



TESIS - RC 185401

Investigasi *Fracture Energy* Pada Balok  
Berserat Baja dengan Tipe *Hooked End* (Dramix  
4D)

MAKSUM

03111850020011

DOSEN PEMIMBING

Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D

Harun Al Rasyid, ST., MT., Ph.D

Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

*“ Halaman sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

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

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
Oleh :

**MAKSUM**  
**NRP: 03111850020011**

Tanggal ujian : 12 Juni 2020  
Periode Wisuda : Desember 2020

Disetujui oleh:  
**Pembimbing:**

1. Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D  
NIP: 19840318 200812 1 002
2. Harun Al Rasyid, S.T., M.T., Ph.D  
NIP: 19830808 200812 1 005



Handwritten signatures of Bambang Piscesa and Harun Al Rasyid, each followed by a dotted line for a stamp.

**Penguji:**

1. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP: 19800430 200501 1 002
2. Dr. Candra Irawan, S.T., M.T  
NIP: 19900823 201504-1 004



Handwritten signatures of Data Iranata and Dr. Candra Irawan, each followed by a dotted line for a stamp.



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

***“ Halaman sengaja dikosongkan ”***

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat rahmat, hidayah dan inayah-Nya akhirnya Thesis ini dapat terselesaikan dan tidak lupa shalawat serta salam kita panjatkan kepada junjungan kita Rosullullah SAW yang telah membimbing dan tunutunan kepada penulis sehingga tetap sabar tanggung jawab dan ikhlas selama menghadapi masalah yang ada

Thesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam memperoleh gelar Magister Teknik, Bidang Keahlian Teknik Struktur, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Yang merupakan salah satu misi dari penulis untuk mewujudkan sebuah karya yang nyata dan bisa digunakan oleh praktisi dan insinyur teknik sipil khususnya di Indonesia. Harapannya ini akan menjadi pembuka jalan lagi untuk perkembangan ilmu rekayasa Teknik Sipil serta membuka wawasan para praktisi Teknik Sipil bahwa kita memiliki intelektulalitas yang tinggi sehingga mampu membuat karya yang luar biasa dan memiliki daya saing.

Penulis sadar bahwa hasil penelitian masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak kekurangan dalam beberapa hal, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun akan menjadi sebuah masukan yang sangat berarti dan juga akan dapat mengembangkan hasil karya ini jauh lagi dan tidak menutup kemungkinan akan dibentuk sebuah tim khusus sehingga penelitian bisa menghasilkan hasil yang akan lebih berguna lagi.

Dalam kesempatan ini tak lupa penulis ingin juga berterimakasih kepada semua pihak yang telah membantu, yakni kepada:

1. Bapak Bambang Pisceca, ST, MT, Ph.D selaku pembimbing I yang telah banyak membantu dan membimbing mulai dari penyusunan proposal hingga Thesis ini selesai.
2. Bapak Harun Al Rasyid, ST, MT, Ph.D selaku pembimbing II dan wali dosen yang dengan penuh kesabaran dan kesediaan waktu, tenaga dan pikiran dalam memberikan arah untuk penyelesaian Tesis ini.

3. Bapak Ir. Mudji Irmawan, M.S, Bapak Dr. Candra Irawan ST., MT, Ibu Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, ST., MT, dan Bapak Dwi Prasetya, ST., MS dan rekan rekan serta teknisi laboratorium beton material maju dan komputasi mekanik yang telah membantu selama ini dalam pengujian dan memberikan semangat dukungan kepada penulis.
4. Bapak ibu terima kasih atas segala doa dan dukungan moril maupun materil sebagai penyemangat terbesar hingga Thesis ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang turut membantu selama masa perkuliahan hingga penulisan Tesis ini, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas jasa dan kebaikan kalian semua.

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

Surabaya, Juli 2020

Penulis

## INVESTIGASI NILAI *FRACTURE ENERGY* PADA BALOK BETON BERSERAT BAJA DENGAN TIPE *HOOKED END* (DRAMIX 4D)

Nama Mahasiswa : Maksum  
NRP : 03111850020011  
Departemen : Teknik Sipil FTSLK-ITS  
Dosen Pembimbing : Bambang Piscesa., ST., MT., PhD  
: Harun Al Rasyid., ST., MT., PhD

### Abstrak

Penambahan serat baja ke dalam beton adalah salah satu cara yang digunakan untuk memperbaiki sifat mekanis beton yaitu dengan memperkuat kuat tariknya. Beton berserat baja memiliki kekuatan terhadap gaya tarik yang lebih besar dibandingkan dengan beton normal. Hal ini disebabkan oleh adanya kemampuan serat baja dalam menahan tegangan tarik pada saat beton mengalami retak-retak. Selain itu, beton berserat baja juga masih cukup efektif dalam menyerap energi fraktur yang terjadi walaupun sudah retak. Hal ini dapat meningkatkan energi yang diserap oleh beton meskipun telah terjadi retak.

Dalam penelitian ini balok berserat baja akan diuji lentur dengan menggunakan pengujian *three bending point*. Balok berserat baja menggunakan serat baja dengan tipe *hooked end* dramix 4D. Penambahan fraksi volume serat baja dimulai dari 0% hingga 2%. Ukuran spesimen balok berserat baja digunakan yaitu 200 mm x 200 mm x 450 mm ditambah dengan takikan. Manfaat dari adanya takikan tersebut sebagai pemicu retak. Pertambahan lebar retak dan beban yang bekerja pada balok direkam untuk menentukan nilai energi fraktur. Model numerik berbasis *finite element* menggunakan 3DLNFEA dibuat untuk memverifikasi hasil pengujian balok berserat baja yang berupa kurva beban - perpindahan dan kurva beban - perubahan lebar retak (CMOD).

Hasil pengujian *three bending point* balok menunjukkan bahwa penambahan serat baja mempengaruhi energi fraktur. Nilai energi fraktur berdasarkan fraksi volumetrik ( $V_f$ ) sebesar 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2% secara berurutan adalah 45.57 N/mm<sup>2</sup>, 173.72 N/mm<sup>2</sup>, 182.65 N/mm<sup>2</sup>, 196.00 N/mm<sup>2</sup>, dan 205.35 N/mm<sup>2</sup>. Dari hasil ini menunjukkan bahwa balok berserat baja lebih daktail dari pada beton polos. Dari hasil analisa numerik, didapatkan bahwa rasio antara beban hasil numerik terhadap eksperimen dengan fraksi volumetric sebesar 0 %, 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2% secara berurutan yaitu 1.121, 0.986, 0.988, 1.004, dan 1.014.

Kata kunci : balok beton berserat baja, fraktur energi, fraksi volumetric.

## **INVESTIGATION FRACTURE ENERGY IN BEAM OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE WITH TYPE HOOKED END (DRAMIX 4D)**

Student name : Maksun  
NRP : 03111850020011  
Departemen : Teknik Sipil FTSLK-ITS  
supervisor 1 : Bambang Piscesa., ST., MT., PhD  
Supervisor 1 : Harun Al Rasyid., ST., MT., PhD

### **Abstract**

The addition of steel fibers to the concrete is one of the methods used to improve the mechanical properties of concrete which strengthen the concrete tensile strength. Steel fiber reinforced concrete has the advantage in post-crack tensile stress capacity due to the ability of steel fibers to resist tensile stresses between cracks. This can increase the energy absorbed by the concrete despite cracks.

In this research, beam steel fiber will be tested using the three bending point test. Beam steel fiber use with type hooked end dramix 4D. the volume addition of the volumetric fraction starts from 0% to 2%. The spesimen size used is 200 mm x 200 mm x 450 mm with a notched. The benefits from of notched for the initial to trigger crack. Increased crack width and tensile strength of beams are used to record the value of fracture energy. The finite element numerical model using 3DLNFEA was created to verify the test results of the load – displacement and load – crack mouth opening displacement (CMOD).

The test results of the beam show that the beam with the addition of steel fiber affects the fracture energy. Fracture energy value based on volumetric fraction ( $V_f$ ) 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% is 45.57 N/mm<sup>2</sup>, 173.72 N/mm<sup>2</sup>, 182.65 N/mm<sup>2</sup>, 196.00 N/mm<sup>2</sup> and 205.35 N/mm<sup>2</sup>. From these results ndicate that the beam with the addition of steel fibers is more ductile than plain concrete. In addition, the research results from this experiment were validated by numerical analysis with a comparison of load-displacement and load – crack mouth opening displacemnt (CMOD) with the results experimental-models with volumetric fraction of 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% namely 1,121, 0.986, 0.988 1.004, and 1.014.

Keywords: steel fiber, fracture energy, volumetric fraction,



## DAFTAR ISI

Abstrak.....	v
Abstract.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1 <i>Steel Fiber Reinforcement Concrete</i> (SRFC).....	5
2.2 Perambatan Retak Dalam Beton Berserat Baja.....	7
2.3 Distribusi Serat.....	8
2.4 Metode Test Beton Berserat Baja.....	9
2.5 Pengujian Lentur Balok Prisma.....	10
2.6 Hubungan Antara Tegangan Dan Lebar Retak Beton Berserat Baja dari Pengujian Lentur Balok Prisma.....	11
2.7 Tekan Silinder SRFC.....	13
2.8 Tarik Silinder SRFC.....	15
2.9 Energi Fraktur.....	16
2.9.1 Energi Fraktur Tarik.....	16
2.9.2 Energi Fraktur Tekan.....	17

2.9.3 Energi Fraktur Bending .....	17
2.10 Post Cracking.....	17
2.11 Dimensional – Non Linear Finite Element Analysis .....	18
2.11.1 Model plastis van mosis .....	18
2.11.2 Model Fraktur Plastisitas Tarik.....	19
2.11.3 Model Plastisitas tekan .....	21
2.12 Model Tegangan-COD untuk SFRC .....	24
2.13 Hubungan Model Tegangan – COD SFRC .....	27
2.13.1 Respon Pengujian Lentur Balok Berserat Baja.....	29
<b>BAB 3 METODOLOGI.....</b>	<b>33</b>
3.1 Bagan Alir Penelitian .....	33
3.2 Studi Literatur.....	33
3.3 Perencanaan Benda Uji .....	34
3.4 Material Bahan.....	34
3.5 Pengujian Material .....	34
3.6 Pembuatan Benda Uji.....	36
3.6.1 Benda Uji Silinder.....	36
3.6.2 Pengujian Belah Silinder .....	36
3.6.3 Pengujian Tekan Silinder.....	36
3.6.4 Pembuatan Benda uji balok .....	38
3.6.5 Geometri dan identitas benda uji .....	38
3.7 Perawatan Beton ( <i>Curing</i> ).....	40
3.8 Pengujian Balok Bending dan Instrument.....	40
3.8.1 <i>Setup</i> Pengujian Benda Uji .....	40
3.8.2 Instrument .....	41
3.9 Permodelan Balok Berserat Baja menggunakan 3D-NLFEA .....	43

3.9.1 Pre-processing.....	43
3.9.2 Non-linear Analysis .....	52
3.9.3 Post-processing .....	53
3.9.4 Analisis Hasil Pengujian .....	54
<b>BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>57</b>
4.1 Umum.....	57
4.2 Analisa Material.....	57
4.2.1 Analisa Berat Jenis Ordinary Portland Cement (OPC) ASTM C 188-95 ....	58
4.2.2 Agregat Halus .....	59
4.2.3 Pengujian Agregat kasar.....	60
4.2.4 Mix Desain Beton .....	62
4.2.5 Distribusi Serat Baja .....	64
4.3 Pengujian Uji Belah Silinder .....	65
4.3.1 Uji Belah Silinder.....	65
4.4 Kuat Tekan .....	67
4.4.1 Pengujian Kuat Tekan .....	67
4.4.2 Kuat Tekan Silinder .....	68
4.5 Pengujian Bending .....	71
4.5.1 Observasi Perilaku Balok, Load-Midspan Displacement Dan Load-CMOD B – H200 – F0% .....	72
4.5.2 Observasi Perilaku Balok, Load-Midspan Displacement dan Load-CMOD dengan Serat Baja.....	74
4.5.3 Mekanisme Retak Balok Berserat Baja.....	78
4.5.4 Perbandingan Load – <i>Midspan Displacement</i> .....	81
4.5.5 Perbandingan Load – CMOD Balok Berserat Baja .....	83
4.6 Hasil Pemodelan Numerik 3DNLFEA.....	85

4.6.1 Pemodelan Balok .....	85
4.6.2 Kurva P Load vs Displacement.....	89
4.6.3 Perilaku Balok Berserat Baja Menggunakan 3D-NLFEA.....	93
4.7 Optimasi .....	98
4.7.1 Peak Load .....	98
4.7.2 Fracture Energy.....	99
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	100
5.1 Kesimpulan.....	100
5.2 Saran.....	101
DAFTAR PUSTAKA .....	102

Lampiran

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Parameter pengaruh serat baja.....	5
Gambar 2. 2 Perbandingan Dramix steel fiber tiap jenis .....	6
Gambar 2. 3 Deskripsi skematis dari efek serat pada proses fraktur pada tegangan uniaksial (Löfgren 2005).....	6
Gambar 2. 4 Tegangan tarik-lebar retak dari pengujian tarik langsung (Amin 2015) .....	7
Gambar 2. 5 Mekanisme cabut serat pada material beton (Zollo 1997).....	8
Gambar 2. 6 Pengaruh volume serat pada faktor orientasi dengan ketebalan serat pada spesimen (Soroushian and Lee 1990).....	9
Gambar 2. 7 Klasifikasi beton berserat baja (Amin 2015).....	10
Gambar 2. 8 Pengujian lentur balok .....	11
Gambar 2. 9 Pendekatan menggunakan <i>inverse analysis</i> (Amin 2015) .....	12
Gambar 2. 10 Beberapa Ragam Bentuk Kurva $\Sigma$ -W Yang Digunakan Dalam <i>Inverse Analysis</i> (Amin 2015) .....	12
Gambar 2. 11 Posisi serat yang berbeda: (a) spesimen dengan tekikan dengan serat tepat di atas takik (B) spesimen takikan dengan serat pada jarak dari takik dan (c) situasi dalam spesimen tak ada takikan (Löfgren 2005) .....	13
Gambar 2. 12 Deskripsi skematis tentang perilaku beton dan FRC tekan (FIB model Code 2013).....	14
Gambar 2.13 Klasifikasi perilaku tarik bahan beton polos dan SFRC (FIB model Code 2013).....	15
Gambar 2. 14 Spesimen fraktur dengan serat yang keluar (a) Spesimen Tegangan Uniaksial (B) Spesimen Balok dan (c) close up dari serat ujung serat yang telah diluruskan saat ditarik keluar (Löfgren 2005).....	18
Gambar 2.15 Gabungan serat dan agregat untuk beton bertulang menggunakan serat dimuat dalam pengujian uniaksial (Löfgren 2005). .....	18
Gambar 2.16 Fungsi bilinear softening Hoover dan Bazant (Piscesa dkk, 2019). 20	
Gambar 2.17 (a) Sistematika perubahan dari perilaku pelunakan kekuatan tarik beton saat beton di bawah tekanan (b)Perubahan perilaku pelunakan	

kuat tarik beton dengan nilai $q_s$ yang bervariasi (Piscesa dkk, 2019) .....	21
Gambar 2. 18 Pengaruh tekanan tarik terhadap perilaku tekan beton .....	24
Gambar 2. 19 Model kurva inverse analysis $\sigma$ - $w$ dari balok SFRC (Amin,2015)	25
Gambar 2.20 Tegangan saat terjadi retak pada area balok SRFC (Amin 2015) ...	25
Gambar 2.21 Rasio pada kekuatan Tarik – garis tengah dengan rasio kedalaman $d_n/h_{sp}$ untuk variasi dari $\alpha$ (Amin 2015).....	26
Gambar 2.22 Rasio dari $w/CMOD - d_n/h_{sp}$ untuk Balok dengan $h_{sp}/D = 0.83$ dan $h_{sp}/D = 0.70$ (Amin 2015) .....	27
Gambar 2.23 Tegangan versus retak COD ( $w$ ) (Amin 2015) .....	27
Gambar 2.24 Pendekatan yang disederhanakan untuk transisi dalam respon momen- CMOD dari uji prisma dipengaruhi oleh komponen beton yang tidak retak ke blok tegangan ke titik di mana komponen beton yang tidak retak tidak efektif (Amin 2015).....	28
Gambar 2. 25 Tegangan pada saat retakan pada balok SFRC pada pengujian tekuk (Amin 2015).....	30
Gambar 2. 26 Rotasi balok SRFC saat dilakukan pengujian lentur (Amin,2015)	32
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	33
Gambar 3. 2 Hasil pengujian <i>splitting</i> silinder.....	36
Gambar 3. 3 <i>Setup</i> Pengujian Tekan <i>Uniaxial Silinder</i> Berserat Baja .....	37
Gambar 3. 4 Desain pengujian silinder.....	37
Gambar 3.5 Penampang balok bertulang .....	38
Gambar 3.6 Pengaturan benda uji balok beton berserat baja pengujian <i>three</i> .....	40
Gambar 3.7 Pengujian <i>three Bending Point</i> .....	41
Gambar 3.8 Pengujian <i>three bending point</i> dengan instrumen LVDT vertikal ....	42
Gambar 3. 9 <i>Crack mouth opening displacement</i> (CMOD).....	42
Gambar 3. 10 <i>Part</i> elemen model menggunakan SALOME .....	44
Gambar 3.11 Sketsa <i>boundary condition</i> .....	45
Gambar 3. 12 Pendefinisian <i>boundary condition</i> : tumpuan dan beban pada elemen menggunakan SALOME.....	46
Gambar 3. 13 Permodelan balok berserat baja menggunakan SALOME.....	46
Gambar 3. 14 Tipe dan ukuran <i>mesh</i> .....	47

Gambar 3. 15 <i>Mesh model</i> .....	48
Gambar 3. 16 Input material parameter BI-LINIER .....	48
Gambar 3. 17 Input material beton .....	49
Gambar 3. 18 Input parameter <i>Steel fiber Reinforced Concrete</i> .....	51
Gambar 3.19 kurva parameter <i>steel fiber reinforced concrete</i> .....	51
Gambar 3. 20 Proses <i>running</i> model .....	52
Gambar 3.21 Bentuk Deformasi Model Dari Paraview.....	53
Gambar 4. 1 Analisa gradasi saringan agregat halus .....	60
Gambar 4.2 Grafik ketentuan gradasi agregat kasar maksimum 10 mm .....	62
Gambar 4.3 Penyebaran serat.....	65
Gambar 4.4 <i>Force vs displacement splitting test</i> .....	66
Gambar 4.5 Hasil pengujian <i>splitting test</i> .....	67
Gambar 4.6 Hubungan tegangan aksial-regangan silinder beton SFRC .....	69
Gambar 4.7 Pola retak spesimen pengujian <i>uniaxial compression</i> , beton polos dan beton dengan tambahan serat. ....	70
Gambar 4.8 Setup pengujian spesimen B – H200 – F0%.....	72
Gambar 4.9 Mekanisme retak saat pengujian spesimen B – H200 – F0% .....	73
Gambar 4.10 Hasil pengujian <i>load- midspan displacement</i> B – H200 – F0% .....	74
Gambar 4.11 Setup pengujian spesimen B – H200 – F1%.....	75
Gambar 4.12 Mekanisme retak saat pengujian spesimen B – H200 – F1% .....	76
Gambar 4.13 Hasil pengujian <i>load- midspan displacement</i> B – H200 – F1% .....	77
Gambar 4.14 Hasil pengujian <i>Load- CMOD</i> B – H200 – F1% .....	78
Gambar 4.15 Sistematisa reaksi balok berserat baja ketika pengujian tekuk. ....	79
Gambar 4.16 Mekanisme retak saat pengujian lentur <i>three bending point</i> .....	79
Gambar 4.17 <i>Load versus midspan-displacement</i> balok berserat baja.....	82
Gambar 4.18 <i>Load vs perubahan lebar retak (Crack Mouth Opening Displacement</i> <i>– CMOD)</i> balok berserat baja .....	84
Gambar 4.19 <i>Plain concrete</i> pada parameter balok berserat baja .....	88
Gambar 4.20 <i>Steel fiber</i> pada Parameter Balok Berserat Baja.....	88
Gambar 4.21 Parameter <i>steel fiber reinforced concrete</i> digunakan pada software 3DNLFEA. ....	89

Gambar 4. 22 Perbandingan load midspan displacement balok eksperimen dan hasil model 3D-NLFEA .....	92
Gambar 4. 23 Pola Retak Dengan Pengujian <i>Three Bending Point</i> .....	93
Gambar 4. 24 Penampilan perubahan lebar retak dengan model .....	94
Gambar 4. 25 Kurva tegangan dan perubahan lebar retak (CMOD).....	97
Gambar 4.26 hubungan <i>peak load</i> dengan <i>volumetric fraction</i> .....	98
Gambar 4.27 hubungan <i>fracture energy</i> dengan <i>volumetric fraction</i> .....	99



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Detail serat baja.....	34
Tabel 3. 2 Peraturan pengujian material .....	35
Tabel 3.3 Perencanaan spesimen balok yang diuji .....	39
Tabel 3. 4 Detail geometri model SALOME balok.....	44
Tabel 4. 1 Hasil pengujian berat jenis semen OPC .....	58
Tabel 4. 2 Kandungan senyawa pada semen OPC .....	58
Tabel 4. 3 Hasil pengujian gradasi agregat halus .....	60
Tabel 4.4 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar.....	61
Tabel 4. 5 Hasil pengujian gradasi agregat halus .....	61
Tabel 4. 6 Perencanaan campuran beton menggunakan tabel DOE.....	62
Tabel 4.7 Komposisi per 1 m <sup>3</sup> beton berserat baja .....	63
Tabel 4. 8 Tabel distribusi serat baja .....	64
Tabel 4. 9 Kuat tarik silinder beton SFRC.....	66
Tabel 4.10 Hasil pengujian kuat tekan silinder .....	68
Tabel 4. 11 Tegangan dan Regangan silinder beton SFRC .....	69
Tabel 4.12 Rekapitulasi $P$ dan $\delta$ balok berserat baja .....	82
Tabel 4.13 Rekapitulasi beban-perubahan lebar retak berserat baja .....	84
Tabel 4. 14 Input data <i>plain concrete</i> .....	86
Tabel 4. 15 Input parameter <i>steel fiber volumetric fraction</i> .....	87
Tabel 4.17 Beban ultimit balok berserat baja hasil eksperimen P-CMOD dan model 3DNLFEA.....	97

*“ Halaman sengaja dikosongkan”*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Saat ini perkembangan beton menjadi sangat pesat dan penggunaannya menjadi salah satu material yang sangat meningkat dengan kemajuan jaman. Beton memiliki kuat tekan yang cukup besar namun memiliki kuat tarik yang kecil dan bersifat getas. Sehubungan dengan kelemahan beton ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanis beton tersebut. Salah satu cara yang digunakan untuk memperbaiki sifat mekanis beton adalah dengan menambahkan *micro reinforcement* seperti serat (Azis, 2016).

Pengenalan serat ke dalam beton pada awalnya dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan tarik matriks beton dengan menunda pelebaran celah retak (Li et al. 2018)(Amin 2015). Romualdi dan Batson 1963 mengawali penelitian *Steel Fiber Reinforced concrete* (SFRC) yang menunjukkan kekuatan tarik dan ketahanan retak beton dapat meningkat secara signifikan dengan memberikan serat baja yang diatur dan berjarak dekat kedalam design beton.

Kerusakan beton pada tahap pembebanan, awalnya muncul dalam bentuk retakan kecil yang terdistribusi. Retakan kecil ini terjadi karena penyusutan dari pasta semen di sekitar agregat. Seiring berjalannya waktu, dengan pembebanan yang berkelanjutan, kerusakan akan menyebar dan membentuk retakan yang lebih besar. Retakan besar tersebut menyebabkan kegagalan struktural (Sain, Chandra Kishe 2007).

Pada beton berserat baja, retakan – retakan yang terjadi akan ditahan oleh serat tersebut. Selanjutnya, serat yang berorientasi secara tegak lurus terhadap arah beban dapat berkontribusi besar terhadap penambahan kekuatan tarik pada beton. Pada saat beton mulai retak, serat mulai mencegah deformasi beton dengan menghambat retakan. Kepadatan dan orientasi dari serat baja, terutama di daerah sekitar retakan, merupakan faktor utama yang berkontribusi terhadap kekuatan tarik pasca retak (S. Zhang, Zhang, and Liao 2019).

Permasalahan lain dalam menggunakan beton berserat baja untuk desain terletak pada bagaimana menentukan besaran fraktur energi yang bekerja. Fraktur energi ini merupakan parameter yang sangat penting dalam memahami sifat-sifat beton dan menentukan kriteria desain struktur beton. Fraktur energi (GF) didefinisikan sebagai area di bawah kurva defleksi beban perunit area permukaan retak. Fraktur energi dipengaruhi oleh material serta ukuran benda uji yang digunakan. Banyak penelitian menunjukkan bahwa pemilihan serat baja juga dapat mempengaruhi kekuatan tarik dan meningkatkan nilai ekonomisnya. Sehingga dalam pemilihan jenis serat harus optimal dengan mempertimbangkan kekuatan tariknya dan rasio air /semen (Şahin and Köksal 2011).

Model mekanika fraktur yang paling banyak digunakan untuk menganalisis struktur beton adalah *Fictitious Crack Model* (FCM). (Köksal et al. 2013) merekomendasikan metode penentuan nilai GF menggunakan pengujian *three bending point*. Nilai fraktur energi cenderung meningkat dengan semakin membesarnya ukuran spesimen (Zhao, Kwon, and Shah 2008). Menurut (Kwon, Zhao, and Shah 2008), ukuran specimen yang semakin besar akan menyebabkan kurva fraktur energi meningkat. (Hoover and Bažant 2014) juga menyimpulkan hal yang sama.

Hal – hal yang mempengaruhi besarnya nilai *fracture energy* diantaranya adalah ukuran spesimen dan volume serat baja. (Barros and Sena cruz 2001) melakukan pengujian *three bending point* pada spesimen balok dengan volume serat 30, 60 dan 90 Kg/m<sup>3</sup> dari serat baja hooked-ends. Dari penelitian tersebut didapatkan adanya peningkatan beban maksimum yang signifikan dan kapasitas disipasi energi yang linier sebagai fungsi volume serat.

Berdasarkan penjelasan diatas, hipotesa awal bahwa penambahan serat baja ke dalam beton dapat menahan retakan dan menambah kekuatan tarik beton pasca retak. Pada spesimen balok dengan penambahan serat baja juga dapat meningkatkan fraktur energi. Selain itu, besaran fraktur energi sangat dipengaruhi oleh pemilihan tipe serat. Sehingga dapat dilakukan penelitian dengan judul “**Investigasi Nilai Fracture Energy Pada Balok Beton Berserat Baja Dengan Tipe Hooked End (Dramix 4D)**”.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh serat baja terhadap beban kuat tarik dan tekan pada silinder?
2. Bagaimana pengaruh komposisi serat baja pada balok beton berserat baja terhadap nilai *fracture energy* pada pengujian *Three bending point*?
3. Bagaimana rumus pendekatan *fracture energy* dan *peak load* terhadap pengaruh *volumetric fraction*?
4. Bagaimana model numerik balok berserat baja untuk memprediksi perilaku tarik dan membandingkan beban ultimate antara model dan eksperimen?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh serat baja terhadap beban kuat tarik dan tekan pada silinder.
2. Mengetahui pengaruh komposisi serat baja pada balok beton berserat baja terhadap nilai *fracture energy* dalam pengujian *Three bending point*.
3. Mengetahui rumus pendekatan *fracture energy* dan *peak load* terhadap pengaruh *volumetric fraction*.
4. Mengetahui model numerik balok berserat baja untuk memprediksi perilaku tarik dan membandingkan beban ultimate antara model dan eksperimen.

## 1.4 Manfaat Penelitian

1. Sebagai referensi untuk pengembangan studi penelitian tentang fiber steel selanjutnya
2. Penelitian ini dapat menjadi salah satu alternatif referensi dalam pembuatan beton dengan campuran steel fiber

## 1.5 Batasan Masalah

1. Rancangan campuran beton menggunakan metode DOE (Development of Enviroment)
2. Penelitian dilakukan dengan percobaan di Laboratorium dan tidak dilakukan uji lapangan.

3. Tipe *steel fiber* yang digunakan adalah jenis 4D BG 65/60.

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

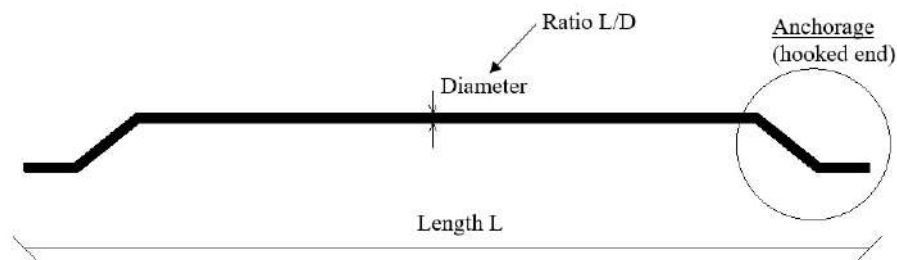
#### 2.1 *Steel Fiber Reinforcement Concrete (SRFC)*

Serat pada struktur beton bertulang bukan merupakan hal yang baru. Serat telah digunakan untuk memperkuat bahan yang rapuh seperti jerami dalam lumpur konstruksi pasangan bata pada Masa Era Babilonia dan Mesir. penelitian dalam beton bertulang ditambah serat baja diawali sekitar 60 tahun yang lalu (Amin 2015).

Beton berserat baja adalah material komposit yang terbuat dari campuran semen, agregat kasar, agregat halus, serta komponen – komponen campuran sering digunakan dalam beton dan ditambah campuran serat baja. Serat dapat berupa gelas/kaca, plastic, baja atau serat tumbuh – tumbuhan seperti rami atau ijuk. Karakterisasi material serat baja telah menjadi fokus beberapa penelitian dalam beberapa tahun terakhir (Amin and Foster 2016).

Menurut (Heru, 2011) kinerja serat baja sendiri terbagi menjadi tiga parameter:

1. Kekuatan tarik
2. Tipe *anchorage*
3. Rasio antara panjang dan diameter : aspek ratio L/D



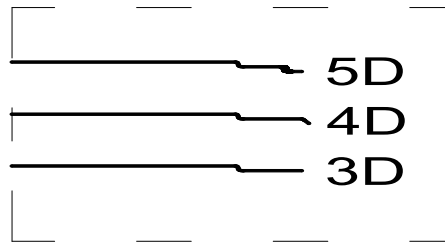
Gambar 2. 1 Parameter pengaruh serat baja

Tiga parameter ini akan memberikan nilai ketangguhan pada dosis tertentu. Namun dosis yang berbeda (volume serat/volume beton), nilai ketangguhan untuk serat baja spesifik akan bervariasi. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa kinerja sebuah serat baja bergantung pada dua hal berikut, yaitu:

1. Jenis serat (L/D ratio, kekuatan Tarik)

## 2. Dosis serat baja per volume

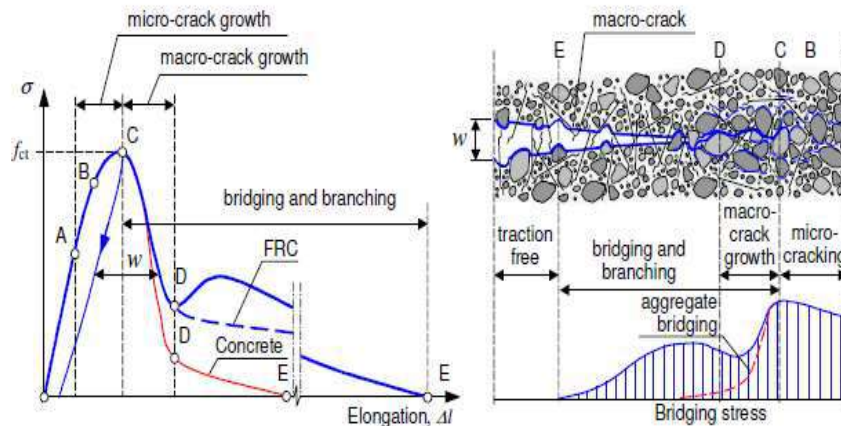
Di Indonesia sendiri material serat mulai berkembang dan salah yang digunakan adalah dramix (pada Gambar 2.2). Dramix® *fiber steel* adalah suatu konsep serat baja yang inovatif dari spesialis industri. Dramix® telah digunakan oleh berbagai pelaksana konstruksi di seluruh dunia pada berbagai aplikasi, seperti lantai industri, lantai gudang, perkerasan jalan, parkir basement, dan sebagainya.



Gambar 2. 2 Perbandingan Dramix steel fiber tiap jenis

Beton bertulang serat baja ada efek gabungan dari agregat dan serat baja yang ditunjukkan Gambar 2.3 dimana penghubung agregat memiliki rentang kerja yang relative singkat dibandingkan dengan serat. Pada Gambar 2.3, tiga zona berbeda dapat diidentifikasi sebagai:

1. zona awalan (*tracing free zone*), yang terjadi untuk celah yang relatif besar;
2. zona penghubung (*bridging and braching*), di mana tegangan mulai diberikan oleh penarikan serat, dan penghubung agregat
3. zona retak besar dan tumbuh retakan kecil kecil

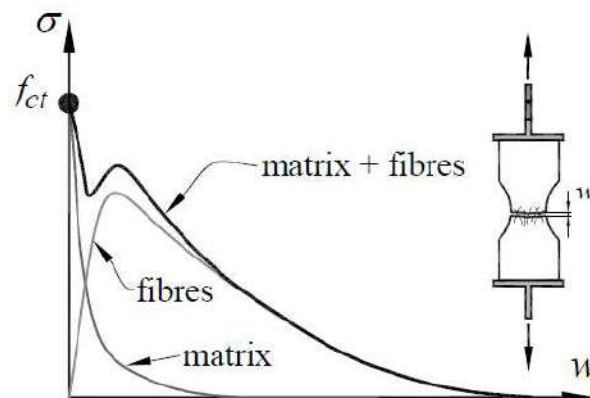


Gambar 2. 3 Deskripsi skematis dari efek serat pada proses fraktur pada tegangan uniaksial (Löfgren 2005)



## 2.2 Perambatan Retak Dalam Beton Berserat Baja

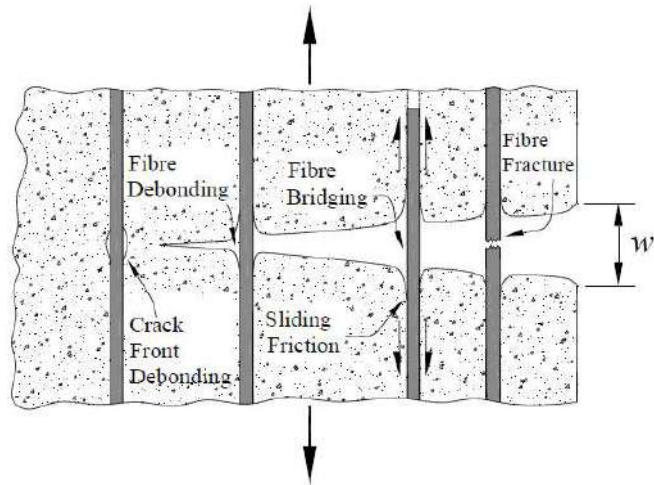
Serat baja yang biasanya digunakan dalam beton bertulang berbahan dari baja karbon atau baja tahan karat memiliki kemampuan tarik ultimit sekitar 200 sampai 2300 MPa dan memiliki modulus elastisitas sebesar 200 GPa. Sebelum mengalami retak, beban yang ditahan oleh serat baja relatif kecil karena modulus elastisitas yang jauh berbeda antara material beton dan serat baja. Penggunaan serat yang relatif sangat kecil dibandingkan dengan volume beton. Kekuatan tarik dari material beton tidak banyak terpengaruh dengan penambahan serat baja. Untuk menjaga perilaku yang baik setelah retak terjadi pada beton polos, material beton harus mengalami retak dahulu sebelum serat baja mencapai tegangan tariknya. Setelah material beton retak, serat menyalurkan tegangan diantara retak dan memberikan tahanan kepada proses melebarnya retak. Seiring dengan melebarnya retak, kekuatan tarik serat baja tidak akan tercapai, namun serat akan sedikit demi sedikit tercabut dari material beton. Penggunaan serat baja pada beton bertulang akan memberikan tegangan sisa setelah terbentuknya retak (Gambar 2.4) pada beton yang biasa disebut sebagai energi fraktur. Luasan dari diagram tegangan-lebar retak menunjukkan besarnya energi fraktur yang dapat diperoleh dari test tarik langsung atau dari tes lentur *notched-prism*.



Gambar 2. 4 Tegangan tarik-lebar retak dari pengujian tarik langsung (Amin 2015)

Gambar 2.4 menggambarkan beberapa bentuk perilaku dari serat dalam menyerap energi dan mengontrol perambatan retak (Zollo 1997). Bila diasumsikan orientasi serat searah dengan arah beban tarik dimulai dari elemen yang paling sebelah kiri yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 *debonding* antara permukaan serat

dengan material terjadi dan serat menahan gaya tarik saat retak melebar. Serat dapat tercabut atau mengalami kegagalan putus bergantung dari panjang pengankuran serat pada material beton.



