 3.7.

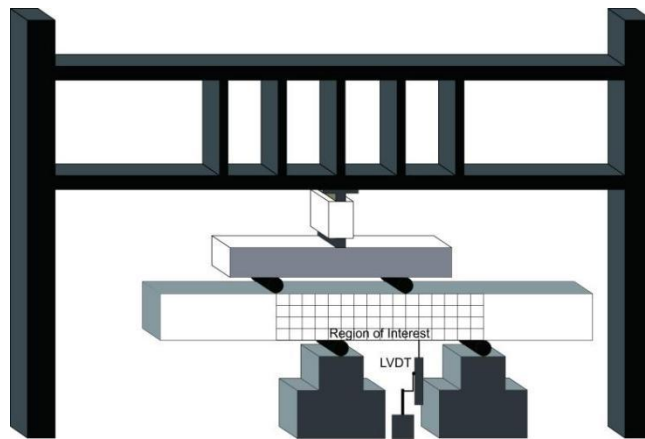
Pada saat pengujian balok 200 x 10 x 20 cm, beban diberikan dari mesin ke alat *load cell* kemudian diteruskan ke balok baja dan diterima oleh balok beton dalam bentuk dua beban titik oleh besi padat berbentuk bundar. Sedangkan pada pengujian balok 100 x 10 x 20 cm, beban diberikan dari mesin ke *load cell* dan langsung diterima balok beton dalam bentuk satu beban titik oleh besi padat berbentuk bundar. Pengukuran lendutan balok dilakukan menggunakan alat *linear variable differential transformer* (LVDT). Pembacaan hasil pengukuran regangan (μm) oleh *strain gauge* maupun lendutan (mm) oleh LVDT terdapat pada alat *data logger* yang dihubungkan menggunakan kabel pada masing-masing *strain gauge* maupun LVDT.



Gambar 3.7 Skema Pemasangan *Strain Gauge* Pada Balok

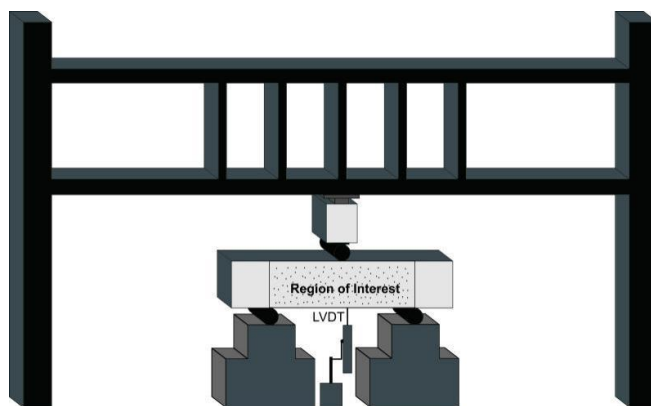


(a) Tampak Depan Pengujian *Ohno Four Point Bending* Balok 200x10x20 cm

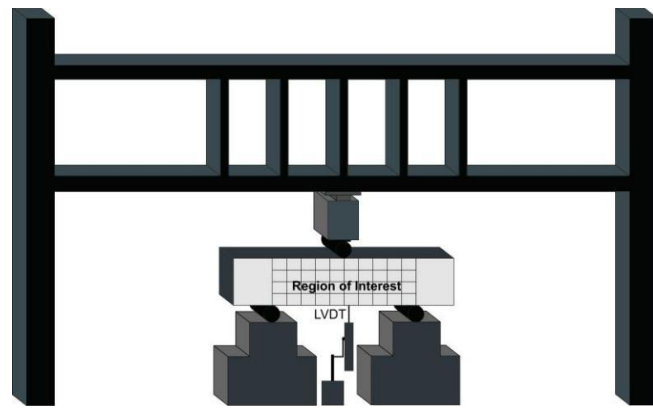


(b) Tampak Belakang Pengujian Balok 200x10x20 cm

Gambar 3.8 Skema Pengujian *Ohno Four Point Bending* Balok 200 x 10 x 20 cm



(a) Tampak Depan Pengujian *Three Point Bending* Balok 100 x 10 x 20 cm



(b) Tampak Belakang Pengujian *Three Point Bending* Balok 100 x 10 x 20 cm
Gambar 3.9 Skema Pengujian *Three Point Bending* Balok 100 x 10 x 20 cm

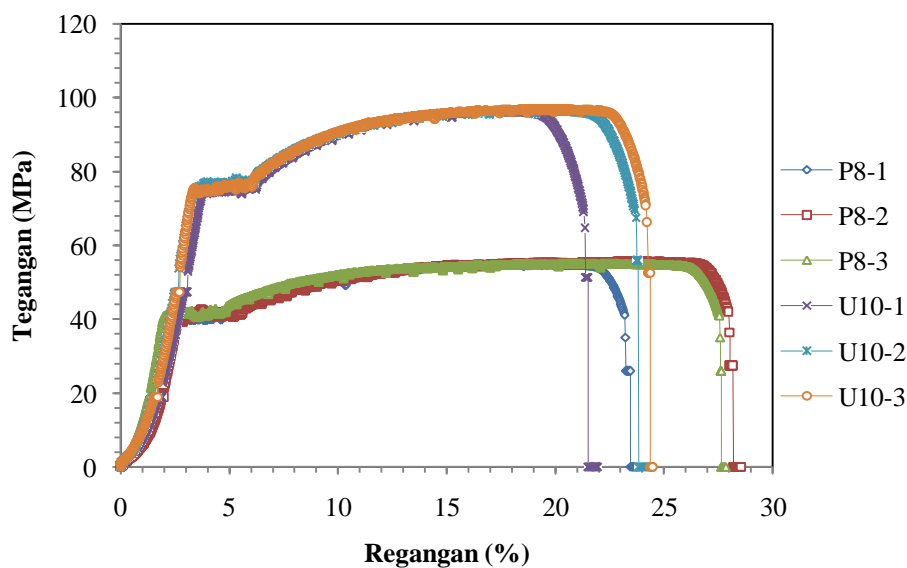
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan

Hasil pengujian kuat tarik tulangan dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Tabel 4.1 .



Gambar 4.1 Grafik Hasil Pengujian Tarik Tulangan Geser $\phi 8$ dan Lentur D10

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan

Item	Polos $\phi 8$			Ulir D10		
	I	II	III	I	II	III
Panjang (mm)	600	600	600	600	600	600
Berat (kg)	0,23	0,23	0,23	0,37	0,36	0,37
Beban (kgf)	2017,76	2041,11	2048,04	3795,57	3820,59	3794,62
Tegangan (kgf/mm ²)	40,14	40,61	40,74	48,33	48,65	48,31
Regangan (%)	4,27	5,39	3,98	7,73	7,43	6,83
Beban Max (kgf)	2753,55	2787,97	2772,03	4839,19	4851,94	4866,60
Tegangan Max (kgf/mm ²)	54,78	55,46	55,15	61,61	61,78	61,96
Regangan Max (%)	37,23	46,76	44,33	33,42	38,36	40,16

Jadi, tegangan rerata tulangan polos $\phi 8$ adalah $40,50 \text{ kgf/mm}^2 = 405 \text{ MPa}$, sedangkan tulangan ulir D10 adalah $48,43 \text{ kgf/mm}^2 = 484,3 \text{ MPa}$. Tegangan maksimum rerata tulangan polos $\phi 8$ adalah $55,13 \text{ kgf/mm}^2 = 551,3 \text{ MPa}$ sedangkan tulangan ulir D10 adalah $61,78 \text{ kgf/mm}^2 = 617,8 \text{ MPa}$. Hasil pengujian memenuhi standar ASTM A 615 dengan tegangan leleh minimum 300 MPa.

4.2 Hasil Slump

Hasil tinggi *slump* untuk beton normal adalah 23 cm, beton *supplementary* 21 cm, sedangkan ECC menghasilkan *slump flow* 12 cm (memenuhi syarat RDCHPFRCC < 45 cm).

4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

4.3.1 Beton Normal

Pengujian kuat tekan dilakukan pada beton silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm setelah dilakukan *moist curing* selama 28 hari. Dari hasil pengujian diperoleh kuat tekan rata-rata balok normal sebesar 51,43 MPa. Jika faktor koreksi beton dengan ukuran 10 x 20 cm adalah 1,04. Maka kuat tekan beton normal rata-rata $51,43 \times 1,04 = 53,49 \text{ MPa}$. Adapun data hasil pengujian kuat tekan beton normal dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Normal

No.	Benda Uji	Berat Beton (kg)	Kuat Tekan (MPa)	Xi-XRT	(Xi-XRT) ²
1.	Na	13,21	54,92	3,49	12,21
2.	Nb	13,24	49,80	-1,63	2,64
3.	Nc	13,44	51,15	-0,28	0,08
4.	Nd	13,58	50,90	-0,53	0,28
5.	Ne	13,53	50,36	-1,07	1,14
Rata-Rata (XRT)			51,43		16,34

Keterangan:

Na, Nb, Nc, Nd, Ne = beton normal pertama, kedua, ketiga, dst.

4.3.2 Beton *Supplementary* (SC)

Pengujian kuat tekan dilakukan pada beton silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm setelah dilakukan *moist curing* selama 28 hari. Dari hasil pengujian diperoleh kuat tekan rata-rata balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) sebesar 51,65 MPa. Jika faktor koreksi beton dengan ukuran 10 x 20 cm adalah 1,04. Maka kuat tekan beton *supplementary* rata-rata $51,65 \times 1,04 = 53,72$ MPa. Adapun data hasil pengujian kuat tekan beton *supplementary* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Supplementary*

No.	Benda Uji	Berat Beton (kg)	Kuat Tekan (MPa)	Xi-XRT	(Xi-XRT) ²
1.	SCa	13,70	50,40	-1,25	1,55
2.	SCb	13,66	53,23	1,59	2,51
3.	SCc	13,76	50,59	-1,06	1,16
4.	SCd	13,71	50,85	-0,80	0,63
5.	SCe	13,52	53,16	1,51	2,29
	Rata-Rata (XRT)		51,65		8,10

Keterangan:

SCa, SCb, SCc, SCd, SCe = beton *supplementary* pertama, kedua, ketiga, dst.

4.3.3 ECC

Pengujian kuat tekan dilakukan pada beton silinder dengan diameter 5 cm dan tinggi 10 cm setelah dilakukan *moist curing* selama 28 hari. Dari hasil pengujian diperoleh kuat tekan rata-rata balok ECC sebesar 49,46 MPa. Jika faktor koreksi beton dengan ukuran 5 x 10 cm adalah 1,09. Sehingga kuat tekan ECC rata-rata $49,46 \times 1,09 = 53,91$ MPa. Adapun data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan ECC

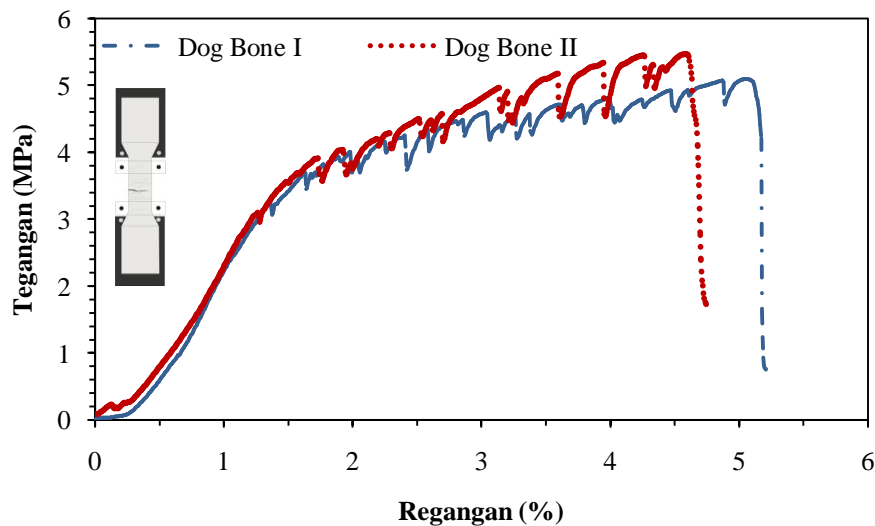
No.	Benda Uji	Berat Beton (kg)	Kuat Tekan (MPa)	$\bar{X}_i - \bar{X}_{RT}$	$(\bar{X}_i - \bar{X}_{RT})^2$
1.	ECCa	0,437	46,30	-3,16	9,96
2.	ECCb	0,449	55,19	5,73	32,88
3.	ECCc	0,435	48,40	-1,06	1,12
4.	ECCd	0,406	47,30	-2,16	4,65
5.	ECCe	0,420	50,09	0,63	0,40
Rata-Rata (XRT)			49,46		49,00

Keterangan:

ECCa, ECCb, ECCc, = ECC pada pengujian hari pertama, kedua, ketiga, dst.

4.4 Hasil Pengujian Kuat Tarik ECC

Hasil pengujian kuat tarik ECC benda uji *dog bone* 8 x 3 x 1 cm dapat dilihat pada grafik Gambar 4.2 dan Tabel 4.5 sedangkan pola retak pada Gambar 4.3.



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Tegangan-Regangan *Dog Bone* 8 x 3 x 1cm

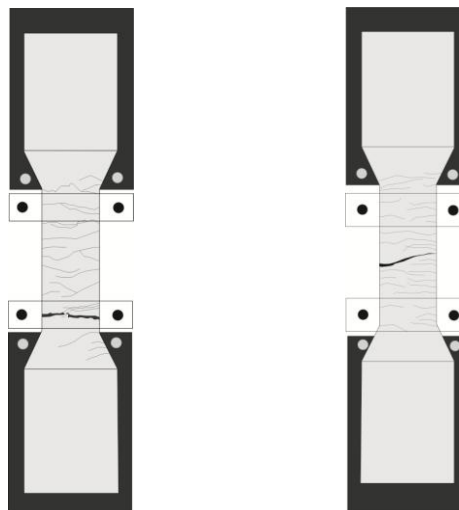
Jika diketahui modulus elastisitas beton sebesar $4700\sqrt{f_c}$; modulus *rupture* sebesar $0,62\sqrt{f_c}$ maka regangan beton normal adalah sebesar 0,00013 atau 0,013%. Sehingga berdasarkan Gambar 4.2 diketahui regangan yang

dihasilkan ECC lebih besar dibandingkan regangan beton normal. Hal ini terjadi oleh karena kombinasi yang tepat antara kuat lekat, ketahanan, modulus serta kemampuan mengikat matriks semen yang tinggi pada PVA sehingga menyebabkan tingginya tegangan dan daktilitas pada ECC. Diketahui juga bahwa benda uji *dog bone* I memiliki daktilitas 8,83% lebih tinggi dibandingkan *dog bone* II namun memiliki kapasitas beban 7,38% lebih kecil dibandingkan *dog bone* I.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kuat Tarik *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm

No.	Item	Benda Uji	
		I	II
1.	Beban maksimum (N)	1579,81	1696,40
2.	Perpanjangan (mm)	7,40	7,47
3.	Regangan (%)	5,21	4,75
4.	Tegangan (MPa)	5,10	5,47

Pola retakan yang dihasilkan pada pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 4.3.



(a) Benda Uji I

(b) Benda Uji II

Gambar 4.3 Pola Retak *Dog Bone* 8 x 3 x 1 cm

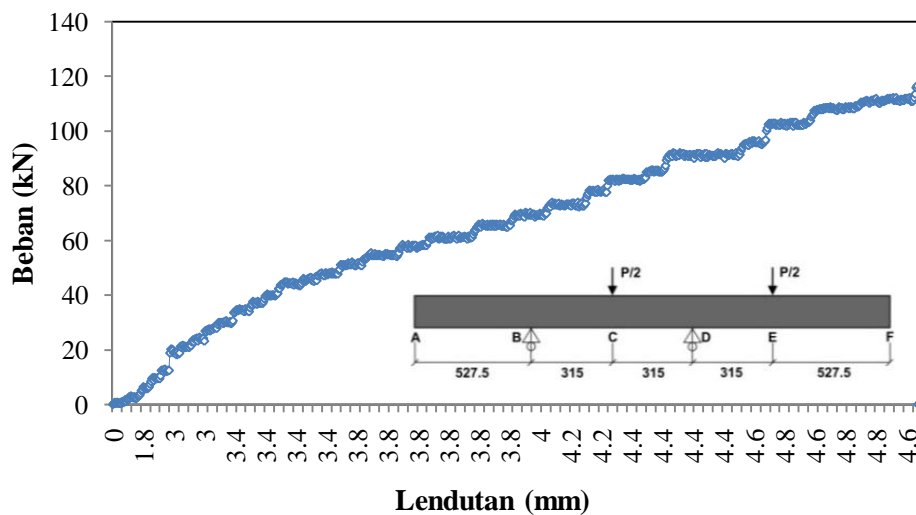
Berdasarkan Gambar 4.3 diketahui bahwa pada saat dilakukan pengujian tarik, ECC menghasilkan banyak retak halus hingga mencapai keadaan retak

putus pada tengah benda uji. Hal ini dapat terjadi akibat susut kering pada ECC karena ukuran mikro partikel material sehingga pada saat dilakukan pengujian maka akan menghasilkan banyak retak halus pada daerah tarik.

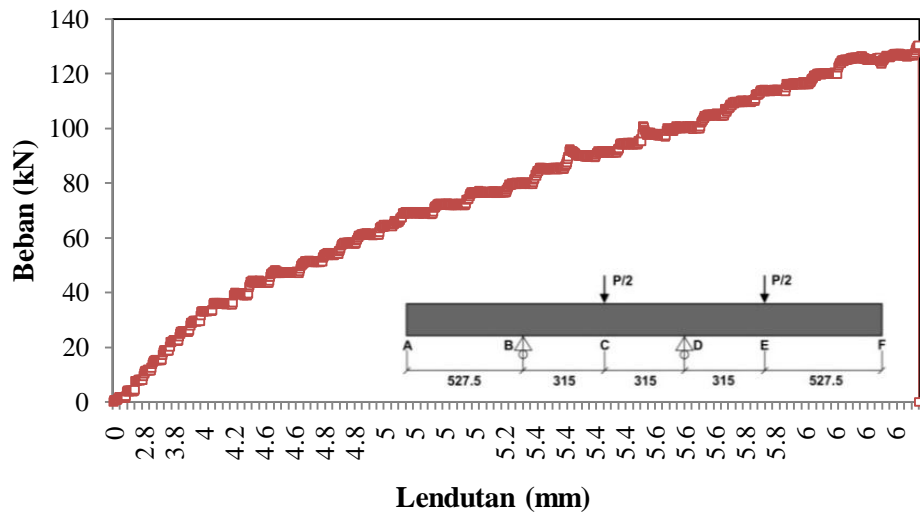
4.5 Pengujian Geser Tanpa *Pre-Crack*

4.5.1 Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Senggang

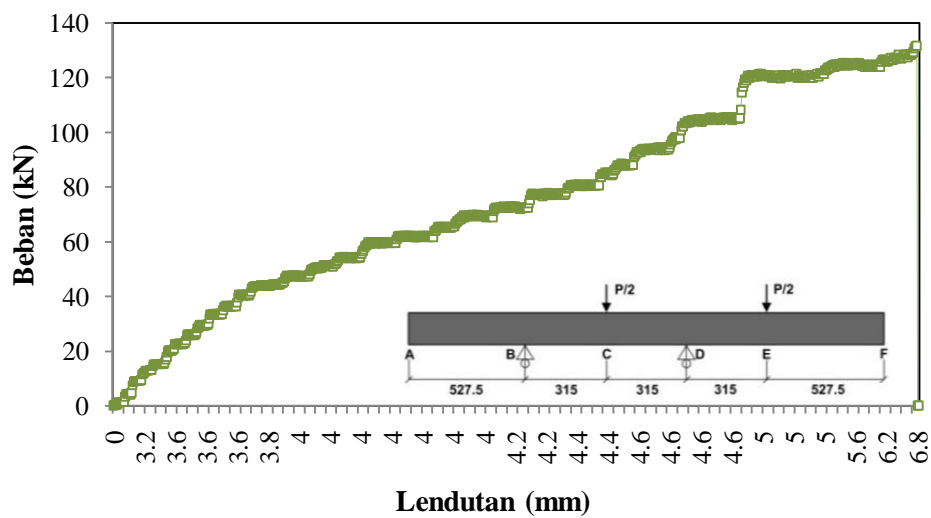
Besar kapasitas beban maksimum tanpa *pre-crack* benda uji balok normal, balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan balok ECC ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.4 sedangkan historis regangan yang dihasilkan *strain gauge* terdapat pada Gambar 4.5. *Strain gauge* I diletakkan pada sengkang dengan jarak 55 cm dari ujung balok untuk mengukur regangan pada tulangan geser, sedangkan *strain gauge* II diletakkan pada tulangan memanjang untuk mengukur regangan pada tulangan lentur.