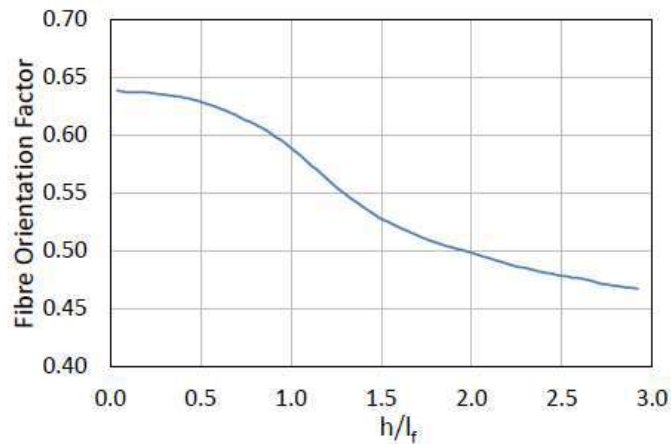
Gambar 2. 5 Mekanisme cabut serat pada material beton (Zollo 1997)

Pada saat proses tercabutnya serat pada Gambar 2.5, tahanan dari rambatan retak dan pelebarannya berdasarkan penyaluran gaya antara serat dan material beton. melalui ikatan dan karakteristik mekanis dari permukaan antara serat dengan material disekelilingnya. Ikatan pada serat baja yang ditemukan di pasaran, meskipun ada beberapa laporan yang menyebutkan bahwa dengan perawatan permukaan serat *polypropylene* dapat meningkatkan ikatan antara serat dan beton (López-Buendía et al. 2013). Namun untuk beton bertulang menggunakan serat baja, ikatan yang terjadi melalui mekanisme mekanikal dan gesekan.

### 2.3 Distribusi Serat

Distribusi serat adalah faktor yang sulit namun penting untuk diukur. Seperti halnya tulangan konvensional, serat paling efisien ketika tegak lurus dengan arah pembebanan, dan paling tidak efisien ketika mereka sejajar terhadap arah pembebanan (Luo, 2014). Dalam pemodelan beton bertulang serat baja, untuk efek orientasi serat berdampak terhadap pada efisiensi serat (Lee, Cho and Vecchio, 2011; Lee, Cho and Vecchio, 2013; Voo and Foster 2003).

Faktor orientasi serat biasanya menjelaskan sudut orientasi serat, dimensi serat, dan dimensi serat (Soroushian and Lee 1990). Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6, faktor orientasi serat meningkat ketika serat baja lebih tipis. Hal ini disebabkan oleh peningkatan probabilitas serat yang berada tegak lurus dengan arah tegangan tarik, memungkinkan penggunaan serat baja yang lebih efisien.

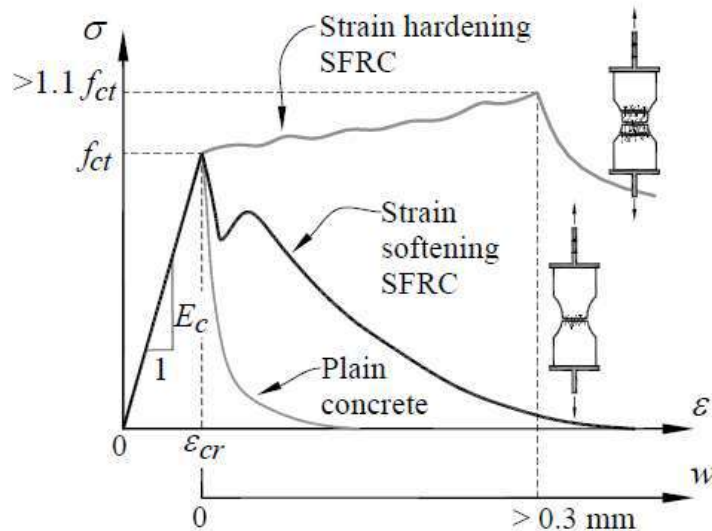


Gambar 2. 6 Pengaruh volume serat pada faktor orientasi dengan ketebalan serat pada spesimen (Soroushian and Lee 1990)

#### 2.4 Metode Test Beton Berserat Baja

Pada umumnya pengujian tarik langsung adalah pengujian yang ideal untuk mendapatkan parameter tegangan sisa pada beton berserat baja secara eksperimental. Perilaku tarik dari bahan sementitus dapat dikategorikan sebagai *strain-softening* dan *strain-hardening* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Untuk material *strain-softening*, kegagalan terjadi melalui lokalisasi dari retak tunggal. Perilaku ini ditandai oleh kekuatan tarik sisa dari benda uji tidak pernah mencapai kekuatan tarik dari material beton setelah retak, namun cenderung nol saat retak melebar. Di sisi lain, untuk material dengan *strain-hardening*, tegangan sisa meningkat setelah retak pertama dan dapat menimbulkan beberapa retak pada benda uji yang kemudian diikuti oleh kegagalan pada retak yang terlokalisasi. Namun dalam penelitian ini hanya akan membahas mengenai material dengan perilaku *strain-softening*. Terdapat beberapa cara pengujian untuk mendapatkan

grafik hubungan tegangan dengan lebar retak. Tetapi pada penelitian ini hanya akan digunakan pengujian lentur dengan benda uji *notched-prism*.



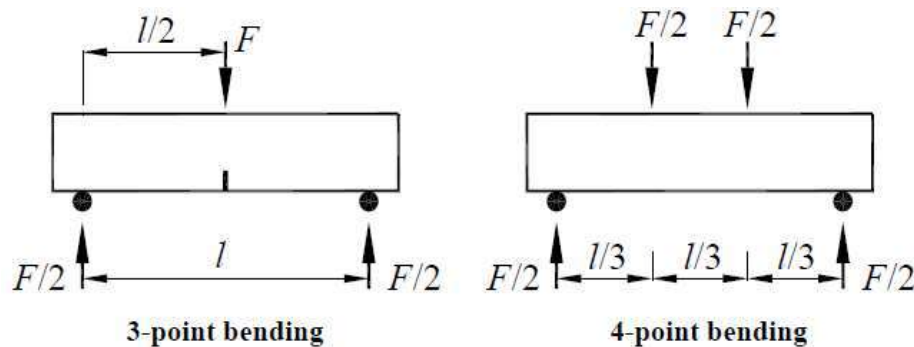
Gambar 2. 7 Klasifikasi beton berserat baja (Amin 2015)

Yang menarik bagi para peneliti dan praktisi adalah penentuan kurva  $\sigma$ - $w$  lengkap (mirip dengan yang disajikan pada Gambar 2.7). Namun, untuk mendapatkan kurva ini, diperlukan metode pengujian yang sesuai. Beberapa peneliti percaya bahwa penentuan hubungan  $\sigma$ - $w$  adalah masalah yang rumit (Di Prisco, Colombo, and Dozio 2013). Dalam kasus bahan rapuh dan getas, seperti beton polos, kekuatan tarik langsung sering diestimasi menggunakan metode tidak langsung seperti dengan modulus uji pecah atau uji split-silinder.

## 2.5 Pengujian Lentur Balok Prisma

Salah satu metode lain untuk mendapatkan tegangan tarik pada beton adalah menggunakan pengujian lentur balok prisma. Terdapat dua jenis tes yang biasa digunakan pada metode lentur balok ini, yaitu lentur dengan tiga titik (3-point bending) dan lentur dengan empat titik (4-point bending) yang dapat dilihat pada Gambar 2. 1 Pada kedua konfigurasi pembebanan, benda uji bisa diberi takikan atau tidak pada tengah bentangnya. Fungsi dari takikan pada benda uji ini agar retak yang terbentuk terlokalisasi pada daerah takikan.

Sehingga, perubahan lebar retak (*crack mouth opening displacement* – CMOD) yang terjadi dapat dengan mudah diukur dan dengan demikian dapat diambil sebuah kesimpulan langsung antara momen yang terjadi dengan lebar retak. Untuk benda uji prisma tanpa takikan biasanya diuji dengan lentur empat titik. Retak pertama yang terjadi pada benda uji ini akan muncul pada penampang terlemah diantara dua titik pembebanan di tengah bentang. Namun, pengujian dengan cara ini tidak dapat memprediksi lokasi dari retak yang terjadi sehingga pengukuran CMOD akan sulit dilakukan. Hasil yang disajikan dari pengujian tipe ini adalah grafik hubungan antara beban dan defleksi tengah bentang. Dalam penelitian ini akan digunakan pengujian balok prisma dengan takikan di tengah bentang dan pembebanan lentur tiga titik.

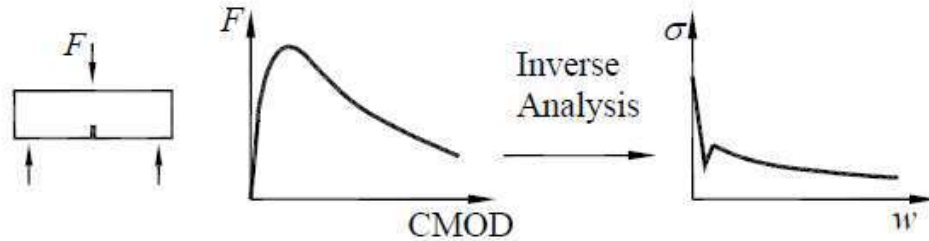


Gambar 2. 8 Pengujian lentur balok

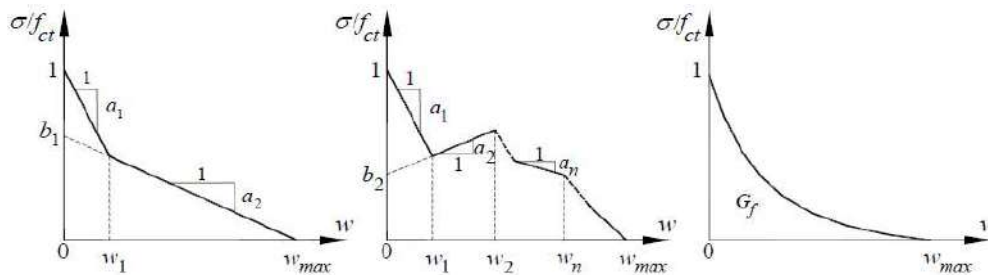
## 2.6 Hubungan Antara Tegangan Dan Lebar Retak Beton Berserat Baja dari Pengujian Lentur Balok Prisma

Untuk mendapatkan grafik hubungan antara tegangan tarik dan lebar retak yang terjadi dari pengujian lentur balok bertakik dapat menggunakan metode analisa *inverse* (*inverse analysis*) (Gambar 2. 2). Langkah pertama dalam melakukan *inverse analysis* adalah mengasumsikan bentuk dari kurva *softening*. Karena bentuk dari kurva hubungan tegangan dan lebar retak ( $\sigma$ -w) yang cukup rumit, maka bentuk dari kurva ini dibuat lebih sederhana dengan bentuk multi linier seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3 Setelah penentuan bentuk dari kurva *softening*, beberapa identifikasi dari parameter fraktur perlu ditentukan. Hal ini

dilakukan dengan memodifikasi kurva *softening* dengan *trial and error* atau menggunakan teknik optimasi dengan melihat hasil pengujian eksperimental.



Gambar 2. 9 Pendekatan menggunakan *inverse analysis* (Amin 2015)

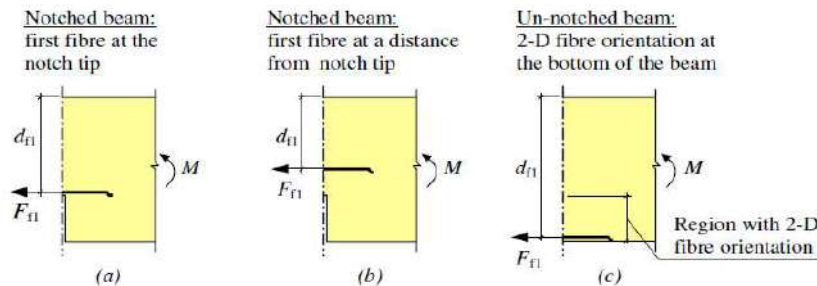


Gambar 2. 10 Beberapa Ragam Bentuk Kurva  $\Sigma$ -W Yang Digunakan Dalam *Inverse Analysis* (Amin 2015)

Pendekatan *inverse analysis* juga telah digunakan untuk *fiber reinforced concrete (FRC)* (Uchida et al. 1995),(Kooiman, Van Der Veen, and Walraven 2000)(Meda, Plizzari, and Slowik 2001). Namun, ada beberapa masalah yang terkait dengan pendekatan *inverse analysis* pada FRC, seperti: (1) bentuk kurva hubungan  $\sigma$ - $w$  tidak didefinisikan dengan baik seperti beton biasa, tetapi bervariasi tergantung pada campuran serat; (2) dengan peningkatan volume serat, menjadi sulit untuk membedakan antara efek kekuatan tarik dan kemiringan pertamapada kurva hubungan  $\sigma$ - $w$ ; (3) *inverse analysis* sering kali salah, yaitu karena tidak ada solusi yang valid (4) Terlalu banyaknya parameter yang mungkin diperlukan untuk menggambarkan hubungan  $\sigma$  - $w$  dan (5) respons dipengaruhi oleh posisi serat Gambar 2.11 yang dapat tercermin pada hubungan  $\sigma$ - $w$  yang ditentukan karena diasumsikan bahwa sifat-sifatnya seragam pada bagian tersebut.

Dengan asumsi sifat yang sama dapat dibenarkan untuk beton polos, sedangkan untuk beton bertulang serat baja sangat mungkin bahwa akan ada variasi karena distribusi serat tidak seragam. Variasi ini mungkin tidak banyak

mempengaruhi kekuatan tarik, tetapi ikatan serat yang terletak dekat dengan takikan (Gambar 2.11) mungkin memiliki efek signifikan pada perilaku dan mempengaruhi penentuan hubungan  $\sigma$ - $w$ . Dalam Gambar 2.11, posisi serat yang berada langsung di area takikan (atau di permukaan balok jika tidak ada takikan) akan memberikan kontribusi lebih signifikan terhadap kekuatan lentur dan juga akan memperlambat perambatan retak. Pada Gambar 2.11 (b), serat memiliki orientasi 2-D di bagian bawah spesimen, karena mereka akan sejajar dengan tepi, dan wilayah dengan orientasi 2-D akan mencapai kedalaman yang sama dengan setengah panjang serat. Masalah lain yang telah diamati untuk balok tanpa takik, Gambar 2.11 (c), adalah bahwa orientasi serat di bagian bawah balok mungkin memiliki efek yang menguntungkan pada kekuatan lentur (Löfgren 2005)



Gambar 2. 11 Posisi serat yang berbeda: (a) spesimen dengan tekikan dengan serat tepat di atas takik (B) spesimen takikan dengan serat pada jarak dari takik dan (c) situasi dalam spesimen tak ada takikan (Löfgren 2005)

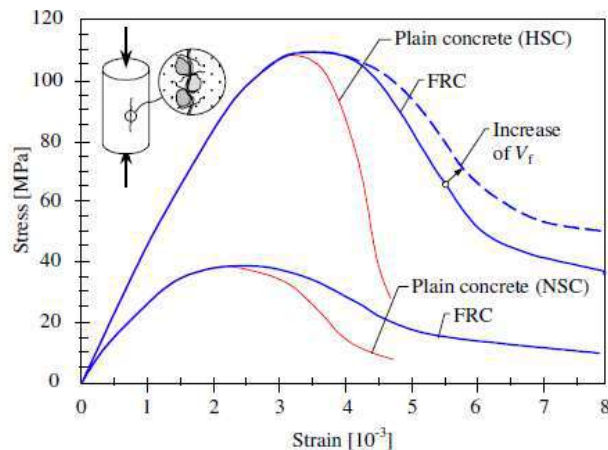
## 2.7 Tekan Silinder SRFC

Hubungan tegangan-regangan beton polos menunjukkan respons elastis hampir linier hingga sekitar 30% dari kekuatan tekan. Hal ini diikuti oleh tegangan hingga kekuatan tekan saat beton ultimit, hubungan tegangan-regangan beton menunjukkan *strain softening* sampai terjadi kegagalan atau *crushing* pada beton. Pengamatan eksperimental menunjukkan bahwa perilaku makroskopis pada tekan beton adalah karena gesekan-gesekan sepanjang retak yang sudah ada, dari pembentukan retak tarik di ujung balok (Vonk 1992)(van Mier 2017). Retak geser dimulai dari *interface* pasta agregat-semen (area lemah) dan merambat ke dalam matriks sebagai retak tarik. Retak tarik ini tumbuh dengan peningkatan tekan beton dan menjadi sejajar dengan arah tekan utama. Kegagalan akhir adalah karena

interaksi retakan. Seperti yang dikemukakan oleh (Neville 1997), tentang hubungan tegangan-regangan beton yang sebagian besar retak terletak pada adanya *interface* antara agregat dan pasta semen yang keras, dimana *microcrack* berkembang pada pembebanan. Perubahan perilaku beton dan ketika kekuatan tekan meningkat dan menjadi lebih getas.

Agregat beton normal secara signifikan lebih kuat dan kaku daripada pasta semen, sedangkan untuk beton mutu tinggi kekuatan dan kekakuannya. Akibatnya, beberapa retakan memanjang melalui agregat yang menghasilkan permukaan retak yang halus, dibandingkan dengan permukaan retak yang lebih bercabang cabang pada beton kekuatan normal (Darwin et al. 2001).

Dengan adanya serat dalam matriks, beton menjadi lebih daktail Gambar 2.12. (Löfgren 2005), penambahan serat sangat menguntungkan untuk meningkatkan sifat mekanik beton mutu tinggi yang dimuat dalam tekan beton, karena kegetasan berkurang secara signifikan. Secara umum dapat disimpulkan bahwa serat baja pada dosis sedang (<1%) tidak mempengaruhi sifat pra-puncak, sedangkan regangan pada lokalisasi retakan dan panjang regangan runtuhnya meningkat. Namun, dengan serat mikro (mis. *carbon and wollastonite*) dan untuk volume serat yang tinggi (> 1%) dimungkinkan untuk meningkatkan kekuatan tekan.



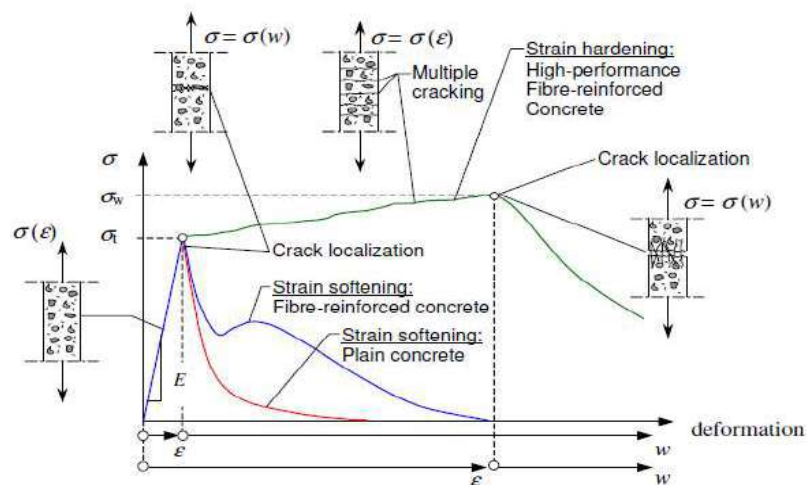
Gambar 2. 12 Deskripsi skematis tentang perilaku beton dan FRC tekan (FIB model Code 2013)



Untuk memperhitungkan efek menguntungkan dari serat baja, sejumlah penelitian empiris telah diusulkan, (Ezeldin, Member, and Balaguru 1993) (Taerwe and Van Gysel 1996). Untuk desain struktural, model konstitutif elastis – plastis dengan transisi parabolik telah diusulkan untuk perilaku tekan beton yang diperkuat serat baja, dengan regangan maksimum 3,0-3,5 ‰ (Nanakorn and Horii 1996) (Lok and Pei 1998).

## 2.8 Tarik Silinder SRFC

Secara umum bahwa klasifikasi yang paling tepat digunakan dari perilaku tarik didasarkan pada respon uni-aksial (van Mier 2017) (Stang and Li 2004). Perilaku tarik material berbasis semen (seperti beton bertulang serat) dapat diklasifikasikan sebagai *strain softening* (*quasi-brittle material*) atau *strain hardening* pada Gambar 2.13. Untuk material *strain softening*, satu area retakan menentukan perilaku pasca-puncak dan setelah matriks retak, tegangan akan mulai berkurang. Bahan *strain hardening* semu disebut komposit semen bertulang serat mutu tinggi (HPFRCC) (Nanakorn and Horii 1996) dan dicirikan atau didefinisikan sebagai ‘*high-performance*’ jika kurva menunjukkan regangan-regangan semu perilaku *hardening* (atau *strain hardening* semu) (yaitu kekuatan pasca retak lebih besar dari kekuatan retak, atau respons elastis). Berdasarkan klasifikasi ini, sifat tarik untuk bahan *strain softening*.



Gambar 2.13 Klasifikasi perilaku tarik bahan beton polos dan SFRC (FIB model Code 2013)

## 2.9 Energi Fraktur

Beton polos adalah material *strain hardening*, dan hasil dari sejumlah peneliti (Petersson, 1981; Cornelissen, Hordijk and Reinhardt, 1986) menunjukkan bahwa data eksperimen untuk kurva tegangan - lebar retak ( $w$ ) terletak pada ikatan yang relatif kecil ketika tegangan dinormalkan dengan kekuatan tarik (Cornelissen, Hordijk, and Reinhardt 1986). Ini berarti bahwa, terlepas dari kerumitan berbagai mekanisme yang terlibat, data eksperimental dapat dipasang dengan cukup akurat dengan cara relatif sederhana (van Mier 2017). Perilaku fraktur tarik dapat dicirikan oleh tegangan tarik - kurva lebar retak, yang dapat digunakan dalam model retak kohesif, misalnya *fictitious crack model* yang awalnya disarankan oleh (Hillerborg, Modéer, and Petersson 1976) atau *crack band model* (Bažant and Oh 1983)

Dalam *fictitious crack model*, parameter utama adalah kekuatan tarik, modulus elastisitas, *fracture energy* ( $G_F$ ) dan bentuk kurva  $\sigma$ - $w$  Gambar 2.14. Karena bentuk kurva  $\sigma$ - $w$  tidak terlalu bervariasi untuk beton polos, maka untuk sebagian besar aplikasi cara praktis biasanya cukup untuk menentukan *fracture energy* ( $G_F$ ) dan kekuatan tarik, untuk menentukan  $\sigma$ - $w$  yang sesuai. *fracture energy* dapat ditentukan secara eksperimental dalam pengujian tegangan uniaksial yang menghasilkan kurva  $\sigma$ - $w$  lengkap, pengujian lentur *three bending point*, menurut RILEM TC-50 FMC (1985) atau metode uji tarik lainnya, seperti *wedge-splitting test method*.

### 2.9.1 Energi Fraktur Tarik

Fraktur energi tarik ( $G_F$ ) yang digunakan dalam model ini menggunakan model peraturan CEB-FIP 1990. Pada model CEB-FIP 1990 dalam Piscesa, dkk (2019), energi fraktur Tarik dasar ( $G_{F0}$ ) merupakan fungsi dari diameter agregat maksimum yang ditentukan oleh kuat tekan beton. Persamaan  $G_F$  sebagai berikut:

$$G_F = G_{F0} \left( \frac{f'_c}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad (2.01)$$

dimana  $f_{cm0}$  bernilai 10.

### 2.9.2 Energi Fraktur Tekan

Fraktur energi tekan pada CEB-FIB 90 memberikan hubungan empiris untuk mendapatkan nilai energi fraktur berdasarkan kuat tekan  $f_c'$  adalah sebagai berikut

$$GF = a_d f_c'^{0.7} \quad (2.02)$$

Dimana,  $a_d$  adalah ukuran agregat kasar

Dengan agregat kasar yang digunakan agregat normal dengan diameter normal maksimal 19 mm digradasikan

### 2.9.3 Energi Fraktur Bending

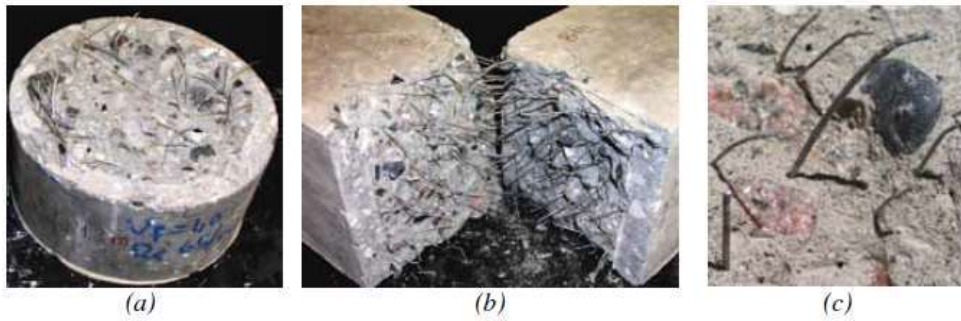
Perhitungan nilai *fracture energy* dengan *three bending point* sangat dipengaruhi *volumetric fraction* yang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *fracture energy*. Menurut (*Rilem recommendation*) rumus pendekatan untuk mencari GF pada balok dengan menggunakan *notched* yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$GF = \frac{w1 + mg\delta_0}{(D+N)W} \quad (2.03)$$

Dimana, GF = fracture energy N/mm W = luasan area pada load-midspan displacement ( $\text{mm}^2$ ),  $\delta_0$  = nilai defleksi, m = total massa, g = gravitasi ( $\text{m/s}^2$ ), D = tinggi (mm), N = tinggi *notched* (mm), W = lebar balok (mm).

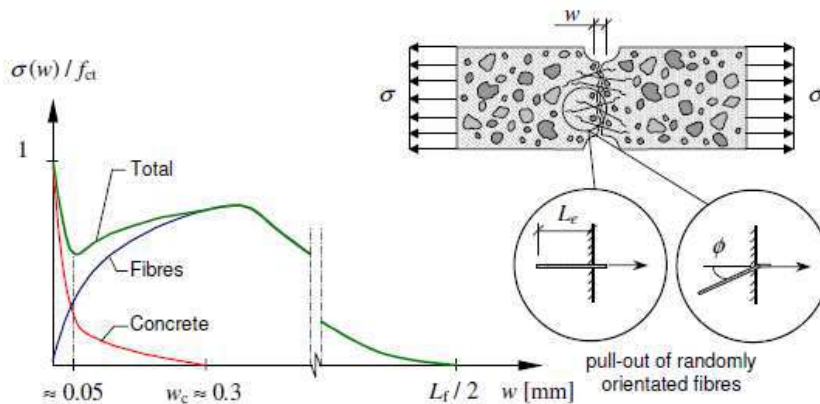
### 2.10 Post Cracking

Sebagian besar beton bertulang serat baja efek penguat utama serat muncul pertama kali setelah matriks retak. Pemeriksaan beton bertulang serat baja pada (Gambar 2.16), menunjukkan bahwa kegagalan terjadi terutama karena penarikan serat dan serat dengan ujung yang cacat, disipasi energi yang cukup besar terjadi karena serat menjadi lurus dan deformasi plastis (Gambar 2.16 (c)).



Gambar 2. 14 Spesimen fraktur dengan serat yang keluar (a) Spesimen Tegangan Uniaksial (B) Spesimen Balok dan (c) close up dari serat ujung serat yang telah diluruskan saat ditarik keluar (Löfgren 2005)

Tidak seperti beton biasa, spesimen SFRC tidak pecah dengan cara yang getas setelah inisiasi retakan pertama. Hal tersebut memiliki efek meningkatkan kerja fraktur, yang disebut sebagai energi ketangguhan atau fraktur dan diwakili oleh area di bawah kurva tegangan lebar retak Gambar 2.17. Selain serat, retak matriks berkontribusi terhadap disipasi energi menjadi penghubung agregat (Gambar 2.17). Meskipun serat baja lebih dominan dalam hal disipasi energi.



Gambar 2.15 Gabungan serat dan agregat untuk beton bertulang menggunakan serat dimuat dalam pengujian uniaksial (Löfgren 2005).

## 2.11 Dimensional – Non Linear Finite Element Analysis

### 2.11.1 Model plastis van mosis

Model plastisitas von mises yang disebut juga sebagai plastisitas J2 hanya berdasarkan parameter k. Fungsi pelelehan didefinisikan sebagai:

$$F^p(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} - k(\varepsilon_{eq}^p) = 0 \quad (2.04)$$

dimana  $J_2$  menunjukkan invarian kedua dari tensor deviator tegangan. Parameter  $k(\varepsilon_{eq}^p) = \sqrt{1/3}\sigma(\varepsilon_{eq}^p)$  adalah tegangan geser maksimum dan  $\sigma_y$  adalah tegangan leleh uniaxial. Parameter ini mengontrol pengerasan isotropik dari kriteria leleh.

$$\sigma_y(\varepsilon_{eq}^p) = \sigma_y + H\varepsilon_{eq}^p, \varepsilon_{eq}^p = \sum_{i=1}^{N_{inc}} \sqrt{2/3(\Delta\varepsilon^p:\Delta\varepsilon^p)} \quad (2.05)$$

dimana  $\sigma_y$  adalah tegangan leleh, H adalah modulus pengerasan dan  $\varepsilon_{eq}^p$  adalah strain plastis yang setara dihitung sebagai penjumlahan regangan plastis yang dihitung sebagai penjumlahan regangan plastis selama pembebanan.

Dalam kasus fungsi potensial plastisitas von mises identik dengan fungsi leleh:

$$G^p(\sigma_{ij}) = F^p(\sigma_{ij}) \quad (2.06)$$

## 2.11.2 Model Fraktur Plastisitas Tarik

### 2.11.2.1 Kegagalan Permukaan Tarik "Cut Off"

Kuat beton dibawah tekanan tarik dipengaruhi oleh 'crushing'/kehancuran beton dan oleh karenanya efek dari 'pelunakan'/penurunan kekuatan beton masuk dalam perumusan "cut off" tarik kehancuran permukaan. Ketika beton memasuki tahap softening/'pelunakan', kuat tarik beton menurun dan menyebabkan penurunan kekuatan yang besar dikarena retak 'split' pada cover beton. kriteria Rankine mendefinisikan dengan fungsi fraktur beton dan fungsi pelunakan penghancur sebagai berikut:

$$f_{frac} = \xi + \sqrt{2}pcos\theta - \sqrt{3}q_f\sqrt{q_s}f_t \quad (2.07)$$

Untuk fungsi pelunakan fraktur (*fracturing softening*), fungsi softening bilinear diusulkan oleh Hoover dan Bazant (2014) dalam Piscesa, dkk (2019) dengan skema seperti pada Gambar 2.19. menunjukkan fungsi softening bilinear untuk rekahan sebagai fungsi regangan rekahan ( $\varepsilon$ ) dan perubahan lebar retak ( $w$ ). Fungsi pelunakan ( $q_f$ ) pada beton yang mengalami rekahan adalah:

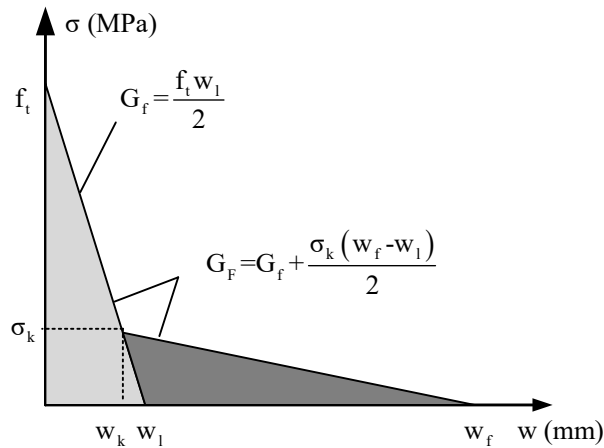
$$q_f = 1.0 - \left(\frac{f_t - \sigma_k}{f_t}\right) \min \left[ \frac{\langle \varepsilon_{eq} - \varepsilon_0 \rangle}{\varepsilon_k - \varepsilon_0}, 1.0 \right] - \frac{\sigma_k}{f_t} \frac{\langle \varepsilon_{eq} - \varepsilon_k \rangle}{\varepsilon_f - \varepsilon_k} \quad (2.08)$$

$$\varepsilon_k = \frac{2G_f}{hf_t} - \frac{\sigma_k}{f_t} \left( \frac{2G_f}{hf_t} \right) + \varepsilon_0 \quad (2.09)$$

$$\varepsilon_f = \frac{2(G_F - G_f)}{h\sigma_k} + \frac{2G_f}{hf_t} + \varepsilon_0 \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_f = \left( 1 - \frac{w_k f_t}{2G_f} \right) f_t \quad (2.11)$$

dimana,  $\varepsilon_f$  adalah regangan saat runtuh dimana lebar bukaan retak sudah terbuka ( $w = wf$ ) dan tegangannya nol,  $w_k$  dan  $\varepsilon_k$  adalah lebar bukaan retak dan regangan pada di titik knee point pada kurva bagian turun dan tegangan saat  $\sigma_k$ . Nilai  $h$  adalah diambil dari sesuai ukuran mesh elemen,  $\varepsilon_0$  adalah regangan tarik pada tegangan puncak.



Gambar 2.16 Fungsi bilinear softening Hoover dan Bazant (Piscosa dkk, 2019)

Fraktur energi tarik ( $G_F$ ) yang digunakan dalam model ini menggunakan model peraturan CEB-FIP 1990. Pada model CEB-FIP 1990 dalam Piscosa, dkk (2019), energi fraktur Tarik dasar ( $G_{F0}$ ) merupakan fungsi dari diameter agregat maksimum yang ditentukan oleh kuat tekan beton. Persamaan  $G_F$  sebagai berikut:

$$G_F = G_{F0} \left( \frac{f'_c}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad (2.12)$$

dimana  $f_{cm0}$  bernilai 10.

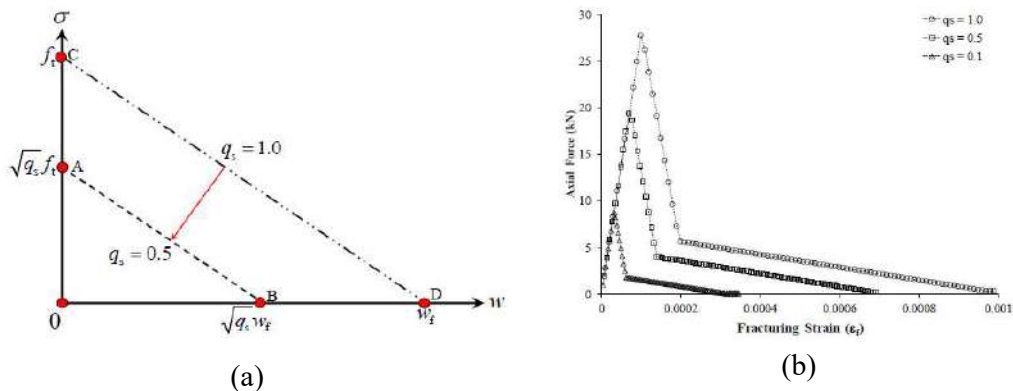
Untuk fungsi pelunakan fraktur (*fracturing softening*), fungsi *softening* bilinear diusulkan oleh Hoover dan Bazant (2014) dalam Piscosa, dkk (2019) dengan skema seperti pada Gambar 2.16 dimana nilai  $G_f/G_F$  diatur sebesar 0.7.

Perpindahan bukaan retak pada tekukan ( $w_k$ ) dan pada titik dimana retak terbuka penuh ( $w_f$ ) dapat diestimasikan sebagai berikut:

$$w_k = \frac{1.12G_F}{f_t}; w_f = \left( \frac{0.6}{f_k} + \frac{1.4}{f_t} \right) G_F \quad (2.13)$$

### 2.11.2.2 Pengaruh Tekan Beton Terhadap Kuat Tarik Beton

Dalam fungsi ini, penurunan kapasitas kuat tarik berkaitan dengan penurunan tegangan (*softening stress*). Perhatikan bahwa ketika penurunan beton saat berada dibawah tekanan, dan tidak hanya kapasitas kekuatan tarik yang berkurang tetapi saat regangan runtuh (*fracturing strain*). Pada Gambar 2.17 (a) menunjukkan perubahan sistematika dari perilaku melambatnya tarik beton karena beban tekan. Baik kekuatan tekan maupun fraktur regangan saat ultimate berkurang terhadap nilai  $\sqrt{q_s}$ , energy fraktur tarik (GF) ikut berkurang dengan skala  $q_s$ , pada Gambar 2.17 b, menunjukkan perubahan perilaku pelambatan beton saat beton ditekan.