(a) Balok Normal Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Senggang

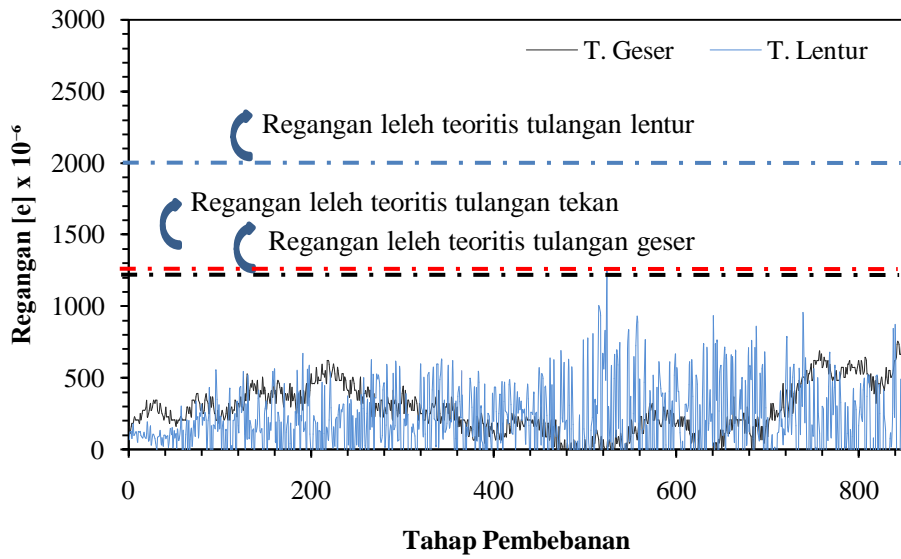


(b) Balok *Supplementary* Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

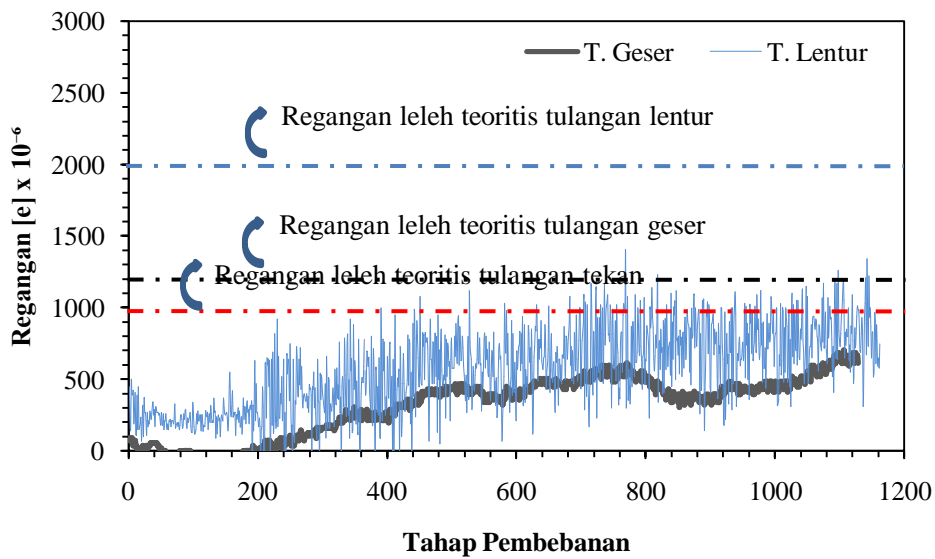


(c) Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

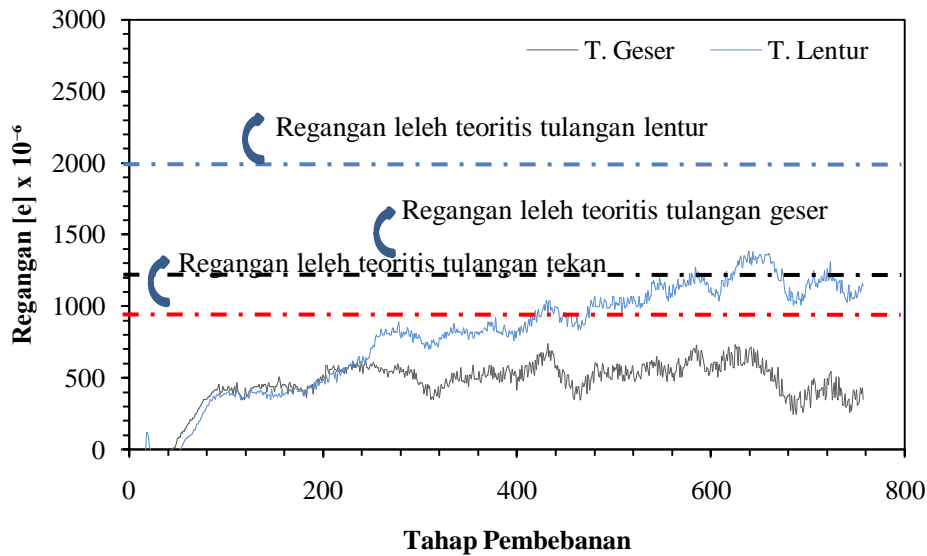
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang



(a)Balok Normal Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Senggang



(b)Balok *Supplementary* Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Senggang



(c)Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

Gambar 4.5 Grafik Historisis Regangan Tulangan Geser dan Tulangan Lentur Balok Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang

Berdasarkan Gambar 4.4 maka dapat disimpulkan bahwa balok ECC dengan sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 2,26% serta lendutan yang lebih besar dibandingkan balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dengan sengkang. Balok ECC juga memiliki kapasitas beban maksimum 11,58% serta lendutan yang lebih besar dibandingkan balok normal. Retak pertama pada balok normal terjadi saat balok menerima beban sebesar 0,67 kN sedangkan pada balok *supplementary* dan balok ECC terjadi saat balok menerima beban yang sama sebesar 1,34. Hal ini berarti balok *supplementary* dan balok ECC memiliki kapasitas beban lebih besar hingga terjadi retak pertama dibandingkan balok normal.

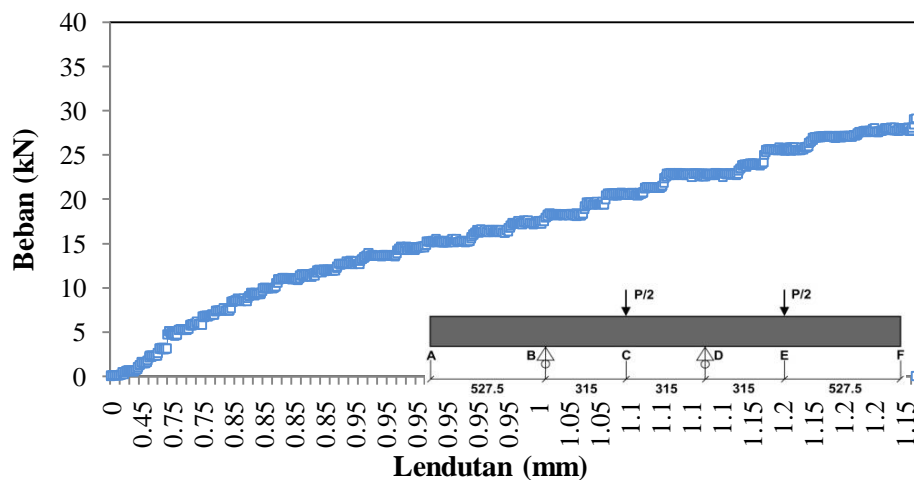
Regangan tulangan geser secara teoritis adalah $f_y/E_s = 240/200000 = 0,0012$ sedangkan regangan tulangan lentur secara teoritis $f_y/E_s = 400/200000 = 0,0020$. Sehingga pada Gambar 4.5 diketahui bahwa regangan tulangan tekan yang dihasilkan oleh balok normal, balok *supplementary*, maupun balok ECC di lebih kecil dari regangan tulangan tekan teoritis balok normal seperti yang terdapat pada Tabel 3.5. Kemungkinan yang terjadi adalah kesalahan pada penempatan posisi *strain gauge* sehingga tulangan geser maupun lentur dalam

kondisi yang belum leleh pada saat kegagalan balok. Data hasil pengujian balok normal dan balok ECC ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan sengkang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

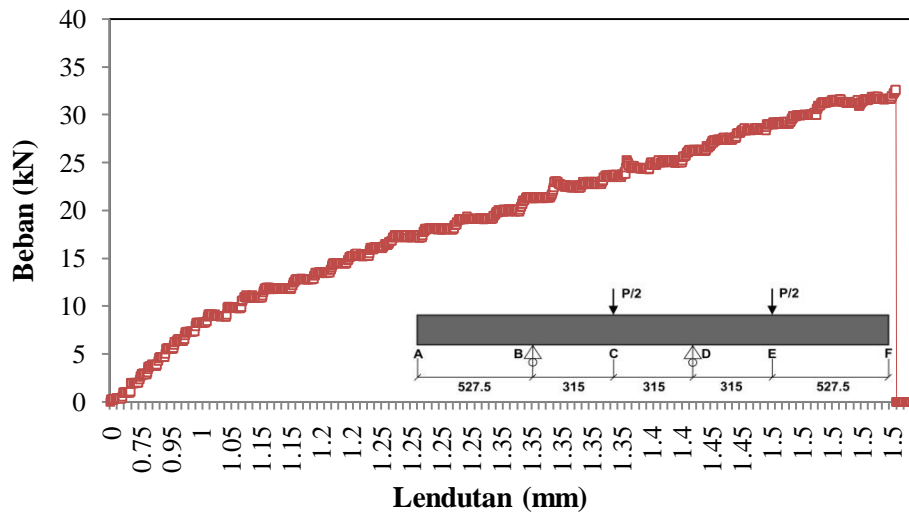
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

No.	Item	Benda Uji		
		Balok Normal	Balok SC	Balok ECC
1.	Retak Pertama (kN)	0,67	1,34	1,34
2.	Beban maksimum (kN)	117,94	130,37	133,39
3.	Lendutan (cm)	5,00	6,00	7,00
4.	Regangan Tulangan Geser	0,00081	0,00042	0,00074
5.	Regangan Tulangan Lentur	0,00123	0,00139	0,00138

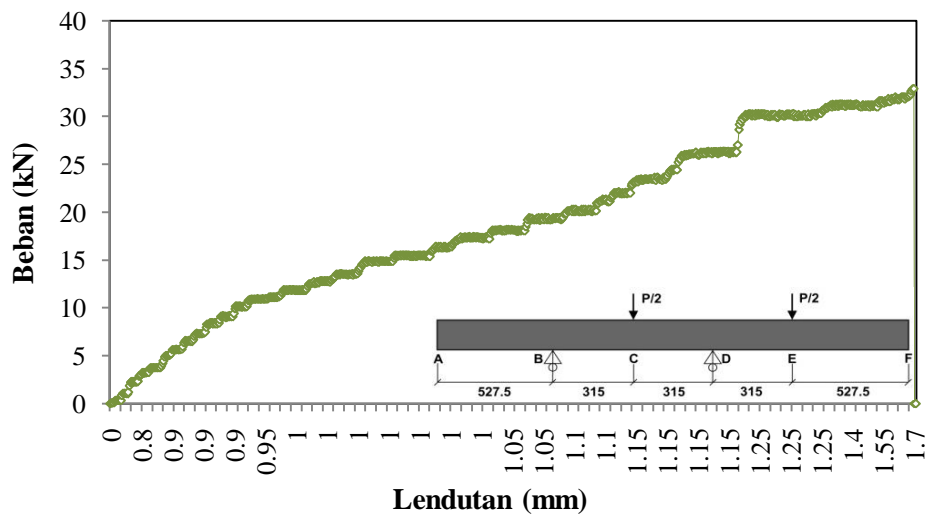
Sehingga kapasitas geser tanpa *pre-crack* balok normal ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan sengkang adalah 29,49 kN; balok *supplementary* 32,59 kN serta balok ECC adalah 33,35 kN lebih kecil dari kapasitas geser desain yaitu 38,89 kN. Grafik hubungan kapasitas beban geser dan lendutan tanpa *pre-crack* benda uji balok normal dan balok ECC ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.6.



(a) Balok Normal Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang



(b) Balok *Supplementary* Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang



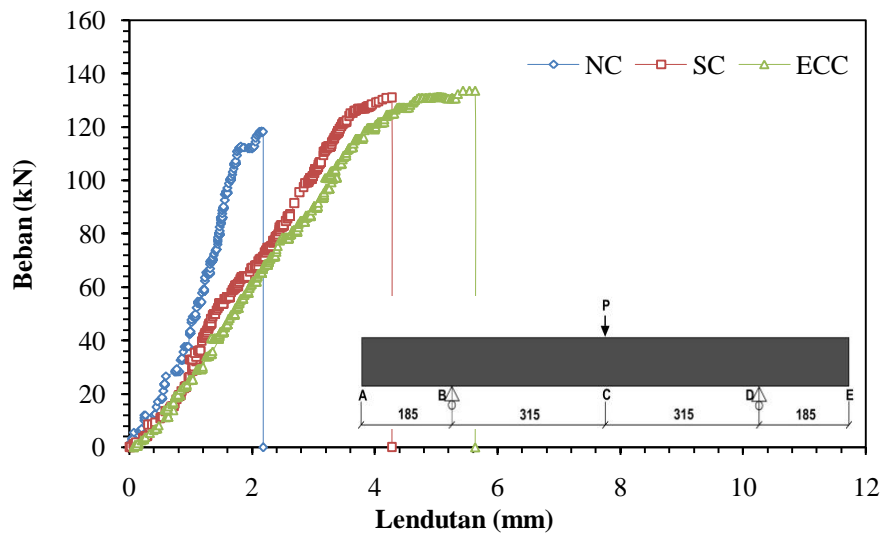
(c) Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

Gambar 4.6 Grafik Hubungan Kapasitas Beban Geser-Lendutan Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

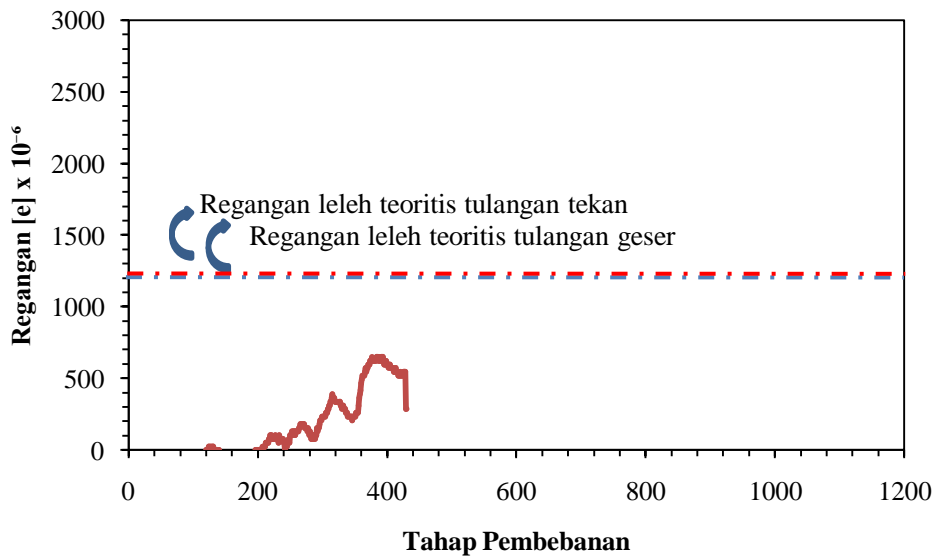
4.5.2 Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang

Besar kapasitas beban maksimum tanpa *pre-crack* benda uji balok normal, balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan balok ECC ukuran 100 x 10 x 20 cm dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.7 sedangkan historis regangan yang dihasilkan *strain gauge* terdapat pada Gambar 4.8. *Strain gauge* diletakkan pada sengkang dengan jarak

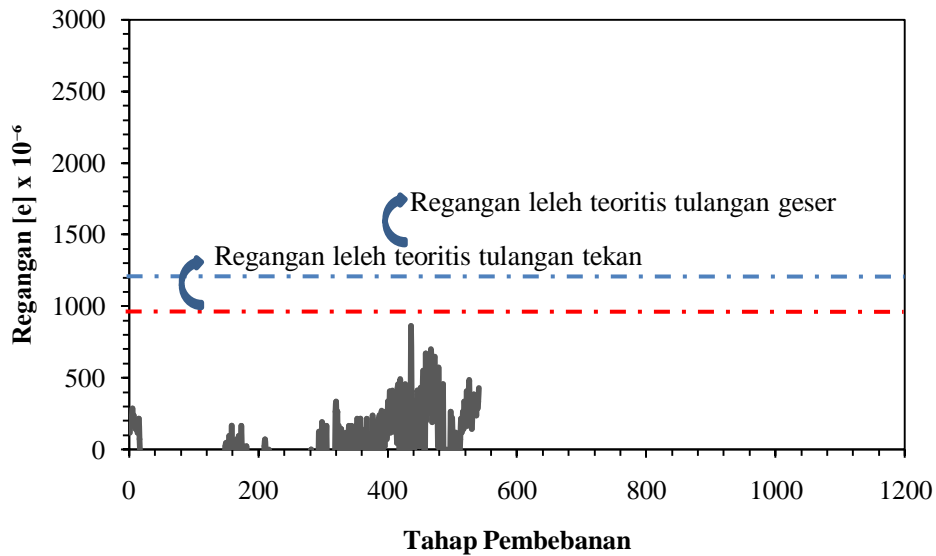
18,5 cm dari ujung balok.



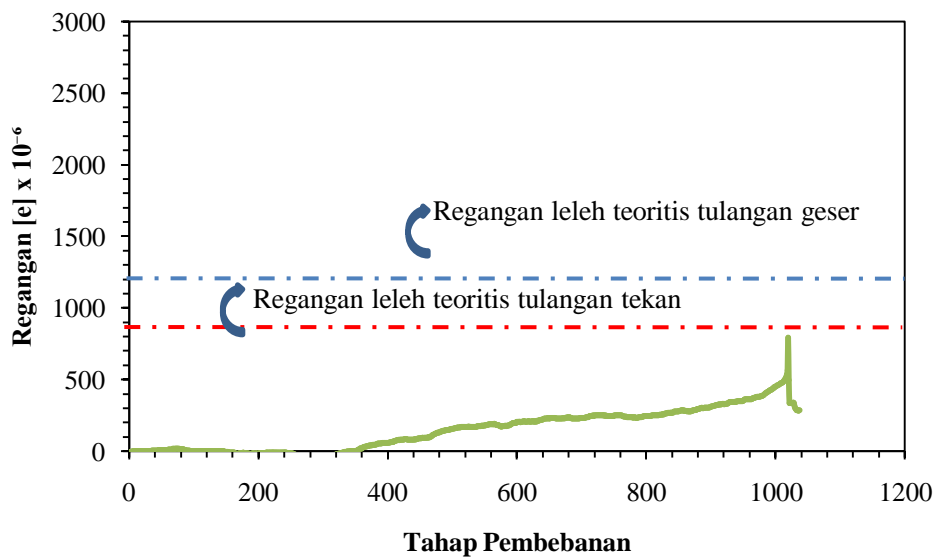
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang



(a) Balok 100x10x20 cm Normal Tanpa Sengkang



(b) Balok 100x10x20 cm *Supplementary* Tanpa Sengkang



(c) Balok 100x10x20 cm ECC Tanpa Sengkang

Gambar 4.8 Grafik Historis Regangan Tulangan Geser Pada Tumpuan Balok Normal dan Balok ECC Ukuran 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang

Berdasarkan Gambar 4.7 dapat disimpulkan bahwa balok ECC tanpa sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 11,38% lebih besar dibandingkan balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) tanpa sengkang serta beban maksimum 1,95% lebih besar dibandingkan balok normal tanpa sengkang. Retak pertama pada balok normal terjadi saat balok menerima beban sebesar 3,53 kN, balok *supplementary* 4,37 kN dan pada balok ECC 2,19 kN. Hal ini berarti balok ECC menerima beban 8,42% lebih besar

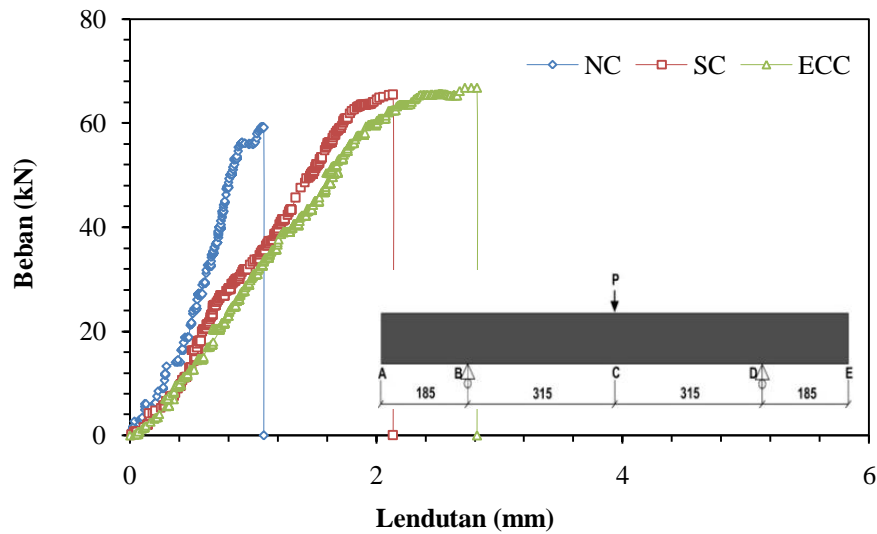
hingga terjadi retak pertama dibandingkan balok normal. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ECC mudah mengalami retak awal akibat pembebanan yang dilakukan namun memiliki kemampuan menahan beban yang lebih besar dibandingkan balok normal dan balok *supplementary*. Bahkan dalam pengujian ini, retak pertama yang terjadi pada ECC adalah 5-6 kali lebih awal dibandingkan balok normal maupun balok *supplementary*.