Gambar 2.17 (a) Sistematika perubahan dari perilaku pelunakan kekuatan tarik beton saat beton di bawah tekanan (b)Perubahan perilaku pelunakan kuat tarik beton dengan nilai  $q_s$  yang bervariasi (Piscesa dkk, 2019)

### 2.11.3 Model Plastisitas tekan

#### 2.11.3.1 Model Plastisitas Beton akibat Beban Aksial Tekan

fungsi kegagalan permukaan dan plastis potensial dikembangkan pada penelitian (Piscesa dkk, 2019) dengan menggunakan parameter pengantar gesekan ( $\alpha$ ), dan untuk persamaan fungsi plastis potensial dengan menambahkan parameter kontrol

laju dilatasi plastis ( $\alpha_{p0}$ ). modifikasi kegagalan permukaan dan fungsi plastis pontesial beton akibat beban aksial tekan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$f_{comp} = \left( \frac{\sqrt{1.5p}}{f'_c q_h} \right)^2 + am \left[ \frac{pr(\theta, e)}{\sqrt{6} f'_c q_h} + \frac{\xi}{\sqrt{3} f'_c q_h} \right] - q_s \leq 0 \quad (2.14)$$

$$g_{comp} = \left( B + \frac{(A-B)(1-\cos 3\theta)}{2} \right) \frac{\rho^2}{f_c'^2 q_h^2 q_s} + \left( B + \frac{(\alpha P_0 - 1)(1-\cos 3\theta)}{2} \right) \frac{\xi}{f'_c q_h \sqrt{q_s}} \quad (2.15)$$

dimana  $\rho$  adalah panjang deviatoris;  $\xi$  adalah panjang hidrostatis;  $\theta$  adalah sudut Lode, serta  $q_h$  adalah fungsi *hardening*.  $q_s$  adalah fungsi *softening*.  $f'_c$  adalah mutu kuat tekan beton A dan B adalah koefisien - koefisien plastis potensial dapat dihitung menggunakan regangan aksial pada tegangan puncak saat beton ditekan secara uniaksial, biaksial, dan triaksial.

### 2.11.3.2 Laju Dilatasi Plastis untuk Tegangan Tarik

Persamaan umum *plastic dilation rate* dalam Piscesa, dkk (2016) berikut ini:

$$\beta = \beta_0 (\beta_{core} - \beta_0) \tanh \left( a \left( \frac{f_r}{f'_c} \right)^b \right) \quad \text{dimana} \quad (2.16)$$

$$a = 2.5 + 0.25 \sqrt{E_L / f'_c} \quad (2.17)$$

$$b = 0.25 f_c'^{0.2} \exp(-0.009 \Phi^* [f'_c - 73]) \quad (2.18)$$

$$\Phi^* = \sqrt{\frac{f_r^* E_L}{f'_c f'_c}} \quad (2.19)$$

dimana  $\beta_0$  adalah laju perubahan plastis uniaksial,  $\beta_{core}$  adalah laju perubahan plastis pada saat tekanan pengekangan sangat tinggi,  $f_r$  adalah besarnya tegangan kekang yang bernilai positif, dan a serta b masing-masing adalah parameter yang dihitung untuk beton terkekang secara aktif dan pasif.

Dikembangkan dalam Piscesa, dkk (2019) dengan mempertimbangkan laju perubahan plastis antar permukaan inti beton dengan selimut beton seperti berikut:

$$\beta = \beta_t + (\beta_{core} - \beta_t) \tanh \left( a \left[ \frac{f_r^*}{f'_c} \right]^b \right) \quad (2.20)$$

$$\beta_t = \eta \beta_0 \quad \text{dengan} \quad \eta = 2.0 \quad (2.21)$$



$$\beta_{core} = -0.5 + 0.0275\Phi \leq \mu_{EXT}; \Phi = \sqrt{\frac{f_r E_L}{f_c f_c'}} \quad (2.22)$$

dimana  $E_L$  adalah modulus pengegang lateral,  $\mu_{EXT}$  adalah *poisson ratio* elastis pada pengegang eksternal,  $\beta_t$  adalah laju perubahan plastis saat  $-f_r = f_t$ ,  $\beta_0$  ditetapkan konstan samadengan -2.5 (Attard dan Samani, 2014 dalam Piscesa, 2019). Ketika tulangan transversal mencapai titik leleh pada beton bertulang tanpa pengegang eksternal, maka pengegang menjadi aktif dan batasan  $\mu_{EXT}$  tidak diperlukan.

### 2.11.3.3 Perilaku Tegangan Regangan *Softening* Tekan dibawah Tegangan Tarik

Attard dan Setunge (1996) mengusulkan perumusan perilaku *softening* pada beton terkekang yang diberi beban aksial tekan dengan dua parameter yaitu regangan pada tegangan puncak ( $\epsilon_{3cc}$ ) dan regangan kurva *softening* ( $\epsilon_{3i}$ ). perumusan ini perlu perbaikan apabila tegangan pengegang berupa tarik. Perumusan komponen regangan plastis pada saat tegangan puncak ( $\epsilon_{3cc}^p$ ) dan pada saat titik balik kurva *softening* ( $\epsilon_{3c}^p$ ) dengan mempertimbangkan komponen plastis dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\epsilon_{3cc}^p = \epsilon_{3cc}^p \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) = \left( \epsilon_{3cu} - \frac{f_c'}{E_C} \right) \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) \quad (2.23)$$

$$\epsilon_{3i}^p = \epsilon_{3ic}^p \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) = \left( \epsilon_{3ic} - \frac{f_c'}{E_C} \right) \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) \quad (2.24)$$

dimana  $f_r$  tekan (bernilai positif) dan tarik (bernilai negative),  $L_T$  adalah faktor skala untuk kuat tarik beton saat diberi beban aksial tekan saat kegagalan permukaan akibat tekan dipotong oleh kegagalan permukaan akibat tarik merupakan regangan aksial beban pada tegangan puncak serta merupakan regangan titik balik pada kurva *softening*.

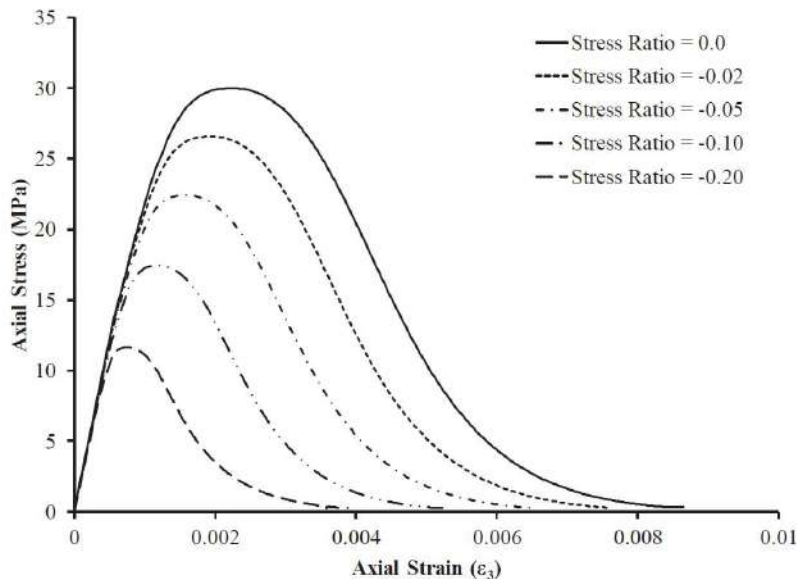
Regangan aksial pada tegangan puncak dan regangan aksial kurva *softening* juga diusulkan oleh Piscesa, dkk. (2017) dengan melakukan kombinasi pada komponen regangan elastis dan plastis.

$$\varepsilon_{3cc} = \varepsilon_{3cc}^e + \varepsilon_{3cc}^p = \left( \frac{f_{cc}}{E_C} + \frac{2\mu f_r}{E_C} \right) \left[ \left( \varepsilon_{3cu} - \frac{f'_c}{E_C} \right) \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) \right] \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_{3i} = \varepsilon_{3i}^e + \varepsilon_{3i}^p = \left( \frac{f_i}{E_C} + \frac{2\mu f_r}{E_C} \right) \left[ \left( \varepsilon_{3ic} - \frac{f'_c}{E_C} \right) \left( 1.0 + \frac{f_r}{L_T f_t} \right) \right] \quad (2.26)$$

#### 2.11.3.4 Pengaruh Tekanan Tarik Terhadap Perilaku Tekan Beton

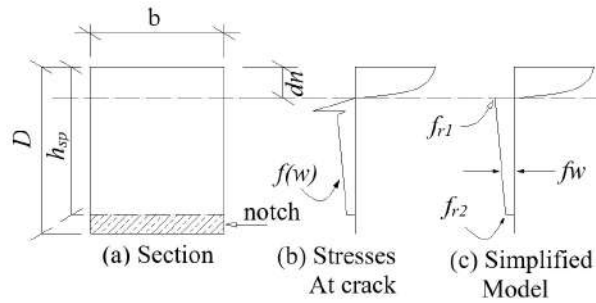
Fungsi perubahan kurva tegangan-regangan untuk beton 30 MPa di pengujian longitudinal dengan adanya tekanan tarik untuk berbagai rasio  $\sigma_1/\sigma_3$ . Pada Gambar 2.19 terlihat jelas saat tegangan puncak diturunkan, sementara regangan pada dan titik balik berkurang dengan meningkatnya rasio tegangan. Oleh karena itu, adanya tekanan tarik mengurangi kekuatan dan daktilitas elemen beton yang tidak menguntuk terhadap beton.



Gambar 2. 18 Pengaruh tekanan tarik terhadap perilaku tekan beton

#### 2.12 Model Tegangan-COD untuk SFRC

Mengilustrasikan penampang balok berserat baja saat retak karena lentur. Dimana  $D$  adalah tinggi total balok,  $h_{sp}$  adalah tinggi total dikurangi dengan takikan,  $dn$  adalah tinggi dari serat tekan ekstrem ke sumbu netral dan  $b$  adalah lebar balok. Disisi tekan (Gambar 2. 19), sumbu netral naik pada bagian saat retak terbuka. Pada retak awal, tegangan linier dan menjadi non-linear karena perubahan lebar retak (CMOD) meningkat.

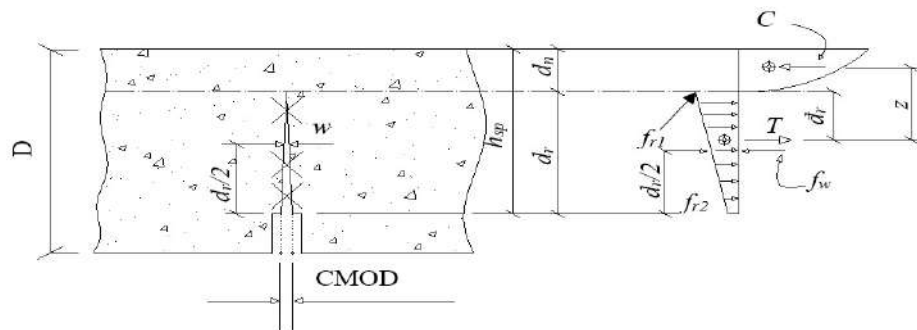


Gambar 2. 19 Model kurva inverse analysis  $\sigma$ -w dari balok SFRC (Amin,2015)

Awalan pengujian bending pada sisi tarik sumbu netral (Gambar 2.19), beton tidak retak saat diberi tegangan. Pada saat mendekati ultimate dari sumbu netral, beton retak dan serat baja mulai membawa tegangan tarik,  $f(w)$ , yang meningkat tegangannya berbanding lurus dengan meningkatnya nilai lebar retakan ( $w$ ) pada bagian yang takikan. Dengan asumsi bahwa (i) komponen tarik pada beton yang tidak retak dapat diabaikan, (ii) lebar retak berbanding lurus dengan jarak dari sumbu netral (rotasi balok tegak) dan (iii) pada rentang lebar retak yang diinginkan, hubungan  $\sigma$ -w kira-kira linier (Amin 2015), area tegangan tarik dapat disederhanakan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20 Tegangan pada kurva  $\sigma$ -w untuk perubahan lebar retak (CMOD) antara ujung takikan dan ujung retak dilambangkan sebagai ( $f_w$ ), dan dihitung sebagai:

$$f_w = (f_{r1} + f_{r2})/2 \quad (2.27)$$

dimana  $f_{r1}$  adalah tegangan  $w = 0$  dan  $f_{r2}$  adalah tegangan di awal takikan



Gambar 2.20 Tegangan saat terjadi retak pada area balok SFRC (Amin 2015)

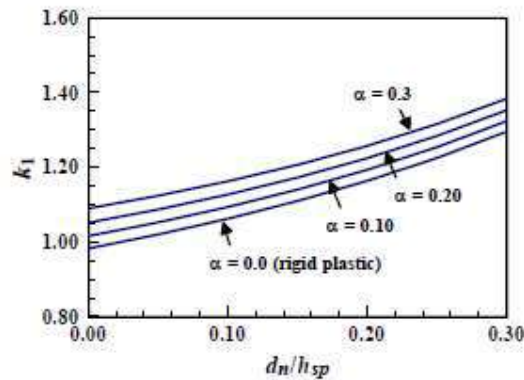
Dari bagian area tegangan titik tengah tegangan tarik dari sumbu netral ( $d_r$ ):

$$d_r = \frac{f_{r1} + 2f_{r2}}{6f_w} d_r \quad (2.28)$$

dan diambil dari  $f_{r1}=f_w (1 + a)$  dan  $f_{r2}=f_w (1 - a)$  dari persamaan 2.29

$$dr = \frac{3-a}{6} dr \quad (2.29)$$

Bentuk balok tekan (Gambar 2.21) akan beralih dari menjadi elastis menjadi plastis dan tergantung pada kuat tekan beton dan kondisi pembebanan. Ketika elastis, area tegangan berbentuk segitiga dan centroid-nya berada di ketinggian  $0,67d_n$  di atas sumbu netral (NA). Jika sepenuhnya inelastik, maka oleh model area tegangan parabola persegi panjang dari (FIB model Code 2013), centroid-nya berada pada ketinggian  $0,60 d_n$  di atas NA. Untuk kasus NA yang terletak di  $0,2 h_{sp}$ , perubahan pada pada lengan luas internal berkisar dari  $0,92 h_{sp}$  hingga  $0,93 h_{sp}$ , dan mewakili perbedaan kurang dari 1%. Dalam penelitian ini ketinggian centroid –tegangan di atas NA diambil pada  $0,64d_n$ .



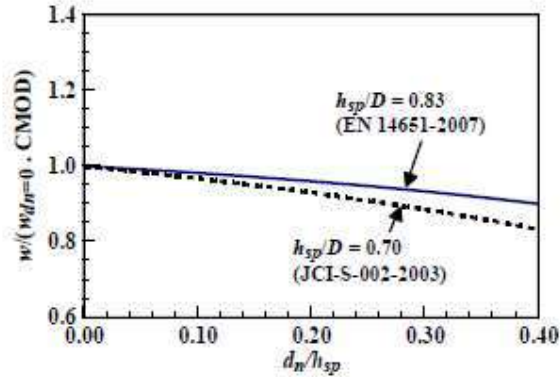
Gambar 2.21 Rasio pada kekuatan Tarik – garis tengah dengan rasio kedalaman  $d_n/h_{sp}$  untuk variasi dari  $\alpha$  (Amin 2015)

Untuk menentukan perubahan lebar retak yang sesuai dengan nilai  $f_w$  yang dihitung, dibuat asumsi sebagai berikut:

1. rotasi defleksi dari dua bagian prisma yang berpusat di sekitar ujung retak.
2. retakan balok terjadi di sepanjang area takikan.

CMOD ( $w$ ) untuk kurva  $\sigma - w$  yang diusulkan diperoleh dari perubahan lebar retak yang diukur (CMOD) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22:

$$w = \frac{CMOD}{2} X \frac{(h_{sp} - d_n)}{(D - d_n)} \quad (2.30)$$

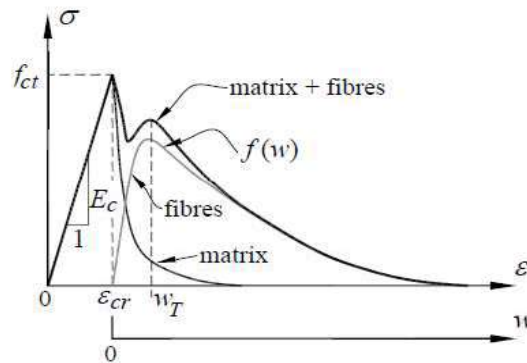


Gambar 2.22 Rasio dari  $w/CMOD - d_n/h_{sp}$  untuk Balok dengan  $h_{sp}/D = 0.83$  dan  $h_{sp}/D = 0.70$  (Amin 2015)

$$w = \frac{CMOD \times 0.35 h_{sp}}{D - 0.3 h_{sp}} \quad (2.31)$$

### 2.13 Hubungan Model Tegangan – COD SFRC

Sebelum retak, perilaku representatif SFRC umumnya diwakili oleh respons tegangan - regangan. Setelah retak, perilaku dinyatakan dalam hubungan tegangan – lebar retak ( $\sigma-w$ ) (Gambar 2.23).

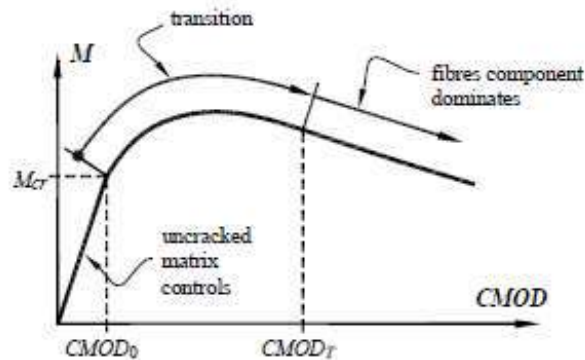


Gambar 2.23 Tegangan versus retak COD ( $w$ ) (Amin 2015)

Hubungan untuk SFRC ini dapat secara langsung diperoleh dari pengujian tarik uniaksial atau, sebagai alternatif, secara tidak langsung dari uji *three bending point* atau *four bending point* pada spesimen balok, dikombinasikan dengan *inverse analysis* yang dapat mengasumsikan hubungan konstitutif yang telah ditentukan sebelumnya. Tegangan untuk COD yang diberikan dapat ditentukan dari:

$$\sigma(w) = \sigma_c(w) + \sigma_f(w) \quad (2.32)$$

dimana  $\sigma_c(w)$  adalah komponen beton polos untuk COD yang diberikan, termasuk efek *coupling* yang menguntungkan dari serat pada matriks, dan  $\sigma_f(w)$  adalah tegangan nominal yang diberikan oleh serat. Dalam pengujian balok, penting untuk mengenali bahwa pada tahap awal pengujian setelah matriks retak, komponen matriks signifikan ketika menafsirkan respons dihasilkan Load - CMOD. Pada tahap pengujian selanjutnya, sumbu netral (NA) naik lebih tinggi ke atas penampang dan pengaruh komponen matriks kurang signifikan dan tegangan yang diberikan oleh serat dapat diperoleh dari Persamaan 2.32 mengambil  $\sigma_f(w) = f_w$  untuk COD ( $w$ ) diberikan oleh Persamaan 2.33. Respons ini digambarkan dalam Gambar 2.24, dengan zona transisi diambil antara titik retak,  $CMOD_0$ , dan titik  $CMOD_T$  di mana pengaruh beton tidak retak pada saat-respon CMOD dapat dianggap sebagai tidak efektif.



Gambar 2.24 Pendekatan yang disederhanakan untuk transisi dalam respon momen-CMOD dari uji prisma dipengaruhi oleh komponen beton yang tidak retak ke blok tegangan ke titik di mana komponen beton yang tidak retak tidak efektif (Amin 2015)

(Amin and Foster 2016) mengamati bahwa pengambilan, atau pengikatan serat belum bekerja dari titik awal retak, dengan panjang penundaan kerja serat tergantung pada sudut serat sehubungan dengan bidang retak. Hasil dari ini adalah pengambilan progresif dari komponen serat dari titik awal retak ke ultimate, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25 Untuk mengembangkan bagian pertama dari kurva, komponen serat dapat diambil:

$$\sigma f(w) = \zeta(w) + f_w \quad (2.33)$$

dimana  $f_w$  diperoleh dari Persamaan 2.33 dan  $\zeta(w)$  adalah fungsi transisi. Dalam penelitian ini fungsi transisi elips telah diadopsi:

$$\zeta(w) = \left\{ \sqrt{1 - \frac{(w_T - w)^2}{w_T^2}} \right\} \quad \text{jika } w < w_T \quad (2.34)$$

$$1 \quad \text{jika } w \geq w_T \quad (2.34a)$$

dimana  $w_T$  (Gambar 2.24) adalah titik di lebar bukaan pada kurva  $\sigma$ - $w$  di mana tegangan telah berada pada puncak ultimate. Tercatat bahwa transisi ini hanya mempengaruhi bagian awal dari respons setelah retak dan tidak terlalu signifikan dalam pengembangan pendekatan desain sederhana untuk penentuan kekuatan tarik langsung residual dari uji lentur balok.

Untuk beton polos, tegangan tarik softening dapat diambil sebagai (Amin and Foster 2016):

$$\sigma_c(w) = c_1 f_{ct} e^{-c_2 w} \quad (2.35)$$

dimana  $f_{ct}$  adalah kekuatan tarik beton tanpa penguat serat dan  $c_1$  dan  $c_2$  adalah koefisien. Koefisien  $c_1$  adalah efek dari serat pada matriks puncak sementara  $c_2$  adalah faktor yang mengontrol kegetasan yang menurun dan dipengaruhi oleh volume serat dan komposisi matriks beton. Untuk fraktur Mode I, (Voo and Foster 2003) mengadopsi  $c_1$  sebagai satu kesatuan. Untuk  $c_2$ , (NG, Htut, and Foster 2012) mengusulkan bahwa:

$$c_2 = 30 / (z_1 + 100 \text{ pf}) \dots \text{ Untuk mortar dan beton dengan } d_g \leq 10 \text{ mm}$$

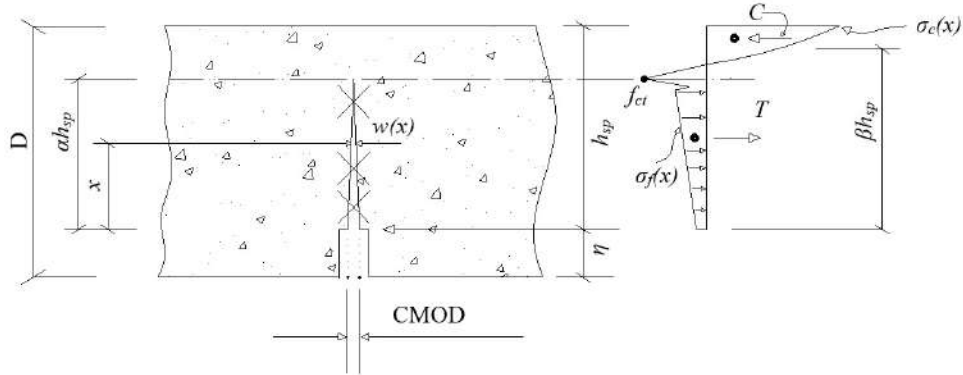
$$c_2 = 20 / (1 + 100 \text{ pf}) \dots \text{ Untuk mortar dan beton dengan } d_g \geq 10 \text{ mm}$$

dimana  $d_g$  adalah ukuran maksimum agregat kasar.

### 2.13.1 Respon Pengujian Lentur Balok Berserat Baja

Perilaku prisma SFRC dalam *softening* dideskripsikan menggunakan *semi analytical model* yang ditemukan pada mekanika fraktur. Formulasi terkenal (J. Zhang and Stang 1998) membentuk dasar untuk model. Pertimbangan dari balok SFRC dengan takikan yang didukung sederhana yang retak dalam saat pengujian bending (Gambar 2.25) di mana  $D$  adalah total tinggi balok,  $h_{sp}$  adalah tinggi balok dikurangi tinggi dari takikan,  $\eta$ ,  $\alpha h_{sp}$  adalah panjang retak untuk  $\alpha \in (0, 1)$ ,  $\beta h_{sp}$

adalah jarak dari sumbu netral (NA) ke akar takikan, dan  $\omega$  adalah lebar retakan pada ujung takik. Berlawanan dengan model Zhang dan Stang (1998), titik pengukuran untuk CMOD bukan pada akar takik tetapi pada mulut takik (yaitu, di bawah akar).



Gambar 2. 25 Tegangan pada saat retakan pada balok SFRC pada pengujian tekuk (Amin 2015)

Saat dilakukan pengujian lentur, sumbu netral naik di bagian saat takikan mengalami retak. Pada pra retak, kurva tegangan  $\sigma_c(x)$  adalah linier, menjadi non-linier seiring peningkatan perubahan lebar retak (CMOD). Dalam analisis ini, cukup untuk memodelkan  $\sigma_c(x)$  sebagai linier-elastis karena tidak ada fenomena yang berkaitan dengan *crushing* beton yang diamati.

Untuk awalanan pengujian di sisi tarik sumbu netral, beton tidak retak dan memberi tegangan. Pada awal retak, tegangan yang diberi oleh beton adalah  $f_{ct}$ . Pada jarak yang mendekati ujung pembebanan dari sumbu netral, beton retak dan serat baja memberi tegangan tarik  $\sigma_f(x)$  yang sesuai dengan tegangan untuk lebar retak  $w(x)$  pada bagian ini. Dari geometri, dapat ditunjukkan bahwa:

$$w(x) = \frac{ahsp - x}{ahsp} \omega \quad (2.36)$$

Dalam penelitian ini model (J. Zhang and Stang 1998) diadopsi dengan dimasukkannya *variable engagement model* (VEM) dari (Voo and Foster 2003) untuk menggambarkan SFRC dalam tegangan.

$$f(w) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{w}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{2w}{l_f}\right)^2 \alpha f \rho^{ab} \quad (2.37)$$

Untuk mengevaluasi respons tegangan tarik anggota SFRC, tegangan tarik akibat efek *strees softening* dari matriks beton setelah retak ditambahkan serat



baja sehingga yang memberikan nilai  $\sigma_f(x)$ . Dalam studi ini kekuatan tarik matriks diambil sebagai:

$$\sigma_c(w) = c_1 f_{ct} e^{-c_2 w} \quad (2.38)$$

dimana  $f_{ct}$  adalah kekuatan tarik beton tanpa penguat serat dan  $c_1$  dan  $c_2$  adalah koefisien. Koefisien  $c_1$  adalah efek dari serat pada kekuatan matriks puncak dan diambil sebagai 100,  $c_2$  adalah faktor yang mengontrol beton getas kurva menurun dan dipengaruhi oleh panjang serat. Tercatat bahwa faktor-faktor ini hanya memengaruhi bagian awal dari respons. Dari keseimbangan gaya dan momen, kita memperoleh:

$$\int_{\alpha h_{sp}}^{h_{sp}} \sigma_c(x) b dx = \int_0^{\alpha h_{sp}} f_t(x) b dx + \int_0^{\alpha h_{sp}} f_c(x) b dx = \chi \quad (2.39)$$

$$\sigma_c(x) = f_{ct} (\beta h_{sp} - x) / (\beta h_{sp} - \alpha h_{sp}) \quad (2.39a)$$

Untuk *three bending point* M dapat dicari dengan pendekatan:

$$\omega = \frac{24a}{bh_{sp}E_c} [MV_1(\alpha) - MV_2(\alpha)] - \frac{4\sigma\alpha h_{sp}}{E_c} V_3(\alpha) \quad (2.40)$$

$$M_{cr} = 0.25P_{cr}L \quad (2.41a)$$

$$\sigma' = \frac{1}{h_{sp}} \int_0^{\alpha h_{sp}} \sigma_f(x) dx \quad (2.41b)$$

Dalam Persamaan 2.27  $E_c$  adalah modulus elastis dari beton dan perpindahan,  $V$ , adalah fungsi dari ketinggian retak dan diambil sebagai:

$$V1(\alpha) = 0.33 - 1.42\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + 0.66/(1-\alpha)^2 \quad (2.42)$$

$$V1(\alpha) = 0.33 - 1.42\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + 0.66/(1-\alpha)^2 \quad (2.42a)$$

$$V3(\alpha) = 1.46 + 3.42(1 - \cos(\frac{\alpha\pi}{2})) / (\cos(\frac{\alpha\pi}{2}))^2 \quad (2.42b)$$

Model ini juga dapat dinyatakan dalam hal beban - defleksi pada tengah bentang. Sebelum retak balok berperilaku elastis dan dalam kasus *three bending point*, defleksi elastis diambil sebagai:

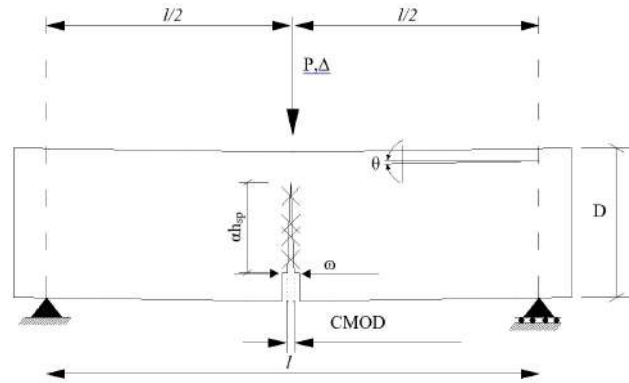
$$\Delta e = \frac{1}{48} x \frac{pl^3}{E_c I} (1 + 2.855 (\frac{h_{sp}}{l})^2 - 0.84 (\frac{h_{sp}}{l})^3) \quad (2.43)$$

RILEM TC 162-TDF (2003) mengembangkan korelasi sederhana antara defleksi pada tengah balok,  $\Delta_c$ , dan CMOD (Gambar 2.26). Mempertimbangkan rotasi benda pada dua balok pada tinggi retak,  $\alpha h_{sp}$ , CMOD dapat dikaitkan dengan rotasi bidang balok,  $\Theta$ , dan karenanya defleksi terjadi ditengah balok:

$$\Delta_c = \frac{CMOD \times l}{4(\eta + \alpha h_{sp})} \quad (2.44)$$

$$CMOD = (\eta + \alpha h_{sp})2\theta \quad (2.45)$$

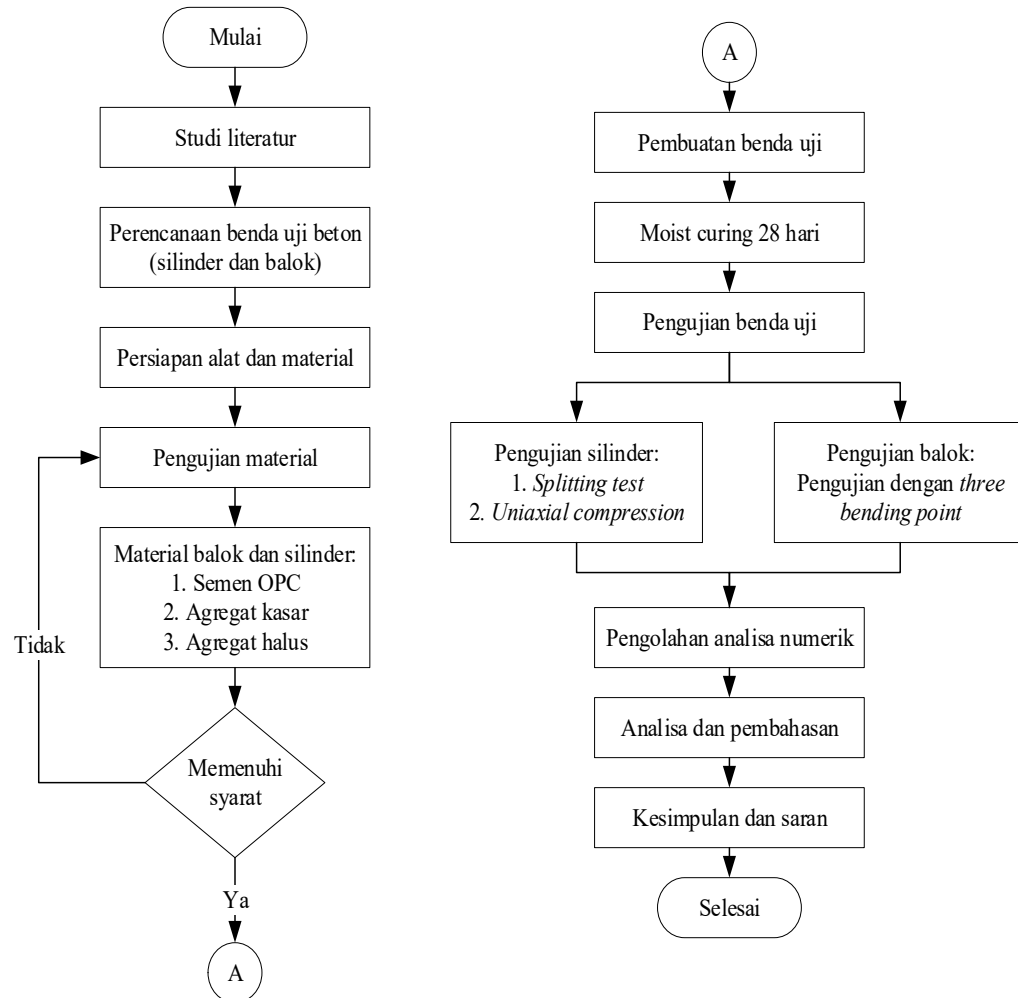
Total nilai defleksi adalah  $(\Delta_e + \Delta_c)$



Gambar 2. 26 Rotasi balok SRFC saat dilakukan pengujian lentur (Amin,2015)

## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Studi Literatur

Adapun studi literatur penelitian ini dengan mengumpulkan referensi-referensi dan teori relevan yang mendukung terhadap penelitian yang dilakukan. Tujuannya adalah untuk memperkuat permasalahan serta sebagai dasar teori dalam melakukan studi. Referensi ini dapat dicari dari buku, jurnal, dan artikel laporan penelitian.

### 3.3 Perencanaan Benda Uji

Perencanaan benda uji adalah desain awal atau estimasi jenis material, mutu material, serta dimensi material yang akan digunakan untuk penelitian. Pada penelitian ini menggunakan mutu beton ( $f_c'$ ) 30 Mpa. Untuk *mix design* beton berdasarkan SNI 03-2834-2000. Sedangkan *mix design Steel fiber reinforced concrete* diambil dari ACI 544-3R-08 chapter 6.

### 3.4 Material Bahan

Adapun material bahan yang digunakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Air
2. *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe I
3. Kerikil agregat maksimum 10 mm
4. Pasir lumajang
5. Fiber dramix 65/60BG<sup>++</sup>

Detail spesifikasi material disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Detail serat baja

No	Tipe serat	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Aspect ratio	Modulus young (N/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan tarik (N/mm <sup>2</sup> )
1	Dramik 65/60 BG	0.9	60	65	200000	1600

### 3.5 Pengujian Material

Pada material beton bertulang harus memenuhi syarat seperti disajikan pada Tabel 3.2 berikut ini:

Tabel 3. 2 Peraturan pengujian material

<b>MATERIAL</b>	<b>PENGUJIAN</b>	<b>PERATURAN</b>
<b>SEMEN (ASTM C150M/SNI 15-2049-2004)</b>	Pengujian konsistensi normal semen	ASTM C 187-16
	Pengujian waktu ikat semen	ASTM C 191-13
	Pengujian berat jenis semen	ASTM C 188-16
<b>AGREGAT KASAR</b>	Pengujian kadar air agregat kasar	SNI 1969-2008
	Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar	SNI 1969-2008
	Pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat kasar	SNI 03-4804-1998
	Pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm)	ASTM C117:2012
<b>AGREGAT HALUS</b>	Pengujian kadar air agregat halus	ASTM C556-97 / SNI 1971:2011
	Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus	ASTM C128-01 / SNI 03-4804-1998
	Pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat halus	ASTM C29/29M-97/ SNI 03-4804-1998
	Metode pengujian kotoran organic dalam pasir untuk campuran mortar dan beton	ASTM C40 / C40M-11 SNI 2816:14

### 3.6 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji ini seperti layaknya membuat balok dan silinder pada umumnya. Yang pertama dengan desain beton normal. Yang kedua penambahan serat baja dengan volume fraksi 0% hingga 2%. Pembahasan serat baja terhadap beton normal dengan dikalikan dengan volume beton

#### 3.6.1 Benda Uji Silinder

Benda uji silinder diameter 100 mm dengan tinggi 200 mm dengan penambahan serat baja dengan volume fraksi 0% hingga 2%.

#### 3.6.2 Pengujian Belah Silinder

Dalam pengujian uji silinder beton tanpa dan dengan serat baja mengacu (ASTM C 496) seperti dalam gambar 3.2. Pengujian belah silinder beton digunakan untuk membandingkan kuat tarik beton tanpa dan dengan serat baja. Pengujian dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 5 KN.

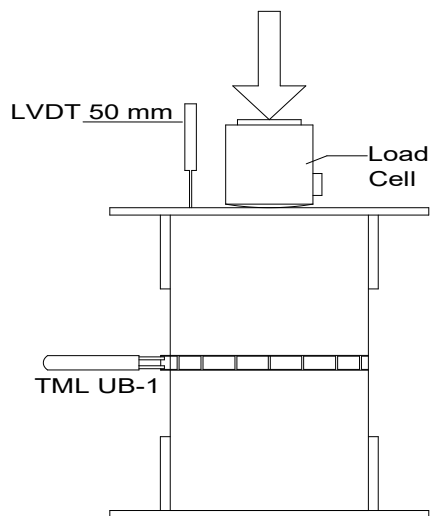


Gambar 3. 2 Hasil pengujian *splitting* silinder

#### 3.6.3 Pengujian Tekan Silinder

Pengujian tekan pada silinder beton beton berserat baja dengan tekan *uniaxial* digunakan untuk mengetahui kuat tekan, regangan tegangan modulus elastisitas dan poisson ratio. Pengujian kuat tekan *uniaxial* silinder dilakukan di Laboratorium

Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh nopember. Pengujian mengacu terhadap ASTM C39/C39M-99 dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 5 kN. Pengambilan data displacement silinder menggunakan *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) 50. Pengambilan data beban axial pada pengujian menggunakan *load cell*. Sedangkan pada pengambilan besaran pelebaran beton saat dilakukan pengujian menggunakan TML UB-2. Pengujian silinder menggunakan kontrol displacement dengan kecepatan 0.5 mm/menit. *setup* pengujian tekan silinder berserat baja *uniaxial* Gambar 3.4.