Berdasarkan Gambar 4.8 diketahui bahwa tulangan sengkang pada balok ECC, balok normal dan balok *supplementary* juga belum leleh pada saat terjadinya kegagalan balok.. Data hasil pengujian balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan sengkang dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Geser Balok Normal dan ECC Ukuran 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang

No.	Item	Benda Uji		
		Balok Normal	Balok SC	Balok ECC
1.	Retak Pertama (kN)	3,53	4,37	0,67
2.	Beban maksimum (kN)	118,44	131,04	133,65
3.	Lendutan (cm)	2,18	4,28	5,64
4.	Regangan tulangan geser pada tumpuan	0,00065	0,00086	0,00079

Sehingga kapasitas geser tanpa *pre-crack* balok normal ukuran 100 x 10 x 20 cm tanpa sengkang adalah 60,48kN; balok *supplementary* 65,52 serta balok ECC adalah 66,82 kN lebih kecil dari kapasitas geser desain yaitu 76,13 kN (Tabel 3.9). Grafik hubungan kapasitas beban geser dan lendutan tanpa *pre-crack* benda uji balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC ukuran 100 x 10 x 20 cm tanpa sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Kapasitas Beban Geser-Lendutan Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang

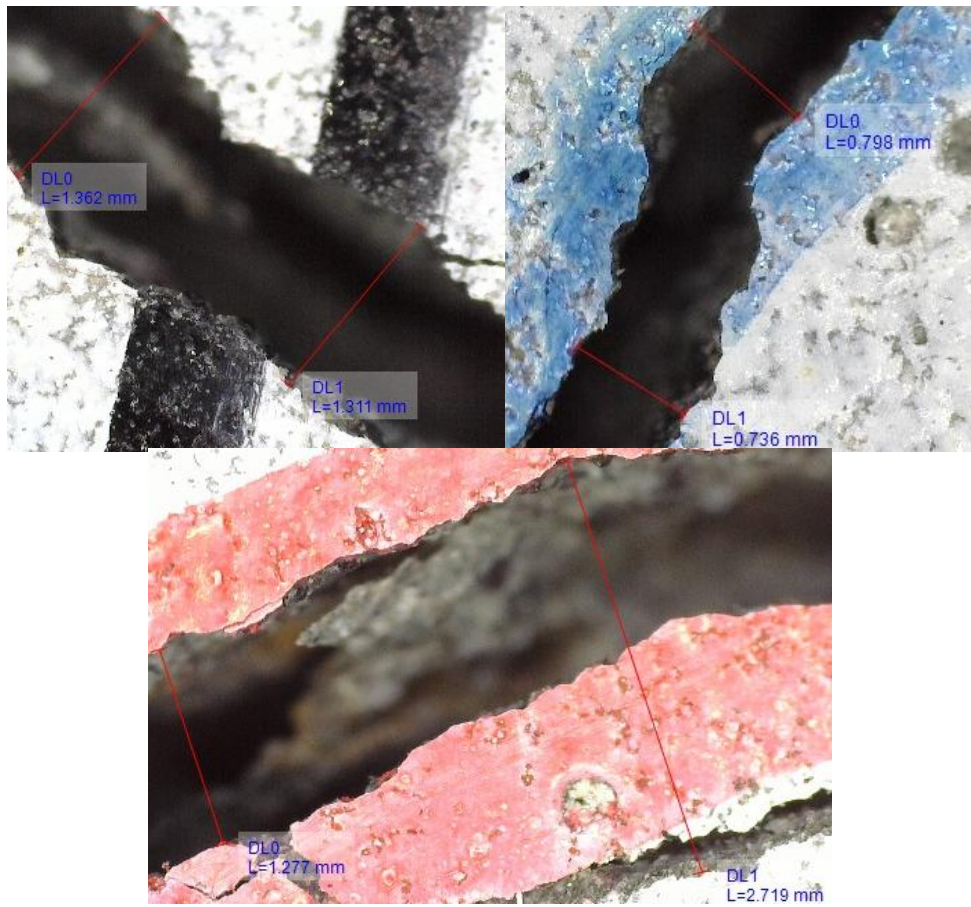
4.6 Lebar Retak Balok Tanpa *Pre-Crack*

4.6.1 Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm dengan Sengkang

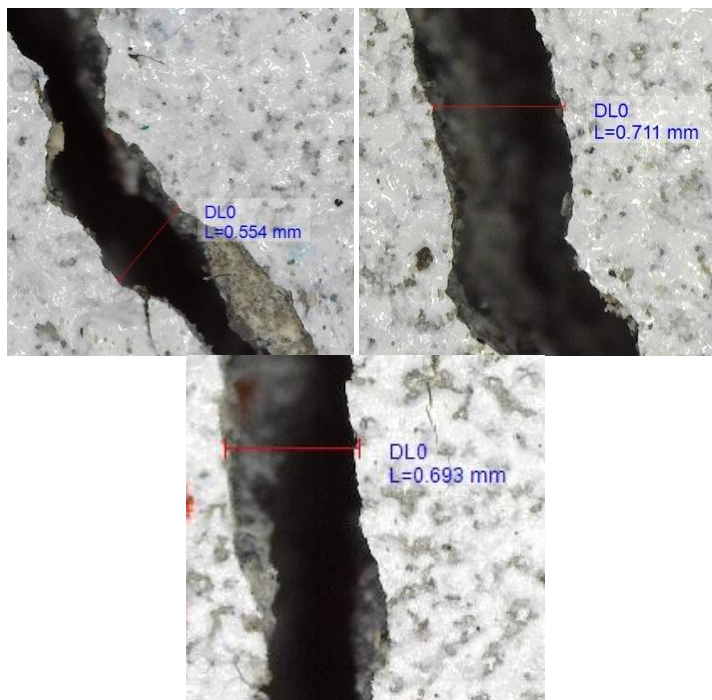
Hasil pengukuran lebar retak balok diperoleh dengan menggunakan alat ukur *microscope digital*. Adapun hasil pengukuran lebar retak terdapat pada Tabel 4.8 sedangkan Gambar lebar retak terdapat dalam Gambar 4.10.

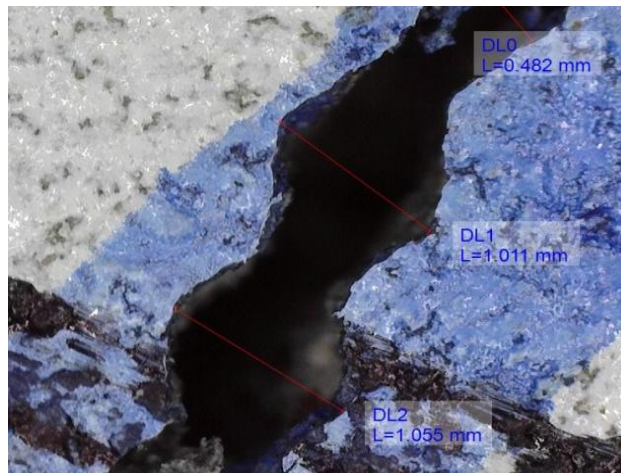
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

No.	Benda Uji	Lebar Retak (mm)					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Balok Normal	0,736	0,798	1,311	1,362	2,719	1,277
2.	Balok <i>Supplementary</i>	0,554	0,711	0,482	0,693	1,011	1,055
3.	Balok ECC	0,200	0,176	0,248	0,276	0,124	0,118
	Rata-Rata Normal			1,357 mm			
	Rata-Rata SC			0,751 mm			
	Rata-Rata ECC			0,190 mm			

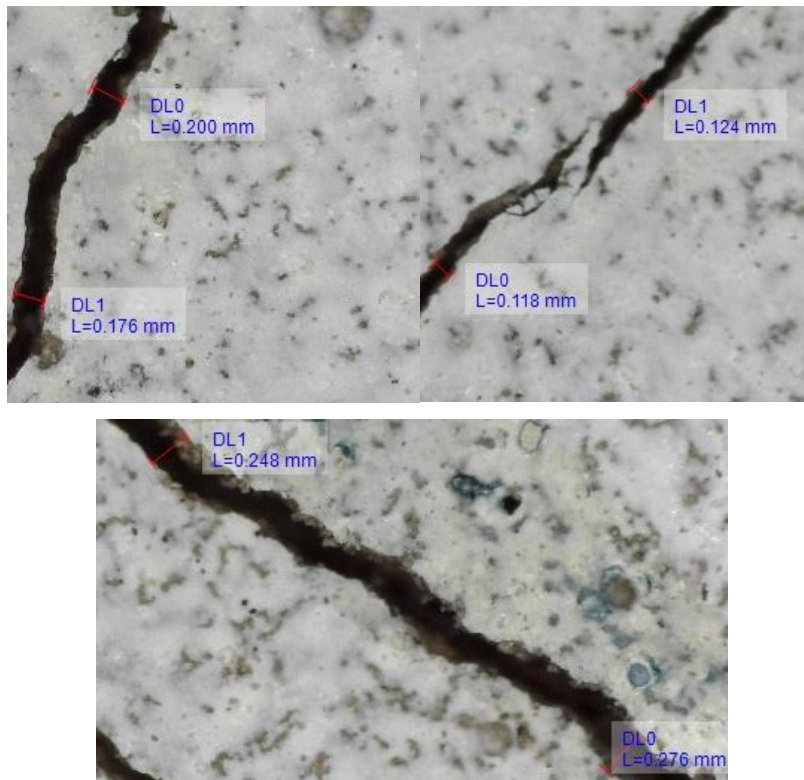


(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm





(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm

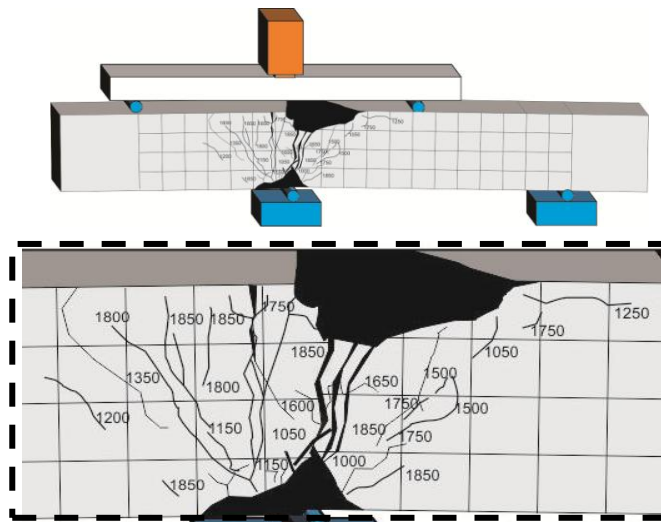


(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm

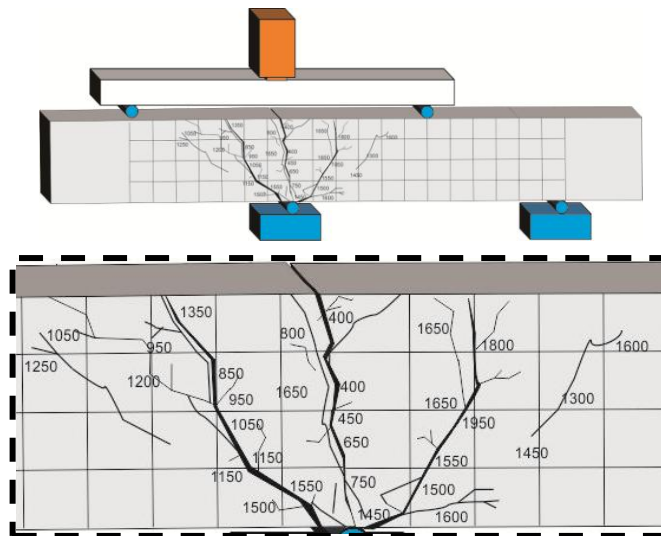
Gambar 4.10 Lebar Retak Balok 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang

Berdasarkan Tabel 4.8, diketahui bahwa lebar retak rata-rata balok ECC dengan sengkang lebih kecil dibandingkan balok normal dengan sengkang maupun balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dengan sengkang. Selain itu, retak halus yang terjadi pada balok ECC juga lebih banyak. Jika dibandingkan dengan perhitungan lebar retak teoritis

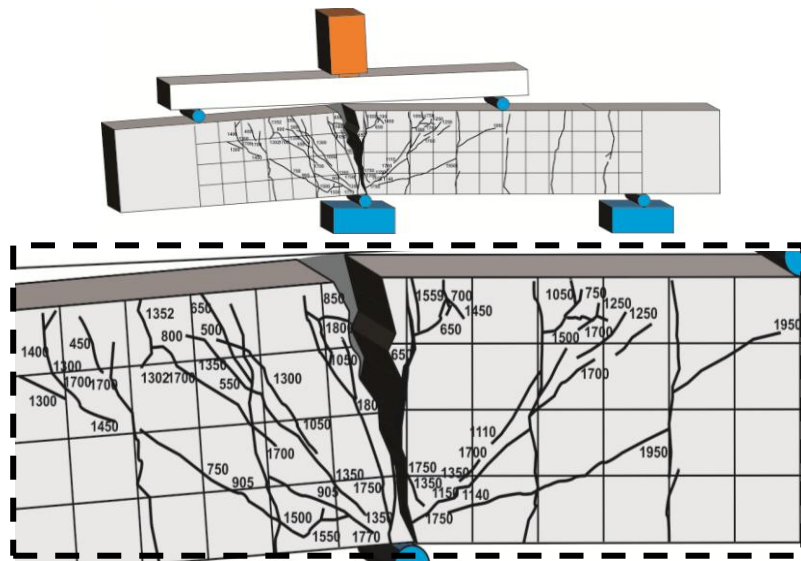
pada butir 3.6c maka lebar retak rata-rata balok normal dan balok *supplementary* masih mendekati lebar retak teoritis yaitu 0,922 mm; akan tetapi lebar retak balok ECC memiliki perbedaan yang signifikan dengan lebar retak teoritis balok. Namun meskipun demikian, ECC tetap mampu menahan beban yang lebih besar dibandingkan balok normal dan balok *supplementary*. Sketsa pola retak balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.11.



(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang Tanpa *Pre-Crack*



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang Tanpa *Pre-Crack*



(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang Tanpa *Pre-Crack*

Gambar 4.11 Sketsa Pola Retak Balok Normal dan ECC 200 x 10 x 20 cm dengan Sengkang Tanpa *Pre-Crack*

Berdasarkan Gambar 4.11 diketahui bahwa pada saat dilakukan pengujian geser, ECC dengan sengkang menghasilkan banyak retak halus sebagai akibat susut kering yang terjadi karena mikro material penyusunnya. Namun daerah hancur (*crush*) terbesar justru terjadi pada balok normal khususnya dibagian atas maupun bawah balok. Pada balok *supplementary* terdapat sedikit daerah hancur di bawah balok sedangkan balok ECC hanya terjadi retak diagonal besar pada tumpuan balok hingga ke bagian atas balok tanpa adanya daerah hancur. Hal ini dapat membuktikan bahwa ikatan antara serat PVA dan matriks semen yang terdapat dalam balok ECC serta adanya sengkang, mampu menjadikan balok ECC lebih baik dalam memikul beban geser dibandingkan balok normal dan balok *supplementary*.

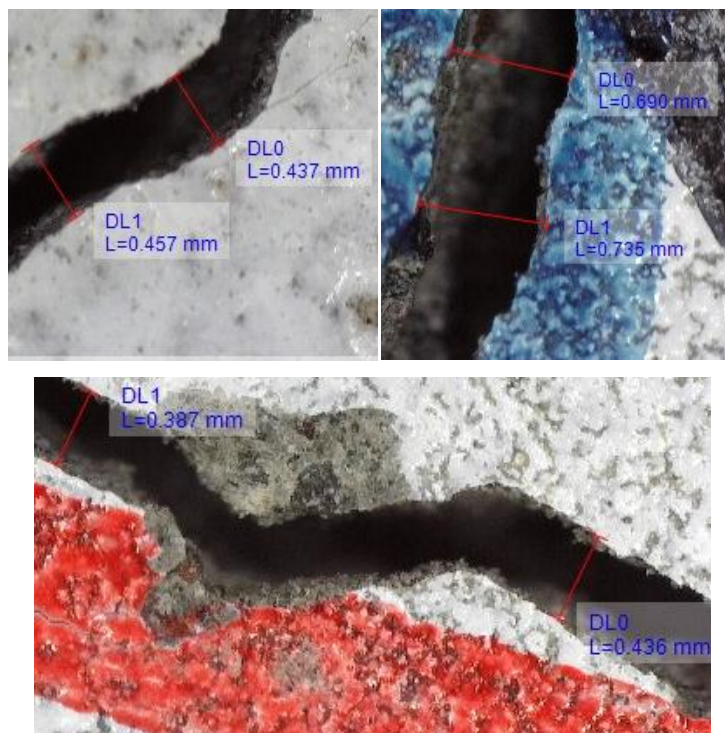
Pada balok ukuran 200 x 10 x 20 cm tanpa *pre-crack*, balok ECC memiliki lebar retak rerata 7 kali lebih kecil dibandingkan balok normal dan 4 kali lebih kecil dibandingkan balok *supplementary*.

4.6.2 Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 100x10x20 cm Tanpa Sengkang

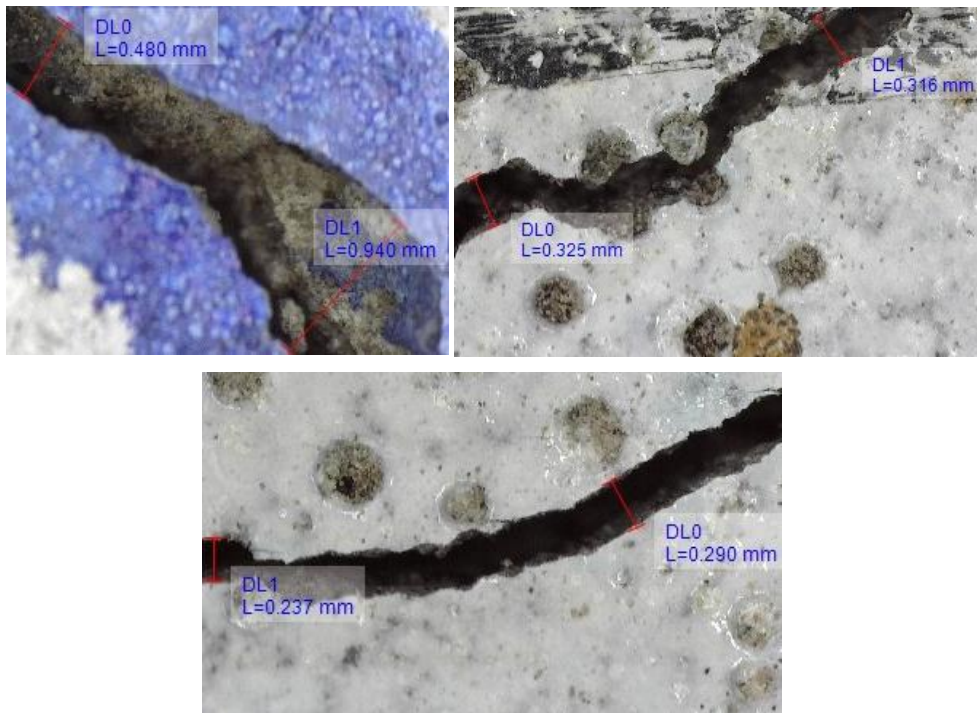
Hasil pengukuran lebar retak balok diperoleh dengan menggunakan alat ukur *microscope digital*. Adapun hasil pengukuran lebar retak terdapat pada Tabel 4.9 sedangkan gambar lebar retak dapat dilihat pada Gambar 4.12.

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Normal dan ECC Ukuran 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang

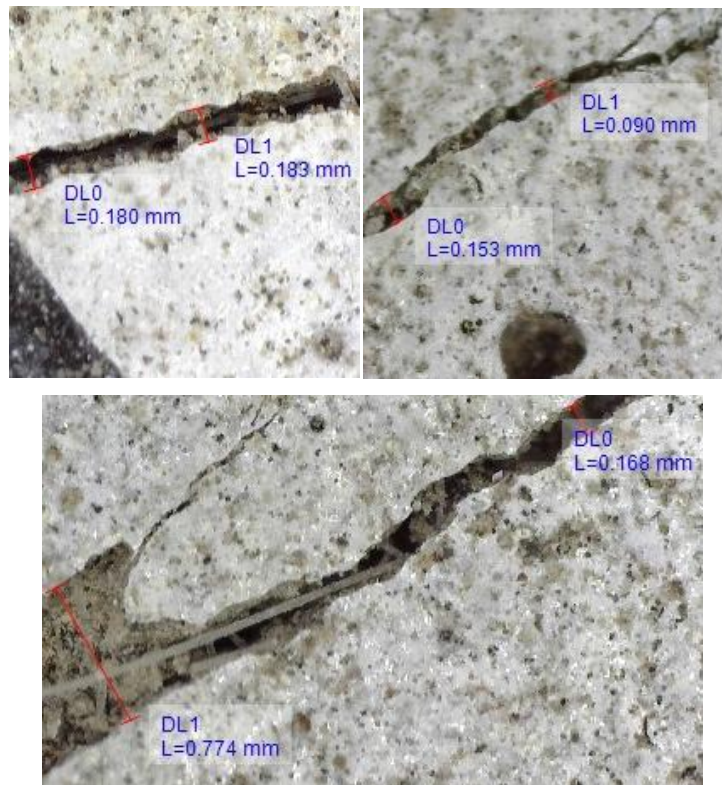
No.	Benda Uji	Lebar Retak (mm)					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Balok Normal	0.387	0.436	0.690	0.735	0.457	0.437
2.	Balok SC	0.325	0.316	0.237	0.290	0.480	0.940
3.	Balok ECC	0,774	0,168	0,180	0,183	0,153	0,090
Rata-Rata Normal			0.524 mm				
Rata-Rata SC			0.431 mm				
Rata-Rata ECC			0,258 mm				



(a) Balok Normal 100 x 10 x 20 cm



(b) Balok *Supplementary* 100 x 10 x 20 cm

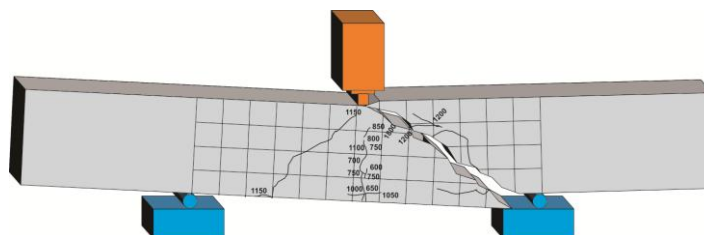


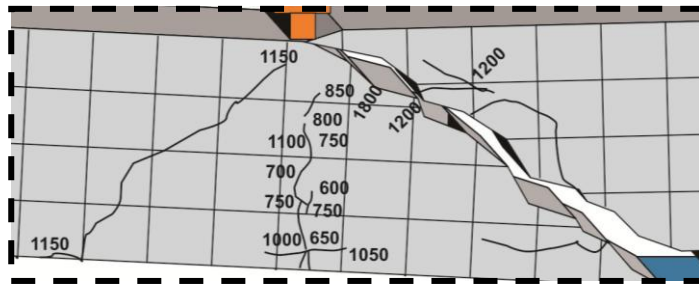
(c) Balok ECC 100 x 10 x 20 cm

Gambar 4.12 Lebar Retak Balok 100 x 10 x 20 cm

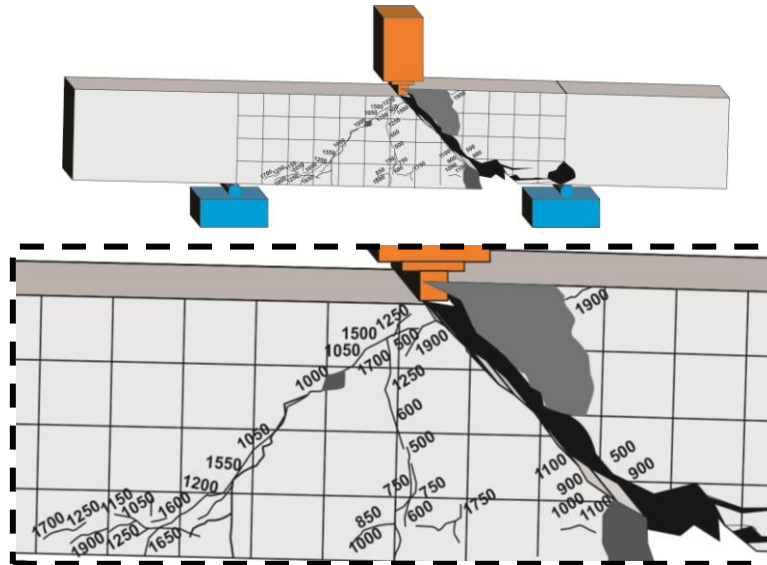
Berdasarkan Tabel 4.9 di atas, diketahui bahwa lebar retak rata-rata balok ECC tanpa sengkang adalah 40,14% atau 1,5 kali lebih kecil dibandingkan balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) tanpa sengkang serta 50,76% atau 2 kali lebih kecil dibandingkan balok normal. Dikeahui juga bahwa balok normal, balok *supplementary* maupun balok ECC memiliki lebar retak rata-rata dibawah lebar retak teoritis yaitu 0,902 mm seperti pada perhitungan butir 3.6d. Oleh karena itu, berdasarkan hasil penelitian pada balok ukuran 100 x 10 x 20 maka dapat disimpulkan bahwa ECC mengalami retak pertama yang terjadi lebih awal dibandingkan balok lainnya. Namun walaupun demikian, kombinasi antara serat PVA maupun ikatan matriks semen yang bersesuaian pada ECC menjadikannya mampu menahan beban yang lebih besar. Peran serat maupun ikatan matriks pada ECC juga dibuktikan dengan lebar retak yang lebih kecil dibandingkan balok lainnya.

Jika pada balok normal ukuran 200 x 10 x 20 cm terjadi retak pertama yang lebih kecil dan memiliki kemampuan menahan beban yang lebih kecil pula dibandingkan balok lain, maka pada balok ECC ukuran 100 x 10 x 20 cm terjadi retak pertama yang lebih kecil namun mampu menerima beban yang lebih besar dibandingkan balok lainnya. Retak halus yang terbentuk pada balok ECC ukuran 100 x 10 x 20 cm juga lebih banyak dibandingkan balok ECC 200 x 10 x 20 cm. Oleh karena itu, kemungkinan yang terjadi adalah pengaruh yang disebabkan oleh perbedaan mutu beton seperti yang terdapat pada butir 4.3.3 diperoleh kuat tekan rata-rata balok 200 x 10 x 20 cm sebesar 50,77MPa sedangkan balok 100 x 10 x 20 cm sebesar 58,87 MPa. Perbedaan mutu balok bisa disebabkan oleh kondisi material, keakuratan timbangan, faktor rasio air semen dan sebagainya. Sketsa pola retak balok normal dan balok ECC tanpa sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.13.

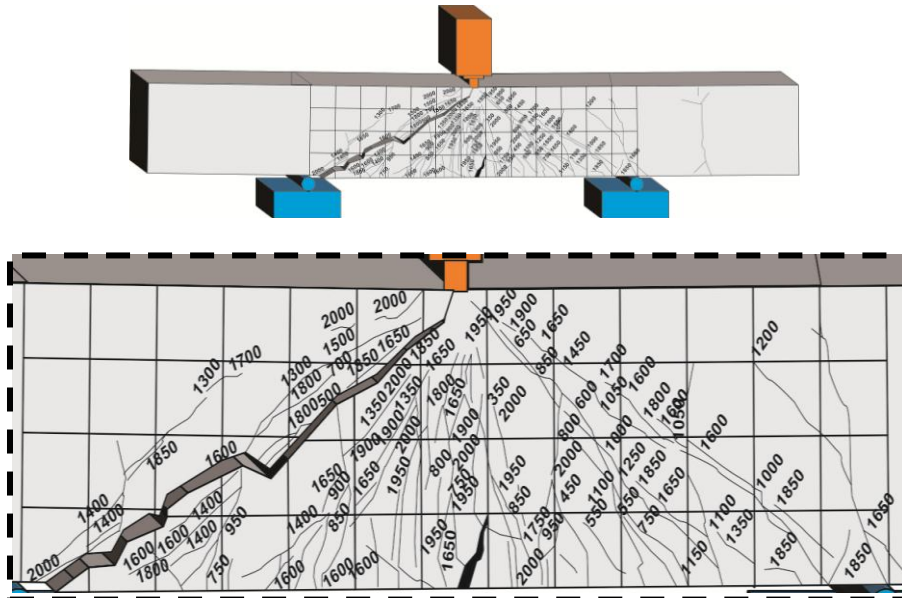




(a) Balok Normal 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang Tanpa *Pre-Crack*



(b) Balok *Supplementary* 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang Tanpa *Pre-Crack*



(c) Balok ECC 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang Tanpa *Pre-Crack*

Gambar 4.13 Sketsa Pola Retak Balok Normal dan ECC 100 x 10 x 20 cm Tanpa Sengkang Tanpa *Pre-Crack*

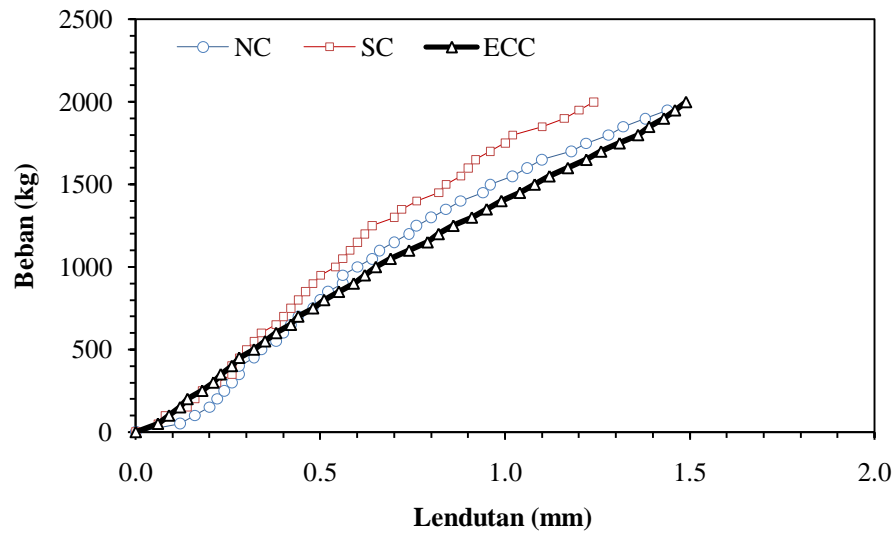
Jika hasil pengujian seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.13, maka dapat diketahui bahwa balok 100 x 10 x 20 cm termasuk dalam *deep beam* tipe III seperti pada Gambar 2.5 perilaku kegagalan balok bertulang tanpa tulangan geser dengan patahan dimulai pada tumpuan hingga beban dengan jarak $< 2d = 330$ cm dan $> d = 165$ cm

Berdasarkan hasil pengujian geser tanpa *pre-crack* dengan maupun tanpa sengkang pada balok normal, balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan balok ECC dengan luas daerah geser yang sama, maka dapat diketahui bahwa balok ECC yang menggunakan sengkang maupun tanpa sengkang lebih baik dalam menerima beban dibandingkan balok normal maupun balok *supplementary*.

Balok ECC dengan sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 2,32% yang lebih besar dibandingkan balok *supplementary* dengan sengkang serta 13,10% lebih besar dibandingkan balok normal dengan sengkang. Sedangkan balok ECC tanpa sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 15,90% lebih besar dibandingkan balok *supplementary* tanpa sengkang serta beban maksimum 25,55% lebih besar dibandingkan balok normal tanpa sengkang.

4.7 Pembuatan *Pre-Crack*

Pembuatan *pre-crack* balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang adalah menggunakan *four point bending method* seperti pada Gambar 3.5. Balok diamati setiap kenaikan beban sebesar 50 kg atau 0,5 kN. Parameter yang diamati adalah retak balok yang mencapai tinggi lebih dari selimut balok 3 cm namun masih di bawah garis netral balok 10 cm. Retakan yang terjadi ditandai dengan spidol permanen, kemudian diukur lebarnya menggunakan alat ukur *microscope digital*. Hubungan beban-lendutan *pre-crack* dapat dilihat pada Gambar 4.14 sedangkan lebar retak *pre-crack* terdapat dalam Tabel 4.10 dan Gambar 4.15.

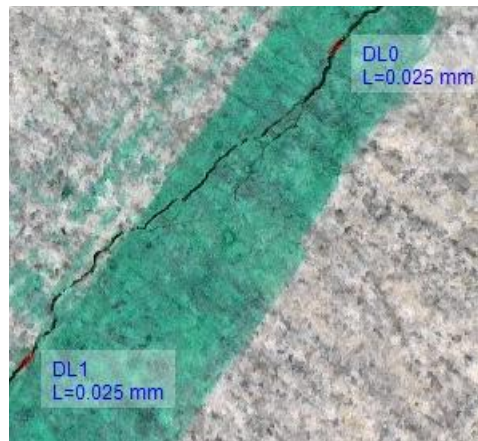


Gambar 4.14 Grafik Hubungan Beban-Lendutan *Pre-Crack* Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC 200x10x20 cm

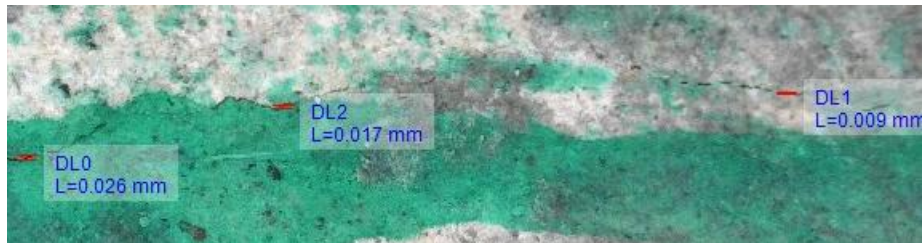
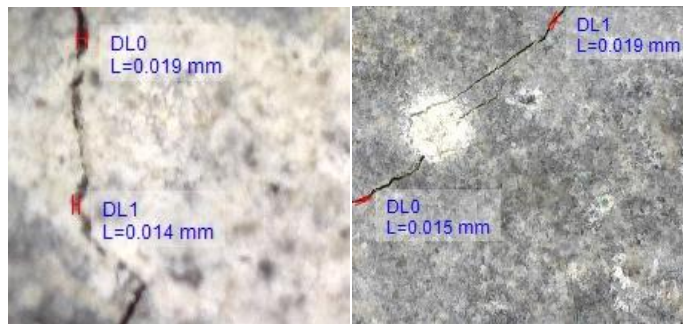
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Beban dan Lebar Retak *Pre-Crack* Balok

No.	Benda Uji	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Lebar Retak (mm)					
				I	II	III	IV	V	VI
1.	Normal	20	1,44	0,028	0,015	0,025	0,025	0,012	0,016
2.	SC	20	1,24	0,019	0,014	0,019	0,015	0,026	0,017
3.	ECC	20	1,49	0,028	0,015	0,017	0,009	0,012	0,016
Rata-Rata Normal						0,020 mm			
Rata-Rata SC						0,018 mm			
Rata-Rata ECC						0,016 mm			





(a) Balok Normal 200 x 20 x 10 cm



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm



(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm

Gambar 4.15 Lebar *Pre-Crack* Balok 200 x 10 x 20 cm

Berdasarkan tabel di atas, diketahui bahwa dengan beban *pre-crack* yang sama pada ketiga jenis balok, balok ECC terjadi lendutan yang lebih besar dibandingkan balok normal dan balok *supplementary* sebagai akibat dari kekakuan ECC yang kecil karena terdiri dari material-material halus tanpa adanya agregat kasar (kerikil).

Selain itu, lebar *pre-crack* rata-rata balok ECC dengan sengkang lebih kecil dibandingkan balok normal dan balok *supplementary* dengan sengkang. Sketsa pola retak balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.16.



(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm



(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm

Gambar 4.16 Sketsa Pola Retak *Pre-Crack* Balok Normal, Balok *Supplementary* dan ECC 200x10x20 cm

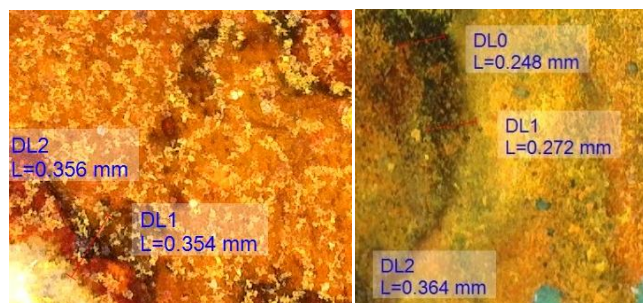
Pada Gambar 4.16 terlihat bahwa balok ECC memproduksi retak halus yang lebih banyak dibandingkan balok normal maupun balok *supplementary*. Balok yang terjadi retak dengan jumlah yang paling sedikit adalah balok *supplementary*. Hal ini terjadi karena kombinasi material penyusun balok berupa *fly ash* dengan ukuran butiran yang sangat kecil sehingga dapat memenuhi pori-pori balok dan terdapat juga agregat kasar. Kombinasi material inilah yang membuat porositas semakin kecil dan mengurangi retak pada balok tersebut.

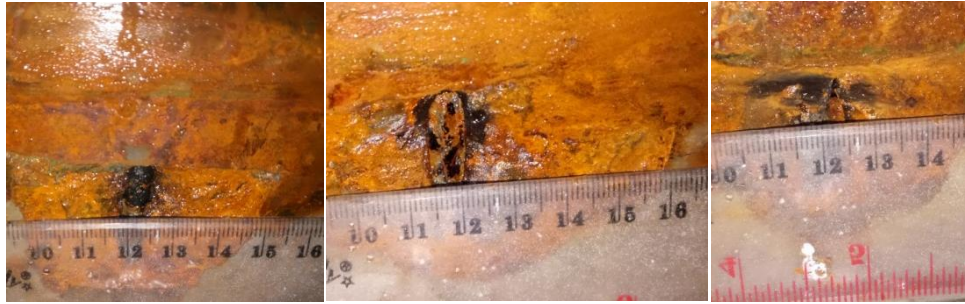
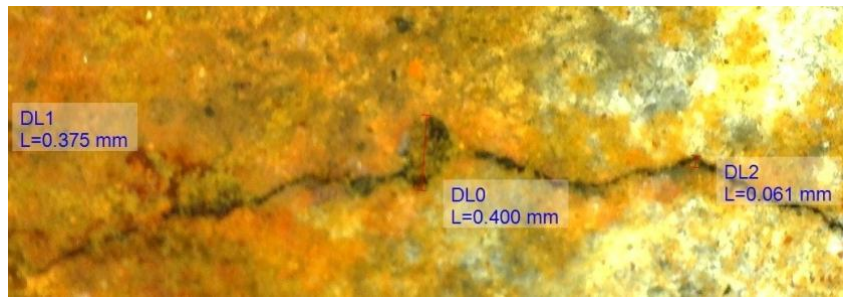
4.8 Pengujian Korosi Menggunakan Metode Galvanostatik

Pengujian korosi dilakukan dengan menggunakan metode galvanostatik seperti yang telah dijelaskan pada bab 3. Setelah balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang direndam dalam larutan NaCl 3,5% dan dialiri arus listrik sebesar 0,3 ampere selama 30 hari, pengujian dihentikan kemudian dilakukan pengamatan dan pengukuran lebar retak pada ketiga balok menggunakan alat *microscope digital*. Hasil pengukuran lebar balok terdapat dalam Tabel 4.11 dan Gambar 4.17.

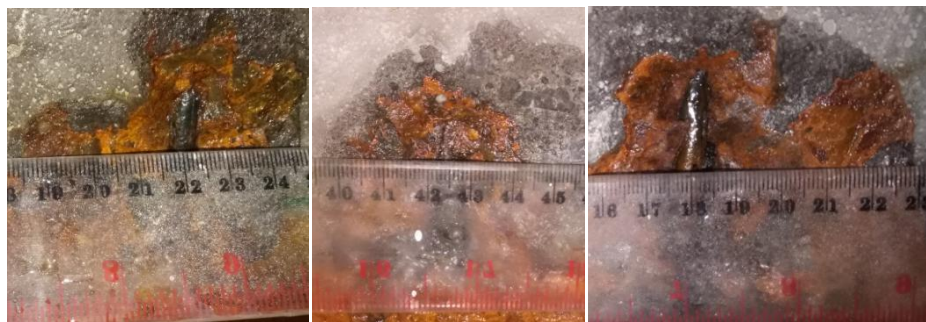
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Lebar Retak Balok Setelah Korosi

No.	Benda Uji	Lebar Retak (mm)					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Balok Normal	0,248	0,354	0,364	0,375	0,400	0,356
2.	<i>Crush</i> Balok Normal	50	45	55	45	40	-
3.	Balok SC	0,250	0,232	0,207	0,174	0,247	0,289
4.	<i>Crush</i> Balok SC	50	50	40	45	40	40
5.	Balok ECC	0,171	0,104	0,154	0,138	0,184	0,131
Rata-Rata Normal			0,350 mm				
Rata-Rata <i>Crush</i> Normal			47,00 mm				
Rata-Rata SC			0,233 mm				
Rata-Rata <i>Crush</i> SC			44,17 mm				
Rata-Rata ECC			0,134 mm				

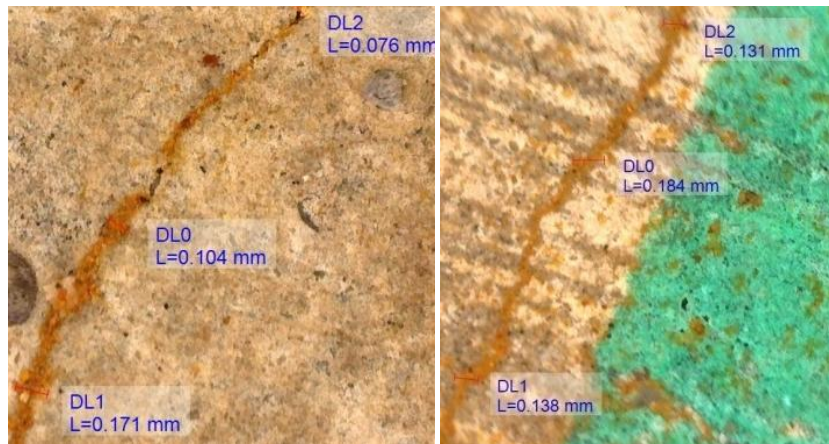




(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm



(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm

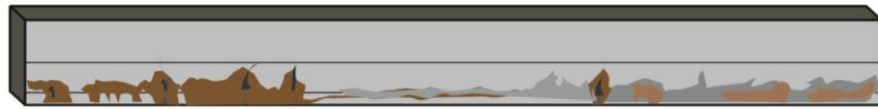
Gambar 4.17 Lebar Retak Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi

Berdasarkan Tabel 4.11 dan Gambar 4.17 di atas, diketahui bahwa lebar retak rata-rata setelah korosi balok ECC dengan sengkang adalah lebih kecil dibandingkan balok *supplementary* dengan sengkang dan balok normal dengan sengkang.