Gambar 3. 3 *Setup* Pengujian Tekan *Uniaxial Silinder* Berserat Baja



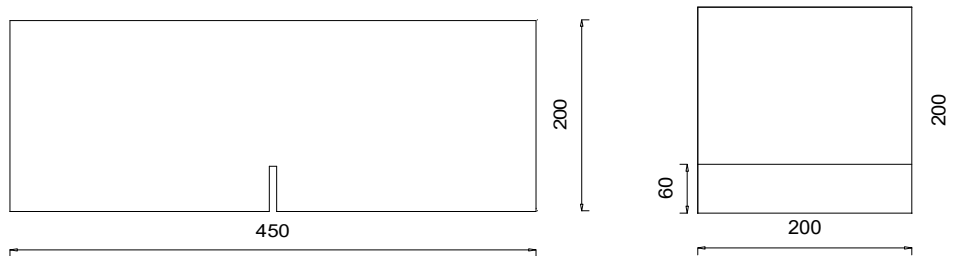
Gambar 3. 4 Desain pengujian silinder

### 3.6.4 Pembuatan Benda uji balok

Pembuatan benda uji balok berserat baja melalui beberapa proses. Penelitian ini menggunakan beton normal dan penambahan serat baja dengan fraksi volume 0% hingga 2% serta takikan pada tengah bagian bawah balok. Penambahan takikan bermaksud supaya retakan pada saat pengujian bending mulai pada titik tersebut. Selain itu takikan pada retakan juga mempermudah dalam perhitungan fraktur energi dari beton berserat baja.

### 3.6.5 Geometri dan identitas benda uji

Penampang benda uji beton dengan takikan ditunjukkan pada gambar 3.5. Panjang balok tanpa dan dengan berserat baja adalah 450 mm, lebar 200 mm dan tinggi 200. Sementara untuk takikan tinggi 60 mm, panjang 200 mm dan lebar 5 mm. Takikan mengacu berdasarkan JCI-S-002-2003. Serat baja pada balok dicampurkan dengan secara acak.



Gambar 3.5 Penampang balok bertulang

Kode identitas benda uji balok berserat baja yang ditunjukkan pada Tabel 3.3 adalah kode spesimen sebagai berikut, B = Balok, H 200 = tinggi balok 200 mm, F 0.0, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% = menunjukkan prosentase jumlah fiber untuk tiap balok dan 1 adalah nomer spesimen. Sedangkan kode identitas pada silinder S1 adalah kode spesimen silinder dan sedangkan F adalah fraksi volume dari prosentase serat baja terhadap silinder.



Tabel 3.3 Perencanaan spesimen balok yang diuji

Nama Spesimen	Ukuran spesimen	Penambahan Steel Fiber	Jumlah
S1 – F 0%	Silinder dengan diameter 100 mm dan panjang 200mm	0 %	3 buah
S1 – F 0.5%		0,5 %	3 buah
S1 – F1.0%		1 %	3 buah
S1 – F1.5%		1,5 %	3 buah
S1 – F2.0%		2 %	3 buah
B-H200-F0.0%	200 mm x 200 mm x 450 mm (lebar notch 5 mm, tinggi notch 60 mm)	0 %	3 buah
B-H200-F0.5%		0,5 %	3 buah
B-H200-F1.0%		1 %	3 buah
B-H200-F1.5%		1.5 %	3 buah
B-H200-F2.0%		2 %	3 buah

Proses Pembuatan benda uji balok beton beserat baja dilaksanakan di laboratorium beton dan bahan bangunan, Departemen Teknik Sipil, FTSLK ITS. Proses pembuatan benda uji balok berserat baja diawali dengan mixing pasta terlebih dahulu. Selanjutnya serat baja dimasukkan kedalam mixing dengan jumlah fraksi volumenya. Agar lebih padat maka dilakukan juga pemadatan menggunakan vibrator. Pembuatan benda uji dalam penelitian ini mengacu pada ASTM C39 / C39M – 18 dan SNI 03-2493-2011.

Data:

Tinggi balok ( $h$ )	= 200 mm
Lebar balok ( $b$ )	= 200 mm
Panjang balok ( $l$ )	= 450 mm
Notched ( $h_{sp}$ )	= 60 mm
Tinggi efektif ( $d$ )	= 140 mm
Volume serat ( $v_f$ )	= 0%, 0.5%, 1%
Mutu beton ( $f_c$ )	= 30 Mpa
Modulus repture ( $f_r$ )	= 4.95 Mpa

### 3.7 Perawatan Beton (*Curing*)

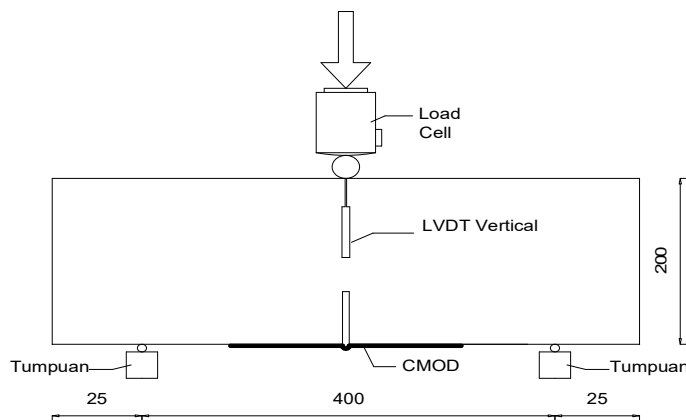
Selanjutnya dilakukan *curing*. *Curing* secara umum dipahami sebagai perawatan beton, yang bertujuan untuk menjaga supaya beton tidak terlalu cepat kehilangan air, atau sebagai tindakan menjaga kelembaban dan suhu beton, segera setelah proses finishing beton selesai dan waktu total setting tercapai. Tujuan pelaksanaan *curing*/perawatan beton adalah memastikan reaksi hidrasi senyawa semen termasuk bahan tambahan atau pengganti supaya dapat berlangsung secara optimal sehingga mutu beton yang diharapkan dapat tercapai, dan menjaga supaya tidak terjadi susut yang berlebihan pada beton akibat kehilangan kelembaban yang terlalu cepat atau tidak seragam, sehingga dapat menyebabkan retak. Pada penelitian ini perawatan beton dilakukan dengan cara moist *curing* selama 28 hari.

### 3.8 Pengujian Balok Bending dan Instrument

Pengujian balok dilakukan untuk mengetahui beban – perpindahan dan beban – perubahan lebar retak dengan pengujian *three bending point*. Pengujian ini dilakukan di laboratorium beton dan material departemen Teknik Sipil ITS.

#### 3.8.1 *Setup* Pengujian Benda Uji

Tahap ini melakukan pengujian lentur yang terdiri dari 15 buah balok tpa dan dengan serat baja. Tahapan pengujian mengacu pada ASTM 70 untuk pengujian kuat lentur dengan satu titik pembebanan atau metode *three bending point*.



Gambar 3.6 Pengaturan benda uji balok beton berserat baja pengujian *three bending point*



Gambar 3.7 Pengujian *three Bending Point*

Pengujian *Three Bending Point* menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) Dengan kapasitas 5 KN. Balok dibebani oleh load cell diatas benda uji. Pembenaan dilakukan secara perlahan sampai balok mengalami keruntuhan. Pada saat pembebanan berlangsung, perpindahan ditengah bentang secara vertical direkam menggunakan LVDT dan pada bawah terdapat CMOD untuk mengukur berapa nilai perubahan lebar retak yang terjadi. Pelaksanaan uji di laboratorium ditunjukkan pada Gambar 3.7.

### **3.8.2 Instrument**

Instrumen pada penelitian terdiri dari beberapa alat, yaitu:

#### 1. *Displacement Transducers* (LVDT)

Pengukuran nilai defleksi yang terjadi pada balok berserat baja ini menggunakan *Displacement Transducer* (LDVT). Tipe yang digunakan dalam pengukuran ini adalah *Displacement Transducer* (LDVT) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 Posisi LDVT dipasang vertical pada tengah balok karena pada tengah bentang tersebut terjadi nilai defleksi terbesar pada balok seperti pada gambar 3. 8.



Gambar 3.8 Pengujian *three bending point* dengan instrumen LVDT vertikal

## 2. *Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)*

*Crack Mouth Opening Displacement* merupakan alat yang digunakan untuk mengukur perubahan besar lebar yang terjadi. *Crack Mouth Opening Displacement* dipasang pada tengah balok dengan horizontal pada takikan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. *Crack Mouth Opening Displacement* ini dipasang untuk mendapatkan data besarnya perubahan retak. tipe CMOD yang digunakan adalah TML seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 9.



Gambar 3. 9 *Crack mouth opening displacement (CMOD)*

### 3. Load cell

*Load Cell* merupakan alat yang digunakan untuk mendapatkan besarnya nilai gaya axial. *Load Cell* dipasang pada atas balok dengan sistem pengujian *Three Bending Point*.

### 4. Data logger

*Data logger* merupakan alat yang digunakan untuk menyimpan output *loadcell*, *CMOD*, *LVDT*. *DataLogger* dipasang disebelah pengujian dengan penyaluran kabel dari instrument benda uji.

## 3.9 Permodelan Balok Berserat Baja menggunakan 3D-NLFEA

Ditahap ini dilakukan konsep permodelan Numerik Finite Element terhadap balok normal dan balok berserat baja yang telah diuji secara eksperimental. Permodelan dikerjakan menggunakan program 3 *Dimension Non-Linear Finite Element Analysis* (3D-NLFEA) 2.7.2 (Piscesa et al. 2019). Kajian permodelan elemen beton terdiri dari dua bagian yaitu model *plain concrete* dan model *steel fiber reinforced concrete*. Tahap tahapan yang dilakukan dalam permodelan balok berserat baja yaitu *pre processing*, *non linier analysis* dan *post processing*.

Permodelan balok berserat baja yang telah diuji bertujuan untuk mendapatkan yang mempresentasikan perilaku hasil eksperimen, baik berupa kurva load – *midspan displacement* dan pola retak. dalam studi ini, permodelan yang dibuat adalah untuk sampel balok berserat baja dengan penambahan serat 0% hingga 2%. Hasil model ini diverifikasi menggunakan hasil pengujian eksperimen. Analisis hasil dilakukan dalam dua hal. Pertama adalah menentukan hasil dari hasil pemodelan 3D-NLFEA tanpa serat baja dengan hasil eksperimen. Kedua adalah verifikasi antara hasil eksperimen dan hasil pendekatan analisa numerik dengan penambahan serat baja.

### 3.9.1 Pre-processing

Langkah pertama yang dilakukan dalam permodelan balok berserat baja adalah *pre-processing*, dalam tahap ini dilakukan pemodelan menggunakan program SALOME 8.3.0 Pada tahap pemodelan menggunakan software SALOME akan diuraikan beberapa langkah pemodelan yaitu: 1) permodelan geometri; 2)

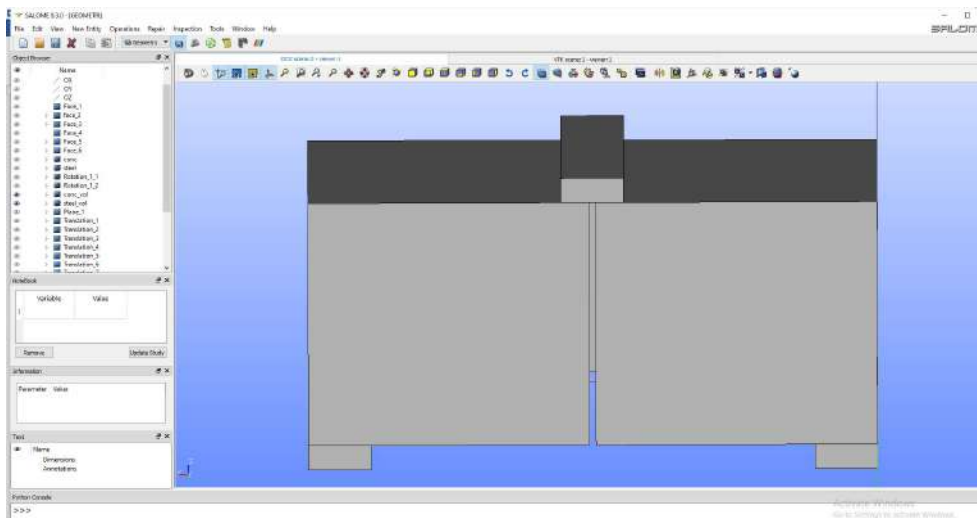
permodelan *boundary condition* yang termasuk didalamnya yaitu pembebanan dan *deflection*; 3) permodelan *meshing*. Dalam Visual Basic melalui program Ms. Excel yang digunakan untuk modul properti material.

### 1. Permodelan Geometri

Bentuk dari geometri elemen balok berserat baja terdapat pada gambar 3.5 Data geometri elemen dari balok berserat baja disajikan dalam Tabel 3.5 pada balok ini sendiri terdapat beberapa elemen diantaranya balok dan tumpuan. Variasi balom terdapat 2 variasi yang ditunjukkan pada tabel sementara pada tumpuan diamsusikan sebagai *steel plate*. Gambar 3.5 menunjukkan model elemen dari balok dan tumpuan.

Tabel 3. 4 Detail geometri model SALOME balok

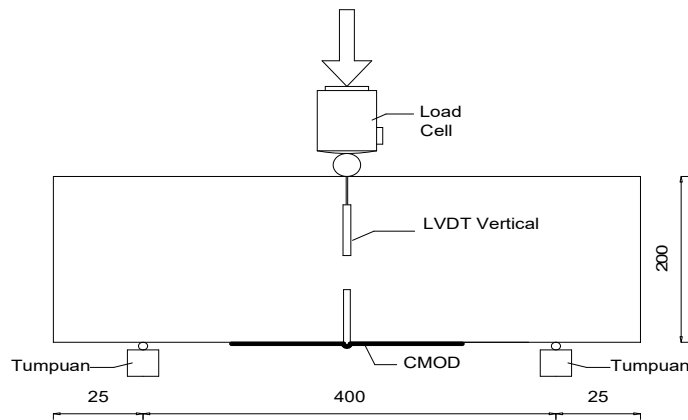
Elemen	Data Geometri
Balok	Lebar : 200 mm Tinggi : 200 mm Panjang : 450 mm
Tumpuan	Boundary condition dan load Lebar : 50 mm Tinggi : 20 mm Panjang : 200 mm
Takikan	Balok 1 = 60 mm



Gambar 3. 10 Part elemen model menggunakan SALOME

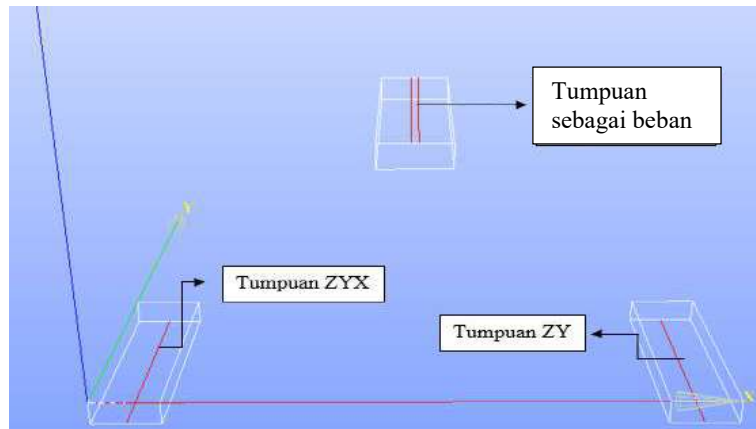
## 2. Permodelan *Boundary Condition*

Modul boundary condition adalah digunakan sebagai pendefinisian bagian bagian penerapan pemodelan beban atau maupun tumpuan. Setelah dilakukan pembuatan geometri elemen, pada elemen dilakukan partition berguna untuk menyatukan material beton dengan beton dan yang menggunakan steel dengan steel supaya memudahkan dalam *grouping*. Setelah *partition* dilakukan maka tahapan selanjutnya adalah *grouping*. Group ini adalah memudahkan untuk dilakukan dalam pembuatan boundary dan meshing. Anggota *group* dapat didefinisikan pada *point*/titik, *face*/permukaan, atau *volume*/blok. Seperti terlihat pada Gambar 3.11 bahwa tumpuan akan diterapkan pada permukaan, maka anggota group tersebut harus berupa *face*/permukaan. Sketch yang akan dibuat *boundary condition* dan *load* pada balok ditunjukkan pada Gambar 3.11

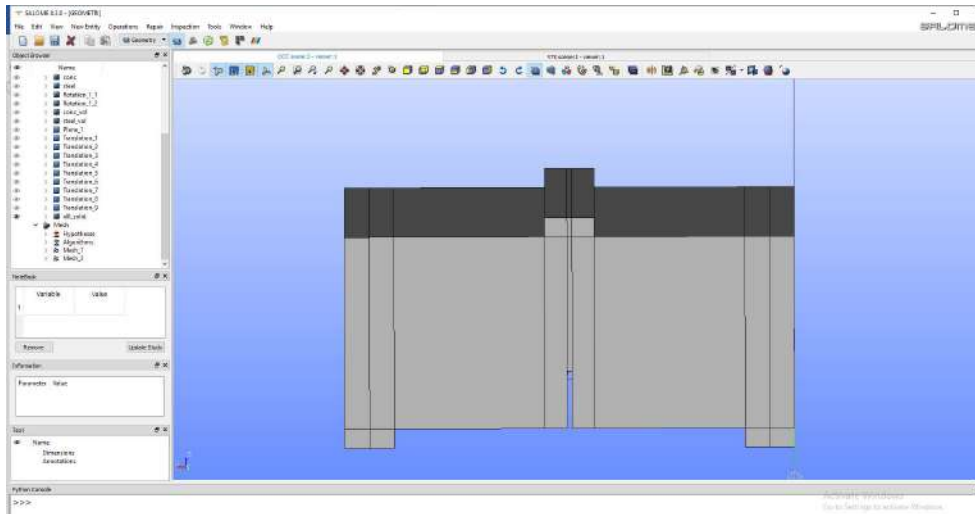


Gambar 3.11 Sketsa *boundary condition*

model Setelah dilakukan *partition* dan *group*. Pada sketch diatas bahwa terdapat 2 tumpuan dan untuk pembenanan menggunakan *three bending point*. Pada tumpuan diasumsikan dengan menggunakan line pada line ini yaitu berada ditengah *steel plate* yang berada di *face* bagian atas. Dan pada load juga menggunakan line untuk line pada load ini yaitu berada ditengah di *face* bagian bawah pada *steel plate*. Pada load disini terdapat 2 garis untuk load displacement nya dikarenakan mengikuti element yang terdapat pada takikan balok tersebut. Untuk permodelan boundary condition disajikan pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Pendefinisian *boundary condition*: tumpuan dan beban pada elemen menggunakan SALOME



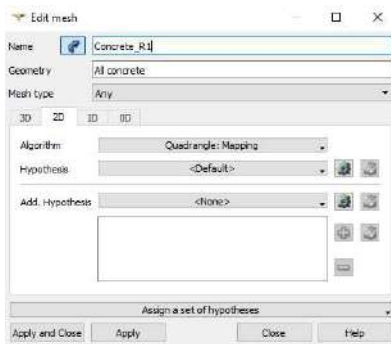
Gambar 3. 13 Permodelan balok berserat baja menggunakan SALOME

### 3. Modul *Mesh*

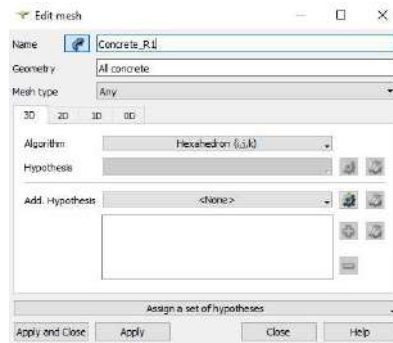
Pada tahap ini, *meshing* digunakan untuk membagi elemen menjadi ukuran yang lebih kecil pada dua bagian utama yaitu seluruh steel plate dan seluruh beton. Meshing dilakukan di SALOME dengan mengubah window *geometry* menjadi window *mesh*. Pada mesh ini jalur retak harus ditentukan sebelumnya, yang membuatnya berguna hanya dalam situasi di mana ini terjadi untuk *inverse analysis* dari spesimen balok dengan notched. Pendekatan retak, di sisi lain, tidak memerlukan retak lagi terkecuali yang telah ditentukan tetapi diasumsikan bahwa deformasi satu retak (pembukaan retak) dapat ditentukan di atas panjang balok.



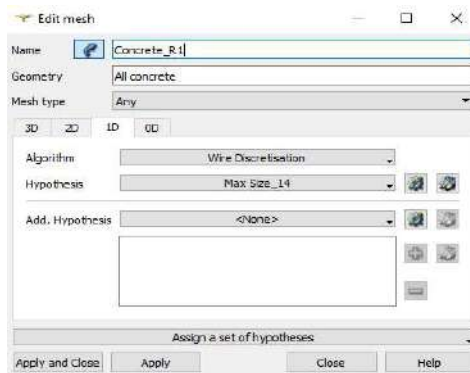
Tipe elemen yang digunakan untuk beton atau elemen solid lainnya seperti *top plate* adalah *hexahedron*, sedangkan tipe elemen untuk garis adalah *wire discretization*. Ukuran mesh digunakan 10 mm sebagai pertimbangan ukuran terbesar kerikil pada beton dan jumlah elemen yang dihasilkan untuk menghemat waktu dalam proses selama *running*. Pemilihan tipe elemen disajikan pada Gambar 3.16 setelah dilakukan pemilihan dalam pengisian *type mesh* maka dilakukan analisis apakah *mesh* tersebut terjadi *error* dilakukan dengan compute. Hasil dari compute hasil *mesh* disajikan pada Gambar 3.14 Hasil dari *mesh* akan di *export* menjadi data yang digunakan pada tahap selanjutnya.



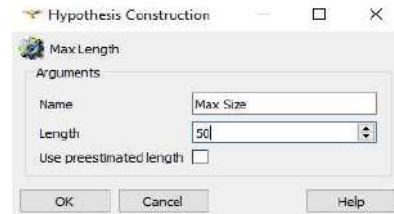
(a) Tipe elemen 3D/solid



(b) Tipe elemen 2D

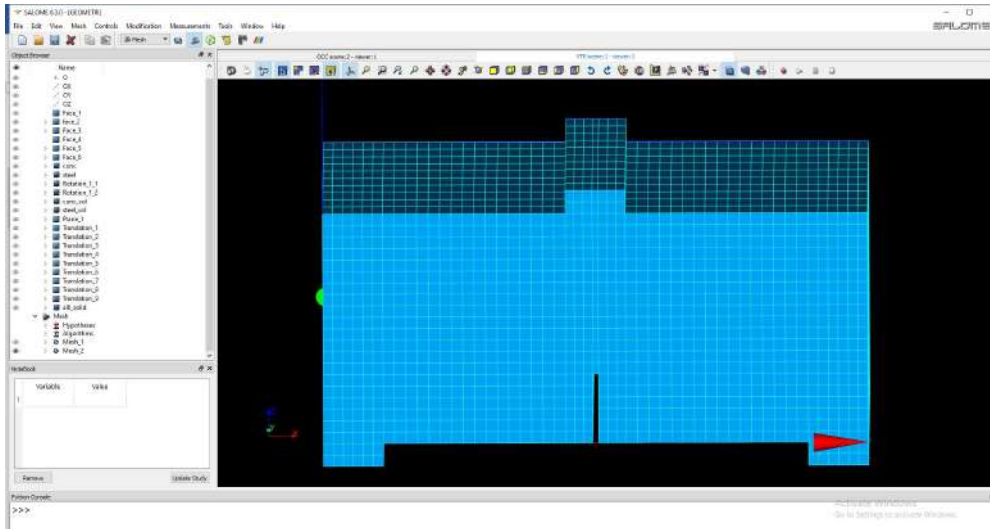


(c) Tipe elemen 1D/truss



(d) Ukuran *mesh*

Gambar 3. 14 Tipe dan ukuran *mesh*



Gambar 3. 15 Mesh model

#### 4. Modul input data material

Setelah dilakukan modul geometry, boundary condition dan load serta meshing. Langkah selanjutnya adalah *Output* dari program SALOME merupakan nodal-nodal pada setiap elemen balok dan tumpuan yang akan didefinisikan secara *real* mulai dari material dan *boundary condition*-nya melalui program Ms. Excel pada *input* data 3D-NLFEA.

##### (1) Material *Von Mises*

Material solid dengan Von Mises (teori J2 Plasticity) digunakan untuk memodelkan *steel plate*. Input material seperti Gambar 3.16.

BI-LINEAR VON MISES MATERIAL [SOLID]				
ACTIVE:	1	ID: MISES_?		
NO	FY	POS	ES	ESH
1	400.00	0.30	200000.00	0.00
2	1.00	0.00	1.00	0.00

Gambar 3. 16 Input material parameter BI-LINIER

##### (2) Material *Plasticity-Fracture*

Material beton memiliki konstitutif model yang didasarkan pada *plasticity fracture concrete model* (Piscosa dkk, 2016) (Piscosa dkk, 2018). Dalam input data material beton pada program 3D-NLFEA. Material beton akan diasumsikan memiliki kuat tekan  $f'_c = 30$  MPa; berat jenis beton adalah  $2200 \text{ kg/m}^3$ ; nilai

modulus elastisitas  $E = 0,043\rho^{1.5}\sqrt{f'_c} = 0,043 \times 2100^{1.5} \times \sqrt{30} = 24303 \text{ MPa}$ , dengan poisson ratio seperti Gambar 3.17.

PISCESA ET. AL. PLASTICITY FRACTURE CONCRETE MODEL [2016-2018] [SOLID]														
ACTIVE:	1	ID: PISCESA ?												
NO	FC	POS	AGGTYPE	RHO	SF	LT	SIGCR	EA	ECC	FTMOD	EC	FT	EPS_U	FRES
1	30	0	1	2200	0	5	0.2025	4	0.51	1	24303	2.812	0.002247	1
	TK3	TEPS3	TALPHA	TDIL	UPREV	FFRACDIR	UPREVFRC	FQSALP0	FQSALP	OVR.STR	COMB.FR	FORCE.CFR	FORCE.RT	STEP_PF
	2	1	1	3	1	0	0	1	1	0	1	0	1	10
	SPIN.THT	THT.INIT	LTCU	LTFRAC	BETABMIN	ELLIM	OBETA_0	BETA02	BETATMTP	VALUNISTR	FT.LT	TYPE.LT	F.COMP	STEP_P
	1	0	1	1	-1	3000	1	-2.5	2	0.005	1.05	0	0	20
	GF0	RFKFT	FRC	FRC-TYPE	FT_2	EF_1	EF_2	GF-HARD	GF-SOFT	GFTDT	SFRC_ST	MINALL	MINFRAC	MINCLUT
	0.03	0.2	2	0	4.500	0.003472	0.004625	0.015621	0.013017	0.028638	BR	0.01	0.0001	5
NO	FC	POS	AGGTYPE	RHO	SF	LT	SIGCR	EA	ECC	FTMOD	EC	FT	EPS_U	FRES
2	15	0	1	800	1	10	0.2025	4	0.51	1	3768	2.161	0.008616	1
	TK3	TEPS3	TALPHA	TDIL	UPREV	FFRACDIR	UPREVFRC	FQSALP0	FQSALP	OVR.STR	COMB.FR	FORCE.CFR	FORCE.RT	STEP_PF
	2	1	1	3	1	1	0	1	1	0	0	0	1	10
	SPIN.THT	THT.INIT	LTCU	LTFRAC	BETABMIN	ELLIM	OBETA_0	BETA02	BETATMTP	VALUNISTR	SFRC_ST	TYPE.LT	F.COMP	STEP_P
	1	0	1	1	-1	3000	1	-2.5	2	0.005	1.2	0	0	20
	GF0	RFKFT	FRC	FRC-TYPE	FT_2	EF_1	EF_2	GF-HARD	GF-SOFT	GFTDT	SFRC_ST	MINALL	MINFRAC	MINCLUT
	0.03	0.2	0	0	3.458	0.001720	0.004014	0.005949	0.039651	0.045610	0	0.04	0.01	5

Gambar 3. 17 Input material beton

FC	: Concrete Compressive Strength	POS	: Poisson Ratio
AGG-TYPE	: Aggregate Type [1] Crushed [2] Gravel	LT	: Internal Length Scale (mm)
RHO	: Concrete Density (kg/m <sup>3</sup> )	SIGCR	: Critical Stress Ratio
SF	: Silica Fume [0] Off [1] On	EA	: Initial Hardening Modulus in Q-K Curve
ECC	: Out of Roundness Eccentricity	FTMOD	: ft modifier
EC	: Elastic Modulus (MPa)	FT	: Uniaxial Tensile Strength (MPa)
EPS_U	: Uniaxial Strain at Peak U	TK3	: Spin Theta [0] No [1] Yes
TEPS3	: [1] Attard and Setunge Eps3CC [2] Samani and Attard Eps3CC	TALPHA	: [1] Dynamic Alpha [2] Constant Alpha
TDIL	: [1] Old dilation rate [2] Piscesa (2016) dilation rate [3] Piscesa (2019) dilation rate	FFRACDIR	: Freeze Fracture Dir. [0] No [1] Yes
FQSA LP0	: Freeze Qs in Alpha_P0 [0] No [1] Yes	FQSALP	: Freeze Qs in Alpha [0] No [1] Yes
OVR.STR	: Over Strain [0] No [1] Yes	COMB.FR	: Combine fr [0] No [1] Yes
FORC E.CFR	: Force Combine fr [0] No [1] Yes	FORCE.RT	: Force Return Mapping For Apex [0] No [1] Yes
SPIN.THT	: Spin Theta [0] No [1] Yes	THT.INIT	: Freeze Theta [0] No [1] Yes
ELLI M	: Lateral Modulus Limit (MPa)	OBETA_0	: Override Beta_0 [0] No [1] Yes

BETA	: <i>Beta Multiplier</i>	VALUNISTR	: <i>Uniaxial Strain at Peak Override</i>
TMTP		F.COMP	: <i>[0] Comp+Frac [1] Comp only [2] Frac only</i>
FTLT	: <i>ft Scale for Fracture Region In Compression Failure Surface</i>	RFKFT	: <i>Ratio fk/ft</i>
GF0	: <i>Uniaxial Fracture Energy</i>	FRC-TYPE	: <i>[0] Plain Concrete [1] PVA-ECC</i>
FRC	: <i>[1] Enabled [1] Disabled</i>	EF_1	: <i>Fracture Strain at Peak</i>
FT_2	: <i>Second Peak fr (PVA-ECC) (MPa)</i>	GF-HARD	: <i>Fracture Energy Hardening</i>
F_2	: <i>Fracture Strain at End</i>	GF-TOT	: <i>Fracture Energy Total</i>
GF-SOFT	: <i>Fracture Energy Softening</i>	MINALL	: <i>Minimum Value for Softening Parameter Qs</i>
FR_A	: <i>Artificial fr (MPa)</i>		
RT			

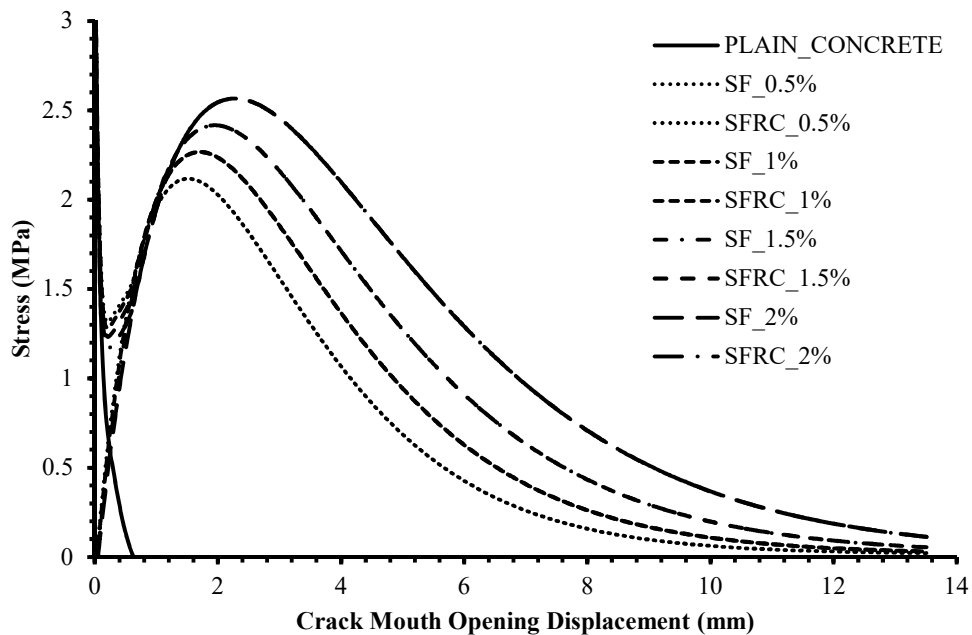
### (3) Material *Steel Fiber reinforced concrete*

parameter konstitutif *Steel fiber Reinforced Concrete* dicoba menggunakan rumus pendekatan dengan cara coba (hasil gambar 3.19). *Steel fiber Reinforced Concrete* dalam menganalisa gabungan antara *plain concrete* dan *steel fiber*. Pada Gambar 2.18 adalah parameter *Steel fiber Reinforced Concrete* yang digunakan yaitu  $GF = 0.000824$  kN/mm,  $FT = 0.9 \cdot 0.32 \cdot f_c^{.67} = 3.690$ ,  $W0 = 5.14 \cdot GF \cdot 1000/ft = 0.1506006$ .  $LT = 5$ . Sementara untuk parameter pada *steel fiber*, parameter A, B, SCALE\_X, SHIFT, WP, SCALE\_X dilakukan dengan cara coba sehingga mendapat grafik yang sesuai dengan eksperimen seperti pada Gambar 3.19. Pada penelitian ini digunakan lima variasi penambahan serat yang berbeda, akan digunakan variasi serat dengan penambahan 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%.