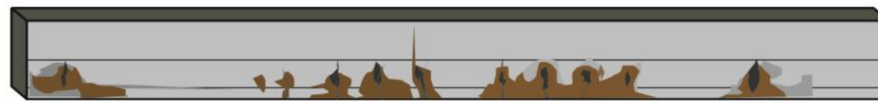
Pada balok normal, lebar retak rata-rata meningkat dari *pre-crack* hingga pasca korosi sebesar 0,22 mm sekitar 13 kali lebih besar; lebar retak rata-rata balok *supplementary* meningkat dari *pre-crack* hingga pasca korosi sebesar 0,33 mm sekitar 17 kali lebih besar; sedangkan lebar retak rata-rata balok ECC meningkat dari *pre-crack* hingga pasca korosi sebesar 0,12 mm atau sekitar 8 kali lebih besar.

Selain itu, retak pasca korosi pada balok normal dan balok *supplementary* tidak menyentuh garis netral yang berarti perambatan retak korosi secara vertical berlangsung sangat lambat dibandingkan balok ECC yang hampir mencapai bagian atas balok. Namun yang menjadi perhatian adalah pada balok normal terdapat bagian balok yang hancur (*crush*) dengan lebar rata-rata 47 mm serta balok *supplementary* 44,17 mm hingga memperlihatkan tulangan sengkang di dalam balok akan tetapi hal ini tidak terjadi pada balok ECC. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.18c pada balok ECC, retak *pre-crack* hanya mengalami sedikit penambahan ukuran lebar serta memanjang hingga hampir mencapai bagian atas balok. Hal ini disebabkan karena ikatan antara serat dan semendapat

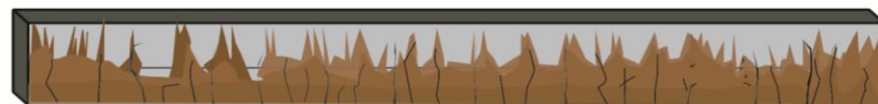
meningkatkan plastisitas balok serta mencegah terjadinya pelebaran retak pada balok ECC. Sketsa pola retak balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang setelah korosi dapat dilihat pada Gambar 4.18.



(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm

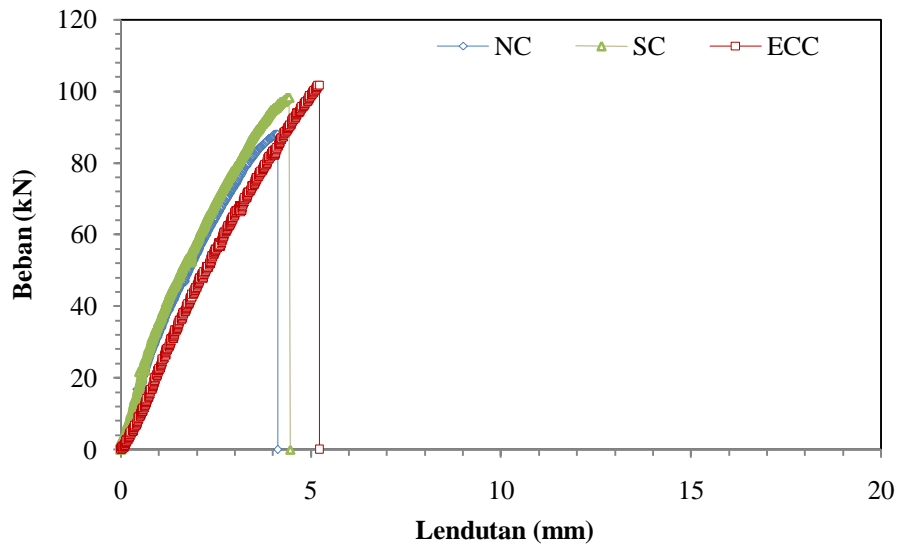


(c) Balok ECC 200 x 10 x 20 cm

Gambar 4.18 Sketsa Pola Retak Setelah Korosi Balok Normal, Balok *Supplementary* dan ECC 200x10x20 cm

4.9 Pengujian Geser Setelah Korosi

Pengujian geser pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC ukuran 200 x 10 x 20 cm menggunakan metode *three point bending* dengan jarak lengan geser a sebesar 315 cm. Hasil pengujian balok dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Tabel 4.12 sedangkan pola retak balok dapat dilihat pada Gambar 4.20.



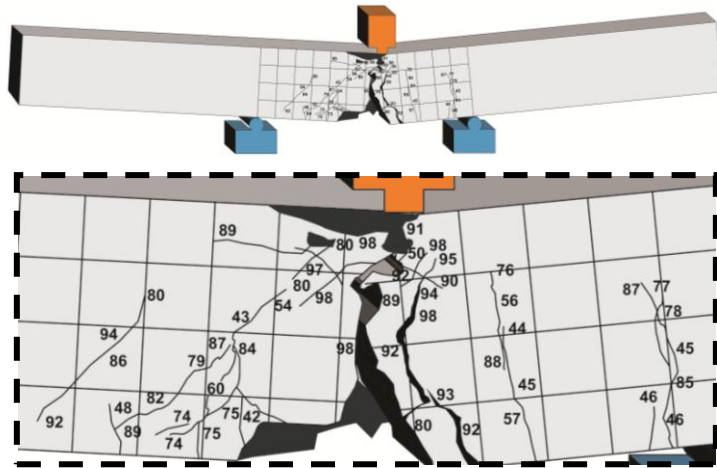
Gambar 4.19 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Geser Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Setelah Korosi

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Geser Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Setelah Korosi

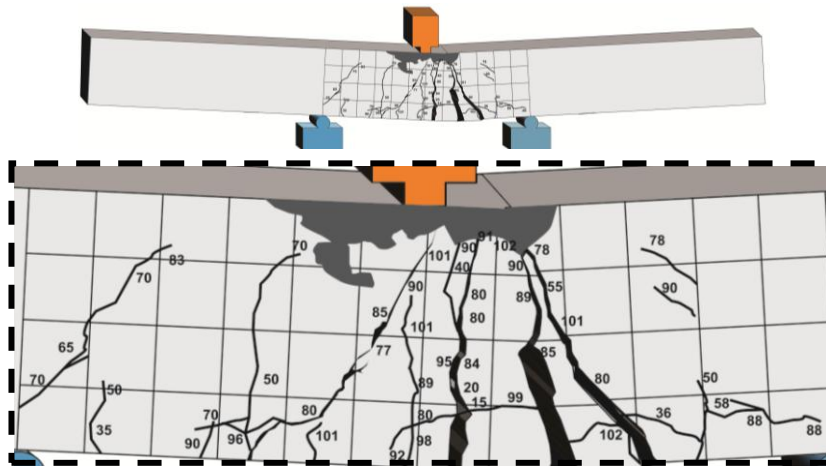
No.	Item	Benda Uji		
		Balok Normal	Balok SC	Balok ECC
1.	Beban maksimum (kN)	87.93	98.31	101.74
2.	Lendutan (cm)	4,13	4,56	5,22

Berdasarkan Gambar 4.19 dan Tabel 4.12 maka dapat disimpulkan bahwa balok ECC lebih baik menahan beban geser dibandingkan balok normal dan balok *supplementary* setelah mengalami korosi.

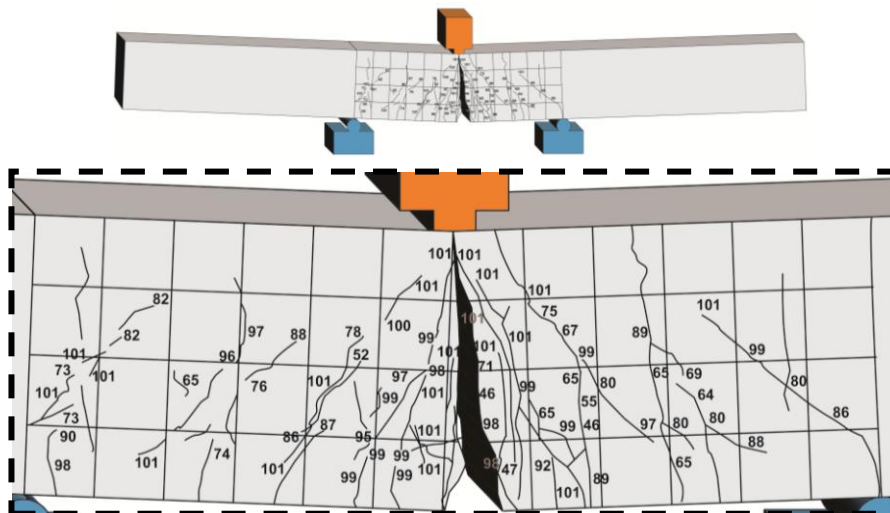
Penurunan kapasitas yang terjadi setelah terjadi korosi pada balok normal adalah sebesar 25,45%; balok *supplementary* 24,59% dan ECC 23,72%. Balok ECC setelah korosi juga masih memiliki kapasitas beban geser 13,58% lebih besar dibandingkan balok normal dan 3,37% lebih besar dibandingkan balok *supplementary*.



(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi



(c) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi

Gambar 4.20 Sketsa Pola Retak Geser Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi

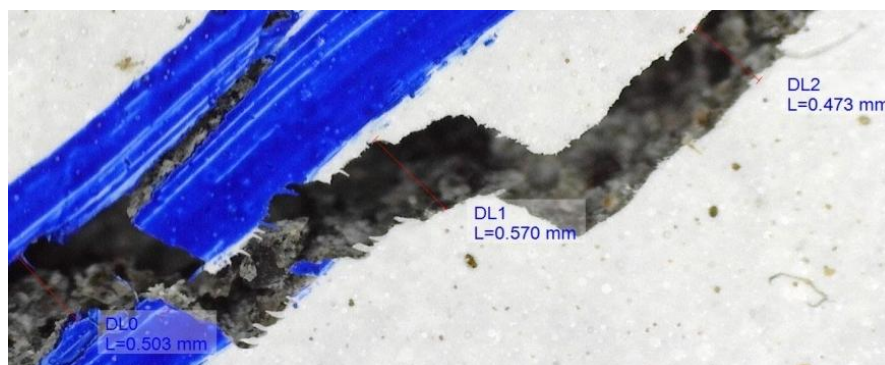
Patahan balok yang terlihat pada Gambar 4.20 tidak terletak pada daerah tumpuan menuju beban. Kemungkinan yang terjadi disebabkan oleh adanya retak akibat *pre-crack* ditambah dengan retak yang timbul akibat korosi pada balok. Pada saat *pre-crack* dilakukan, metode yang digunakan adalah *four point bending* biasa sehingga dikhawatirkan retak lentur yang telah terbentuk akan semakin melebar apabila dilakukan proses korosi pada balok.

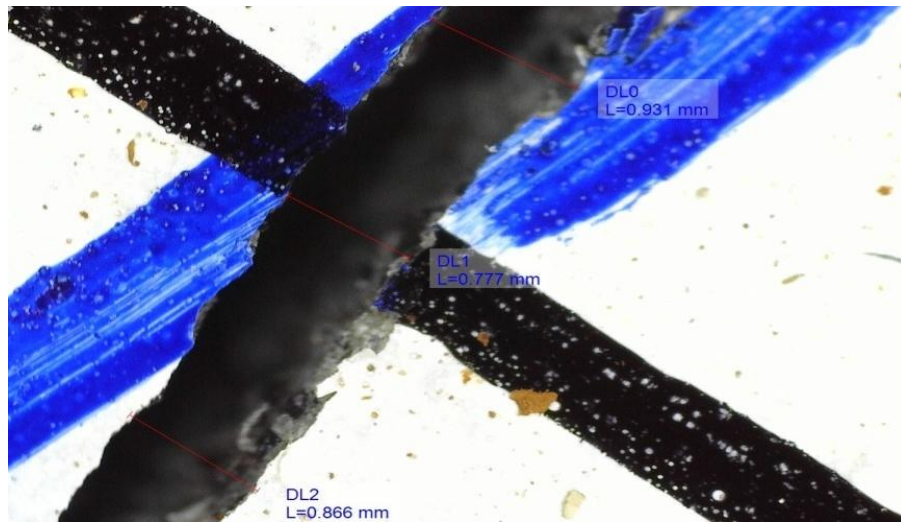
4.10 Lebar Retak Balok Geser Setelah Korosi

Lebar retak balok hasil pengujian geser setelah korosi selama 30 hari diukur menggunakan *microscope digital*. Hasil pengukuran lebar retak dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.21.

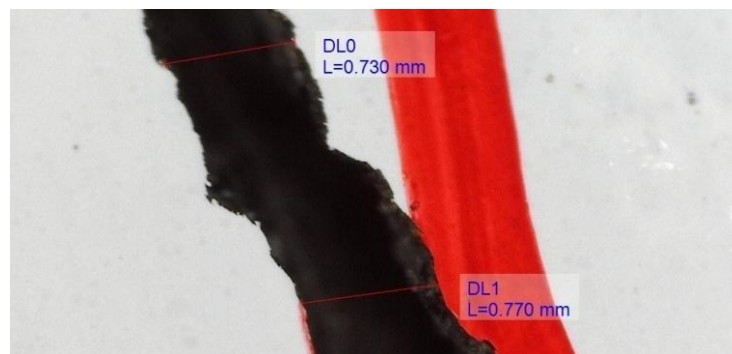
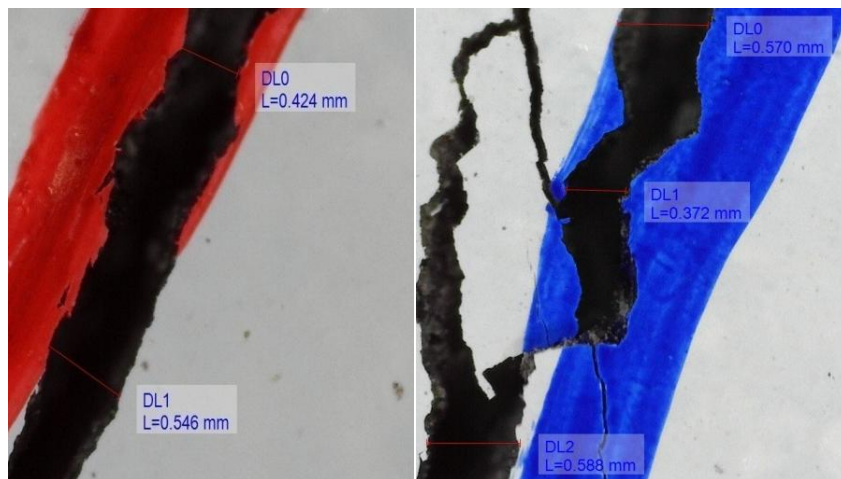
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Lebar Retak Geser Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC Ukuran 200x10x20 cm Setelah Korosi

No.	Benda Uji	Lebar Retak (mm)					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Balok Normal	0,473	0,570	0,503	0,777	0,866	0,931
2.	Balok SC	0,546	0,424	0,588	0,570	0,730	0,770
3.	Balok ECC	0,501	0,510	0,536	0,403	0,524	0,619
Rata-Rata Normal		0,687 mm					
Rata-Rata SC		0,605 mm					
Rata-Rata ECC		0,516 mm					

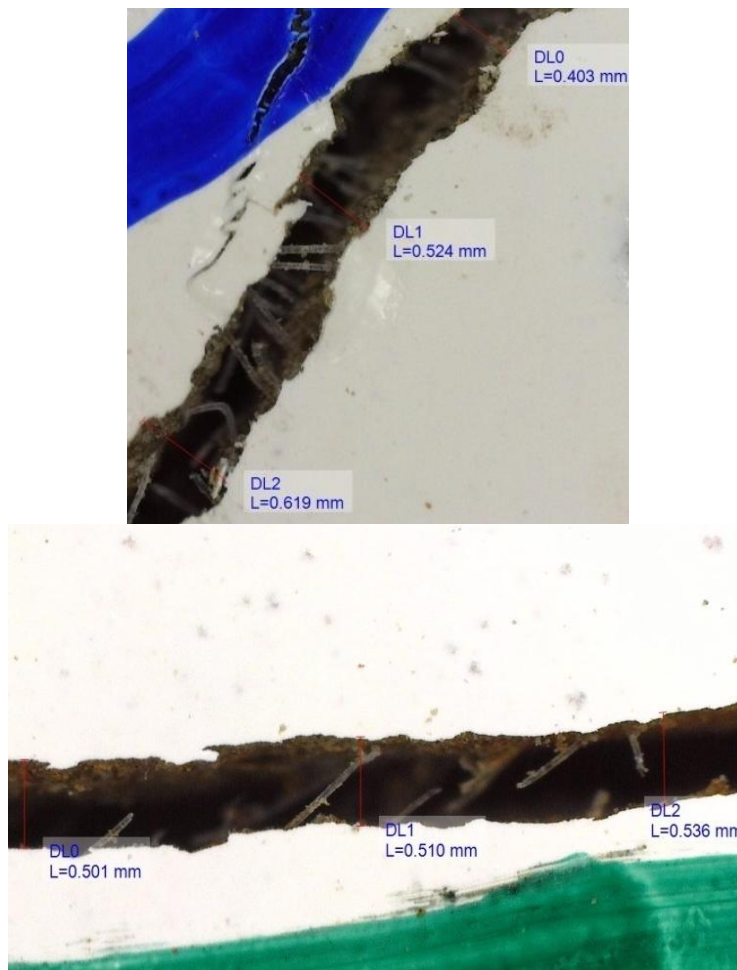




(a) Balok Normal 200 x 10 x 20 cm



(b) Balok *Supplementary* 200 x 10 x 20 cm



(c) Balok ECC 200 x 10 x 10 cm

Gambar 4.21 Lebar Retak Geser Balok Normal, Balok *Supplementary* dan Balok ECC 200 x 10 x 20 cm Setelah Korosi

Lebar retak terbesar setelah korosi berdasarkan Tabel 4.13 dan Gambar 4.21 terjadi pada balok normal diikuti balok *supplementary* dan balok ECC. Pola retak balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC setelah korosi dapat dilihat pada Gambar 4.20.

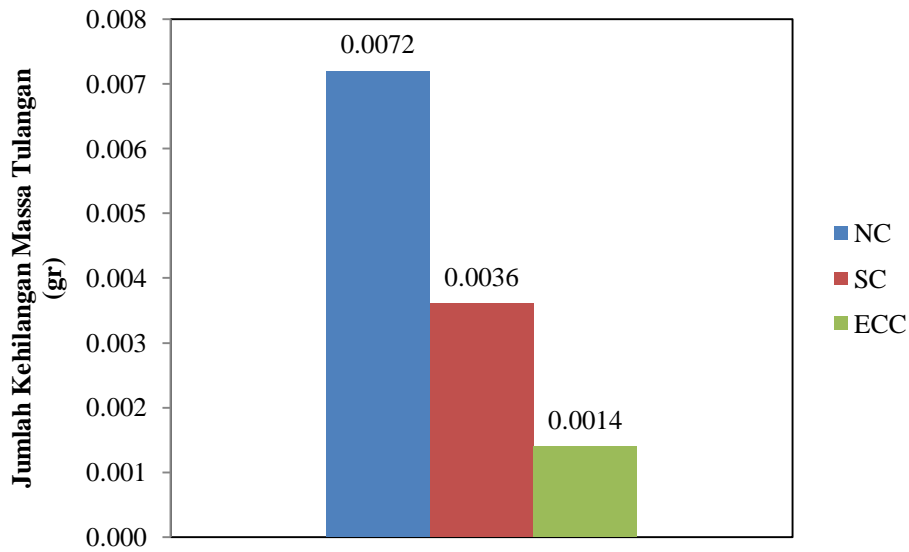
Seperti yang terlihat pada Gambar 4.20, balok ECC membentuk retak halus lebih banyak dibandingkan balok normal dan balok *supplementary* oleh karena adanya serat yang mencegah terbentuknya pelebaran retak dengan cara membentuk retak-retak halus yang lebih banyak.

4.11 Massa Tulangan Setelah Korosi

Pengukuran massa pada tulangan geser dan tulangan lentur dilakukan setelah pengujian geser pasca korosi pada balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC. Balok yang telah diuji geser pasca korosi dihancurkan menggunakan alat *demolition breaker*, kemudian diambil tulangnya. Tulangan lentur dipotong dengan panjang 60 cm dan menghindari daerah tulangan yang telah leleh setelah pengujian geser dilakukan. Kemudian tulangan geser maupun tulangan lentur yang mengalami korosi ditimbang masing-masing. Setelah ditimbang, tulangan direndam menggunakan cairan penghilang karat selama 24 jam lalu kembali ditimbang untuk mengetahui massa korosi. Jumlah massa tulangan geser $\phi 8$ dan tulangan lentur D10 setelah korosi dapat dilihat masing-masing pada Tabel 4.14 dan 4.15 sedangkan jumlah kehilangan massa tulangan dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan 4.23.

Tabel 4.14 Massa Tulangan Geser $\phi 8$ Pasca Korosi, Sebelum dan Setelah Dibersihkan

No.	Massa Sebelum Dibersihkan			Massa Setelah Dibersihkan		
	NC	SC	ECC	NC	SC	ECC
1	0.215	0.210	0.205	0.203	0.201	0.205
2	0.215	0.205	0.205	0.207	0.202	0.205
3	0.215	0.200	0.205	0.206	0.201	0.203
4	0.207	0.201	0.205	0.208	0.204	0.205
5	0.215	0.205	0.210	0.207	0.204	0.205
Total	0.213	0.206	0.206	0.206	0.202	0.205



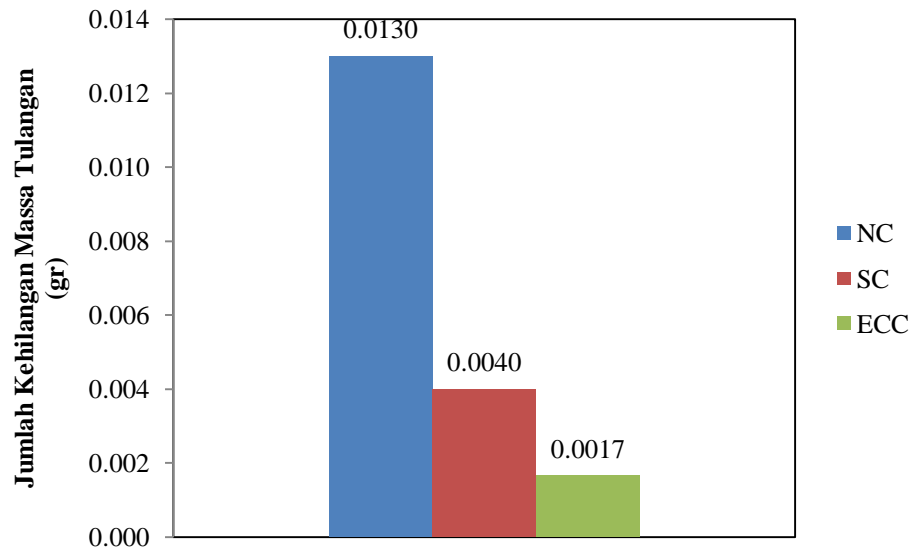
Gambar 4.22 Jumlah Kehilangan Massa Tulangan Geser $\phi 8$ Setelah Korosi

Tabel 4.14 dan Gambar 4.22 menunjukkan bahwa jumlah kehilangan massa tulangan geser $\phi 8$ paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* dan 5 kali lebih sedikit dari balok normal. Hal ini sesuai dengan Tabel 4.10 yang menyatakan lebar retak pada balok ECC *pre-crack* lebih kecil diikuti balok *supplementary* dan balok normal.

Hal ini membuktikan bahwa serat yang terdapat dalam ECC berfungsi dengan baik hingga dapat menggantikan fungsi sengkang dalam menahan beban geser pada balok.

Tabel 4.15 Massa Tulangan Lentur D10 Pasca Korosi, Sebelum dan Setelah Dibersihkan

No.	Massa Sebelum Dibersihkan			Massa Setelah Dibersihkan		
	NC	SC	ECC	NC	SC	ECC
1	0.360	0.345	0.345	0.350	0.341	0.322
2	0.365	0.340	0.355	0.341	0.341	0.284
3	0.360	0.340	0.355	0.355	0.341	0.343
Total	0.362	0.342	0.352	0.349	0.341	0.316



Gambar 4.23 Jumlah Kehilangan Massa Tulangan Lentur D10 Setelah Korosi

Seperti yang terjadi pada tulangan geser $\phi 8$, Tabel 4.15 dan Gambar 4.23 menunjukkan bahwa jumlah kehilangan massa tulangan lentur D10 paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* dan 6 kali lebih sedikit dari balok normal. Hal ini sesuai dengan Tabel 4.10 yang menyatakan lebar retak pada balok ECC *pre-crack* lebih kecil diikuti balok *supplementary* dan balok normal.

4.12 Laju, Level dan Waktu Korosi

Perhitungan laju korosi dilakukan berdasarkan Rohrbach Cosasco System, 1999 pada Persamaan 2.6 sedangkan level dan waktu korosi dihitung berdasarkan model Bazant dan Morinaga pada Persamaan 2.7.

4.12.1 Tulangan Geser $\phi 8$

- Balok Normal

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650 \times M_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600 \times 0,0072}{7,85 \times 5,09 \times 30} = 0,0219 \text{ mm/tahun}$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,0072)}{0,213} = 3,37\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan geser balok normal 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0219 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 3,37%.

- Balok *Supplementary*

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650xM_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600x0,0026}{7,85x5,09x30} = 0,0110mm / tahun$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,0036)}{0,206} = 1,75\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan geser balok *supplementary* 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0110 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 1,75%.

- Balok ECC

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650xM_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600x0,0014}{7,85x5,09x30} = 0,0043mm / tahun$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,0043)}{0,206} = 0,68\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan geser balok ECC 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0043 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 0,68%.

- Waktu Korosi (t_{corr})

$$Q_{cr} = 0,602D \left(1 + \frac{2C_v}{D} \right)^{0,85}$$

$$Q_{cr} = \left(0,602 \times 8 \left(1 + \frac{2 \times 30}{8} \right)^{0,85} \right) \times 10^{-4} = 0,00297 \text{ g/cm}^2$$

$$j_r = \frac{W}{F} i_{corr}$$

$$j_r = \frac{27,925}{96847} \times 0,3 = 0,0000865 \text{ g/m}^2 \cdot s$$

$$t_{corr} = \frac{Q_{cr}}{j_r}$$

$$t_{corr} = \frac{0,00297}{0,0000865} = 34,33 \approx 34 \text{ tahun}$$

Jadi, waktu terjadi korosi pada tulangan geser $\phi 8$ mm adalah selama 34 tahun.

4.12.2 Tulangan Lentur D10

- Balok Normal

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650 \times M_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600 \times 0,0130}{7,85 \times 8,19 \times 30} = 0,0246 \text{ mm/tahun}$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,013)}{0,362} = 3,60\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan lentur balok normal 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0246 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 3,60%.

- Balok *Supplementary*

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650xM_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600x0,0040}{7,85x8,19x30} = 0,0076mm / tahun$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,0076)}{0,345} = 1,16\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan lentur balok *supplementary* 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0076 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 1,16%.

- Balok ECC

Laju Korosi

$$CR = \frac{3650xM_{ac}}{dAT}$$

$$CR = \frac{3600x0,0017}{7,85x8,19x30} = 0,0032mm / tahun$$

Level Korosi (γ)

$$\gamma = \frac{100(W_i - W_f)}{W_i}$$

$$\gamma = \frac{100(0,0032)}{0,348} = 0,48\%$$

Jadi, laju korosi pada tulangan lentur balok ECC 200 x 10 x 20 cm adalah 0,0032 mm/tahun < 0,025 mm/tahun sehingga berdasarkan Tabel 2.3 maka laju korosi tergolong amat baik. Sedangkan level korosi adalah sebesar 0,48%.

- Waktu Korosi (t_{corr})

$$Q_{cr} = 0,602D \left(1 + \frac{2C_v}{D} \right)^{0,85}$$

$$Q_{cr} = \left(0,602 \times 10 \left(1 + \frac{2 \times 30}{10} \right)^{0,85} \right) \times 10^{-4} = 0,00371 \text{ g/cm}^2$$

$$j_r = \frac{W}{F} i_{corr}$$

$$j_r = \frac{27,925}{96847} \times 0,3 = 0,0000865 \text{ g/m}^2 - s$$

$$t_{corr} = \frac{Q_{cr}}{j_r}$$

$$t_{corr} = \frac{0,00371}{0,0000865} = 42,91 \approx 43 \text{ tahun}$$

Jadi, waktu terjadi korosi pada tulangan lentur D10 mm adalah selama 43 tahun.

Rekapitulasi hasil perhitungan laju, level dan waktu korosi dapat dilihat pada Tabel 4.16 dan 4.17.

- **Tulangan Sengkang $\phi 8$**

Tabel 4.16 Rekapitulasi Laju, Level dan Waktu Korosi Tulangan Geser $\phi 8$

Beton	Laju Korosi (mm/tahun)	Level Korosi (%)	Waktu Korosi (tahun)
Normal	0,0219	3,37	
<i>Supplementary</i>	0,0110	1,75	34
ECC	0,0043	0,68	

- **Tulangan Memanjang D10**

Tabel 4.17 Rekapitulasi Laju, Level dan Waktu Korosi Tulangan Lentur D10

Beton	Laju Korosi (mm/tahun)	Level Korosi (%)	Waktu Korosi (tahun)
Normal	0,0130	3,60	
<i>Supplementary</i>	0,0040	1,16	43
ECC	0,0017	0,48	

Berdasarkan Tabel 4.16 dan 4.17, tulangan lentur memiliki laju, level dan waktu terjadi korosi yang lebih lama dibandingkan tulangan geser. Hal ini terjadi karena posisi kabel yang diletakkan pada tulangan lentur D10 sehingga arus listrik untuk membentuk korosi lebih rentan terjadi pada tulangan lentur. Selain itu, laju korosi tulangan lentur di lapangan juga lebih kecil dibandingkan laju korosi tulangan lentur teoritis pada butir 3.7.4 yaitu 0,7428 mm/tahun.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

3.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengujian geser maka akan diambil beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut:
 - 1.1 Balok ECC dengan sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 2,32% yang lebih besar dibandingkan balok *supplementary* dengan sengkang serta 13,10% lebih besar dibandingkan balok normal dengan sengkang.
 - 1.2 Balok ECC tanpa sengkang memiliki kapasitas beban maksimum 1,95% lebih besar dibandingkan balok *supplementary* tanpa sengkang serta beban maksimum 11,38% lebih besar dibandingkan balok normal tanpa sengkang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas geser balok normal, balok *supplementary* dan balok ECC dengan sengkang maupun tanpa sengkang tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini sesuai dengan perhitungan analisa kapasitas geser teoritis kedua jenis balok yang tidak menunjukkan perbedaan signifikan.
 - 1.3 Balok normal setelah terjadi korosi mengalami penurunan kapasitas sebesar 25,45%; balok *supplementary* 24,59% dan balok ECC 23,72%. Hal ini sesuai dengan ukuran lebar retak dan jumlah kehilangan massa tulangan yaitu balok normal terbesar diikuti balok *supplementary* dan balok ECC.
2. Hasil pengujian lebar retak menunjukkan bahwa pada balok ukuran 200 x 10 x 20 cm tanpa *pre-crack*, balok ECC memiliki lebar retak rerata 86% atau 7 kali lebih kecil dibandingkan balok normal dan 25,30% atau 4 kali lebih kecil dibandingkan balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen).
Lebar retak rata-rata balok ECC tanpa sengkang ukuran 100x10x20 cm adalah 40,14% atau 1,5 kali lebih kecil dibandingkan balok *supplementary* tanpa sengkang serta 50,76% atau 2 kali lebih kecil dibandingkan balok normal. Dikeahui juga bahwa balok normal, balok *supplementary* maupun

balok ECC memiliki lebar retak rata-rata dibawah lebar retak teoritis yaitu 0,902 mm seperti pada perhitungan butir 3.6d.

3. Jumlah kehilangan massa tulangan geser $\phi 8$ paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan 5 kali lebih sedikit dari balok normal. sedangkan jumlah kehilangan massa tulangan lentur D10 paling sedikit terdapat pada balok ECC yaitu kurang lebih 2,5 kali lebih sedikit dari balok *supplementary* dan 6 kali lebih sedikit dari balok normal.
4. Tulangan lentur D10 memiliki laju dan level korosi yang lebih kecil dibandingkan tulangan geser sengkang $\phi 8$ disertai dengan urutan yang sama yakni balok normal yang terbesar diikuti balok *supplementary* (balok dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen) dan balok ECC. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk terjadi korosi adalah tulangan lentur D10 lebih lama dibandingkan tulangan geser sengkang $\phi 8$. Hal ini terjadi karena tebal selimut beton pada tulangan lentur lebih besar yaitu 30 mm dibandingkan dengan tebal selimut beton tulangan sengkang 15 mm. Detail laju, level dan waktu korosi pada tulangan geser maupun tulangan lentur dapat dilihat pada Tabel 4.16 dan 4.17.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan jika tebal selimut balok dari sisi lebar maupun sisi tinggi balok disamakan dan diberikan arus yang sama sehingga dapat diketahui perilaku perambatan laju, level dan waktu korosi yang terjadi pada tulangan lentur maupun sengkang.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan terhadap balok dengan ukuran, material dan metode korosi yang sama terhadap balok tanpa *pre-crack* dan balok dengan *pre-crack* dengan variasi waktu lebih dari 30 hari agar diketahui laju, level dan waktu korosi, kehilangan massa serta kapasitas geser balok tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 211. 1-91. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.*
- ACI Committee 224. 2R-92. *Cracking of Concrete Members in Direct Tension.*
- ACI Committee 318-11. *Building Code Requirements for Structural Concrete*
- ACI Committee 544, 1982. *State of the art report on fiber reinforced concrete - Report : ACI 544 IR-82*, American Concrete Institute: Farmington Hills.
- ASTM C 29-91a. *Standard Test Method for Bulk Density and Voids Aggregates.*
- ASTM C 70-79. *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregates*
- ASTM C 127-88(1993). *Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates.*
- ASTM C 128-93. *Spesification Gravity and Absorption of Fine Aggregate.*
- ASTM C 136-93. *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate.*
- ASTM C 142-78. *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.*
- ASTM C 188-89, 2003. *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. United States: Association of Standard Testing Materials.*
- ASTM A 615/A 615M-03a. *Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement.*
- ASTM C 618-94a. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*
- Ahmad, S. (2009). Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete. *The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 34, Number 2C, 34(2)*, 95–104.
- Amesu, Y. (2014). The Influence of Cracks on Reinforcement Corrosion in Concrete - A Critical Review. (July), 0–12. <https://doi.org/263587762>
- Araújo, D. D. A. (2016). Cracks Repair in Reinforced Concrete Structures Case Study-Reinforced Concrete Tunnel Repair. *Tecnico Lisboa*, 1–10.

- Ayub, T. (2015). Mechanical Properties of High-Strength Concrete Reinforced with PVA and Basalt Fibre. (May). <https://doi.org/10.1007/978-981-4585-02-6>
- Cook, W., & Mitchell, D. (1991). Design of Disturb Conception des zones Bemessung von Diskon. *IABSE Surveys*.
- Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., & Hoshiro, H. (2006). Properties of Polyvinyl Alcohol Fibre as Reinforcing Materials for Cementitious Composites. *RILEM Publications SARL*, 2(1), 145–153. <https://doi.org/10.1617/2912143942.016>
- Japan Society of Civil Engineers. (2008). *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*.
- Kanakubo, T., Shimizu, K., & Kanda, T. (2007). Size Effect on Flexural and Shear Behavior of PVA-ECC. *Protect Workshop*, Paper No. 54.
- Kewalramani, M. A., Mohamed, O. A., & Syed, Z. I. (2017). Engineered Cementitious Composites for Modern Civil Engineering Structures in Hot Arid Coastal Climatic Conditions. *Procedia Engineering*, 180(June), 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.237>
- Kong, F.K., Chemrouk, M. (2002). *Reinforced Concrete Deep Beams* (First Edit; F. . Kong, ed.). <https://doi.org/Library of Congress in Publication Data>
- Li, V. C. (1983). Engineered Cementitious Composites for Structural What is ECC. *10*(2), 66–69.
- Li, V. C., Mishra, D. K., Naaman, A. E., Wight, J. K., LaFave, J. M., Wu, H. C., & Inada, Y. (1994). On The Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites. *Advanced Cement Based Materials*, 1(3), 142–149. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90045-0)
- Luo, D., Li, Y., Li, J., Lim, K., Asha, N., & Nazal, M. (2018). A Recent Progress of Steel Bar Corrosion Diagnostic Techniques in RC Structures. *Molecular Diversity Preservation International Journal*, 19–34. <https://doi.org/10.3390/s19010034>

- Meng, D., Lee, C. K., & Zhang, Y. X. (2017). Flexural and Shear Behaviours of Plain and Reinforced Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite Beams. *Engineering Structures*, 151, 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.036>
- Paegle, I., & Fischer, G. (2016). Phenomenological Interpretation of The Shear Behavior of Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *Cement and Concrete Composites*, 73, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.018>
- Patil, S. S., & Baghban, O. R. (2018). Comparison of Experimental Strength of RC Deep Beams Design by Various Country Codes with Respect to Deep Beam with Different Percentage of Web Steel. (May), 122–126.
- Pimanmas, A and Maekawa, K. (2001). Influence of Pre-Crack in Shear. *Influence of Pre-Crack on RC Behavior in Shear*, (669), 277–291.
- Ranade, R., Basaran, C., & Fakhri, H. (2010). Ductile Fiber-Reinforced Concrete for Corrosion Mitigation in Reinforced Concrete Structures: Experiments and Theory. *I(1)*, 1–2.
- Ranjith, A., Balaji Rao, K., & Manjunath, K. (2016). Evaluating The Effect of Corrosion on Service Life Prediction of RC Structures – A Parametric Study. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 587–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijbe.2016.07.001>
- Reich, E. A., Carroll, M. A., & Zarembo, J. E. (1966). An Improved Packing for The Coleman Carbon-Hydrogen Analyzer. *Microchemical Journal*, 11(2), 264–268. [https://doi.org/10.1016/0026-265X\(66\)90061-0](https://doi.org/10.1016/0026-265X(66)90061-0)
- Rohrback Cosasco System. (1999). Corrosion Rate Calculations from Coupons. *06*, 2–3.
- Sahmaran, M., Anil, O., Lachemi, M., Yildirim, G., Ashour, A. F., & Acar, F. (2015). Effect of Corrosion on Shear Behavior of Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *ACI Structural Journal*, 112(January 2016). <https://doi.org/10.14359/51687749>

- Saravanakumar, P., & Govindaraj, A. (2016). Influence of Vertical and Inclined Shear Reinforcement on Shear Cracking Behaviour in Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(6), 602–610.
- Sathiyarayanan, S., Natarajan, P., Saravanan, K., Srinivasan, S., & Venkatachari, G. (2006). Corrosion Monitoring of Steel in Concrete by Galvanostatic Pulse Technique. *Science Direct*, 28, 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.005>
- Shahnewas, Md., Alam, M. S. (2014). Improved Shear Equations for Steel Fiber-Reinforced Concrete Deep and Slender Beams. *ACI Structural Journal*, 111, 1–6. <https://doi.org/S-2012-400.R3>
- Shang, Q. (2006). Shear Behaviour of Engineered Cement-Based Composites. (December), 138. Retrieved from <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/1885>
- Shi, Y., Yang, B., & Liaw, P. (2017). Corrosion-Resistant High-Entropy Alloys: A Review. *Metals*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/met7020043>
- Siad, A., Bencheikh, M., & Hussein, L. (2017). Effect of Combined Pre-Cracking and Corrosion on The Method of Repair of Concrete Beams. *Construction and Building Materials*, 132, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.020>
- Tambusay, A., Suryanto, B., & Suprobo, P. (2018). Visualization of Shear Cracks in a Reinforced Concrete Beam Using the Digital Visualization of Shear Cracks in a Reinforced Concrete Beam using the Digital Image Correlation. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 8, 573–578. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.2.4847>
- Vavpetič, P. (2008). Corrosion in concrete steel. (april). Retrieved from http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/Corrosion_Seminar.pdf
- Velu, S. (2014). Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. *International Journal of Electrochemical Science*, 2(January 2007), 1–28.

- Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E., & Li, V. C. (2009). Cement and Concrete Research Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites Under Wet – Dry Cycles. *Cement and Concrete Research*, 39(5), 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.013>
- Yu, L., François, R., Dang, V. H., L'Hostis, V., & Gagné, R. (2015). Development of Chloride-Induced Corrosion in Pre-Cracked RC Beams Under Sustained Loading: Effect of Load-Induced Cracks, Concrete Cover, and Exposure Conditions. *Cement and Concrete Research*, 67, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.007>
- Yuan, Y., Ji, Y., & Shah, S. P. (2007). Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 104(3), 344–347. <https://doi.org/10.14359/18624>
- Zhao, Y., Yu, J., Hu, B., & Jin, W. (2012). Crack Shape and Rust Distribution in Corrosion-Induced Cracking Concrete. *Corrosion Science*, 55, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.11.002>
- Zych, T. (2014). New Generation Cementitious Composites With Fibres- Properties and Application. *Czasopismo Techniczne*, 8–A, 85–102. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.14.194.3282>

Lampiran 1

Pengujian Berat Jenis Semen (ASTM C 188-89)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Tipe Material : *Ordinary Portland Cement* Tipe I
Asal Material : Gresik
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Jenis Semen

Perhitungan	Satuan	Notasi	Pengukuran		Rerata
			I	II	
Berat Semen	gr	<i>A</i>	500	500	500
Berat Semen + Solar + Labu	gr	<i>B</i>	1510	1518	1514
Berat Labu + Solar	gr	<i>C</i>	1142	1150	1146
Berat Jenis Semen	gr/cm ³	$BJS = \frac{A}{(A + C) - B}$	3,15	3,15	3,15

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat jenis 3,15 memenuhi syarat ASTM yaitu maksimum 3,15 gr/cm³

Lampiran 2a

Pengujian Gradasi Agregat Kasar (ASTM C 136-93)

Tanggal Pengujian : 02 April 2019
Asal Material : Pasuruan
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Berat Lolos (gram)	Lolos (%)	Syarat Lolos (%)
37,5	0,00	0,00	0,00	10000	100	100
25	0,00	0,00	0,00	10000	100	100
19	618	6,18	6,18	9382	93,82	90-100
12,5	208	2,08	8,26	9174	91,70	90-100
9,5	6480	64,80	73,06	2694	26,94	20-55
4,75	2570	25,70	98,76	124	1,24	0-10
2,36	124	1,24	100	0,00	0,00	0-5
Jumlah	10000		386,26			

Modulus Kehalusan Kerikil

$$\begin{aligned} \text{MHK} &= \frac{\text{Jumlah \% komulatif tertahan}}{100} \\ &= \frac{386,26}{100} \\ &= \mathbf{3,86} \end{aligned}$$

Lampiran 2b

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar (ASTM C 127-88)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Jenis Kerikil : Pasuruan
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Perhitungan	Satuan	Notasi	Pengukuran	
			I	II
Berat Benda Uji Kering Oven	gram	A	4940,00	4950,00
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh	gram	B	5000,00	5000,00
Berat Benda Uji SSD Dalam Air	gram	C	3140,00	3130,00

Perhitungan	Rumus	I	II	Rerata
Berat Jenis Kering (<i>Specific Gravity</i>)	$SG = \frac{A}{B - C}$	2,66	2,65	2,65 gr/cm ³
Berat Jenis SSD (<i>Bulk Specific Gravity</i>)	$BSG = \frac{B}{B - C}$	2,69	2,67	2,68 gr/cm³
Berat Jenis Semu (<i>Apparent Specific Gravity</i>)	$ASG = \frac{A}{A - C}$	2,74	2,72	2,73 gr/cm ³
Penyerapan (<i>Absorption</i>)	$Ap = \frac{B - A}{A} \times 100$	1,21	1,01	1,11 gr/cm³

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat jenis 2,68 memenuhi syarat ASTM yaitu 2,40-2,90

Penyerapan air 1,11 memenuhi syarat ASTM maksimum 0,20-4,00%

Lampiran 2c

Pengujian Kadar Air Agregat Kasar (ASTM C 70-79)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Jenis Kerikil : Pasuruan
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Kadar Air Agregat Kerikil

Pengukuran	Notasi	Rumus	I	II	Rerata
Berat Talam	gram	W_1	71,80	93,56	82,68
Berat Talam + Samplel	gram	W_2	1571,80	1593,56	1582,68
Berat Sampel	gram	$W_3 = W_2 - W_1$	1500,00	1500,00	1500,00
Berat Talam + Sampel Kering	gram	W_4	1560,00	1580,00	1570,00
Berat Sampel Kering	gram	$W_5 = W_4 - W_1$	1488,20	1486,44	1487,32
Kadar Air	%	$\frac{(W_3 - W_5)}{W_5} \times 100$	0,79	0,91	0,85

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Kadar air hasil pengujian 0,85% memenuhi syarat ASTM yaitu maksimum 2%

Lampiran 2d

Pengujian Berat Volume Agregat Kasar (ASTM C 29-91a)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Jenis Kerikil : Pasuruan
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Volume Agregat Kerikil

Berat Volume Lepas	Notasi	Satuan	Pengukuran	
			I	II
Berat Sampel + Wadah	<i>G</i>	gr	7430	7410
Berat Wadah	<i>T</i>	gr	700	700
Volume Wadah	<i>V</i>	cm ³	5000	5000
Berat Volume Lepas	<i>M</i>	g/cm ³	1,35	1,35
Berat Isi Rata-Rata	Mrata-rata	gr/cm ³	1,34	

Berat Volume Padat	Notasi	Satuan	Pengukuran	
			I	II
Berat Sampel + Wadah	<i>G</i>	gr	7900	7890
Berat Wadah	<i>T</i>	gr	700	700
Volume Wadah	<i>V</i>	cm ³	5000	5000
Berat Volume Padat	<i>M</i>	g/cm ³	1,44	1,44
Berat Isi Rata-Rata	Mrata-rata	gr/cm ³	1,44	

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat volume lepas 1,34 gr/cm³ dan berat volume padat 1,44 gr/cm³ hasil pengujian memenuhi syarat ASTM yaitu 1,20-1,75 gr/cm³.

Lampiran 3a

Pengujian Gradasi Agregat Halus (ASTM C 136-93)

Tanggal Pengujian : 02 April 2019
Jenis Pasir : Lumajang
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Gradasi Agregat Halus

Ukuran Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Tertahan (%)	Kumulatif (%)	Berat Lolos (gram)	Lolos (%)	Syarat Lolos (%)
9,50	0,00	0,00	0,00	2200	100	100
4,75	188	4,77	4,77	2095	95,23	95-100
2,36	148	7,18	11,95	1937	88,05	80-100
1,18	292	13,50	25,45	1640	74,55	50-85
0,60	524	23,82	49,27	1116	50,73	25-60
0,30	616	28,00	77,27	500	22,73	10-30
0,15	500	22,73	100	0,00	0,00	2-10
Jumlah	2200		268,73			

Modulus Kehalusan Pasir

$$\begin{aligned} \text{MHP} &= \frac{\text{Jumlah \% komulatif tertahan}}{100} \\ &= \frac{268,73}{100} \\ &= \mathbf{2,69} \text{ memenuhi syarat ASTM yaitu } 2,30\text{-}3,10 \end{aligned}$$

Pasir termasuk pada golongan pasir medium (*medium sand*) dengan modulus kehalusan 2,60-2,90.

Lampiran 3b

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (ASTM C 128-93)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
 Jenis Pasir : Lumajang
 Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Pengujian	Satuan	Notasi	Pengukuran	
			I	II
Berat Benda Uji Kering Oven	gram	A	493,00	494,00
Berat Piknometer + Air	gram	B	1303,50	1302,50
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh	gram	S	500,00	500,00
Berat Piknometer + Benda Uji + Air	gram	C	1620,00	1619,50

Perhitungan	Rumus	I	II	Rerata
Berat Jenis Kering (<i>Specific Gravity</i>)	$SG = \frac{A}{B + S - C}$	2,68	2,70	2,69 gr/cm ³
Berat Jenis SSD (<i>Bulk Specific Gravity</i>)	$BSG = \frac{S}{B + S - C}$	2,73	2,73	2,73 gr/cm³
Berat Jenis Semu (<i>Apparent Specific Gravity</i>)	$ASG = \frac{A}{B + A - C}$	2,79	2,79	2,79 gr/cm ³
Penyerapan (<i>Absorption</i>)	$Ap = \frac{S - A}{A} \times 100$	1,42	1,22	1,32 gr/cm³

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat jenis 2,73 gr/cm³ memenuhi syarat ASTM yaitu 2,4-2,9 gr/cm³

Penyerapan air 1,32% memenuhi syarat ASTM maksimum 0,20-2,00%

Lampiran 3c

Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus (ASTM C 142-78)

Tanggal Pengujian : 02 April 2019

Jenis Pasir : Lumajang

Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Pengukuran	Notasi	Satuan	I	II	Rata - Rata
Berat Wadah + Sampel Awal	W	gram	420,00	500,00	,00
Berat Wadah + Sampel Setelah Dicuci	R	gram	400,00	480,00	545,00
Kadar Lumpur (P)	$\frac{W - R}{W} \times 100$	%	4,76	4,00	4,38

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Kadar lumpur hasil pengujian 4,38% memenuhi syarat ASTM yaitu maksimum 5%.

Lampiran 3d

Pengujian Kadar Air Agregat Halus (ASTM C 70-79)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Jenis Pasir : Lumajang
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Kadar Air Agregat Halus

Pengukuran	Satuan	Notasi	I	II	Rerata
Berat Talam	gram	W_1	9,21	10,15	9,68
Berat Talam + Sampel	gram	W_2	70,39	72,60	71,50
Berat Sampel	gram	$W_3 = W_2 - W_1$	61,18	62,45	61,82
Berat Talam + Sampel Kering	gram	W_4	70,12	71,23	70,68
Berat Sampel Kering	gram	$W_5 = W_4 - W_1$	60,91	61,08	61,00
Kadar Air	%	$\frac{(W_3 - W_5)}{W_5} \times 100$	0,44	2,24	1,34

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Kadar air hasil pengujian 1,34% memenuhi syarat ASTM yaitu maksimum 2%

Lampiran 3e

Pengujian Berat Volume Agregat Halus (ASTM C 29-91a)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Jenis Kerikil : Lumajang
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Volume Agregat Pasir

Berat Volume Lepas	Notasi	Satuan	Pengukuran	
			I	II
Berat Sampel + Wadah	<i>G</i>	gr	7540	7540
Berat Wadah	<i>T</i>	gr	700	700
Volume Wadah	<i>V</i>	cm ³	5000	5000
Berat Volume Lepas	<i>M</i>	g/cm ³	1370	1370
Berat Isi Rata-Rata	Mrata-rata	gr/cm ³	1,37	

Berat Volume Padat	Notasi	Satuan	Pengukuran	
			I	II
Berat Sampel + Wadah	<i>G</i>	gr	7820	7940
Berat Wadah	<i>T</i>	gr	700	700
Volume Wadah	<i>V</i>	cm ³	5000	5000
Berat Volume Padat	<i>M</i>	g/cm ³	1420	1450
Berat Isi Rata-Rata	Mrata-rata	gr/cm ³	1,44	

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat volume lepas 1,37 gr/cm³ dan berat volume padat 1,44 gr/cm³ hasil pengujian memenuhi syarat ASTM yaitu 1,20-1,75 gr/cm³.

Lampiran 4

Pengujian Berat Jenis *Fly Ash* (ASTM C 618-94a)

Tanggal Pengujian : 03 April 2019
Tipe Material : *Fly Ash* Kelas F
Asal Material : PT. Paiton *Operation and Maintenance* Indonesia (POMI)
Produksi : PT. Wijaya Karya Beton

Tabel Hasil Pengujian Berat Jenis Semen

Perhitungan	Satuan	Notasi	Pengukuran		Rerata
			I	II	
Berat <i>Fly Ash</i>	gr	<i>A</i>	500	500	500
Berat <i>Fly Ash</i> + Solar + Labu	gr	<i>B</i>	1475	1470	1473
Berat Labu + Solar	gr	<i>C</i>	1147	1142	1145
Berat Jenis <i>Fly Ash</i>	gr/cm ³	$BJS = \frac{A}{(A + C) - B}$	2,41	2,41	2,41

Berdasarkan hasil pengujian, maka diperoleh:

Berat jenis 2,41 memenuhi syarat ASTM yaitu maksimum 5,00 gr/cm³

Lampiran 5

Perencanaan Campuran Beton Normal (ACI 211. 1-91)

Data Analisa Material

Agregat Kasar:

- Gradasi = 3,68 gr
- Berat jenis = 2,68 gr/cm³
- Kadar lumpur = 2,44 %
- Kadar air = 0,85 %
- Penyerapan = 1,11 %
- Volume padat = 1,44 gr/cm³
- Volume gembur = 1,34 gr/cm³

Agregat Halus:

- Gradasi = 2,69 gr
- Berat jenis = 2,73 gr/cm³
- Kadar lumpur = 3,73 %
- Kadar air = 1,34 %
- Penyerapan = 1,32 %
- Volume padat = 1,44 gr/cm³
- Volume gembur = 1,37 gr/cm³

I. Menentukan *Slump*

Tabel 1. *Slump* Berdasarkan Tipe Konstruksi

Type of Construction	Slump	
	(mm)	(inches)
Reinforced foundation walls and footing	25-75	1-3
Plain footings, caissons and substructure walls	25-75	1-3
Beams and reinforced walls	25-100	1-4
Building columns	25-100	1-4
Pavements and slabs	25-75	1-3
Mass concrete	25-50	1-2

Berdasarkan tabel 1 di atas maka dipilih nilai *slump* rencana 25-100 mm untuk tipe konstruksi balok.

II. Menentukan Rasio Air-Semen (w/c)

Tabel 2. Perkiraan Kandungan Udara Berdasarkan Hasil *Slump* dan Kandungan Air Pada Agregat Ukuran Maksimum

Slump	Water kg/m^3 of concrete for indicated nominal max sizes of aggregate			
	9,5	12,5	19,0	25,0
Non-air-entrained concrete				
25 to 50	207	199	190	179
75 to 100	228	216	205	193
150 to 175	243	228	216	202
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete, %	3	2,5	2	1,5
Air-entrained concrete				
25 to 50	181	175	168	160
75 to 100	202	193	184	175
150 to 175	216	205	197	184
Recommended averages total air content, % for level of exposure				
Mild exposure	4,5	4,0	3,5	3,0
Moderate exposure	6,0	5,5	5,0	4,5
Extreme exposure	7,5	7,0	6,0	6,0

Berdasarkan tabel 2, maka perkiraan kandungan udara adalah sebanyak 3,5%

Tabel 3. Perkiraan Kebutuhan Air

Workability	Slump (mm)	Water kg/m ³ for indicated max size of CA (mm)				
		10	12	20	25	40
		Non-air-entrained concrete				
Extremely dry	-	177	168	158	148	137
Very stiff	-	188	182	168	158	148
Stiff	0-25	196	192	177	168	158
Stiff plastic	25-50	206	196	182	177	162
Plastic	75-100	226	217	203	192	177
Flowing	150-175	240	226	212	203	188
Percentage of approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete		3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Air-entrained concrete						
Extremely dry	-	158	148	137	133	123
Very stiff	-	168	158	148	137	133
Stiff	0-25	177	168	158	148	137
Stiff plastic	25-50	182	177	162	152	143
Plastic	75-100	203	192	177	168	158
Flowing	150-175	212	203	188	177	168
Reccomended average total air content, %		8,0	7,0	6,0	5,0	4,5

Berdasarkan tabel 3 maka akebutuhan air yang diperkirakan adalah 158 kg/m^3 sedangkan kandungan udara yang diperkirakan adalah sebanyak 6%.

Tabel 4. Rasio Air-Semen Berdasarkan Tipe Struktur

Type of Structure	Structure Wet Continously or Frequently Exposed to Freezing & Thawing	Structure Exposed to Seawater
Thin sections (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) & sections with less than 1- inch cover steel	0,45	0,40
All other structures	0,50	0,45

Berdasarkan tabel 4 maka rasio air-semen yang diperkirakan adalah sebesar 0,45.

III. Menghitung Berat Semen

$$\text{Berat Semen} = \frac{\text{Berat Air}}{\text{Rasio Air - Semen}}$$

$$\text{BeratSemen} = \frac{158}{0,45} = 351,11 \text{ kg} / \text{m}^3$$

IV. Menghitung Massa Beton Segar

Tabel 5. Perkiraan Massa Beton Segar

Nominal Max Size of Aggregate (mm)	First Estimate of Concrete Unit Mass (kg/m ³)	
	Non-Air-Entrained	Air-Entrained
9,5	2280	2200
12,5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37,5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

Berdasarkan tabel 5 maka massa beton segar diperkirakan 2275 kg/m³

V. Menghitung Koreksi Volume Per Unit Volume

Tabel 6. Faktor f Pada Volume Kerikil

Consistence	Factors for Mac Size of Coarse Aggregate (mm)				
	10	12,5	20	25	40
Extremely dry	1,90	1,70	1,45	1,40	1,30
Very stiff	1,60	1,45	1,30	1,25	1,25
Stiff	1,35	1,30	1,15	1,15	1,20
Stiff plastic	1,08	1,06	1,04	1,06	1,09
Plastic	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluid	0,97	0,98	1,00	1,00	1,00

Tabel 7. Volume Kerikil Per Unit Berdasarkan Modulus Kehalusan Pasir

Nominal Max Size of Aggregate (mm)	Volume of Dry-Rodded Coarse Aggregate Per Unit Volume of Concrete for Different Fineness Modulus of Fine Aggregate			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Berdasarkan tabel 6 diperoleh faktor f kerikil = 1,15

Modulus kehalusan pasir = 2,69 sehingga berdasarkan hasil interpolasi tabel 7 maka diperoleh volume agregat (V_A) = 0,631

$$V_{\text{coarse}} = f \times V_A = 1,15 \times 0,631 = 0,73$$

$$V_{\text{sand}} = 1 - V_{\text{coarse}} = 1 - 0,73 = 0,27$$

VI. Menghitung Kebutuhan Material

$$\text{Kebutuhan Air} = 158 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\text{Kebutuhan Semen} = 351,11 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Kadar Agregat Gabungan} &= \text{Berat Beton} - (\text{Kebutuhan Air} + \text{Kebutuhan Semen}) \\ &= 2275 - (158 + 351,11) \\ &= 1765,89 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Kerikil} &= V_{\text{coarse}} \times \text{Kadar Agregat Gabungan} \\ &= 0,73 \times 1765,89 \\ &= 1281,42 \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Pasir} &= V_{\text{sand}} \times \text{Kadar Agregat Gabungan} \\ &= 0,27 \times 1765,89 \\ &= 484,47 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

VII. Menghitung Koreksi Campuran

$$\begin{aligned} \text{Koreksi Kerikil} &= (\text{Kadar Air} - \text{Penyerapan}) \times \text{Kebutuhan Kerikil} / 100 \\ &= (0,85 - 1,11) \times 1281,42 / 100 \\ &= - 3,33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Koreksi Pasir} &= (\text{Kadar Air} - \text{Penyerapan}) \times \text{Kebutuhan Pasir} / 100 \\ &= (1,34 - 1,32) \times 484,47 / 100 \\ &= 0,10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Air/m}^3 \text{ beton} &= \text{Kebutuhan Air} + \text{Koreksi Kerikil} + \text{Koreksi Pasir} \\ &= 158 - 3,33 + 0,10 \\ &= 154,77 \text{ Liter} \end{aligned}$$

VIII. Penggunaan Material

$$\text{Semen} = 351,11 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Air} = 154,77 \text{ Liter}$$

$$\begin{aligned} \text{Kerikil} &= ((\text{Penyerapan} - \text{Kadar Air}) \times \text{Kebutuhan Kerikil}/100) \\ &\quad + \text{Kebutuhan Kerikil} \\ &= ((1,11 - 0,85) \times 1281,42/100) + 1281,41 \\ &= 1284,75 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pasir} &= ((\text{Penyerapan} - \text{Kadar Air}) \times \text{Kebutuhan Pasir}/100) \\ &\quad + \text{Kebutuhan Pasir} \\ &= ((1,32 - 1,34) \times 484,47/100) + 484,47 \\ &= 484,37 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total} &= \text{Semen} + \text{Air} + \text{Kerikil} + \text{Pasir} \\ &= 351,11 + 154,77 + 1284,75 + 484,37 \\ &= \mathbf{2275 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

IX. Perbandingan Material

Adapun perbandingan material hasil perhitungan adalah sebagai berikut:

Semen	Air	Kerikil	Pasir
1	0,44	3,66	1,38

Jika faktor kehilangan sebesar 15 % maka jumlah kebutuhan material menjadi:

$$\text{Semen} = \mathbf{403,78 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Air} = \mathbf{177,98 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Kerikil} = \mathbf{1477,46 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Pasir} = \mathbf{557,03 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Total} = \mathbf{2616,25 \text{ kg/m}^3}$$