SFRC-PARAM_1					
C1:	3	GF:	0.0000824	kN/mm	NDATA
C2:	6.930	W0:	0.1506006	mm	201
LT:	5	FT:	2.812	N/mm2	
A:	0.5	WP:	0.001	mm	
B:	15	SHIFT:	0.015	mm	
SCALE_Y:	0.25	SCALE_X:	1		
CONC_ONLY		FIBER		TOTAL	
W	STRESS	STRESS	STRESS	PHI	
0	2.812313	0	2.8123135	1	
0.002	2.564184	0	2.5641842	0.91177	
0.004	2.338655	0	2.3386548	0.831577	
0.006	2.134393	0	2.1343931	0.758946	
0.008	1.949991	0	1.9499907	0.693376	
0.01	1.784005	0	1.7840055	0.634355	
0.012	1.634994	0	1.6349937	0.58137	
0.014	1.501536	0	1.5015362	0.533915	
0.016	1.382257	0.107627	1.4898843	0.529772	
0.018	1.275839	0.311427	1.5872661	0.564399	

Gambar 3. 18 Input parameter *Steel fiber Reinforced Concrete*

GF	: Fracture Energy	C1	: Parameter C1
W0	: Lebar bukaan retak	C2	: Parameter C2
FT	: Uniaxial tensile strength	LT	: Internal length sacale
WP	: Parameter WP (mm)	A	: Parameter A
SHIFT	: Parameter SHIFT (mm)	B	: Parameter B
SCALE_X	: Parameter SCALE_X (mm)	SCALE_Y	: Parameter SCALE_Y



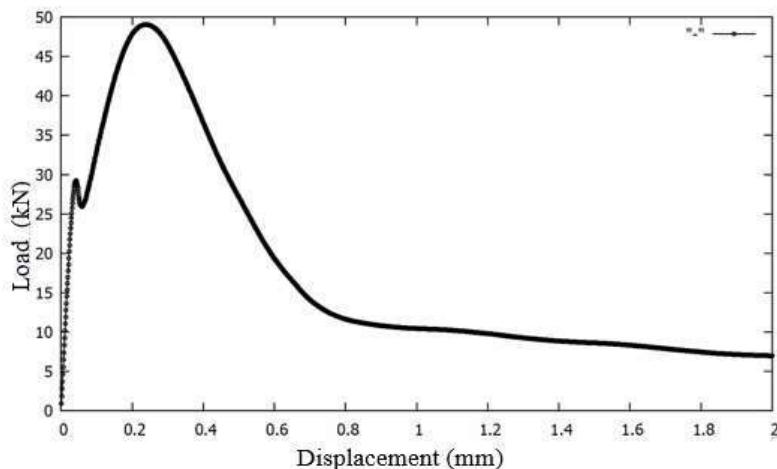
Gambar 3.19 kurva parameter *steel fiber reinforced concrete*

### 3.9.2 Non-linear Analysis

Setelah proses *pre-processing* telah lengkap maka selanjutnya adalah menjalankan (running) model. Proses running ini dijalankan menggunakan program *3 Dimension Non-Linear Finite Element Analysis* 3D-NLFEA. Selama proses ini berlangsung dapat dilihat grafik *load-displacement* (P- $\Delta$ ) pada monitor komputer dengan menggunakan software *gnulpot*. Proses running akan memakan cukup banyak waktu dan memori komputer tergantung pada jumlah elemen yang ada pada model. Proses running disajikan pada Gambar 3.18.

```
*) E:\RAY\3DFEM\12749\3DFEM\3DFEM\3DFE_12_01_08.klm
STEP 1388 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1389 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:02:36.26
STEP 1389 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.213611E-002 TOL = 4.726150E+002 K = 1.000022E+000 LambdaTot = 1.921500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1389 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.111311E-002 TOL = 3.917617E+002 K = 1.000022E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1389 FEMAL DISPLACEMENT = 188.355275879279 mm
STEP 1390 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:13:10.45
STEP 1390 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.211220E-002 TOL = 4.670207E+002 K = 1.001910E+000 LambdaTot = 1.904500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1390 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.109460E-002 TOL = 3.771803E+002 K = 1.000022E+000 LambdaTot = 1.904500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1390 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1391 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:18:17.78
STEP 1391 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.210100E-002 TOL = 3.801607E+002 K = 1.001120E+000 LambdaTot = 1.902500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1391 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.092112E-002 TOL = 3.612512E+002 K = 1.001010E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1391 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1392 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:24:13.87
STEP 1392 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.210071E-002 TOL = 3.832577E+002 K = 1.001401E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1392 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.097220E-002 TOL = 3.398200E+002 K = 1.001110E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1392 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1393 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:28:41.51
STEP 1393 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.209492E-002 TOL = 3.424617E+002 K = 1.001500E+000 LambdaTot = 1.907500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1393 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.093901E-002 TOL = 3.250000E+002 K = 1.001401E+000 LambdaTot = 1.907500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1393 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1394 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:32:17.76
STEP 1394 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.208972E-002 TOL = 3.368252E+002 K = 1.001770E+000 LambdaTot = 1.908500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1394 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.131100E-002 TOL = 3.080140E+002 K = 1.001500E+000 LambdaTot = 1.908500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1394 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1395 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:35:11.63
STEP 1395 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.208101E-002 TOL = 3.139032E+002 K = 1.001504E+000 LambdaTot = 1.905500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1395 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.139721E-002 TOL = 2.871817E+002 K = 1.001770E+000 LambdaTot = 1.905500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1395 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1396 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:38:12.57
STEP 1396 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.207760E-002 TOL = 3.082112E+002 K = 1.002151E+000 LambdaTot = 1.908500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1396 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.160770E-002 TOL = 2.805600E+002 K = 1.001504E+000 LambdaTot = 1.908500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1396 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1397 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:52:49.85
STEP 1397 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.207100E-002 TOL = 3.012282E+002 K = 1.002378E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1397 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.100000E-002 TOL = 2.727300E+002 K = 1.002151E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1397 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1398 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:58:06.22
STEP 1398 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.206611E-002 TOL = 2.911627E+002 K = 1.002120E+000 LambdaTot = 1.902500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1398 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.182711E-002 TOL = 2.722642E+002 K = 1.002378E+000 LambdaTot = 1.902500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1398 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1399 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:58:12.72
STEP 1399 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.206000E-002 TOL = 2.922150E+002 K = 1.002700E+000 LambdaTot = 1.902500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1399 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.187130E-002 TOL = 2.721892E+002 K = 1.002522E+000 LambdaTot = 1.902500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1399 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
STEP 1400 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 Elapsed Time: 34:58:19.89
STEP 1400 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 SOL = 2.205400E-002 TOL = 2.923101E+002 K = 1.002910E+000 LambdaTot = 1.901500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1400 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 SOL = 2.181000E-002 TOL = 2.741817E+002 K = 1.002700E+000 LambdaTot = 1.904500E+003 LF = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 1400 FEMAL DISPLACEMENT = 189.455275879279 mm
*****
PREPARE OUTPUT DATA.
*****
PROGRAM FINISHED (1)...
```

(a) Running analysis window



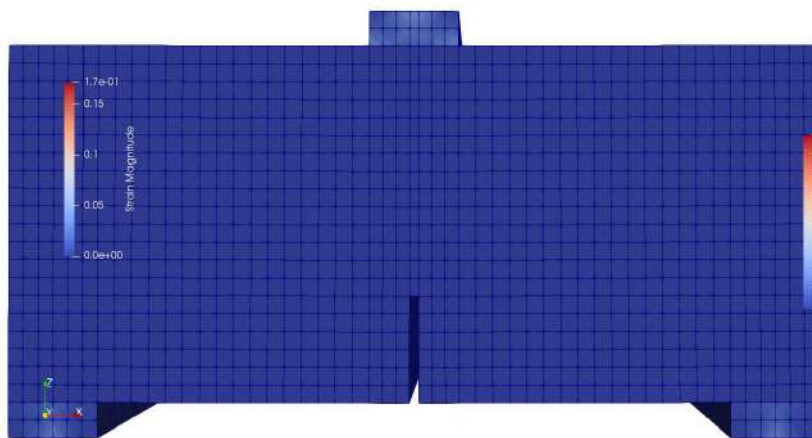
(b) plot grafik P- $\Delta$  selama *running* berlangsung

Gambar 3. 20 Proses *running* model

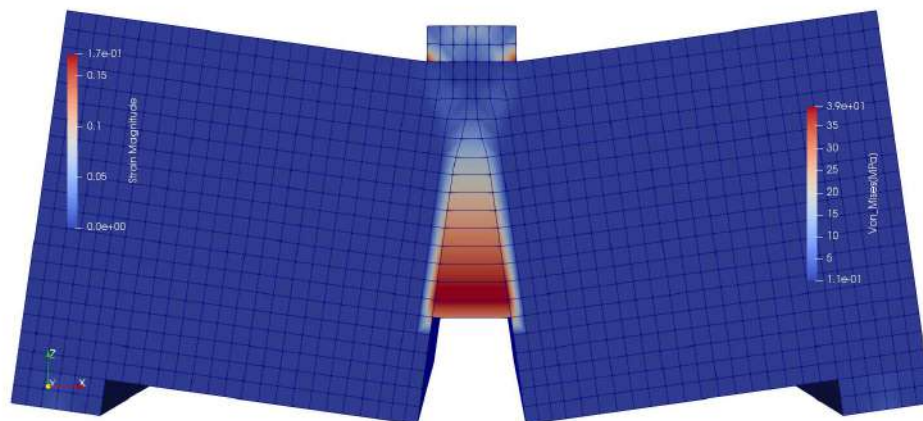


### 3.9.3 Post-processing

Setelah selesai pada tahap running menggunakan 3DNLFEA maka akan hasil data pada folder Paraview akan diplikasikan melalui software ParaView 3.8.0. Pada tahap ini dapat dilihat berbagai hasil analisa model dari proses sebelumnya secara detail, contohnya kontur tegangan pada beton, kontur tegangan pada beton, dsb. yang diperlukan untuk analisa penelitian selanjutnya. Penggunaan ParaView Sebagai contoh, bentuk beton berserat baja sebelum duji dan sudah dilakukan pengujian dan hasil defleksi ditunjukkan pada Gambar 3.19.



(a) Kontur dalam keadaan normal



(b) Kontur dalam menerima beban

Gambar 3.21 Bentuk Deformasi Model Dari Paraview

### 3.9.4 Analisis Hasil Pengujian

Analisa terhadap hasil pengujian diperoleh berdasarkan hasil uji ekperimental di Laboratorium Material Dan Bahan dengan mengacu pada standar peraturan yang ada seperti SNI dan ASTM sehingga didapatkan hasil yang optimal. Sedangkan pada analisa Numerik menggunakan software *3 Dimension Non-Linier Finite Element Analysis 3D-NLFEA 2.7.2*. Selain itu perlu adanya analisa detail terhadap penelitian terdahulu karena adanya saling keterkaitan, dan juga dapat sebagai kontrol terhadap hasil yang didapatkan.

Beberapa aspek yang akan ditinjau pada analisa perilaku lentur balok berserat baja adalah sebagai berikut:

#### 1. Perilaku kuat tarik dan kuat tekan serat baja pada silinder

Dalam penelitian ini serat baja adalah material utama sehingga perlu adanya analisa secara khusus. Pada pengujian ini dilakukan adalah slinder dengan pengujian splitting dan saat benda uji diberikan beban tekan *uniaxial*. Hasil pengujian splitting silinder berserat baja berupa grafik hubungan *applied load* (KN) dan *Stroke Displacement* (mm). didapatkan dari bacaan *Universal Testing Machine* (UTM). Pada pengujian benda uji silinder berserat baja dengan diberikan beban *uniaxial*. Hasil pengujian tekan *uniaxial* silinder berserat baja berupa grafik regangan tegangan didapatkan dari bacaan *load cell*, LVDT yang dihubungkan dengan *data logger*.

#### 2. Hubungan beban dan perpindahan spesimen balok

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

#### 3. Hubungan beban dan perubahan lebar retak spesimen balok

Hubungan beban dan defleksi biasanya berupa kurva yang didapatkan dari bacaan *data logger*. Bacaan beban yang bekerja didapatkan dari *load cell* dan bacaan perubahan lebar retak yang terjadi akibat beban didapatkan dari alat *Crack Mouth Opening Displacement* (CMOD). Hasil hubungan beban dan perubahan lebar retak



dilakukan analisa untuk masing-masing spesimen karena tentunya memiliki perilaku yang berbeda-beda antar spesimen.

#### 4. Pola retak dan kerusakan

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

#### 5. Verifikasi hasil eksperimen dan analisa numerik

Verifikasi ini adalah dengan hasil dari hasil eksperimen beban dan defleksi dengan analisa numerik. pada analisa Numerik menggunakan software *3 Dimension Non-Linier Finite Element Analysis* 3D-NLFEA 2.7.2. selain validasi hubungan beban dan defleksi yaitu mengamati pola retak yang terjadi dengan menggunakan pendekatan software. Sehingga menemukan rumus pendekatan yang mendekati dengan pengujian eksperimen.

*“ Halaman sengaja dikosongkan”*

## **BAB 4**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Umum**

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah analisa material yang akan digunakan. Hal ini menjadi penting untuk menentukan material yang digunakan layak digunakan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau *American Standard for Testing Material* (ASTM). Material yang tidak memenuhi standar akan digantikan dengan yang baru, sedangkan material yang memenuhi spesifikasi kemudian dilakukan penentuan komposisi campuran yang paling efektif berdasarkan propertis material. Selanjutnya berdasarkan komposisi yang ada, dilakukan pencetakan benda uji dalam skala structural yakni balok *Normal Concrete* (NC), balok *Steel Fiber Reinforced Concrete* (SFRC), dengan dimensi 200 mm x 200 mm x 450 mm dan. Tahapan selanjutnya yakni diberi komposisi serat fiber dengan fraksi volume 0% hingga 2%, pada balok diberi takikan (*notched*) sehingga memudahkan dalam pengamatan untuk *fracture energy* dan diuji lentur untuk mengetahui perubahan lebar retak tersebut.

Dari hasil pengujian eksperimental tersebut maka akan divalidasi analisa numerik menggunakan software program Salome 8.3.0 untuk memodelkan sementara untuk constitutive material dan running dengan menggunakan software *3 Dimension Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA) 2.7.2* dan melihat perilaku menggunakan software ParaView 5.8.0. Pencetakan benda uji balok pada penelitian ini analisa propertis dan komposisi serta permodelan analisa numerik dengan *finite element* dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

#### **4.2 Analisa Material**

Hasil analisa material yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 4.2.1 Analisa Berat Jenis Ordinary Portland Cement (OPC) ASTM C 188-95

Berat jenis semen didapatkan berdasarkan ASTM C 188 - 95 dengan membandingkan antara nilai berat jenis semen OPC dengan berat jenis minyak tanah. Data hasil percobaan berat jenis semen OPC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4. 1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Hasil pengujian berat jenis semen OPC

Percobaan ke-	1	2	Rata-rata	Satuan
Berat semen ( $W1$ )	250	250	250	Gram
Berat semen + minyak + labu takar ( $W2$ )	734.7	735.2	734.7	Gram
Berat labu takar + minyak ( $W3$ )	548	548	548	Gram
Berat jenis ( $(0.8 \times W1)/(W1+W3-W2)$ )	3.160	3.152	3.156	gr/cm <sup>3</sup>

Berat jenis rata rata OPC yang didapatkan dari percobaan yang dilakukan adalah 3.1 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabel 4. 2 Kandungan senyawa pada semen OPC

OPC	
<i>Compound</i>	<i>Content (%)</i>
CaO	80.25
SiO <sub>2</sub>	9.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8
MnO	0.078
SO <sub>3</sub>	2.2
K <sub>2</sub> O	0.48
TiO <sub>2</sub>	0.38
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
CuO	0.085
ZnO	0.046
SrO	0.089
BaO	0.05

Hasil pada Tabel 4.3 menunjukkan kandungan *Silicon dioxide* (SiO<sub>2</sub>), *aluminium oxide* (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan *iron oxide* (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang apabila ditotalkan menjadi 91.85 %. Dengan demikian berdasarkan ketentuan ASTM C618-12a.

#### 4.2.2 Agregat Halus

Pasir digunakan pasir Lumajang

Berat pasir akhir (b) = 95,25 gr

$$\begin{aligned} \text{Kandungan lumpur} &= \frac{a-b}{a} \times 100\% \\ &= \frac{4.75}{100} \times 100\% \\ &= 4.75\% \end{aligned}$$

Kandungan lumpur dalam agregat halus tidak boleh lebih dari 5 % (PBI 1971 pasal 3.3 ayat 3). Dari hasil perhitungan diperoleh kandungan lumpur dalam pasir adalah 4,75 %, sehingga pasir tersebut memenuhi syarat sebagai agregat halus.

Berat pasir SSD (a) = 500 gr

Berat pasir kering oven (b) = 488.85 gr

Berat volumetric + air (c) = 724.85 gr

Berat volumetric + pasir + air (d) = 1035.25 gr

Perhitungan *Bulk Specific Gravity*, *Bulk Specific Gravity SSD*, *Apparent Specific Gravity*, dan *Absorption* dapat dilihat pada Persamaan 3.2- 3.5.

$$\text{Bulk Specific Gravity} = \frac{a}{b-500-} = \frac{488.85}{724.85-500-103.25} = 2.57$$

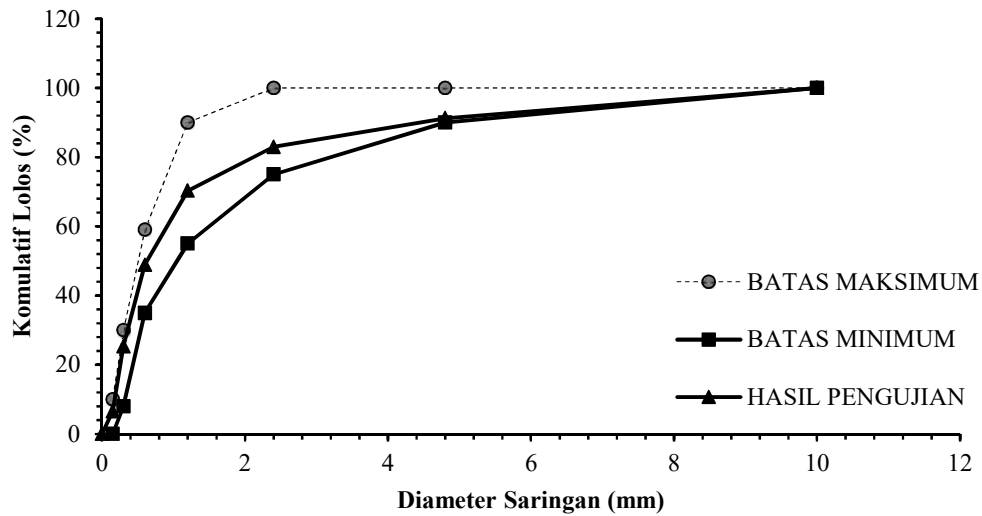
Menurut ASTM C.128-79 syarat *Bulk Specific Gravity SSD* antara 2.5 - 2.7, maka pasir sampel memenuhi syarat dan layak digunakan sebagai agregat halus beton.

##### a. Gradasi

Hasil analisa gradasi pasir menurut ASTM C.33-97 dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Hasil pengujian gradasi agregat halus

Ukuran saringan	Gram	Persen tertinggal	Persen lolos kumulatif	
10	0	0.00	0.00	100.00
4.8	100	8.73	8.73	91.27
2.4	95	8.30	17.03	82.97
1.2	145	12.66	29.69	70.31
0.6	245	21.40	51.09	48.91
0.3	270	23.58	74.67	25.33
0.15	215	18.78	93.45	6.55
0	75	6.55	100.00	0.00
	1145	100.00	374.67	



Gambar 4. 1 Analisa gradasi saringan agregat halus

Dari hasil pengujian di Gambar 4.1 diatas dapat dilihat bahwa pasir tersebut berada didalam gradasi zona 2 yang sehingga pasir tersebut memenuhi syarat sebagai bahan campuran adukan beton.

#### 4.2.3 Pengujian Agregat kasar

Berat jenis dan penyerapan agregat kasar didapatkan dengan menggunakan analisa ASTM C127-01. Material agregat kasar ini nantinya akan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan benda uji untuk silinder, balok beton dan benda uji dengan variasi penambahan serat baja. Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 berikut :

Tabel 4.4 Hasil analisa berat jenis dan penyerapan agregat kasar

No	Nomor Pengujian	I	II	satuan
1	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	2960	2970	gr
2	Berat Benda Uji Kering Permukaan (Bj)	3000	3000	gr
3	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh didalam Air (Ba)	1880	1910	gr
4	Berat Jenis Curah (Bk/(Bj-Ba))	2.64	2.72	
5	Berat Jenis Kering Permukaan (Bj/(Bj-Ba))	2.68	2.75	
6	Berat Jenis Semu (Bk/(Bk-Ba))	2.74	2.80	
7	Penyerapan ((Bj-Bk)/ Bk)x100%	1.35	1.01	
	Rata-rata ((I+II)/2)	2.684		

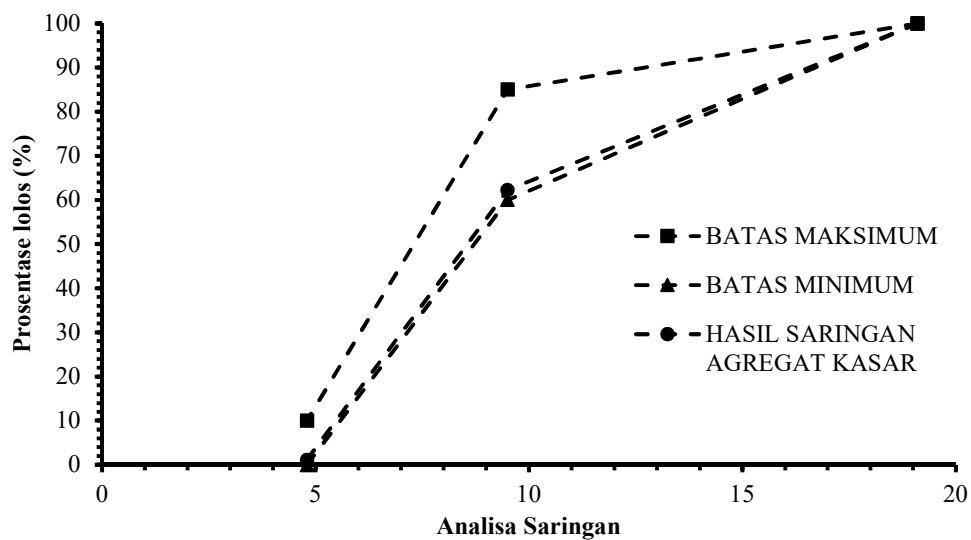
Dari analisa yang dilakukan berdasarkan ASTM C127-01 diperoleh hasil rata-rata berat jenis agregat kasar alami sebesar 2.684 gr/cm<sup>3</sup>. Nilai dari berat jenis ini nantinya akan digunakan dalam *mix design* campuran silinder beton dan balok beton.

### Gradasi

Hasil analisa gradasi pasir menurut SNI 03-2834-2000 dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil pengujian gradasi agregat halus

Ukuran saringan	Gram	Persen tertinggal	Persen lolos kumulatif	
19.1	0	0.00	0.00	100.00
9.5	1890	37.80	37.80	62.20
4.8	3052	61.04	98.84	1.16
pan	58	1.16	1.16	0.84



Gambar 4.2 Grafik ketentuan gradasi agregat kasar maksimum 10 mm

Dari hasil pengujian di Gambar 4.2 diatas dapat dilihat bahwa kerikil tersebut berada didalam gradasi agregat kasar maksimum 10 mm yang sehingga pasir tersebut memenuhi syarat sebagai bahan campuran adukan beton.

#### 4.2.4 Mix Desain Beton

Penentuan proporsi campuran beton berserat baja dilakukan dengan percobaan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menggunakan development enviroment. Rekapitulasi mix desain hasil uji kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Perencanaan campuran beton menggunakan tabel DOE

No	Urain	Tabel/grafik perhitungan	Nilai
1.	Kuat tekan karakteristik	Ditetapkan	30 MPa
2.	Standard deviasi	Butir 4.3.2.1.1	7 MPa
3.	Nilai tambah (margin)	Butir 4.2.3.1.2	$1.64 \times 7 = 11.7$ MPa
4.	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	Butir 4.2.3.1.2	$30 + 11.7 = 41.7$ MPa
5.	Jenis semen	Ditetapkan	OPC tipe 1
6.	Jenis admixture		
7.	Jenis agregat halus	Pasir Lumajang	
8.	Jenis agregat kasar	Kerikil Pasuruan	
9.	Faktor air semen	Tabel-2, Grafik-2	0.52
10.	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0.6
11.	Slump	Ditetapkan	8-12
12.	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	10 mm
13.	Kadar air bebas	Ayat 3.3.5	288 kg/m <sup>3</sup>
14.	Jumlah semen	11:8 atau 7	$288/0.3 = 619$ kg/m <sup>3</sup>
15.	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	
16.	Jumlah semen minimum	Ditetapkan	325 kg/m <sup>3</sup>
17.	Faktor air semen		0.52
18.	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3-6	Daerah gradasi susunan butir zona 2
19.	Persen agregat halus		45 %
20.	Berat jenis relative agregat gabungan(kering permukaan)		2,61 t/m <sup>3</sup>
21.	Berat jenis beton	Grafik 16	2390 kg/m <sup>3</sup>
22.	Kadar agregat gabungan	21-(14+13)-22	2052.22 kg/m <sup>3</sup>
23.	Kadar agregat halus	19 x 23	923.5 kg/m <sup>3</sup>
24.	Kadar agregat kasar	23-24	1128.72 kg/m <sup>3</sup>



Variasi penambahan serat baja pada balok berserat baja adalah 0% hingga 2% dengan tiap kelipatan 0.5%. Pada penambahan serat baja akan dikalikan dengan volume total dari volume beton.

Tabel 4.7 Komposisi per 1 m<sup>3</sup> beton berserat baja

Material	Satuan	Komposisi
OPC	kg/m <sup>3</sup>	619
Kerikil	kg/m <sup>3</sup>	1128.72
Pasir	kg/m <sup>3</sup>	923.5
Air	ltr/m <sup>3</sup>	288
Fiber Steel	%	0.5,1,1.5,2
Berat beton	Kg	2390
Slump	Cm	8 - 12

#### 4.2.5 Distribusi Serat Baja

Dalam pengujian benda uji untuk menilai perataan serat baja dalam keadaan beton. Perhitungan serat dilakukan secara manual pada takikan setelah dilakukan setelah pengujian balok dengan uji lentur. Distribusi serat dalam spesimen dan *volumetric fraction* serat adalah cara untuk menentukan dari keberhasilan prosedur pengecoran. Untuk menilai faktor-faktor ini, jumlah serat yang melintasi bidang kegagalan dihitung setelah spesimen diuji pada Gambar 4.3 Didapatkan total jumlah dari kedua sisi benda uji. Pada penelitian persamaan yang diusulkan (Soroushian and Lee 1990) sebuah metode perhitungan manual yang dimana:

$$\alpha = \frac{N}{Nth} = N \frac{Af}{Vf \times Ac} \quad (4.1)$$

Dimana:

Ac = 200 mm (bagian balok yang melintang takikan)

Af = 0.9 mm (ukuran fiber)

Vf = 0.5 (volume serat)

N = 64 (jumlah serat)

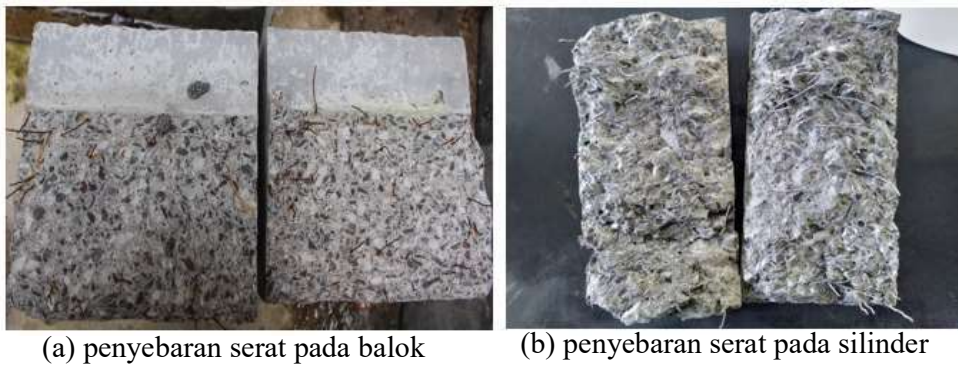
$$\alpha = 64 \times \frac{0.9}{0.5 \times 200} = 0.57$$

Dari hasil ini dapat dilihat bahwa orientasi penyebaran pada balok B – H-200 – 0.5% = 0.57 artinya serat serat tersebut berorientasi pada campuran sebesar

itu dikarenakan volume serat sangat tergantung pada kemampuan kerja beton. Tabel distribusi serat baja disajikan pada Tabel 4. 8, sedangkan penyebaran serat seperti sajian Gambar 4.3 berikut ini:

Tabel 4. 8 Tabel distribusi serat baja

Nama spesimen	Vf	$\alpha$	Vf/ $\alpha$
S1 – F0%	0 %	-	-
S1 – F0.5%	0.5 %	0.486	0.97
S1 – F1%	1 %	0.864	0.86
S1 – F1.5%	1.5%	1.44	0.96
S1 – F2 %	2%	1.96	0.98
B – H- 200 – 0%	0 %	-	-
B – H- 200 – 0.5%	0.5 %	0.57	1.15
B – H- 200 – 1 %	1%	0.95	0.95



(a) penyebaran serat pada balok

(b) penyebaran serat pada silinder

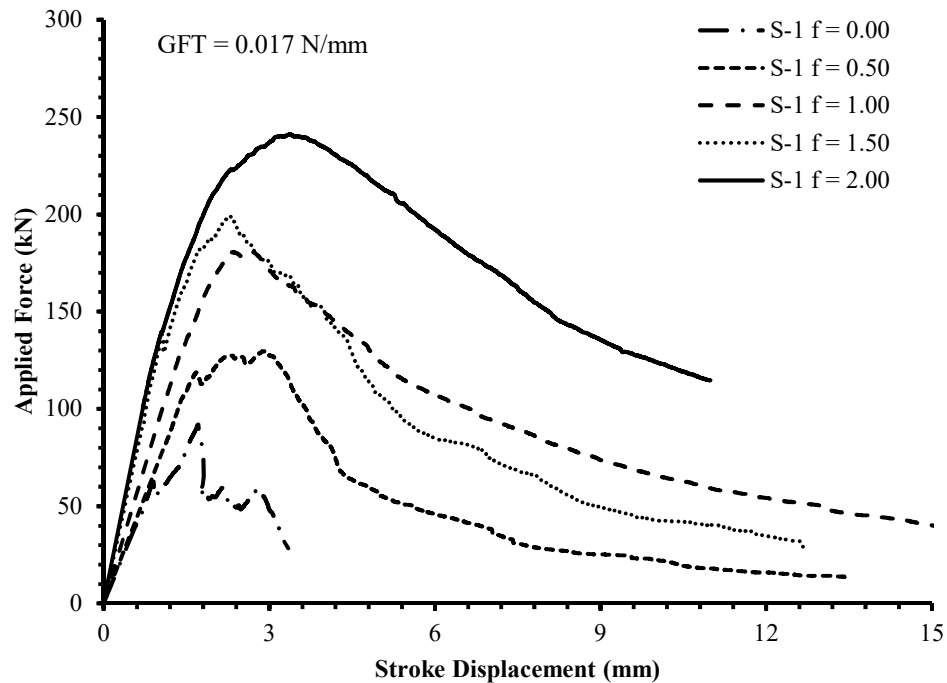
Gambar 4. 3 Penyebaran serat

### 4.3 Pengujian Uji Belah Silinder

Pada pengujian Tarik belah pada beton mengacu pada ASTM C 496 M – 04 dengan menerima beban tegak lurus sumbu bahannya dan akan mengalami rekahan (*splitting*). Hal ini terjadi karena daya dukung beton terhadap gaya lentur tergantung pada jarak dari garis berat beton, makin jauh dari garis berat makin kecil daya dukungnya. Kekuatan tarik relatif rendah untuk beton normal berkisar antara 9%-15% dari kuat tekan.

### 4.3.1 Uji Belah Silinder

Pengujian tersebut menggunakan benda uji silinder beton berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm dengan membandingkan variasi fiber 0%, 0.5%, 1 %, 1.5%, 2%. Langkah-langkah pengujian sama seperti pengujian kuat tekan, hanya saja pada pengujian ini ditambahkan suatu lempengan plat besi agar dapat membagi beban merata pada panjang silinder. Beban maksimum P (kN) selanjutnya digunakan untuk menentukan kuat tarik belah beton.



Gambar 4.4 Force vs displacement splitting test

Tabel 4. 9 Kuat tarik silinder beton SFRC

No	Mix Code	Volumetric Fraction (VF)	Tensile Strength ( $f'_{ct}$ ) (MPa)
1	S-1 F0%	0.0%	2.93
2	S-1 F0.5%	0.5%	4.13
3	S-1 F1%	1.0%	5.75
4	S-1 F1.5%	1.5%	6.34
5	S-1 F2%	2.0%	7.68

Dari Tabel 4.9 diatas dapat dibandingkan bahwa kuat tekan belah benda uji benda silinder dimensi 200 dan diameter 100 mm, dibandingkan antara beton normal dan beton berserat baja dengan variasi *volumetric fraction* serat baja 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%. Dari hasil pengujian 5 silinder dengan variasi penambahan *fiber steel* menunjukkan bahwa S-1 F2% menghasilkan kekuatan tarik paling tinggi yaitu 7.68 MPa dilanjutkan dengan spesimen S-1 F1.5% dengan kuat tarik sebesar 6.34 MPa. dan dilanjutkan dengan spesimen S-1 F1% dengan kuat tarik sebesar 5.75 MPa dilanjutkan dengan spesimen S-1 F0.5% dengan kuat tarik sebesar 4.93 MPa. Hasil kuat tarik dengan penambahan serat fiber yang paling tinggi yaitu 2% ini menunjukkan perbedaan 2.5 kali dari beton normal dengan nilai terendah yaitu sebesar 2.93 MPa dan rata kenikan ditiap penambahan serat baja 0.5% adalah 28%.

Kuat Tarik ini lebih kuat pada beton berserat baja ini dikarekan terjadinya Tarik dari serat baja yang sudah mengikat dimatrik beton sehingga menghasilkan penambahan kekuatan tekan beton. Hal ini juga disampaikan pada penelitian (Boulekbache et al. 2016) bahwa penyebaran serat artinya serat baja berorientasi pada campuran dan volume serat sangat tergantung pada kemampuan kerja beton.



Gambar 4.5 Hasil pengujian *splitting test*

Gambar 4.5 diatas menunjukkan bahwa serat baja berada berbanding terbalik dengan pengujian tekan silinder. Hal ini juga disampaikan (Shah and Rangan 1971) Seperti halnya tulangan konvensional serat baja paling efektif adalah ketika tegak lurus dengan arah pembebanan dan paling tidak efisien ketika serat baja berada sejajar terhadap arah pembebanan. Untuk menilai keefektifan serat baja dalam metode manual ketika spesimen telah terbelah setelah pengujian dilakukan

#### 4.4 Kuat Tekan

##### 4.4.1 Pengujian Kuat Tekan

Dari pengamatan ini diambil beban aksial yang terbaca dari beban yang diberikan oleh *load cell*. Sedangkan perpindahan lateral dibaca menggunakan LDVT. Regangan yang terjadi pada beton, dibaca dengan menggunakan LVDT yang diikat menggunakan rantai yang meilingkar di silinder. Sedangkan pengamatan visual dilakukan mengambil gambar pola retak yang terjadi selama pengujian hingga mengalami keruntuhan (*failure*).

##### 4.4.2 Kuat Tekan Silinder

Setelah mendapatkan analisa material penyusun beton yang akan dibuat, maka dilakukan pengecoran dan proses curing. Kuat tekan dilakukan pada beton silinder dengan tinggi 20 cm dan diameter 10 cm, dengan masing-masing sampel kuat tekan beton dari silinder normal dan dari beberapa variasi serat baja dengan variasi mulai dari 0.5% sampai dengan 2 %. Dari spesimen diuji saat berumur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton untuk masing-masing balok dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil pengujian kuat tekan silinder

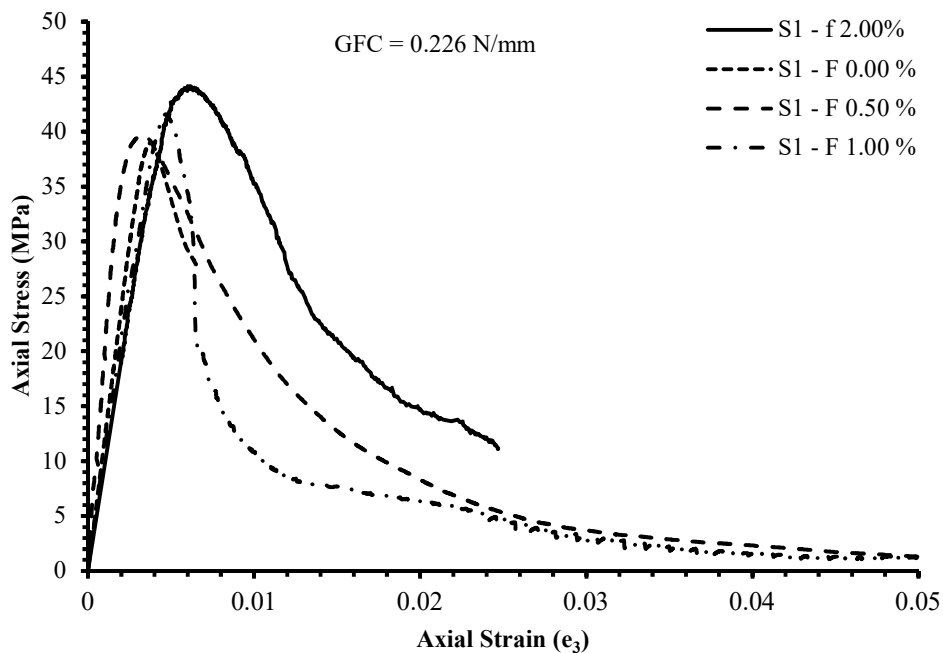
Spesimen	Age of concrete (hari)	Load (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	weight (kg)	Strength compresion (Mpa)
S-1-0%	28	305520	7853.98	3.7395	38.90
S-1-0.5%	28	311410	7853.98	3.7265	39.65
S-1-1%	28	326568	7853.98	3.7775	41.58
S-1-2%	28	345710	7853.98	3.7435	44.15

Berdasarkan hasil pengujian Pada Tabel 4.10 didapatkan kuat tekan rata beton normal atau variasi serat baja 0% sebesar 38.90 Mpa, beton serat baja 0.5 % kuat tekan beton sebesar 39.65 Mpa, beton serat baja 1 % kuat tekan beton sebesar 41.58 Mpa sedangkan beton serat baja 2 % kuat tekan beton sebesar 44.15 Mpa. Penggunaan serat baja sebagai bahan pengganti tulangan pada beton normal mampu menciptakan kuat tekan yang lebih naik tapi tidak terlalu terlalu besar. Hal ini

disampaikan (Thomas and Ramaswamy 2007) bahwa penggunaan rasio serat baja yang sama yang sama dengan sebelumnya meningkatkan kekuatan beban ultimate kurang dari 10%.

Dapat dilihat pada Tabel 4.10 hasil tekan uniaxial tipe silinder SFRC menunjukkan bahwa S-2% menghasilkan regangan yang paling daktail dengan tegangan dihasilkan 44.15 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan serat baja pada silinder memiliki regangan yang lebih daktail dari beton normal. Sedangkan kuat tekan yang dihasilkan oleh silinder S1-F0% sampai silinder S1-F2% mengalami kenaikan hasil nilai tegangan berbanding lurus dengan penambahan serat baja. Kandungan variasi serat baja makin tinggi semakin menghasilkan nilai tegangan menjadi lebih tinggi.

Perilaku awal beton normal dan SFRC di dalam menahan tegangan tekan cenderung sama. Namun semakin bertambahnya tegangan, perbedaan perilaku antara beton normal dan SFRC semakin terlihat. Hal ini disebabkan karena serat baja baru bekerja aktif saat terjadi *microcracking*. Perbedaan perilaku yang terjadi adalah kemampuan beton di dalam menerima regangan.



Gambar 4. 6 Hubungan tegangan aksial-regangan silinder beton SFRC

Tabel 4. 11 Tegangan dan Regangan silinder beton SFRC

Cylinder Type	Volumetric Fraction (VF)	Ultimit	
		Stress (MPa)	Strain (%)
S1 – F0%	0.0%	38.98	0.0037
S1 – F0.5%	0.5%	39.65	0.0027
S1 – F1%	1.0%	41.57	0.0047
S1 – F2%	2.0%	44.15	0.0061

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa benda uji dengan menggunakan SFRC yang menunjukkan perilaku berbeda dengan benda uji lainnya. Setelah mencapai tegangan *ultimate*, kapasitas benda uji dalam memikul beban pada umumnya makin lama makin rendah. Namun benda uji silinder S-2% SFRC dengan variasi serat 2% ini menunjukkan peningkatan kapasitas memikul beban setelah mencapai tegangan *ultimate* walaupun tidak melebihi tegangan *ultimate* tersebut. dapat meningkatkan kemampuan regangan pada beton. Beton normal  $f_c'30$  MPa memiliki regangan rata-rata sebesar 0.0037, namun penggunaan serat baja dapat membuat beton mencapai regangan hingga 0.0061. Batas nilai pada regangan ini juga disampaikan oleh (Singh 2017) Regangan tarik utama dan regangan tekan rentang *steel fiber reinforced concrete* antara 0.015-0.020 dan 0.0035-0.0070.

Nilai tegangan pada silinder tercipta ketika pelebaran retak tertahan serat baja. Pola retak yang diciptakan spesimen silinder setelah pengujian tekan uniaxial dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Pola retak spesimen pengujian *uniaxial compression*, beton polos dan beton dengan tambahan serat.

Gambar 4.7 di atas memperlihatkan retak yang besar pada saat spesimen silinder saat diberikan beban tekan *uniaxial compression*. Terlihat pada retakan pada spesimen silinder beton polos beton hanya ditahan oleh matriks beton pada saat tegangan berada dipuncak sementara pada silinder dengan serat baja retakan ditahan oleh serat baja sehingga terjadi terlihat saling tarik membuat beton lebih daktail. Hal ini juga di sampaikan (Singh 2017) Efek serat-serat baja menjadi signifikan dan terlihat pada respons tegangan-regangan hanya setelah tegangan dalam silinder melampaui batas beton normal yaitu 70% dari kekuatan tekan ultimate. Pada tahap ini, kekuatan tarik dari agregat kasar yang mengelilinginya beton mencegah perluasan, dan pelebaran microcracks pada area permukaan beton dan hal ini akan sangat meningkatkan perilaku pasca retak pada serat dalam silinder.

Hal tersebut juga disampaikan (Dhakal, Wang, and Mander 2005) penambahan serat baja dalam beton dapat mengubah karakteristik dasar kurva tegangan-regangannya dari pada beton polos serat baja dapat mempertahankan regangan tekan sebelum dihancurkan dan pengurangan tekanan tekan pada pasca puncak ultimate sehingga membuat lebih daktail.

#### **4.5 Pengujian Bending**

Pengujian bending balok berserat baja menggunakan *three bending point*. Hasil pengujian ditunjukkan melalui grafik beban – perpindahan dan pengamatan perilaku perubahan lebar retak yang diamati melalui CMOD pada takikan balok. Grafik beban dan perpindahan diambil dari yang diberikan load cell (P) dengan displacement ( $\Delta$ ) yang terjadi ditengah bentang. Sedangkan besarnya displacement dibaca menggunakan LDVT Sedangkan pengamatan visual dilakukan mengambil gambar pola retak yang terjadi selama pengujian hingga mengalami keruntuhan (*failure*).

Perilaku terhadap lentur bisa dikategorikan menjadi 4 fase yaitu: *Linear-elastic phase*, *Non-linear cracked phase*, dan *fiber pullout/fracturing phase*. Pada fase pertama, regangan tarik disebabkan dari matriks beton. Seiring dengan peningkatan beban, retak mulai melebar dan berangsur-angsur menyebar ke arah garis takikan. Sebelum retakan melebar, gaya tarik yang ditahan serat baja. Pada fase ketiga terjadi pelebaran pada daerah retakan dan terjadi sangat cepat. Mulai



terlihat retakan pelan dimana serat baja mulai bekerja pada celah terbuka. Serat baja dengan bagian sedikit tertanam pada beton mulai tercabut keluar dari beton. Serat baja menahan pelebaran retak yang terjadi dengan baik melalui kemampuan *pull-outnya*.

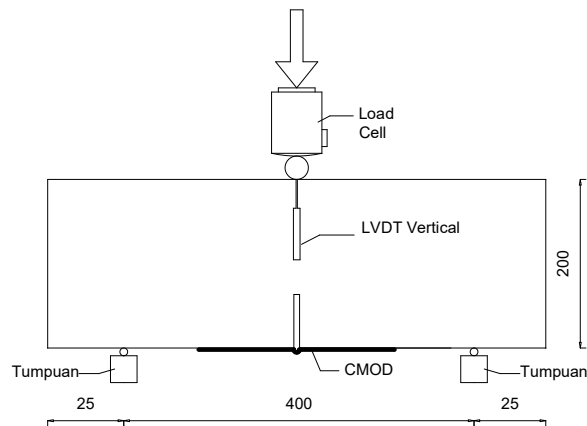
#### 4.5.1 Observasi Perilaku Balok, Load-Midspan Displacement Dan Load-CMOD B – H200 – F0%

##### 4.5.1.1 Data perencanaan B – H200 – F0%

Pada spesimen B – H200 – F0% digunakan sebagai pembanding dari balok dengan variasi serat baja. Sebagai berikut data perencanaan:

lebar	: 200 mm
tinggi	: 200 mm
panjang	: 450 mm
<i>notched</i>	: 60 mm
<i>Volumetric fraction (V<sub>f</sub>)</i>	: 0 %
Mutu beton ( <i>f'<sub>c</sub></i> )	: 30 MPa

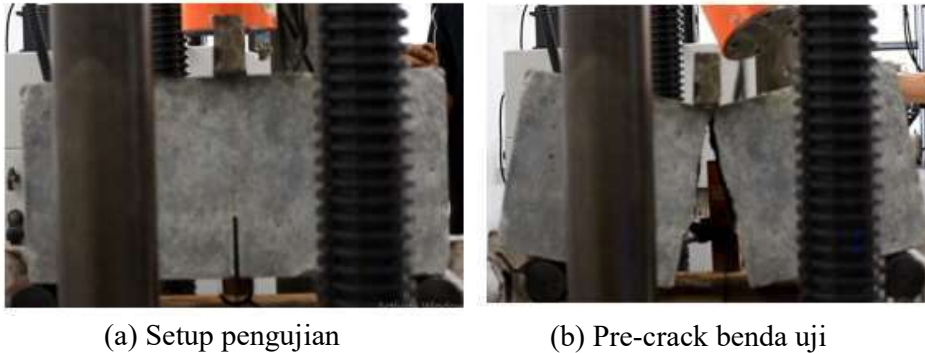
Pada pengamatan pada balok B – H200 – F0% yang di uji dengan menggunakan *three bending point*. Instrument yang dipakai dalam pengujian ini adalah *load cell* yang digunakan untuk menunjukan beban, LVDT adalah digunakan untuk mendapatkan besaran nilai deflection pada saat balok dilakukan pembebanan pemasangan LDVT dipasang secara vertical berlawanan dengan arah balok. Setup pengujian pada balok B – H200 – F0% ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Setup pengujian spesimen B – H200 – F0%

#### 4.5.1.2 Pola Retak pada Balok B – H200 – F0%

Spesimen B – H200 – F0% yang dilakukan pengujian *three bending point* dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 5 KN. Benda uji dibebani dititik tengah balok dengan dilengan 225 mm dengan percepatan pengujian 0.5 sec/mm. Hasil pengamatan visual untuk retak pada balok B – H200 – F0% yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



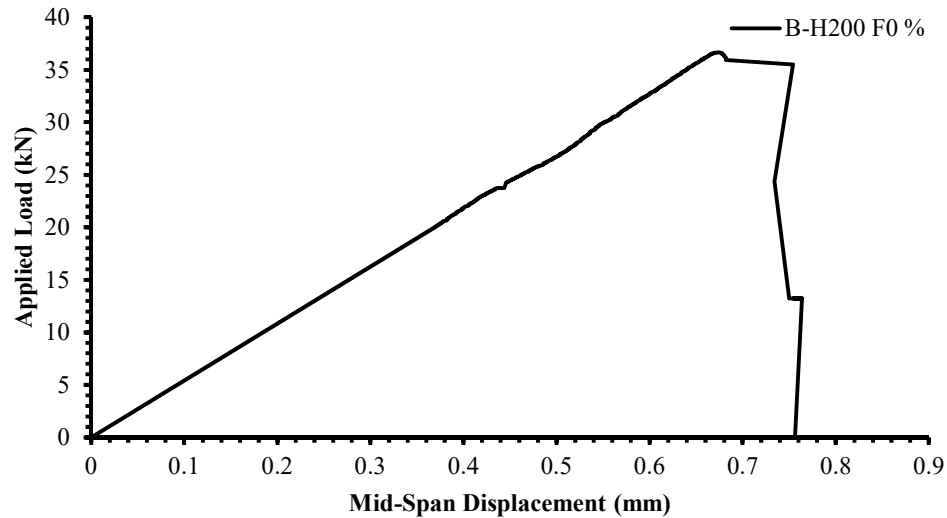
Gambar 4. 9 Mekanisme retak saat pengujian spesimen B – H200 – F0%

Mekanisme retak yang ditunjukkan pada balok B – H200 – F0% di Gambar 4.9b menunjukkan bahwa terjadi pola retak yaitu satu retakan dari arah takikan merambat menuju arah pembebanan. Beton saat pada pre-crack saat beban berada di nilai 36.67 kN dan sekaligus menjadikan nilai pre-crack sebagai nilai beban ultimate (beban puncak) ini disebabkan karena spesimen balok B – H200 – F0% ini adalah sebagai beton polos (*plain concrete*). *Crushing* balok B – H200 – F0% ini terjadi saat pada saat *midspan displacement* sebesar 0.67 mm.

#### 4.5.1.3 Load–Midspan Displacement B – H200 – F0%

Pada pengamatan pengujian ini dinilai dari 2 aspek yaitu *load* dan *midspan displacement*. Nilai *load* pada balok yang dipasang berada dititik tengah atas balok didapatkan dari *load cell* sementara nilai *midspan displacement* diambil dari LVDT dipasang vertical dan berlawanan arah balok. Kurva *load – midspan displacement* dari balok B – H200 – F0% yang dibebani dengan *three bending point* dengan variasi serat baja 0% ditunjukkan pada Gambar 4.10 Secara garis besar semua benda uji balok berserat baja memiliki pola interaksi dari kurva *load – midspan displacement* yang sama. Kurva diawali dengan bagian linier elastis, saat

mengalami plastis yang membedakan adalah Efek dari *volumetric fraction* (*vf*) pada balok.



Gambar 4.10 Hasil pengujian *load- midspan displacement* B – H200 – F0%

Pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa dari pengujian *three bending point* pada balok B – H200 – F0% kurva diawali dengan linier elastis hingga sampai pada *pre-crack* atau bias disebut beban ultimate. Hasil dari pengujian balok didapatkan pada saat beban ultimate yaitu sebesar 36.67 KN sementara hasil midspan displacement ini didapatkan hasil sebesar 0.67 mm. pada saat kurva menuju kuva softening beton mengalami getas.

#### 4.5.2 Observasi Perilaku Balok, Load-Midspan Displacement dan Load-CMOD dengan Serat Baja

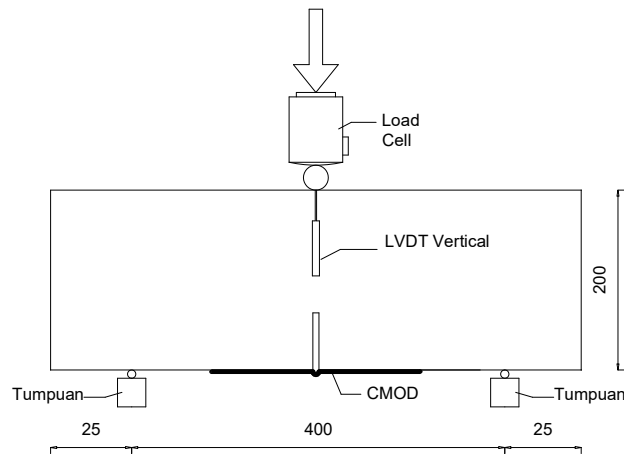
##### 4.5.2.1 Data Perencanaan B – H200 – F 1%

Pada spesimen B – H200 – F1 % (diambil salah satu mix desain dari penggunaan serat baja) digunakan dengan menggunakan *volumetric fraction* 1% dari volume balok. Sebagai berikut data perencanaan:

lebar	: 200 mm
tinggi	: 200 mm
panjang	: 450 mm
<i>notched</i>	: 60 mm
<i>Volumetric fraction (Vf)</i>	: 1 %

mutu beton ( $f'c$ ) : 30 MPa  
 serat baja : 65/60 BG<sup>+</sup>

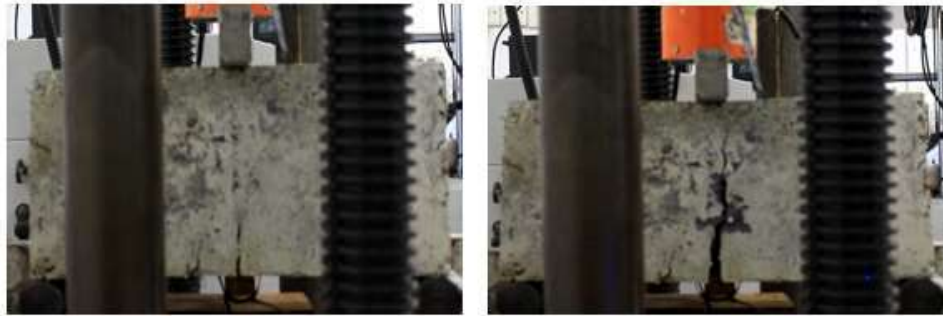
Pada pengamatan pada balok B – H200 – F1% di uji dengan menggunakan *three bending point*. Instrument yang dipakai dalam pengujian ini adalah *load cell* yang digunakan untuk menunjukkan besar load pada saat pengambilan nilai beban saat sedang pengujian, LVDT adalah instrument yang digunakan untuk mendapatkan besaran nilai deflection pada saat balok dilakukan pembebanan pemasangan LDVT dipasang secara vertical berlawanan dengan arah balok sedangkan untuk menggunakan besarnya nilai perubahan lebar retak (CMOD) alat ini dipasang pada permukaan bawah balok dengan titik tengah berada di *notched*. Setup pengujian pada balok B – H200 – F1% ditunjukkan pada Gambar 4. 15.



Gambar 4. 11 Setup pengujian spesimen B – H200 – F1%

#### 4.5.2.2 Pola Retak pada Balok B – H200 – F1%

Spesimen B – H200 – F1% yang dilakukan pengujian *three bending point* dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 5 KN. Benda uji dibebani dititik tengah balok dengan dilengan 225 mm dengan percepatan pengujian 0.5 sec/mm. Hasil pengamatan visual untuk retak pada balok B – H200 – F1% yang dtunjukkan pada Gambar 4. 16 Mekanisme retak yang ditunjukkan pada balok B – H200 – F1% Gambar 4. 16 b.



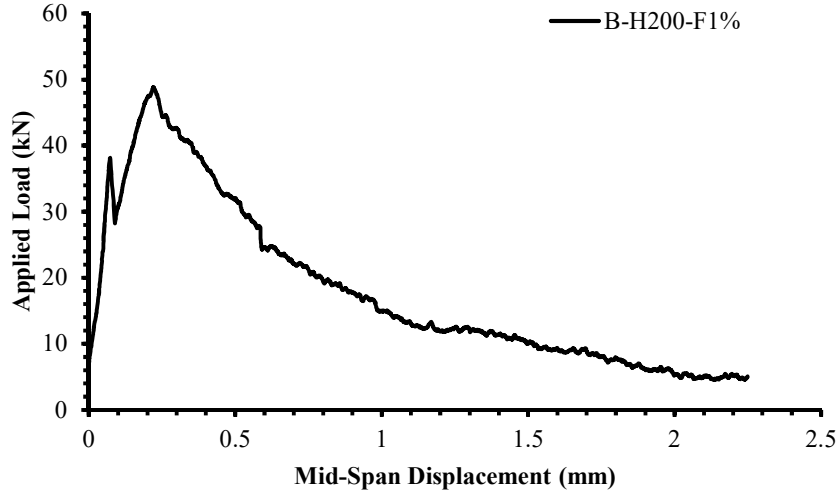
(a) Setup pengujian B – H200 – F0.5% (b) Pre-crack pengujian B–H200– F0.5%

Gambar 4. 12 Mekanisme retak saat pengujian spesimen B – H200 – F1%

Pada Gambar 4. 16 mekanisme retak yang ditunjukkan pada balok B – H200 – F1 % digambar 4. 16 menunjukkan bahwa terjadi pola retak yaitu satu retakan dari arah takikan merambat menuju arah pembebanan *three bending point*. Retakan pertama pada balok ini terjadi saat pre-crack pada saat menerima beban sebesar 39.76 kN Dan pada midspan displacement 0.74 mm pasca pre-crack load merambat naik hingga mencapai beban ultimate dan mencapai beban ultimate dinilai 48.48 kN dengan midspan displacement 2.85 Pada saat retakan pertama perubahan lebar retak baru mulai bekerja hingga sampai beton terjadi *chrushing*.

#### 4.5.2.3 Load – midspan displacement B – H200 – F1%

Pada pengamatan pengujian ini dinilai dari 2 aspek yaitu *load* dan midspan displacement. Nilai *load* pada balok yang dipasang berada dititik tengah atas balok didapatkan dari *load cell* sementara nilai midspan displacement diambil dari LVDT dipasang vertical dan berlawanan arah balok. Kurva *load – midspan displacement* dari balok B – H200 – F1 % yang dibebani dengan *three bending point* dengan variasi serat baja 0.5 % ditunjukkan pada gambar 4. 17. Secara garis besar semua benda uji balok berserat baja memiliki pola interaksi dari kurva *load – midspan displacement* yang sama. Kurva diawali dengan bagian linier elastis, saat mengalami plastis yang membedakan adalah Efek dari *volumetric fraction (Vf)* pada balok.

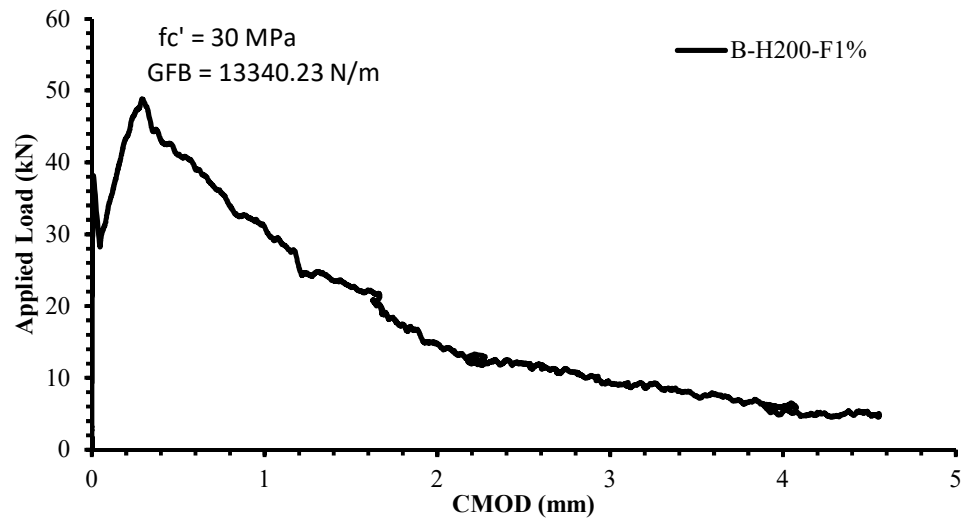


Gambar 4.13 Hasil pengujian *load- midspan displacement* B – H200 – F1%

Pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa dari pengujian *three bending point* pada balok B – H200 – F1% kurva diawali dengan linier elastis hingga sampai pada pre-crack. Dari pre-crack didapatkan hasil dari pengujian balok sebesar 39.76 KN dan berada pada nilai *midspan displacement* sebesar 0.74 mm nilai *load* bergerak merambat naik menuju beban ultimate pada balok dan didapatkan yaitu sebesar 48.48 KN sementara hasil *midspan displacement* pada saat *load* pada ultimate didapatkan hasil sebesar 2.85 mm.

#### 4.5.2.4 Load – CMOD B – H200 – F1%

Pada pengujian lentur ini dengan 3 titik (*three bending point*) digunakan untuk mendapatkan tegangan tarik pada beton. Pada balok ini terdapat *notched* atau takikan yang berfungsi dari takikan pada benda uji ini agar retak bisa terjadi pada daerah takikan tersebut. Jadi dalam perubahan lebar retak (*Crack Mouth Opening Displacement – CMOD*) dapat diukur dengan mudah dan demikian langsung bisa diambil kesimpulan antara momen yang terjadi dengan perubahan lebar retak. Hasil pengujian eksperimen balok B – H200 – F1% dalam pendekatan FIB *Model Code* akan yang disajikan ditelusuri ke: (1) besarnya nilai awal perubahan lebar retak (CMOD) 5 mm, sebagai titik pengambilan sampel kunci pertama: (2) pengujian spesimen dengan *notched* dan (3) setelah beban ultimate semakin berkurangnya beban dan bertambahnya nilai CMOD.



Gambar 4.14 Hasil pengujian Load- CMOD B – H200 – F1%

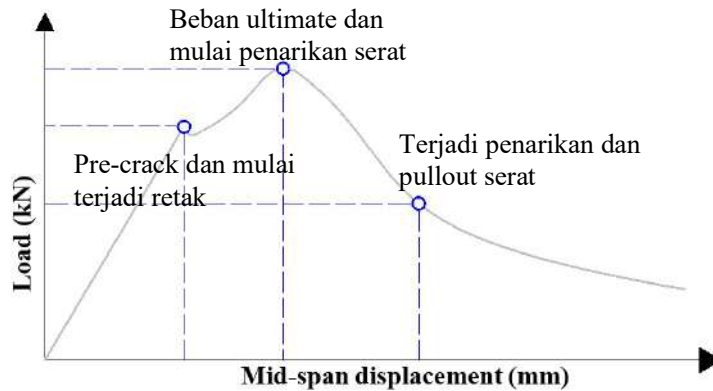
Berdasarkan hasil tes, kurva beban vs perubahan lebar retak (CMOD) pada balok pada B - H200- F1 Gambar 4.14 Pada fase ultimate ini nilai terbesar pada beban – perubahan lebar retak adalah spesimen B - H200- F1% dengan nilai 48.48 N. Sementara pada titik leleh ultimate terjadi paling panjang nilainya ada pada spesimen B – H200 – F1% dengan nilai 48.48 mm. sementara hasil dari besarnya nilai fracture energy yang diambil dari pengujian dengan adalah sebesar 182.45 N/mm.

#### 4.5.3 Mekanisme Retak Balok Berserat Baja

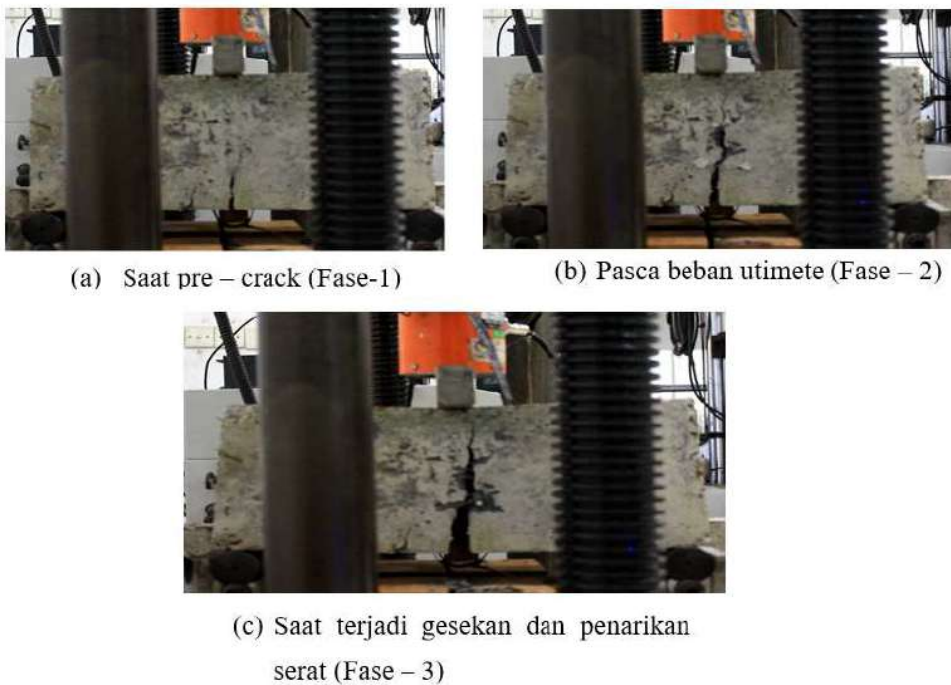
Cara bekerja serat terhadap retak berbeda terhadap beton biasa. Asumsi awal tentang pertumbuhan retak adalah dimana kekuatan serat baja tegak lurus untuk mampu menahan retakan dari awal mulai retak hingga terjadinya *pull out* (Chen,1982). Kondisi pertama Serat baja bekerja setelah terjadi pre-crack, dimana terjadi retakan pertama serat baja akan cenderung mencegah retak-retak kecil menjadi retakan yang lebih besar.

Kondisi kedua adalah pengaruh pengujian pada spesimen balok dengan *three bending point*, di mana bagian kegagalan ditentukan oleh lokasi *notched* dan *takikan* tersebut sangat ditentukan oleh probabilitas hamburan dengan distribusi serat. Kondisi ketiga berkaitan dengan adanya batas yang membatasi kebebasan untuk tidak berorientasi pada serat. Dengan serapan berbagai jenis serat dalam

industri, pedoman umum harus memasukkan efek ini dalam uji karakterisasi bahan saat pengambilan.



Gambar 4.15 Sistematika reaksi balok berserat baja ketika pengujian tekuk.



Gambar 4.16 Mekanisme retak saat pengujian lentur *three bending point*

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa pada saat pengujian *three bending point* dengan takikan. Pada Gambar 4.15 (fase-1) respon *load-midspan displacement* yang ditunjukkan oleh pada balok bersifat linier-elastis pada umumnya. Geometri serat biasanya tidak memiliki pengaruh pada kapasitas



penguatan beban pada tahap ini, serat hampir tetap diam sampai terbentuknya retak pertama pada spesimen. Nilai *load - midspan displacement* yang sesuai dengan kekuatan yang ditunjukkan oleh bahan dapat ditentukan dari kekuatan beton dan modulus elastisitasnya (Singh 2017). Retak dimulai terjadi pada beton, pada setelah pre crack pada Gambar 4.16 (a) menunjukkan bahwa setelah matriks beton telah berakhir dalam menahan beban (akhir fase-1), itu mengarah pada pembentukan sejumlah retakan pada beton, tetapi serat yang ada di sana menjembatani celah dan memastikan transfer gaya tarik melintasi lebar retak pada spesimen. Menurut (Cuenca 2014) serat baja mengembangkan kemampuan *crack control* dan mengijinkan beton dengan mencapai tegangan pucaknya dan juga menjaga agar retak tidak menyebar. Akhir fase-1 menandakan timbulnya retak dan memulai kinerja dari serat baja.

Retak dimulai pada beton, masuk pada fase-2, adalah saat ketika setelah pre crack hingga beban ultimate. Serat baja dalam beton yang dikompositkan hanya bisa berkerja secara aktif setelah terbentuknya retakan pada bagian akhir (fase-1). Setelah itu terjadi, kekuatan load beton dalam fase ini berasal dari aksi komposit yang ada antara beton dan serat. Perubahan lebar retak (CMOD) biasanya sangat baik pada fase-2 yang meningkat pada laju cepat hingga akhir fase, tetapi itu umumnya disertai dengan fenomena pengurangan beban. Biasanya, lebar retak dari retak yang sudah berkembang dalam spesimen meningkat pada fase-2 dengan pembentukan yang baru. Pada akhir fase-2, retakan telah terbentuk dengan baik dan cukup lebar (0,1-0,2 mm) untuk menyebabkan hilangnya kontribusi dari bagian beton (Singh 2017). Dalam pembagian beban pada akhir fase-2. Retakan kemudian menjadi cukup lebar untuk menyebabkan penurunan kekuatan yang ditunjukkan oleh SFRC.

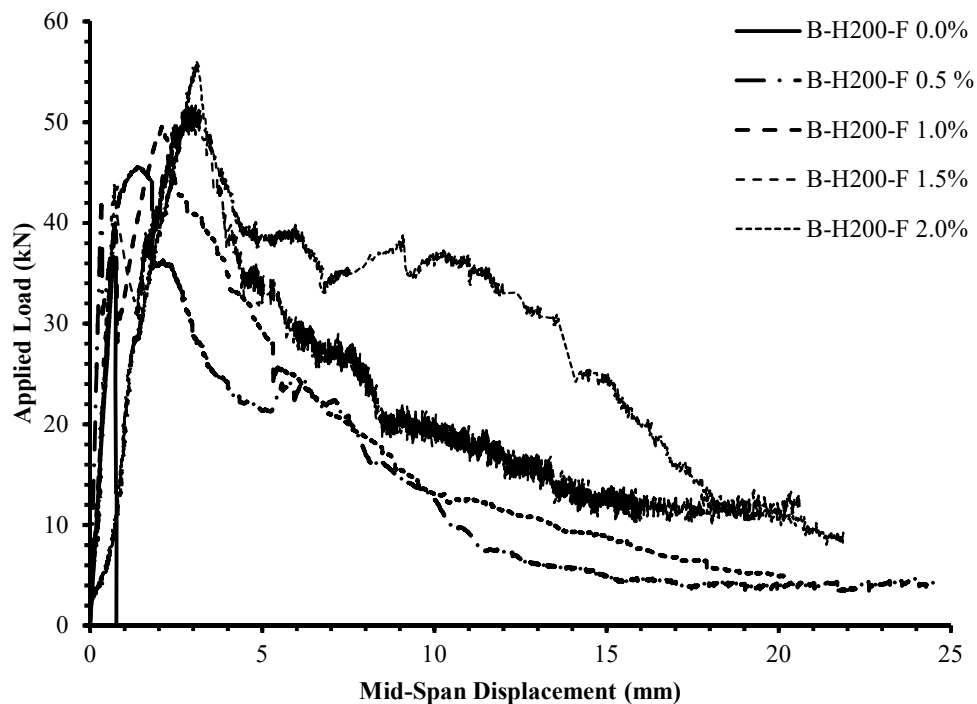
Pada Gambar 4.16C menunjukkan pada fase-3 bahwa pengaruh serat dalam beton sangat menahan pada kurva *softening* untuk turun tajam. Serat yang menahan retakan pada *notched* yang disebabkan oleh pembentukan retakan, melakukannya terutama melalui penarikan serat. Tentu, tidak semua serat yang melintasi celah dan berkontribusi terhadap kekuatan, karena banyak dari serat berada dalam campuran mortar yang tidak berada di area *notched*. Ini terutama terjadi karena orientasi acak serat dalam beton. Hal ini menunjukan bahwa serat baja membentuk perilaku dari

serat dalam menyerap energi dan mengontrol perambatan retak (Zollo 1997) Tetapi karena sejumlah serat cenderung banyak dan secara acak dalam campuran, serat tidak akan berkontribusi dengan cara yang sama seperti serat akan pada *notched*. Namun, dengan pembukaan lebar celah yang meningkat, kontribusi dari serat yang berlawanan arah pembebanan juga akan meningkat dan ketika serat mengalami ketika mereka meluruskan diri mereka sendiri di bawah pembebanan. Proses ini fase-3, menghasilkan penurunan beban yang konstan dengan perubahan lebar celah hingga fase akhir dari pengujian.

#### **4.5.4 Perbandingan Load – Midspan Displacement**

Dalam studi analisis ini meninjau dua aspek yaitu beban dan displacement. Displacement merupakan nilai lendutan yang terjadi ditengah bentang sedangkan *Load* adalah nilai beban lateral ditengah bentan dengan pengujian *three bending point*. Crack merambat lebih tinggi pada bagian tersebut, pengaruh beton pada momen nyata berkurang Pada bagian ini, perilaku balok SFRC dalam kurva digambarkan pada Gambar 4.17 Kurva perbandingan *load - midspan displacement* pada balok berserat baja yang dibebani dengan *three bending point* dengan variasi serat baja dan ditunjukkan pada Gambar 4.17.

Secara garis besar semua benda uji balok berserat baja memiliki pola interaksi hubungan *load – midspan displacement* yang sama. Kurva diawali dengan bagian linier elastis yang dilanjutkan Efek dari *volumetric fraction* serat pada perilaku defleksi load dari balok berserat baja ditunjukkan pada Gambar 4.17 Dapat dilihat bahwa balok berserat baja pada perilaku lentur yang lebih baik daripada beton polos, di mana ketika pasca beban ultimate menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan dimana beton polos yang turun yang sangat tajam ke nol ketika spesimen menghasilkan retakan awal. Dibandingkan dengan balok beserat baja ketika pasca beban *ultimate* yaitu menunjukkan bahwa serat menahan retakan dan memberikan kekuatan tarik pada balok sehingga membuat lebih daktail dibandingkan beton polos.



Gambar 4. 17 Load versus midspan-displacement balok berserat baja

Tabel 4.12 Rekapitulasi  $P$  dan  $\delta$  balok berserat baja

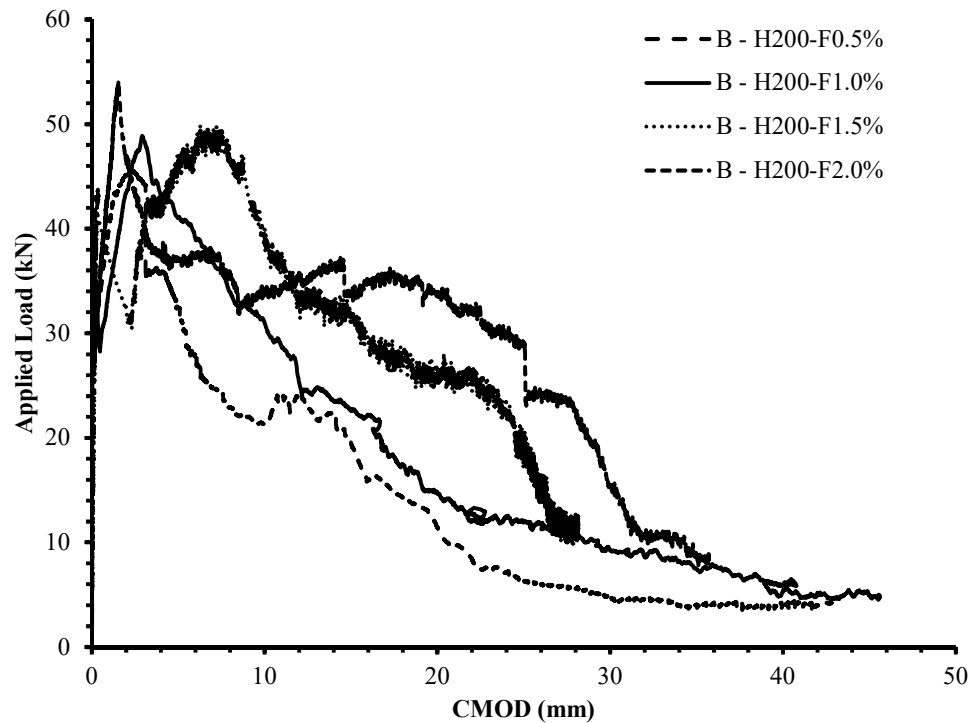
Nama Spesimen	VF	Kondisi pre-crack		Kondisi ultimit		Daktilitas
		P (kN)	$\delta$ (mm)	P (kN)	$\delta$ (mm)	$\frac{\delta_{ultimit}}{\delta_{pre-crack}}$
B - H200-F 0.0%	0%	36.67	0.674	36.67	0.67	1.00
B - H200-F 0.5%	0.5%	41.743	0.652	45.61	2.12	3.25
B - H200-F 1.0 %	1%	39.76	0.74	48.48	2.85	3.86
B - H200-F 1.5 %	1.5%	43.48	0.522	50.97	2.18	3.95
B - H200-F 2.0 %	2%	35.02	0.782	52.55	3.12	3.98

Dari hasil Gambar 4.17. B – H200 – F 0.5% dan F – 1% Menunjukkan kesamaan respon saat beban awal sampai pasca retak. namun perbedaan terjadi setelah pasca *ultimate*. Perbedaan di mana perbedaan yang signifikan dalam beban puncak yang ditemukan oleh pengaruh penambahan variasi volume serat baja tersebut yang ditunjukkan pada kurva *load-midspan displacement* SFRC untuk berbagai *volumetric fraction* serat baja ditunjukkan pada Gambar 4.17. Secara umum, penggunaan penambahan *steel fiber reinforced concrete* menunjukkan beban

puncak tertinggi dan daktilitas pasca-puncak *ultimate*, sedangkan tanpa serat baja memiliki nilai terendah (Li et al. 2018), Perlu dicatat bahwa penambahan variasi volume serat baja memiliki sedikit efek pada tahap *pre-crack*, tetapi pengaruh yang signifikan pada tahap *post-cracking* dari kurva *load-midspan displacement*. hal ini menyebabkan nilai pada saat ultimate untuk fraksi volume serat pada spesimen B – H200 – F2% lebih tinggi dengan nilai 50.55 kN. Dibandingkan dengan beton polos spesimen B - H200 -F 0 % dengan nilai yaitu 36.67 kN beban puncak pada spesimen B– H200 – F 0.5% dengan nilai 45.61 KN. beban puncak pada spesimen B– H200 – F 1% dengan nilai 48.48 KN dan beban puncak pada spesimen B– H200 – F 1.5% dengan nilai 50.97 KN. Perbedaan yang cukup signifikan terjadi pada beton polos dengan beton dengan variasi serat baja pada beton berserat baja. Hal ini disebabkan oleh kinerja ikatan antara serat baja terhadap matriks beton dan jumlah serat yang menompang beban pada retakan (Li et al. 2018). Hal ini menunjukkan bahwa material *Steel Fiber Reinforced Concrete* sebagai material penyusun utamanya memiliki kuat tarik yang jauh lebih tinggi daripada beton polos.