Lampiran 6

Foto Persiapan Material



Foto Material Semen



Foto Material *Fly Ash*

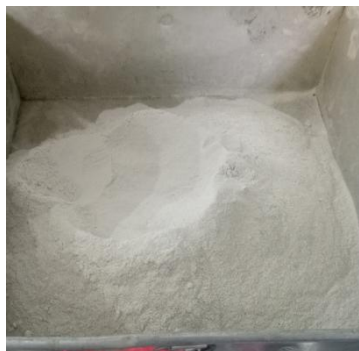


Foto Material Pasir Silika



Foto Material Serat *Polyvynil Alcohol* Ukuran Panjang 8 mm



Foto Material *High Range Water Reducer* Tamcem 60 RA



Foto Perakitan Tulangan Beton



Foto Pemasangan dan Pengecekan *Strain Gauge* Pada Tulangan



Foto Peletakkan Tulangan dalam Beton dengan Tambahan Tahu Beton

Lampiran 7

Foto Pembuatan dan Perawatan (*Curing*) Benda Uji



Foto Pengecoran dan Pembuatan Benda Uji Balok



Foto Pengecoran dan Pembuatan Benda Uji Silinder 10 x 20 cm



Foto Pengecoran dan Pembuatan Benda Uji *Dog Bone* dan Silinder 5 x 10 cm



Foto Perawatan (*Moist Curing*) Benda Uji Balok



Foto Perawatan (*Moist Curing*) Benda Uji Silinder



Foto Penentuan Nilai *Slump*

Lampiran 8

Foto Pengujian Kuat Tekan



Foto Penimbangan Benda Uji Silinder 10 x 20 cm



Foto Penimbangan Benda Uji Silinder 5 x 10 cm



Foto Pengujian Kuat Tekan Silinder 10 x 20 cm



Foto Pengujian Kuat Tekan Silinder 5 x 10 cm



a) Silinder 10 x 20 cm

b) Silinder 5 x 10 cm

Foto Retak Benda Uji Silinder Setelah Pengujian Kuat Tekan

Lampiran 9

Foto *Set-Up* Pengujian Tarik Dog Bone



Foto *Set-Up* Pengujian Tarik *Dog Bone*



Dog Bone I



Dog Bone II

Foto Retak *Dog Bone* Setelah Pengujian Tarik

Lampiran 10

Foto *Set-Up* Pengujian Korosi Metode Galvanostatik



Foto *Set-Up* Metode Galvanostatik Untuk Mempercepat Korosi



Foto Ketinggian Air dengan Campuran NaCl 3,5%



Foto Korosi Pada Sisi Panjang Balok

Lampiran 11

Foto Pembuatan *Pre-Crack*



Foto Pembuatan *Pre-Crack*

Lampiran 12

Foto Retak *Pre-Crack* Balok

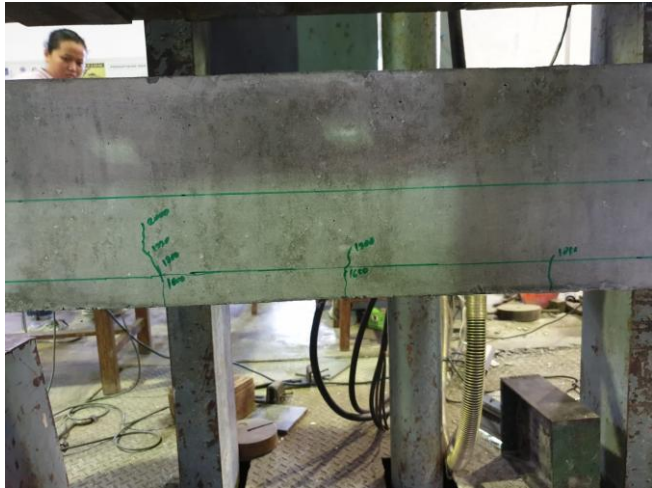


Foto *Pre-Crack* Balok Normal (F1)



Foto *Pre-Crack* Balok Supplementary (F2)



Foto *Pre-Crack* Balok ECC (F3)

Lampiran 13

Foto *Set-Up* Pengujian Geser Balok Kontrol



Foto *Set-Up* Pengujian Balok Kontrol 200 x 10 x 20 cm



Foto *Set-Up* Pengujian Balok Kontrol 100 x 10 x 20 cm

Lampiran 14

Foto Retak Balok Kontrol

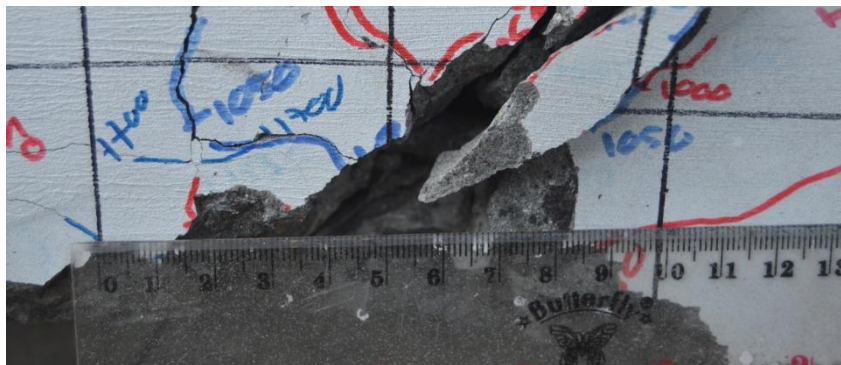
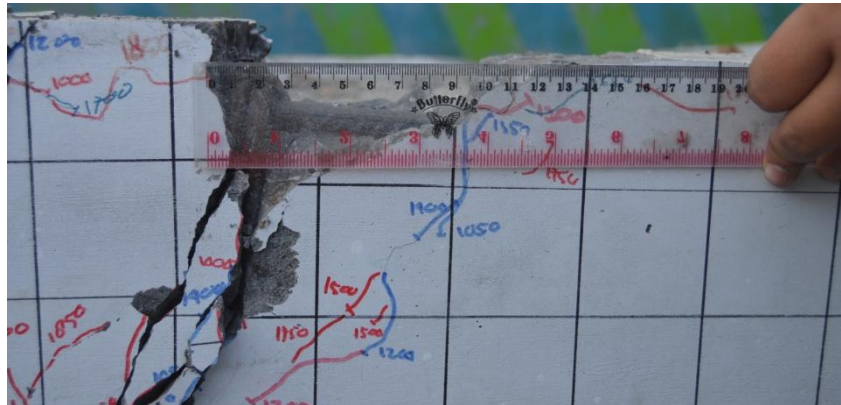
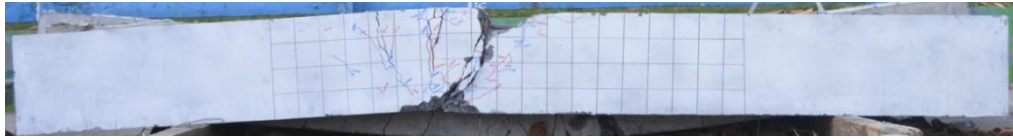


Foto Balok Normal 200 x 20 x 10 cm (C1)

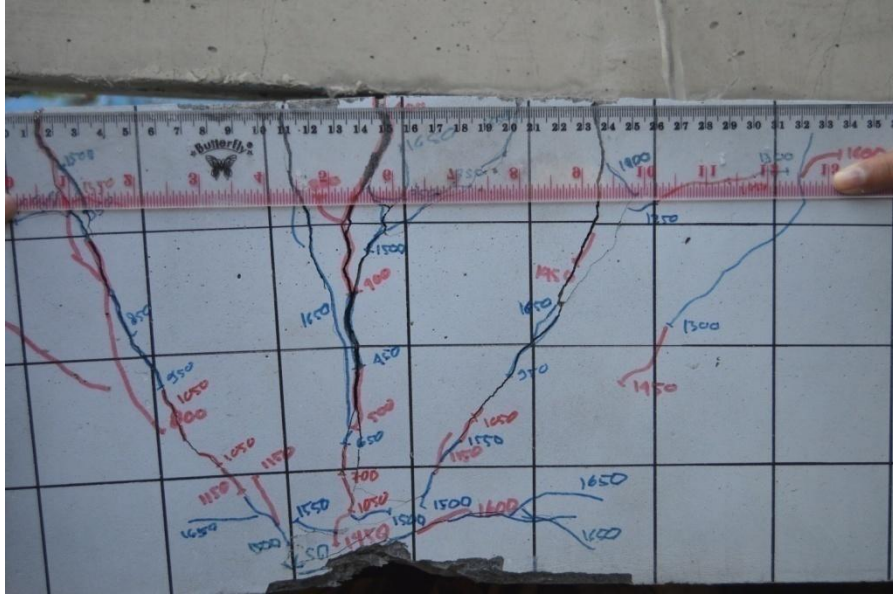
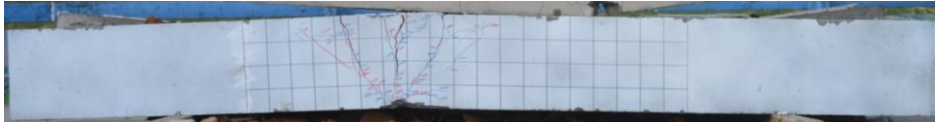


Foto Balok Supplementary 200 x 20 x 10 cm (C2)



Foto Balok ECC 200 x 20 x 10 cm (C3)

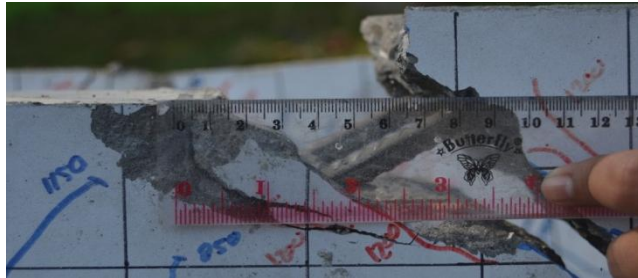
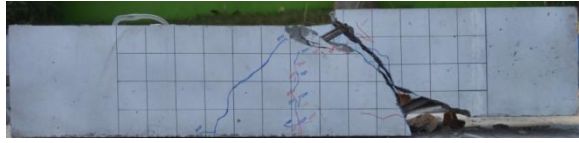


Foto Balok Normal 100 x 20 x 10 cm (C1-1)

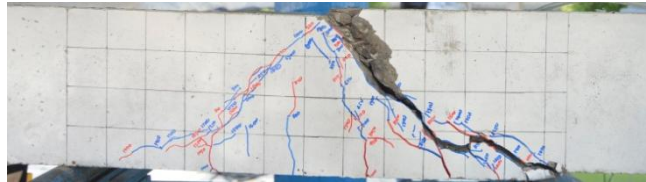


Foto Balok *Supplementary* 100 x 20 x 10 cm (C2-1)

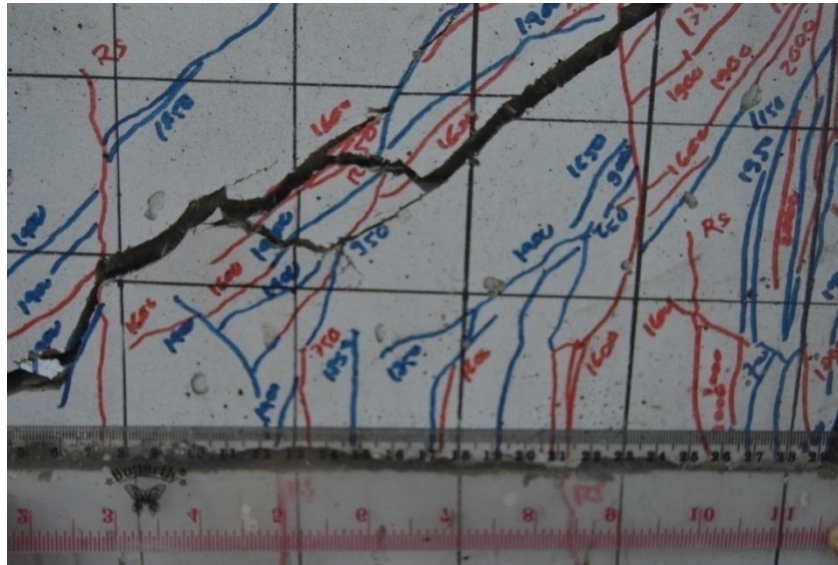


Foto Balok ECC 100 x 20 x 10 cm (C3-1)

Lampiran 15

Foto Korosi Yang Terjadi Pada Balok Sebelum Pengujian



Foto Balok Normal 200 x 20 x 10 cm (F1)



Foto Balok *Supplementary* 200 x 20 x 10 cm (F2)



Foto Balok ECC 200 x 20 x 10 cm (F3)

Lampiran 16

Foto Pengujian Geser Setelah Korosi

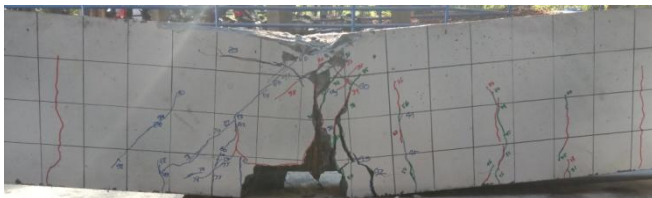


Foto Balok Normal 200 x 20 x 10 cm (F1)

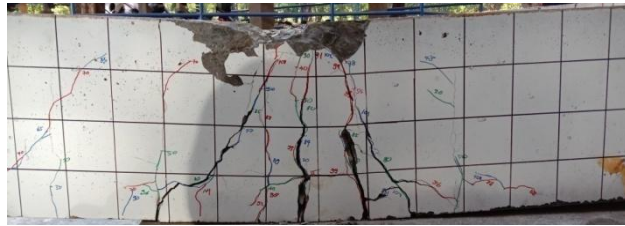


Foto Balok *Supplementary* 200 x 20 x 10 cm (F2)



Foto Balok ECC 200 x 20 x 10 cm (F3)

Lampiran 17

Foto Massa Tulangan Setelah Korosi



Foto Contoh Korosi Pada Tulangan Sengkang Sebelum Dibersihkan



Foto Contoh Korosi Pada Tulangan Memanjang Sebelum Dibersihkan



Foto Perendaman Tulangan Ke Dalam Larutan Penghilang Karat



Foto Tulangan Yang Telah Dibersihkan Setelah Perendaman



Foto Massa Tulangan Senggang Balok Normal (F1) Sebelum Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Senggang Balok Normal (F1) Setelah Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Senggang Balok *Supplementary* (F2) Sebelum Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Senggang Balok *Supplementary* (F2) Setelah Dibersihkan

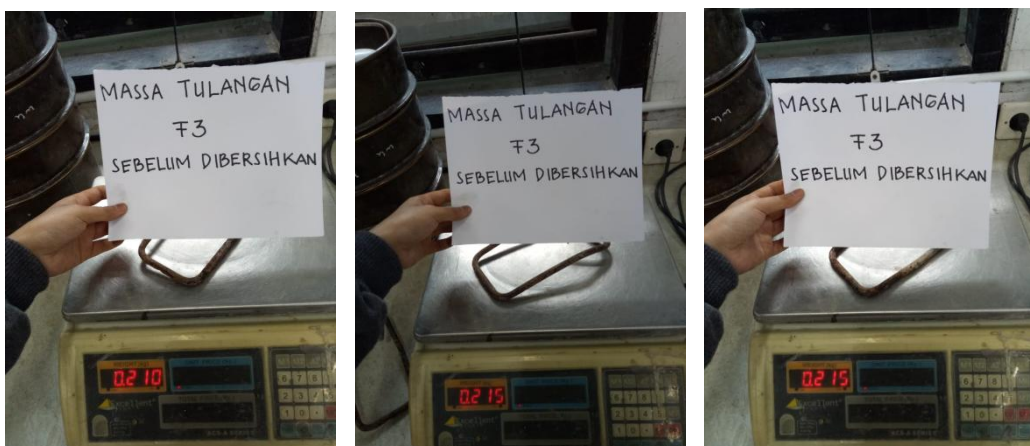


Foto Massa Tulangan Senggang Balok ECC (F3) Sebelum Dibersihkan

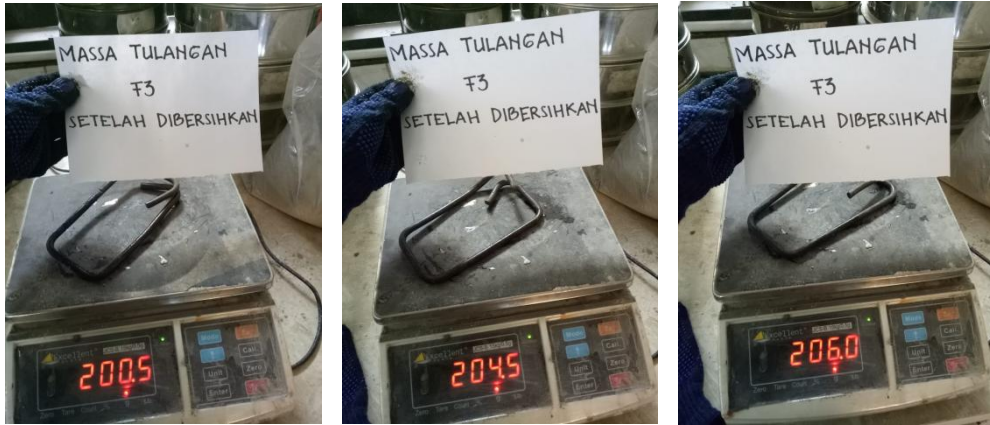


Foto Massa Tulangan Senggang Balok ECC (F3) Setelah Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Memanjang Balok Normal (F1) Sebelum Dibersihkan

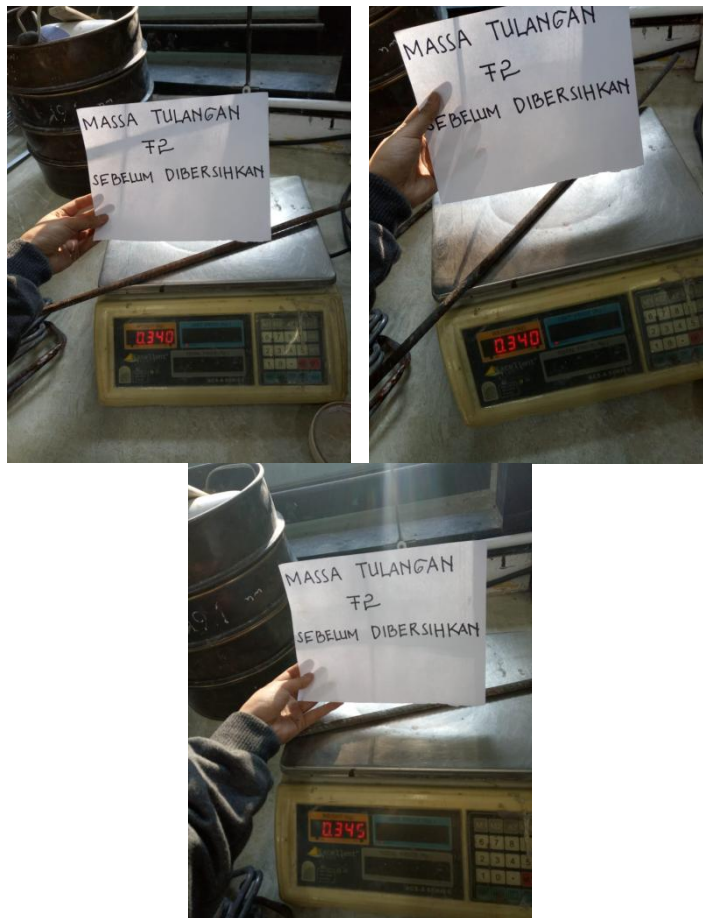


Foto Massa Tulangan Memanjang Balok *Supplementary* (F2) Sebelum Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Memanjang Balok *Supplementary* (F2) Setelah Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Memanjang Balok ECC (F3) Sebelum Dibersihkan



Foto Massa Tulangan Memanjang Balok ECC (F3) Setelah Dibersihkan

BIODATA PENULIS

Identitas Diri

Nama : Merzy Mooy
NRP : 03111750020002
Tempat Tanggal Lahir : Nunsui, 21 Maret 1994
Alamat Rumah : Jalan Pantai Nunsui, RT 05/RW 02, Kelurahan Oesapa,
Kecamatan Kelapa Lima, Kota Kupang, NTT
Nomor Telepon : 081238856551
e-mail : merzhymooy@yahoo.com



Riwayat Pendidikan

- Sarjana (S1)

Nama Perguruan Tinggi : Universitas Nusa Cendana, Kupang, NTT
Jurusan : Teknik Sipil
Fakultas : Sains dan Teknik
Tahun Masuk - Lulus : 2011 – 2017
Judul Skripsi : Pengaruh Suhu *Curing* Terhadap Kuat Tekan
Beton
Nama Pembimbing : Dr. Partogi H. Simatupang, S.T., M.T
John H. Frans, S.T., M.T

- Magister (S2)

Nama Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya,
Jawa Timur
Jurusan : Teknik Sipil
Bidang Keahlian : Struktur
Fakultas : Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan
Tahun Masuk - Lulus : 2017 – sekarang
Judul Tesis : Studi Eksperimental Pengaruh *Pre-Crack* Pada
Kapasitas Geser Balok *Engineered Cementitious
Composite* Yang Terkorosi
Nama Pembimbing : Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S., Ph.D
Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D