#### **4.5.5 Perbandingan Load – CMOD Balok Berserat Baja**

Dalam studi ini analisa meninjau kurva yaitu load dengan perubahan lebar retak yang terjadi ketika pra-retak. Dimana nilai *load* dimulai ketika *pre-crack* yang merambat naik hingga puncak saat beban berada dipuncak dan pasca beban ultimate akan turun sesuai dengan jumlah serat yang bekerja pada *notched*, sedangkan ketika kurva mulai plastis perubahan lebar retak mulai terlihat memanjangnya dan akan nilai perubahan lebar retak bertambah hingga *poll out* dan berbanding lurus dengan *volumetric fraction* serat pada balok tersebut.



Gambar 4. 18 Load vs perubahan lebar retak (*Crack Mouth Opening Displacement – CMOD*) balok berserat baja

Tabel 4.13 Rekapitulasi beban-perubahan lebar retak berserat baja

Nama Spesimen	VF	Kondisi ultimit		Fracture Energy Bending (N/m)
		$P$ (kN)	$\delta$ (mm)	
B - H200-F 0.0%	0.0%	36.67	0.674	202.066
B - H200-F 0.5%	0.5%	45.61	2.12	12320.66
B - H200-F 1 %	1.0%	48.48	2.85	14088.33
B - H200-F 1 %	1.5%	50.97	2.18	16126.03
B - H200-F 1 %	2.0%	52.55	1.84	17981.73

Pada Gambar 4.18 menunjukan diawali ketika precrack perubahan lebar retak mulai bergerak membuka retak pada takikan sedangkan untuk beban merambat naik hingga ultimate dan hingga mulai menurun. Pada awal perubahan lebar retak (CMOD) akan diam ketika kurva masih bergerak linier, perubahan lebar retak mulai membuka retak saat kurva menunjukkan beban praretak. Kurva Beban dan perubahan lebar retak akan meningkat hasilnya secara signifikan dengan

berbanding lurus dengan jumlah variasi serat pada balok. Hal tersebut juga disampaikan (J. Zhang and Stang 1998) perubahan lebar retak dan kurva saat softening tergantung pada sifat geometris dan mekanik serat dan pada jumlah serat yang digunakan.

Pada tabel 4.13 berdasarkan pengujian balok dengan *three bending point* dengan mengukukan notched pada balok, dari kurva *load – crack mouth opening displacement* dapat dihitung nilai *fracture energy* yaitu selaras dengan peningkatan *volumetric fraction*. Dari hasil ini didapatkan bahwa spesimen B–H200–F0.5% dengan nilai *fracture energy* yaitu 12320.66 N/m. Sedangkan spesimen B– H200–F1.0% didapatkan hasil sebesar 14088.33 N/m pada spesimen B–H200–F1.5% didapatkan hasil sebesar 16126.03N/m dan spesimen B–H200–F2% didapatkan hasil sebesar 17981.73 N/m hasil ini jauh lebih besar jika dibandingkan dengan hasil beton polos yaitu sebesar 202.066 N/m. Hal ini menunjukkan bahwa dengan semakin tingginya *volumetric fraction* semakin mempengaruhi nilai *fracture energy*.

## **4.6 Hasil Pemodelan Numerik 3DNLFEA**

### **4.6.1 Pemodelan Balok**

Pada software Salome 8.3.0. digunakan untuk mendesain geometry dan meshing. Balok berpenampang 200 x 200 mm dengan panjang 450 mm dengan tambahan takikan setinggi 60 mm dan lebar 5 mm. Pada dalam pengujian *load* dan *boundary condition* diasumsikan dengan menggunakan *steel* dengan ukuran 50 mm x 20 mm x 200 mm yang berada dikedua ujung dan pada atas tengah balok. Dalam Mesh type 3D dipilih *Exstrusion 3D* pada memakai 2D yaitu *Quadrible Mapping* dan sedangkan pada 1D menggunakan *wire descretasition* dengan ukuran elemen meshing adalah 10 mm.

Didalam mesh ini dibagi dalam beberapa group yaitu mesh untuk semua elemen termasuk meliputi balok steel, volume beton dan steel, dan line Pembagian desain ini pada group berfungsi yaitu untuk memudahkan dalam pengambilan data. Setelah selesai menggunakan SALOME 8.3.0 dalam pembentukan geometry dan meshing maka dalam permodelan balok dilanjutkan menggunakan software 3 *Dimension Non-Linier Finite Element Analysis* 3D-NLFEA 2.7.2. Dalam software

ini digunakan constitutive material beton Material beton yang didasarkan pada plasticity fracture concrete model (Piscesa dkk, 2016) (Piscesa dkk, 2018) dan mengolah data dan meshing dari SALOME 8.3.0. didalam perencanaan modelan balok menggunakan Beton  $f_c$ '30 MPa memiliki E- 24303 MPa dengan rasio poisson  $\nu$ -0,3 sedangkan density 2200. Sedangkan *Steel plate* memiliki E- 200000 MPA dan  $\nu$ -0,3 dengan berdasarkan dari Von Mises.

Beton berserat baja ini dalam pencampurannya diasumsikan dengan secara teracak kedalam beton dan ditetapkan tertanam. Serat baja dimodelkan sebagai material tambahan. Sedangkan beton dimodelkan sebagai elemen padat. Pada constitutive model untuk nilai FRC diberi nilai 2 sehingga dalam proses running beton tersebut sudah dalam keadaan balok berserat baja. Pada parameter *Steel Fiber Reinforced Concrete* yang dimasukkan dalam model balok berserat baja ditunjukkan pada Tabel 4.14, 4.15 dari tersebut dibagi menjadi bagian yaitu *plain concrete* dan *steel fiber* merupakan diusulkan oleh peneliti yang tercantum dalam panduan 3DLFEA.

Data parameter *plain concrete*, berupa parameter optimasi dengan memuat pendekatan inverse analysis menggunakan 3DNLFEA dimana berupa parameter *Fracture Energy* (GF), lebar retak bukaan beton ( $W_o$ ), FT, C1, C2, jumlah elemen (LT) (Tabel 4.14).

Tabel 4. 14 Input data *plain concrete*

parameter <i>Plain Concrete</i>	
Fracture energy	0.045 kN/mm
Lebar bukaan retak beton ( $W_o$ )	0.179 mm
FT	3.69 mm
C1	3
C2	6.940
Jumlah element (LT)	5

Data parameter *Steel Fiber* dengan *volumetric fraction 0.5%* berupa parameter optimasi dengan memuat menggunakan 3DNLFEA dimana berupa parameter A, B, SCALE\_Y, WP, SHIFT, dan SCALE\_X (Tabel 4.15)

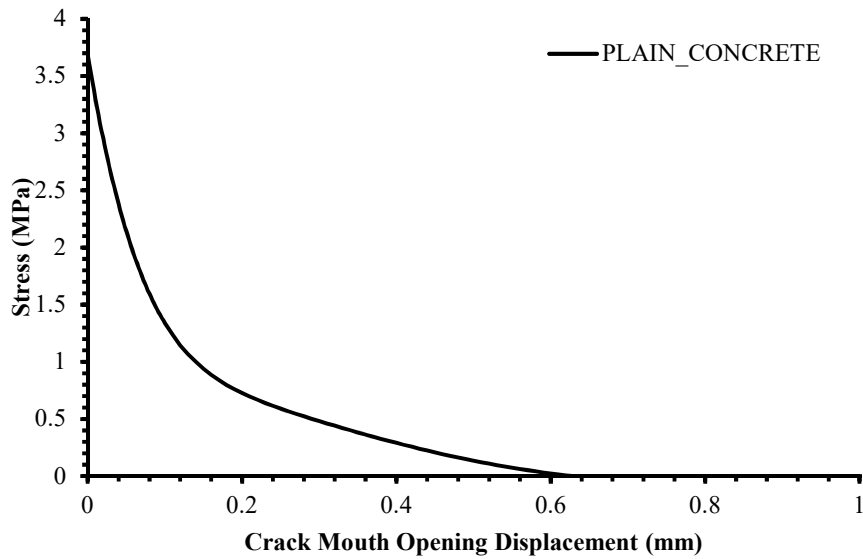
Tabel 4. 15 Input parameter *steel fiber volumetric fraction*

<i>Parameter Steel Fiber</i>				
Parameter	0.5%	1%	1.5%	2%
A	0.35	0.375	0.4	0.425
B	1.5	1.5	1.5	1.5
SCALE_X	0.025	0.025	0.025	0.025
WP	0.001	0.001	0.001	0.001
SHIFT	0.015	0.015	0.015	0.015
SCALE_X	0.45	0.4	0.35	0.3

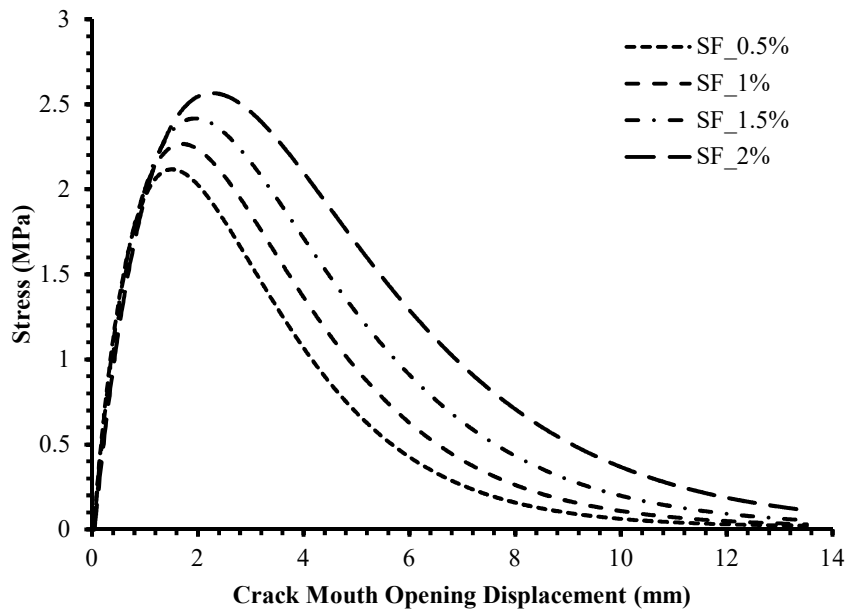
Dimana pengaruh parameter A yaitu terhadap load semakin tinggi nilai A maka akan semakin tinggi nilai load tetapi memiliki semakin tinggi juga pengaruh terhadap getas, parameter B yaitu berpengaruh terhadap load semakin tinggi parameter B semakin tinggi nilai *load*, parameter SCALE\_Y yaitu berpengaruh terhadap load semakin tinggi parameter B semakin tinggi nilai load, parameter WP yaitu memiliki pengaruh terlalu telalu tinggi terhadap nilai load sehingga ditetapkan 0.001, parameter SHIFT yaitu memiliki pengaruh terhadap nilai total terhadap *Plain concrete* dan *Steel fiber* sehingga ditetapkan dengan nilai 0.015, parameter SCALE\_X yaitu berpengaruh terhadap daktailnya semakin besar nilainya SCALE\_X maka semakin daktail pada balok berserat baja dan juga memiliki pengaruh yang kecil terhadap nilai *load*.

Sesuai usulan sebagai (Amin and Foster 2016) kurva *plain concrete* pada tegangan *tensile softening* yang dimodelkan pada gambar 4.19 dengan rumus pendekatan  $\sigma(w) = c_{ifct} e^{-c_2 w}$ . Pada gambar tersebut adalah *inverse analysis* yang sangat dipengaruhi oleh *fracture energy* (GF) dan nilai C1 dan C2. Nilai ini berpengaruh pada pre-crack pada beton.



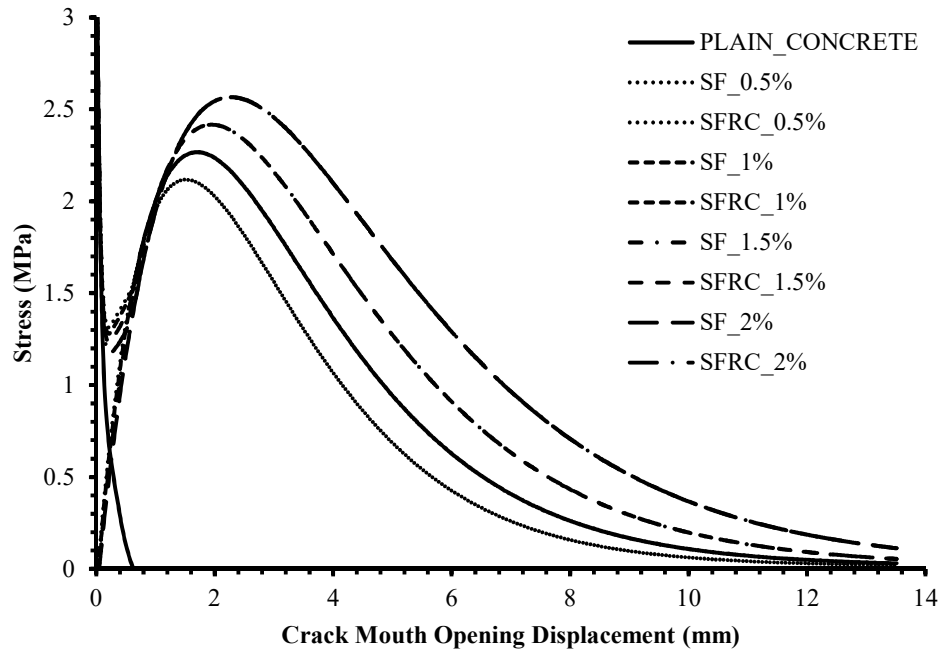


Gambar 4. 19 *Plain concrete* pada parameter balok berserat baja  
 Data input untuk steel fiber adalah usulan dari (J. Zhang and Stang 1998). Yang ditunjukkan pada gambar 4.20 Data tersebut didapatkan dari pendekatan rumus  $\sigma_f(w) = (1 - (\frac{(1-A.wp)}{\max(-w.scal_x)} - \frac{A}{e^{(B(\text{Max}(w.scale_x)wp))}}) \times \max(\frac{w.scale_x.shif}{wp.scale_x})$  dengan dilakukan coba coba dikarenakan metode pengujian yang sedikit berbeda. Sehingga hasil dari analisa pendekatan dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 *Steel fiber* pada Parameter Balok Berserat Baja

Dalam kedua parameter plain concrete dan steel fiber kombinasikan dilakukan yang di ambil dari rumus pendekatan dari (Amin,2015)  $\sigma(w) = \sigma_c(w) + \sigma_f(w)$ . sehingga didapatkan hasil seperti pada Gambar 4. 21.



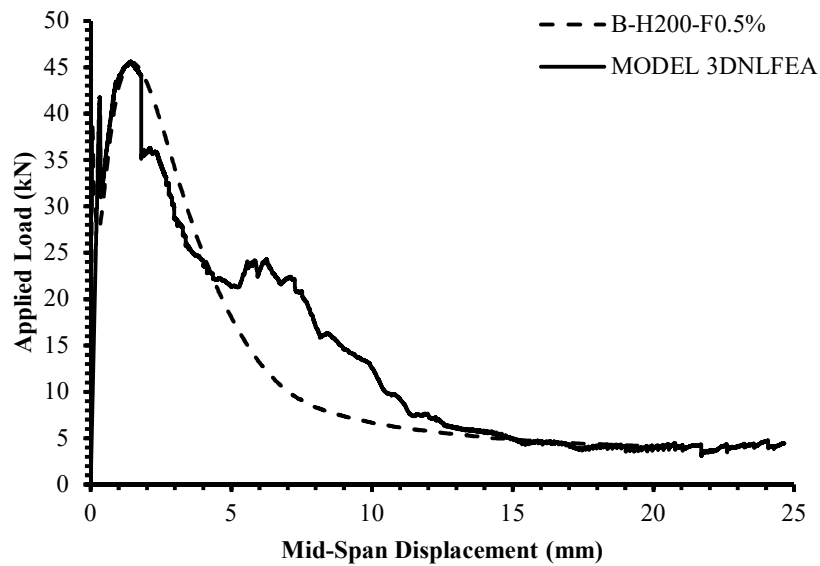
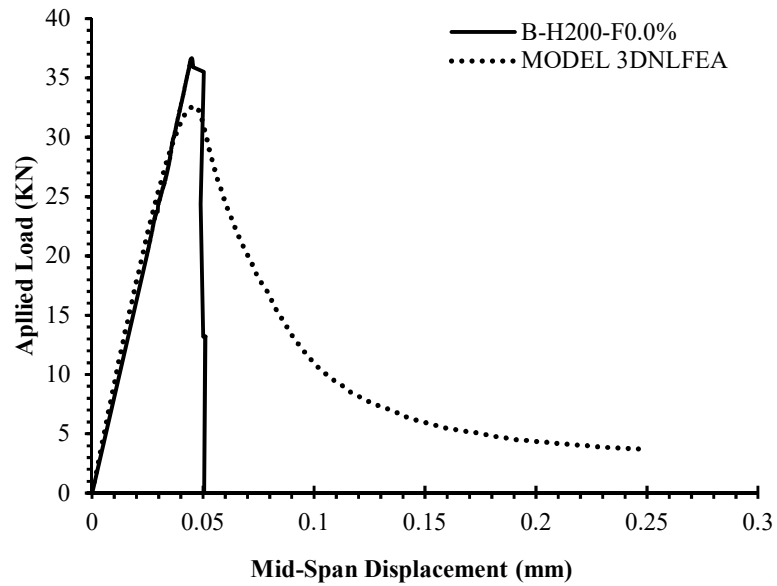
Gambar 4.21 Parameter *steel fiber reinforced concrete* digunakan pada software 3DNLFEA.

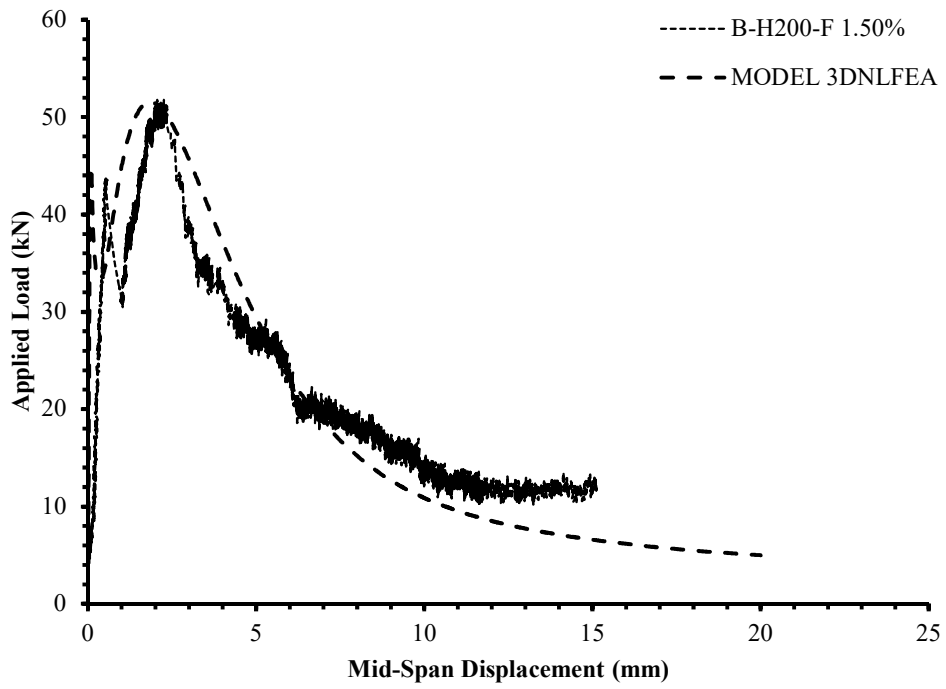
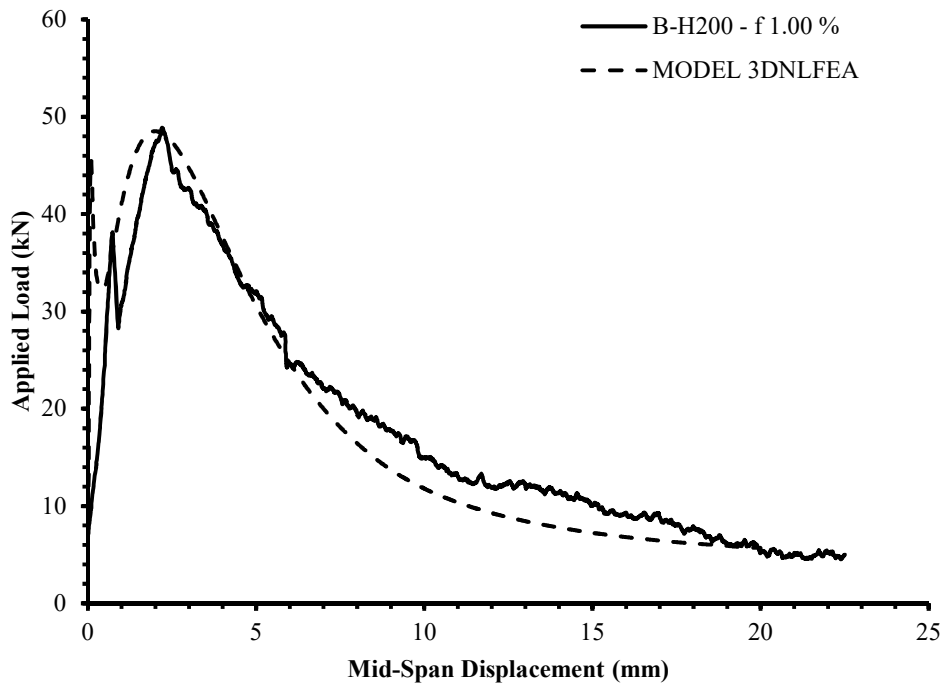
Dalam software 3D-NLFEA untuk *boundary condition* pada balok berserat baja dimodelkan dengan arah sumbu *global ZXY* dan arah sumbu global *ZY*, dan *load* pada atas tengah balok beton pada karena pengujian ini menggunakan *three bending point* dengan asumsikan dengan gaya displacement dengan besar increment 0.001 karena harus detail dalam ditiap pembebanannya. Menggunakan model *steel fiber reinforced concrete* (SRFC) dengan 3D-NLFEA 2.7.2 bisa dipakai untuk memodelkan Balok Berserat Baja.

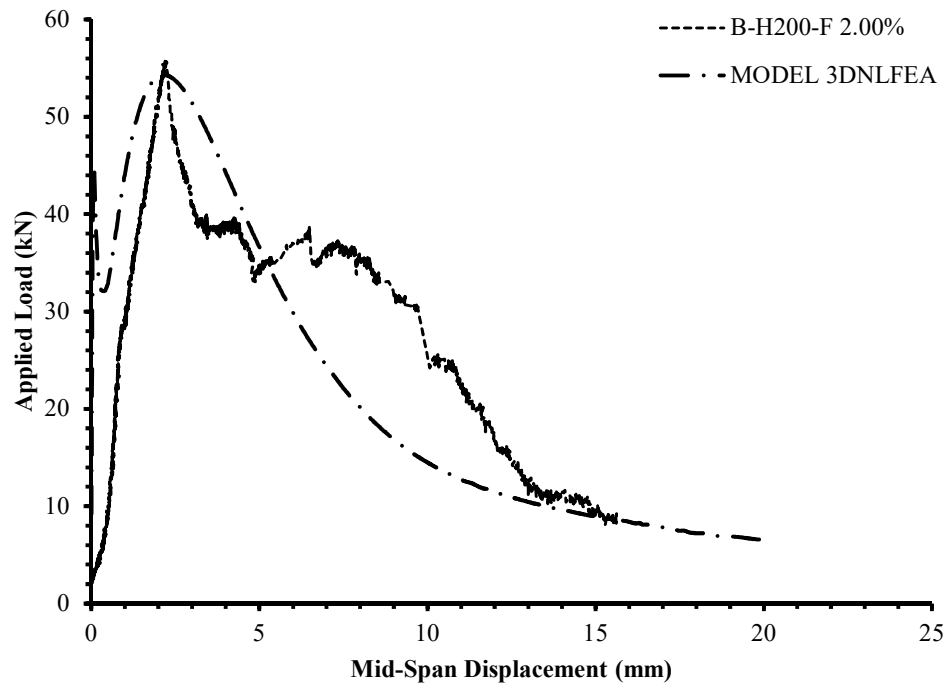
#### 4.6.2 Kurva P Load vs Displacement

Kurva hubungan antara beban dengan *displacement* yang terjadi di tengah bentang hasil pemodelan balok berserat baja dengan variasi volume 0% hingga 2% dan serta ukuran balok dengan hasil pengujian laboratorium pada Gambar 4.22. Secara garis besar, 3D-NLFEA memiliki pola yang sama dengan hasil eksperimen. Kurva

dimulai dengan kondisi elastis dan dilanjutkan dengan proses plastifikasi (pelelehan). Saat fase elastis model 3D-NLFEA dan hasil eksperimen memiliki kekakuan dan daktailitas yang sama. Kondisi berjalan sampai selesai. Setelah mencapai beban ultimit, model 3DNLFEA meningkat yang lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimen. Setelah elastis memasuki fase plastis dimana model 3DNLFEA dan eksperimen memiliki daktailitas yang berbeda ini disebabkan karena pengaruh penyebaran serat.







Gambar 4. 22 Perbandingan load midspan displacement balok eksperimen dan hasil model 3D-NLFEA .

Tabel 4.16 Beban ultimit balok berserat baja hasil eksperimen dan model 3DNLFEA

Benda uji	VF	Beban ultimate		Eksp/Model
		Eksperimen	Model 3D-NLFEA	
B-H200-F-0%	0.0%	36.67	32.65	1.12
B-H200-F-0.5%	0.5%	45.61	46.37	0.98
B-H200-F-1%	1.0%	48.48	48.53	0.99
B-H200-F-1.5%	1.5%	51.75	51.54	1.004
B-H200-F-2%	2.0%	55.06	54.29	1.014
Mean				1.024
COV				0.054

Model finite element mampu memperkirakan perbedaan yang signifikan antara perilaku lentur balok pada variasi serat baja dan beton polos, pada Gambar 4.22 menunjukkan bahwa beton yang diperkuat serat mampu menghambat perilaku

softening dan pertumbuhan retak hingga mencapai titik kritis. Hasil pada Tabel 4.16. Menunjukkan bahwa pada hasil dari beban ultimate dari eksperimen dan model 3D-NLFEA menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda.

#### 4.6.3 Perilaku Balok Berserat Baja Menggunakan 3D-NLFEA

Setelah dalam permodelan geometry dan meshing menggunakan SALOME 8.3.0 dan software *3 Dimension Non-Linear Finite Element Analysis* 3DNLFEA 2.7.2 dalam proses constitutive material hingga running dan pengambilan hasil load dan displacement. Pada kali ini untuk mengamati perilaku dari balok berserat baja setelah selesai running menggunakan ParaView 9.8.0. pada Gambar 4.23 Adalah hasil dari hasil setelah running dengan pengamatan perilaku retak dan pengujian beton serat baja.



(a) pola retak 3D-NLFEA

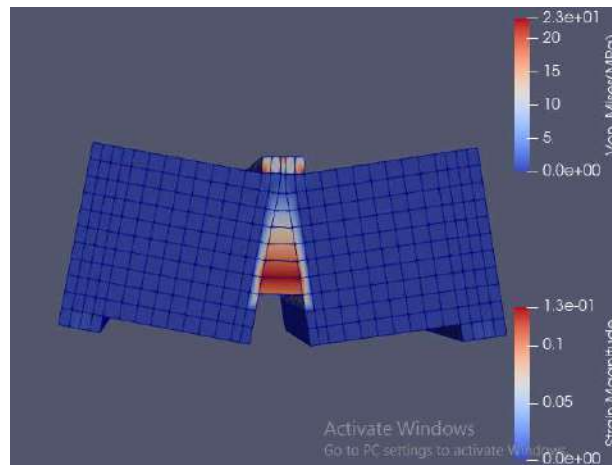


(b) pola retak eksperimen

Gambar 4. 23 Pola Retak Dengan Pengujian *Three Bending Point*

Pada pengujian balok berserat baja terlihat retakan pada takikan berbeda dengan pengujian pada eksperimen langsung pada pendekatan *Finite Element Analysis* pola retak seperti dipaksa retak pada element tersebut. Pola satu retak pada tengah beton pengaruh bukaan terbesar yaitu terjadi pada ujung atas takikan sehingga dari awal mula *crack* (retak) dipasang perubahan lebar retak (CMOD). Merambat ke kearah pembebanan pada *steel plate* pada elemen yang merambat dapat dilihat pada Gambar 4.24 Terlihat begitu kuat dalam menahan beban. Terlihat pada pembebanan menggunakan *three bending point* jadi pengujian menggunakan satu steel plate jadi dikarenakan steel plate yang terlalu keras pada arah beton yang tetap datar dan terlihat terjadi chrusing antara steel plate dengan beton.

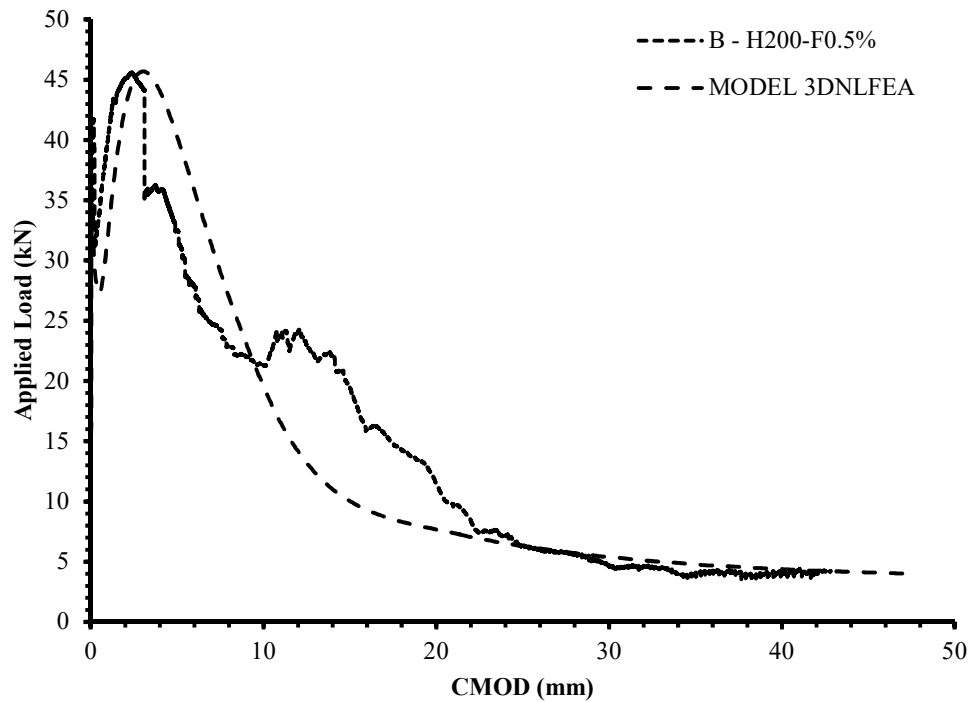
Pengaruh takikan pada beton berserat baja juga diamati dari sisi retaknya sehingga dapat diambil nilai perubahan lebar retak (CMOD). Data load tekan balok berserat baja diambil pada *line steel plate* di Gambar 4.28.



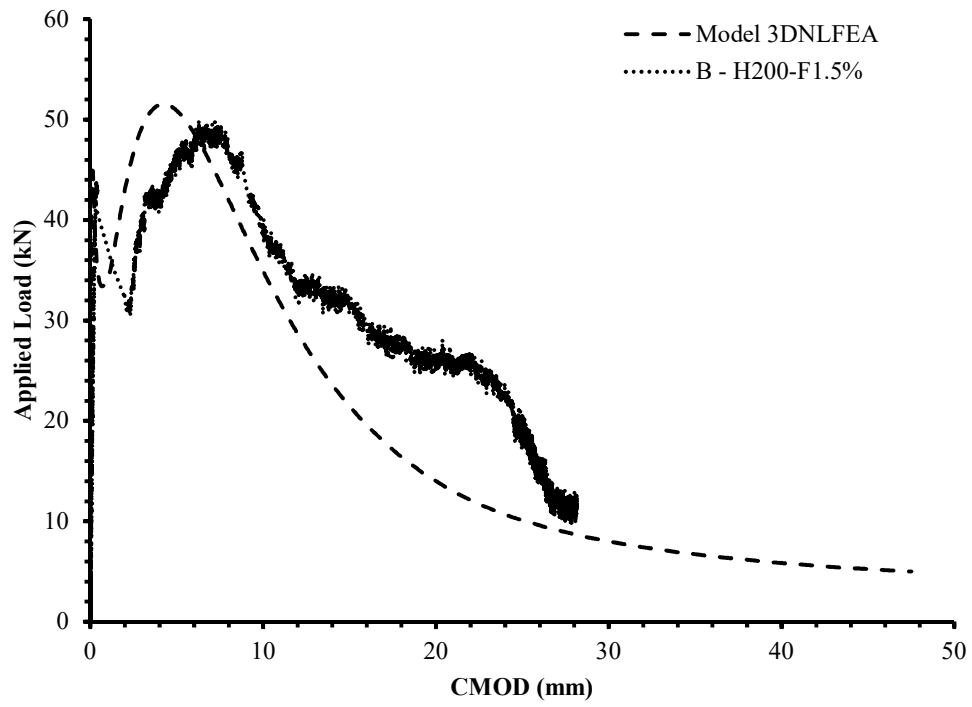
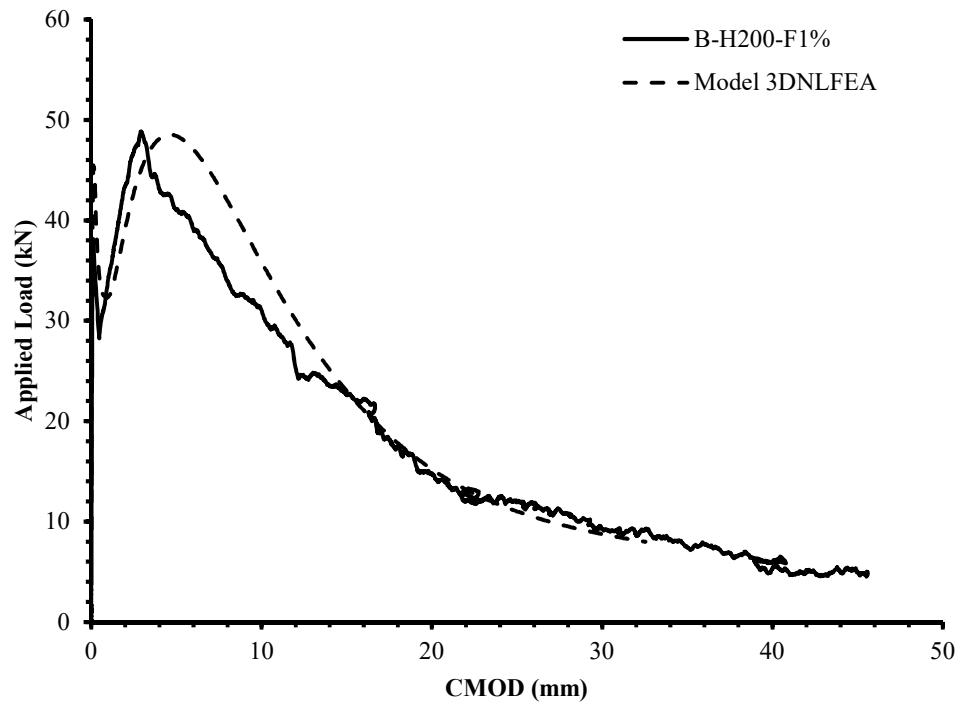
Gambar 4. 24 Penampilan perubahan lebar retak dengan model

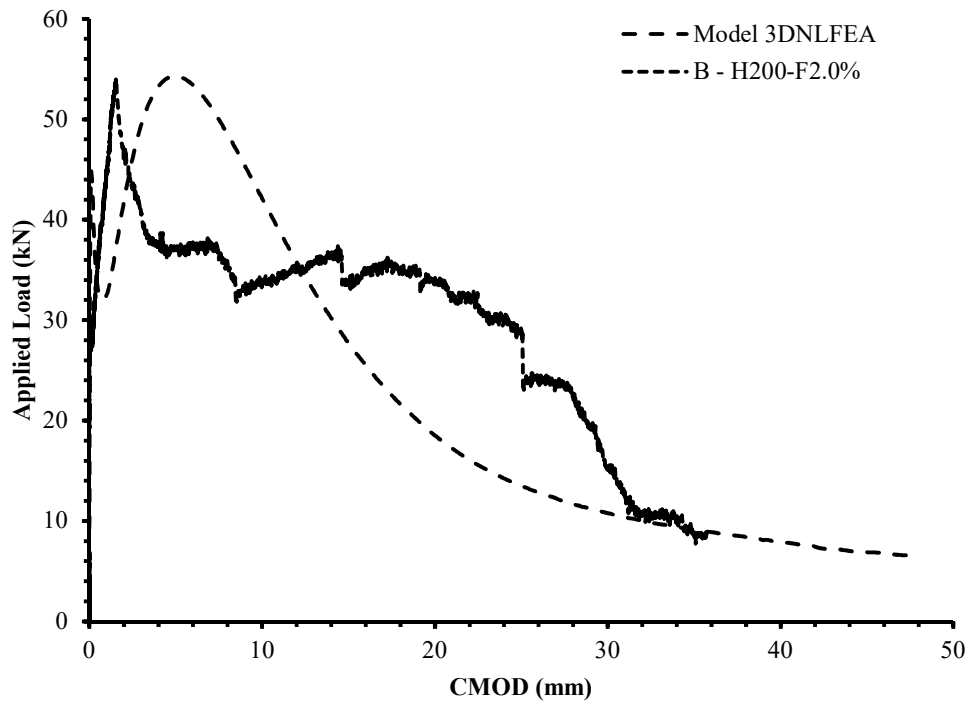
Data dari paraview ini diambil perubahan lebar retak beton berserat baja diplot pada ujung titik *notched* sehingga terjadi perubahan lebar retak pada tengah bentang oleh kurva pada Gambar 4.24. pada gambar tersebut terlihat bahwa retakan terjadi merambat ke arah pembenanan. Hasil perubahan lebar retak yang diambil dari paraview akan diplot dengan hasil beban dari running 3DNLFEA dan didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.25. Hasil pengujian (Gambar 4.25a) menunjukkan bahwa akibat penambahan variasi volume serat 0.5 % pada spesimen B-H200-F 0.5% beban nilai load saat ultimate sebesar 46.24 kN dengan hasil

eksperimen/model sebesar 0.984. (Gambar 4.25) sedangkan akibat penambahan variasi volume serat 1% pada spesimen B – H200 – F1% beban nilai tegangan puncak 49.08 kN dengan hasil eksperimen/model sebesar 0.999. (Gambar 4.25c) akibat penambahan variasi volume serat 1.5 % pada spesimen B-H200-F 1.5% beban nilai load saat ultimate sebesar 51.54 kN dengan hasil eksperimen/model sebesar 0.989. (Gambar 4.25d) sedangkan akibat penambahan variasi volume serat 2 % pada spesimen B – H200 – F2% beban nilai tegangan puncak 54.28 kN dengan hasil eksperimen/model sebesar 1.014. Hasil COV pada tabel 41.8 eksperimen dan model finite element didapatkan sebesar 0.014.









Gambar 4. 25 Kurva tegangan dan perubahan lebar retak (CMOD).

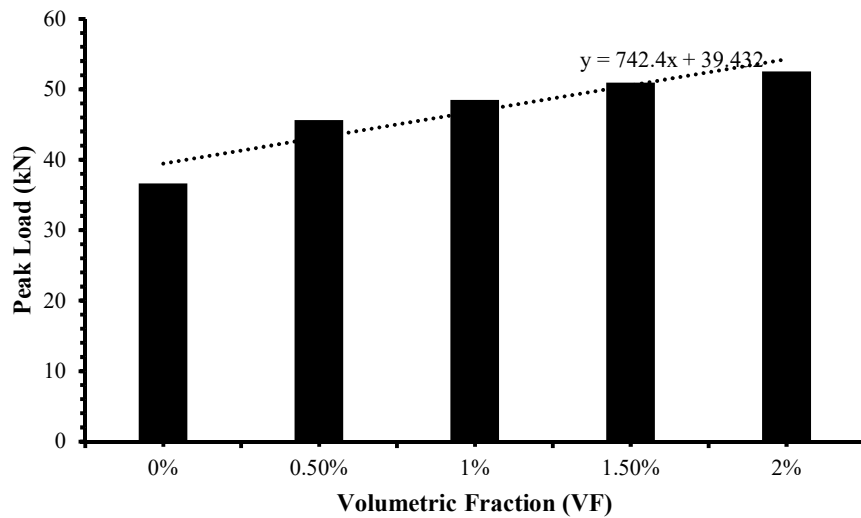
Tabel 4.16 Beban ultimit balok berserat baja hasil eksperimen P-CMOD dan model 3DNLFEA.

Benda uji	VF	Beban ultimate		Eksp/Model
		Eksperimen	Model 3D-NLFEA	
B-H200-F-0.5%	0.5%	45.61	46.37	0.984
B-H200-F-1%	1.0%	48.48	48.53	0.999
B-H200-F-1.5%	1.5%	50.97	51.54	0.989
B-H200-F-2%	2.0%	55.06	54.28	1.014
Mean				0.996
COV				0.014

## 4.7 Optimasi

Dengan menggunakan semua hasil eksperimen dan melakukan analisis pada semua data, suatu rumus pendekatan telah diusulkan (dalam studi ini) sebagai berikut yang bergantung pada *volumetric fraction* (VF).

### 4.7.1 Peak Load

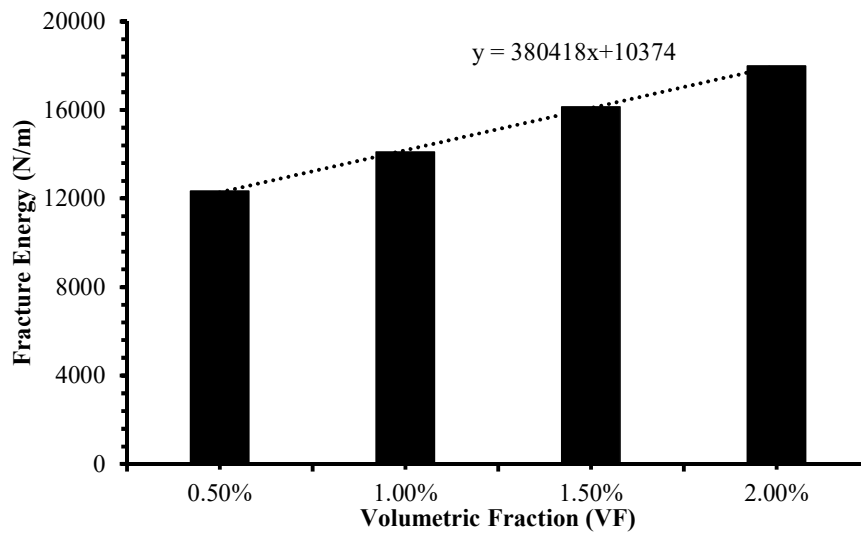


Gambar 4. 26 hubungan *peak load* dengan *volumetric fraction*

Pada Gambar 4.26 Dengan menggunakan analisa fungsi linier hubungan *peak load* dan *volumetric fraction* didapat rumus pendekatan sebagai berikut

$$P = 742.4 V_f + 39.432$$

#### 4.7.2 Fracture Energy



Gambar 4. 27 hubungan *fracture energy* dengan *volumetric fraction*

Pada Gambar 4.27 Dengan menggunakan analisa fungsi linier hubungan *fracture energy* dan *volumetric fraction* didapat rumus pendekatan sebagai berikut:

$$P = 390418V_f + 10374 \text{ (N/m)}$$

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimen dan permodelan numerik beton polos dan menggunakan serat baja dengan pengujian *three bending point*, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Kinerja serat baja terhadap silinder compression dan splitting test

Hasil pengujian tekan pada beton silinder SFRC menunjukkan bahwa terjadi peningkatan terhadap nilai *peak load* sebesar 1-10 % tiap penambahan serat baja tiap sebesar 0.5% sedangkan pengujian tarik belah silinder memperlihatkan hasil bahwa penambahan serat baja sangat efektif hal ini bisa dilihat dari kuat belah tarik naik dengan rata rata 28%.

2. Efek serat pada pada balok terhadap fracture energy

Balok berserat baja dengan menambahkan notched dilakukan pengujian *three bending point*. Dari hasil pengujian dapat dihitung nilai *fracture energy* dari masing balok, pada balok berserat baja dengan *volumetric fraction* 0.5% nilai *fracture energy* sebesar 12320.66 N/mm dan pada balok berserat baja dengan *volumetric fraction* 1% adalah sebesar 14088.33 N/m pada balok berserat baja dengan *volumetric fraction* 1.5% adalah sebesar 16126.03 N/m dan pada balok berserat baja dengan *volumetric fraction* 2% adalah sebesar 17981.73N/m peningkatan nilai *fracture energy* yang didapatkan linier.

3. Efek volumetric terhadap fracture energy dan peak load

Dari semua hasil eksperimen dan melakukan analisis linier pada semua data, diusulkan suatu rumus pendekatan antara *fracture energy* dan peak load terhadap pengaruh *volumetric fraction*. Rumus pendekatan *fracture energy* adalah  $P = 380418V_f + 10374 \text{ N/m}$  dan rumus pendekatan *peak load* adalah  $P = 742.4 V_f + 39.432$

4. Hasil verifikasi antara permodelan analisa numerik dan eksperimen

Balok dengan penambahan serat baja ini sangat mempengaruhi pada pasca beban ultimate serat baja berfungsi supaya balok dengan pengujian *three bending point* menahan beban yang diberikan sehingga tidak getas seperti balok polos. Kinerja

dari serat baja ini yang dianalisa dengan numerik menggunakan 3DNLFEA. Hasil Model 3DNLFEA menunjukkan balok dengan serat baja dapat meningkatkan kekuatan pada beban ultimate dengan perbandingan hasil eksperimen dan analisa numerik pada *load - midspan displacement* dengan mean 1.024 dan nilai COV sebesar 0.054 sedangkan pada *Load – Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)* dengan mean 0.996 dan nilai COV sebesar 0.014.

## 5.2 Saran

Konstruksi bangunan didaerah rawan gempa perlu mendapat perhatian khusus dalam kekuatan tariknya. Kerusakan akibat retak dapat mengurangi kekuatan struktur terutama kekuatan tarik. Berdasarkan hasil eksperimen dan pendekatan dengan finite element 3DNLFEA pada penelitian ini, dapat diberi masukan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan perilaku *Steel Fiber* mampu memperbaiki kinerja balok pada tarik sehingga membuat balok menjadi lebih daktail.
2. Penggunaan *steel fiber* pada plat untuk saat ini mungkin lebih efektif terhadap pada manfaat steel fiber untuk kekuatan tarik posisi *steel fiber* yang berlawanan arah dengan pembebanan.
3. Dalam mix desain *steel fiber* yang sudah dibuat pada eksperimen direncanakan secara acak, namun perlu disarankan adanya penelitian lanjutan sehingga penambahan kekuatan tarik *steel fiber* terhadap beton bisa digunakan secara maksimal
4. Model 3DNLFEA menghasilkan respon *load – midspan Displacement* yang lebih kaku dibandingkan dengan eksperimen. Dengan hasil ini dibutuhkan pengaturan yang lebih lanjut dari model konsitutive *steel fiber* yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amin, Ali. 2015. "Post Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete: From Material to Structure," no. April: ``.
- Amin, Ali, and Stephen J. Foster. 2016. "Predicting the Flexural Response of Steel Fibre Reinforced Concrete Prisms Using a Sectional Model." *Cement and Concrete Composites* 67: 1–11.
- Barros, J. A.O., and J. Sena cruz. 2001. "Fracture Energy of Steel Fiber-Reinforced Concrete." *Mechanics of Composite Materials and Structures* 8 (1): 29–45.
- Bažant, Zdeněk P., and B. H. Oh. 1983. "Crack Band Theory for Fracture of Concrete." *Matériaux et Constructions* 16 (3): 155–77.
- Boulekbache, Bensaid, Mostefa Hamrat, Mohamed Chemrouk, and Sofiane Amziane. 2016. "Flexural Behaviour of Steel Fibre-Reinforced Concrete under Cyclic Loading." *Construction and Building Materials* 126 (April 2018): 253–62.
- Cornelissen, H A W, D A Hordijk, and H W Reinhardt. 1986. "Two-Dimensional Theories of Anchorage Zone Stresses in Post-Tensioned Prestressed Beams." *HERON* 31 (2): 45–56.
- Cuenca, Estefanía. 2014. *On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforce Concrete. Springer Theses.*
- Darwin, David, Shawn Barham, Rozalija Kozul, and and Shuguang Luan. 2001. "Fracture Energy of High-Strength Concrete." *ACI Materials Journal* 98 (Sept-Oct 2001): PP. 410-417.
- Dhakal, R. P., C. Wang, and J. B. Mander. 2005. "Behavior of Steel Fibre Reinforced Concrete in Compression." *ISISS 2005: Innovation & Sustainability of Structures, Vol 1-3*, no. October 2015: 1803–13.
- Ezeldin, By A Samer, Associate Member, and Perumalsamy N Balaguru. 1993. "Normal- and high - strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression" 4 (170): 415–29.
- FIB model Code. 2013. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Germany.
- Hillerborg, A., M. Modéer, and P. E. Petersson. 1976. "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics

- and Finite Elements.” *Cement and Concrete Research* 6 (6): 773–81.
- Hoover, Christian G., and Zdeněk P. Bažant. 2014. “Cohesive Crack, Size Effect, Crack Band and Work-of-Fracture Models Compared to Comprehensive Concrete Fracture Tests.” *International Journal of Fracture* 187 (1): 133–43.
- Köksal, Fuat, Yuşa Şahin, Osman Gencil, and İlhami Yiğit. 2013. “Fracture Energy-Based Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes.” *Engineering Fracture Mechanics* 107: 29–37.
- Kooiman, A. G., C. Van Der Veen, and J. C. Walraven. 2000. “Modelling the Post-Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design Purposes.” *Heron* 45 (4): 275–307.
- Kwon, Seung Hee, Zhifang Zhao, and Surendra P. Shah. 2008. “Effect of Specimen Size on Fracture Energy and Softening Curve of Concrete: Part II. Inverse Analysis and Softening Curve.” *Cement and Concrete Research* 38 (8–9): 1061–69.
- Lee, Seong Cheol, Jae Yeol Cho, and Frank J. Vecchio. 2011. “Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Verification.” *ACI Materials Journal* 108 (Sept-Oct): pp.526-535.
- . 2013. “Simplified Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Elements in Tension.” *ACI Materials Journal* 110 (4): 403–12.
- Li, Biao, Lihua Xu, Yuchuan Shi, Yin Chi, Qi Liu, and Changning Li. 2018. “Effects of Fiber Type, Volume Fraction and Aspect Ratio on the Flexural and Acoustic Emission Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete.” *Construction and Building Materials* 181: 474–86.
- Löfgren, Ingemar. 2005. *Fibre-Reinforced Concrete for Industrial Construction - A Fracture Mechanics Approach to Material Testing and Structural Analysis. Doktorsavhandlingar Vid Chalmers Tekniska Högskola.*
- Lok, Tat-Seng, and Jin-Song Pei. 1998. “Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete.” *Journal of Material in Civil Engineering*, no. May: 86–97.
- López-Buendía, Angel M., María Dolores Romero-Sánchez, Verónica Climent, and Celia Guillem. 2013. “Surface Treated Polypropylene (PP) Fibres for Reinforced Concrete.” *Cement and Concrete Research* 54 (April 2020):29–35.



- Luo, Jun Wei. 2014. "Behaviour and Analysis of Steel Fibre-Reinforced Concrete under Reversed Cyclic Loading," 315.
- Meda, A, G A Plizzari, and V Slowik. 2001. "Fracture of Fiber Reinforced Concrete Slabs on Grade." *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 1013–20.
- Mier, Jan G.M. van. 2017. *Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models. Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models..*
- Nanakorn, P., and H. Horii. 1996. "Fracture Mechanics-Based Design Method for SFRC Tunnel Linings." *Proceedings of the Materials Engineering Conference* 1 (1): 819–28.
- Neville, Adam M. 1997. "Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete." *ACI Materials Journal* 94 (1): 71–74.
- NG, T. S., T. N. S. Htut, and S. J. Foster. 2012. "Fracture of Steel Fibre Reinforced Concrete - the Unified Variable Engagement Model." *Uniciv Report No. R-420*, no. January: 1–117.
- Petersson, P. E. 1981. *Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials*. CODEN: LUTVDG. Vol. 1006.
- Piscesa, B., Attard, M. M., & Samani, A. K. (2016). *A lateral strain plasticity model for FRP confined concrete. Composite Structures*, 158, 160–174.
- Piscesa, B., Attard, M. M., Samani, A. K., dan Tangaramvong, S. (2017): Plasticity constitutive model for stress-strain relationship of confined concrete, *ACI Materials Journal*, 114(2), 361–371.
- Piscesa, Bambang, Mario M. Attard, Dwi Prasetya, and Ali K. Samani. 2019. "Modeling Cover Spalling Behavior in High Strength Reinforced Concrete Columns Using a Plasticity-Fracture Model." *Engineering Structures* 196 (June): 109336.
- Prisco, Marco Di, Matteo Colombo, and Daniele Dozio. 2013. "Fibre-Reinforced Concrete in Fib Model Code 2010: Principles, Models and Test Validation." *Structural Concrete* 14 (4): 342–61.
- Şahin, Yuşa, and Fuat Köksal. 2011. "The Influences of Matrix and Steel Fibre Tensile Strengths on the Fracture Energy of High-Strength Concrete." *Construction and Building Materials* 25 (4): 1801–6.

- Shah, Surendra P., and BV Rangan. 1971. "Fiber Reinforced Concrete Properties." *America Concrete Institut* 68 (2): 126–35.
- Singh, Harvinder. 2017. *Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design*. *Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design*. <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter05/JSCE-VIFCEA Joint Seminar Papers>.
- Soroushian, Parviz, and Cha Don Lee. 1990. "Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete." *ACI Materials Journal* 87 (5): 433–39.
- Stang, H, and V C Li. 2004. "Classification of Fiber Reinforced Cementitious Materials for Structural Applications." *6th RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB 2004*, no. September: 197–218.
- Taerwe, L., and A. Van Gysel. 1996. "Influence of Steel Fibers on Design Stress-Strain Curve for High-Strength Concrete." *Journal of Engineering Mechanics* 122 (8): 695–704.
- Thomas, Job, and Ananth Ramaswamy. 2007. "Mechanical Properties of Steel Fibre Concrete." *J. Mater. Civ. Eng* 19 (May): 385–92.
- Uchida, Y., N Kurihara, K Rokugo, and W Koyanagi. 1995. "Determination of Tension Softening Diagrams Various Kinds of Concrete By Means of Numerical Analysis." *Fracture Mechanis of Concrete Structure, FRAMCOS-2*, 17–30.
- Vonk, Rene. 1992. "Softening of Concrete Loaded in Compression Citation." Technische Universiteit Eindhoven.
- Voo, Jackie Yen Lei, and Stephen Foster. 2003. "Variable Engagement Model for the Design of Fibre Reinforced Concrete Structures." *Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III*, no. Art. 2.
- Zhang, J., and H. Stang. 1998. "Applications of Stress Crack Width Relationship in Predicting The Flexural Behavior of Fibre Reinforced Concrete." *Cement and Concrete Research* 28 (March): 439–452.
- Zhang, Shengli, Changsuo Zhang, and Lin Liao. 2019. "Investigation on the Relationship between the Steel Fibre Distribution and the Post-Cracking Behaviour of SFRC." *Construction and Building Materials* 200: 539–50.
- Zhao, Zhifang, Seung Hee Kwon, and Surendra P. Shah. 2008. "Effect of Specimen

Size on Fracture Energy and Softening Curve of Concrete: Part I. Experiments and Fracture Energy.” *Cement and Concrete Research* 38 (8–9): 1049–60.

Zollo, Ronald F. 1997. “Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 Years of Development.” *Cement and Concrete Composites* 19 (2): 107–22.

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

# Lampiran

## Material Steel Fiber Dramix 65/60<sup>+</sup>



**Dramix®**



### DATASHEET

#### DRAMIX 4D 65/60BG



The Dramix® 4D series was designed with optimal serviceability and performance in mind. Its extra-high tensile strength and special 4D<sup>®</sup> anchorage are engineered specifically to be used in high strength concrete classes up to C70.

High strength concrete + extra-high tensile wire + small diameter + optimized 4D<sup>®</sup> hook gives exceptional post crack behavior. Dramix® 4D series is the cost effective solution for:

- Segmental tunnel lining
- Joint-free seamless floors
- Comblabslabs merging the benefits of fiber and conventional reinforcement
- Pavements
- Marine structures
- Systems with moderate-to-high structural requirements
- Floors in biologically and chemically isolated environments
- Secondary reinforcement in segmental tunnel linings
- Precast structures - others

Fibres are glued for homogeneous distribution and easy mix.

Bekaert offers extensive technical assistance in helping to determine the most suitable fibre type, optimal dosage and the appropriate concrete mix for a wide range of applications. For further information, contact your local support.

For recommendations on handling, dosing and mixing visit [www.bekaert.com/dosingdramix](http://www.bekaert.com/dosingdramix). For EC Declaration of Performance visit [www.bekaert.com/doc/Dramix\\_4D](http://www.bekaert.com/doc/Dramix_4D).

Bekaert reserves the right to modify, discontinue or rebrand this product at any time with or without notice. All information contained herein is general and may not be complete. For further details, please contact the local Bekaert office.

#### CHARACTERISTICS

##### Material properties

Nom. tensile strength:	1.600 (N/mm <sup>2</sup> )
Young's modulus:	200.000 (N/mm <sup>2</sup> )
Strain at ultimate strength:	0,8%

##### Geometry

Fibre family	4D	
Length (l)	60 mm	
Diameter (d)	0,90 mm	

Aspect ratio (l/d)	65	
--------------------	----	--

##### Minimum EN 14889-1 dosage

15 kg/m<sup>3</sup>

##### Fibre network

2.999 m <sup>3</sup> at 15 kg/m <sup>3</sup>
3.149 fibres/kg

##### Dramix® family

- 3D Typical SFRC applications
- 4D Supreme serviceability control
- 5D Advanced structural applications

Tensile strength	5D	4D	3D
Wire ductility	5D	4D	3D
Anchorage strength	5D	4D	3D

#### PRODUCT CERTIFICATES \*



\*Product certificates are plant specific.

#### PRODUCT CONFORMITY

Dramix® conforms to ASTM A820, EN 14889-1 and ISO 13270 Class A.

#### SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

#### PACKAGING



#### HANDLING



Dramix® 4D 65/60BG, PH1/E

# Lampiran

## Material Semen OPC



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
 INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
 DIREKTORAT RISET DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT  
 Gedung Pusat Riset Lantai Lobby, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111  
 Telp. (031) 0315953759, Fax (031) 5955793, PABX : 1404,1405,1330  
 Email: [lpmm@its.ac.id](mailto:lpmm@its.ac.id) Website: [www.its.ac.id/lpmm](http://www.its.ac.id/lpmm)

*Lampiran 1 dari hal 1*

No: T/ /IT2.IV.1/TU.00.08/2020

No.	Nama Contoh	Jenis Uji (Unsur)	Pembacaan 1	Pembacaan 2	Satuan	Metode Pengujian
1	Semen	Al	1,1	1,2	%	X-Ray Fluorescence*
		Si	5,7	5,7		
		S	1,1	1,1		
		K	0,53	0,54		
		Ca	84,99	84,94		
		Ti	0,37	0,37		
		V	0,02	0,03		
		Mn	0,1	0,1		
		Fe	5,59	5,59		
		Cu	0,11	0,11		
		Zn	0,062	0,062		
		Sr	0,13	0,12		
Ba	0,1	0,1				

No.	Nama Contoh	Jenis Uji (Unsur)	Pembacaan 1	Pembacaan 2	Satuan	Metode Pengujian
1	Semen	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	2,1	%	X-Ray Fluorescence*
		SiO <sub>2</sub>	9,7	9,4		
		SO <sub>3</sub>	2,2	2,2		
		K <sub>2</sub> O	0,48	0,47		
		CaO	80,25	80,2		
		TiO <sub>2</sub>	0,38	0,36		
		V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02		
		MnO	0,078	0,078		
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8	4,8		
		CuO	0,085	0,085		
		ZnO	0,046	0,048		
		SrO	0,089	0,088		
BaO	0,05	0,07				

\* Hasil bersifat Semikuantitatif

Koordinator Teknis

Vita Yuliana, S.Si  
 NPP. 1990201822404

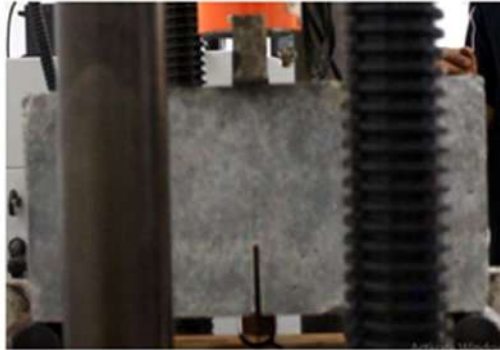
FR/LEL-ITS/7-B-01 Laporan Hasil Pengujian

Ter/Rev/TP-3/0/10032020

LAMPIRAN

## GAMBAR POLA RETAK BALOK KONTROL DAN BALOK STEEL FIBER

### 1. Balok Normal



(a) setup pengujian



(b) pre-crack benda uji

### 2. Balok Steel Fiber



(a) Saat pre – crack (Fase-1)

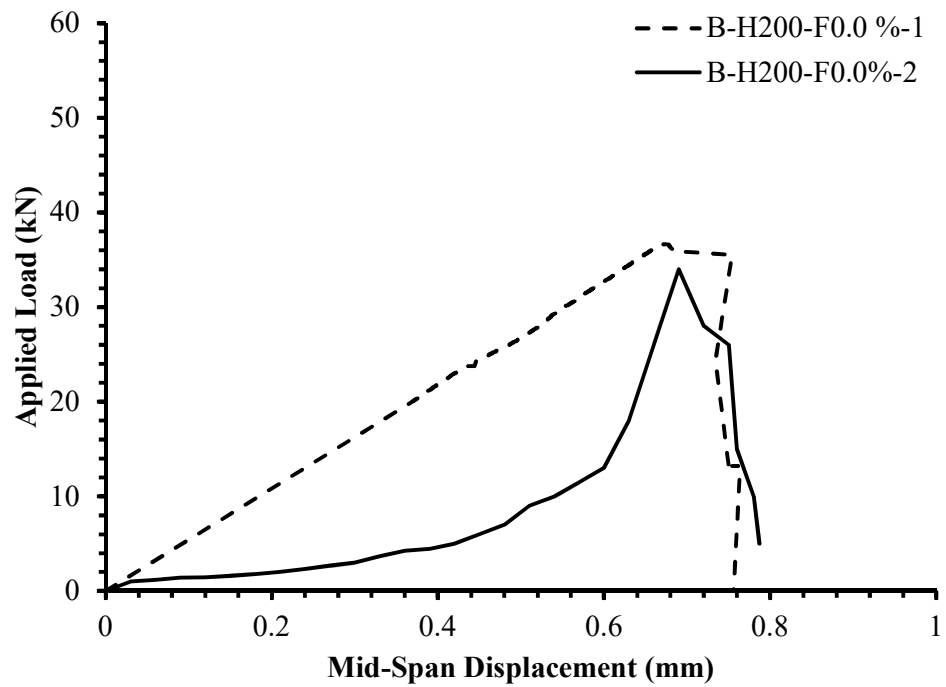


(b) Pasca beban utimete (Fase – 2)



(c) Saat terjadi gesekan dan penarikan serat (Fase – 3)

LAMPIRAN  
HASIL PENGUJIAN BALOK

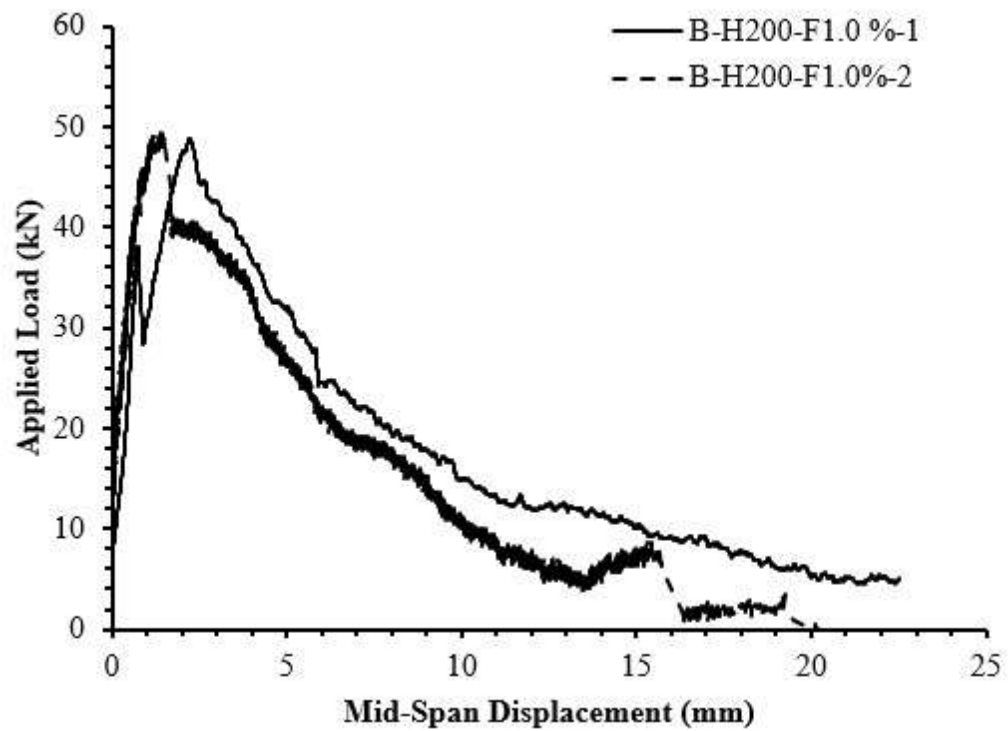


Gambar pengujian balok spesimen B-H200-F0.0%

Tabel Rekapitulasi

Nama Spesimen	Kondisi pre-crack		Kondisi ultimit		Daktilitas
	P (kN)	$\delta$ (mm)	P (kN)	$\delta$ (mm)	
B-H200-F 0.0%-1	36.67	0.674	36.67	0.67	1.00
B-H200-F 1.0%-2	34.00	0.69	34.00	0.69	1.00

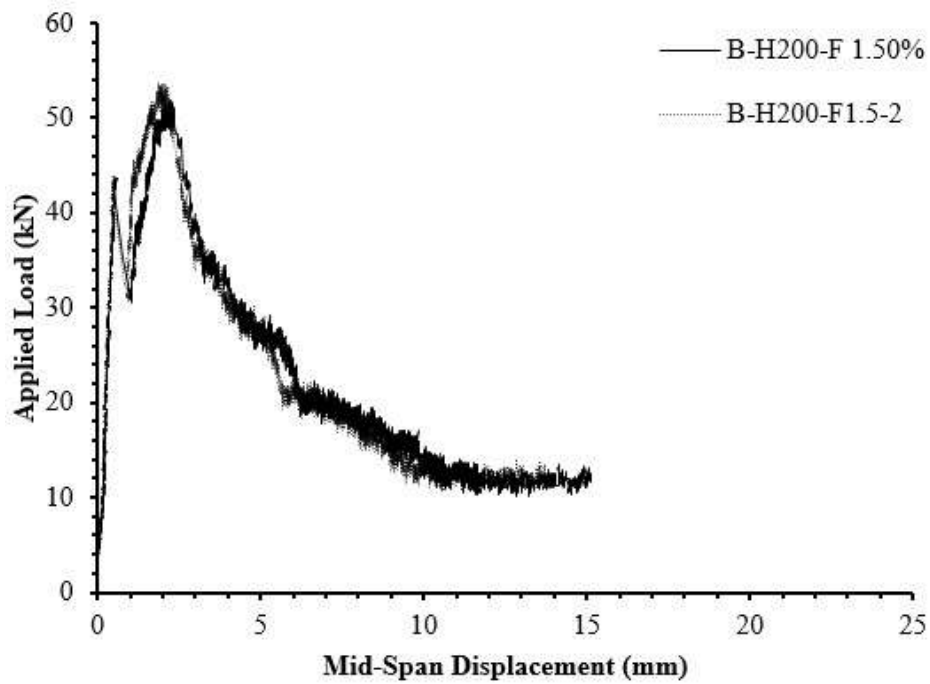




Gambar pengujian balok spesimen B-H200-F1.0%

Tabel Rekapitulasi

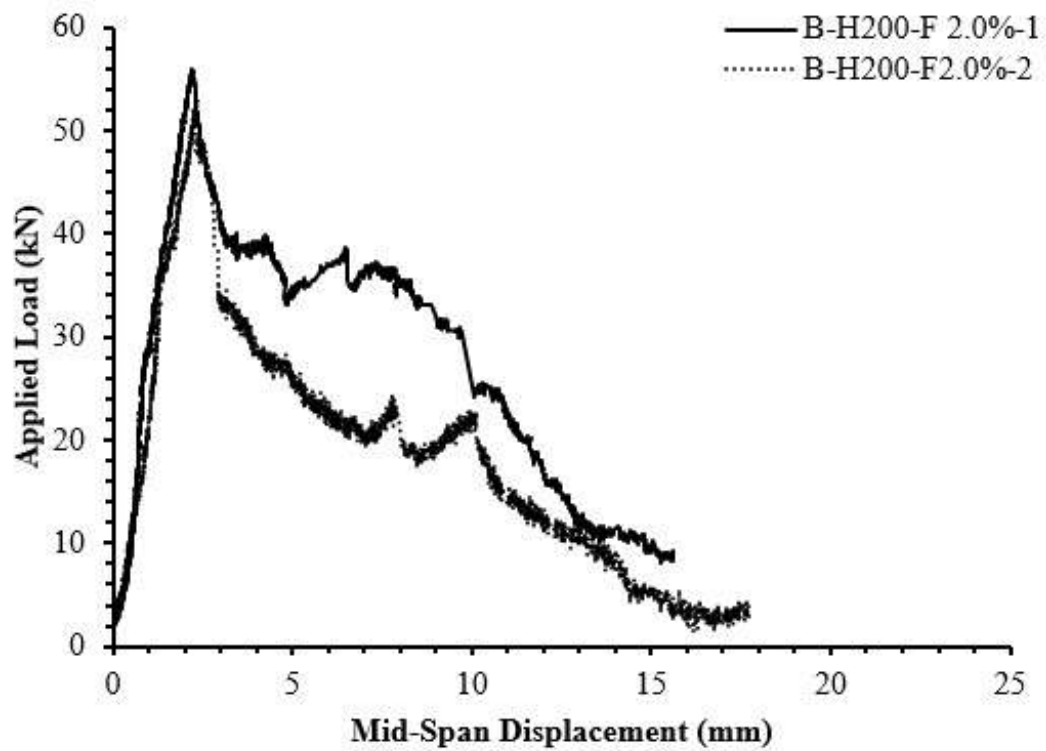
Nama Spesimen	Kondisi pre-crack		Kondisi ultimit		Daktilitas
	P (kN)	$\delta$ (mm)	P (kN)	$\delta$ (mm)	$\frac{\delta_{ultimit}}{\delta_{pre-crack}}$
B-H200-F 1.0%-1	39.76	0.74	48.48	2.85	3.86
B-H200-F 1.0%-2	40.08	0.472	49.00	1.14	3.25



Gambar pengujian balok spesimen B-H200-F1.5%

Tabel Rekapitulasi

Nama Spesimen	Kondisi pre-crack		Kondisi ultimit		Daktilitas
	P (kN)	$\delta$ (mm)	P (kN)	$\delta$ (mm)	$\delta_{ultimit} / \delta_{pre-crack}$
B -H200-F 1.5%-1	43.48	0.522	50.97	2.18	3.95
B-H200-F 1.5%-2	43.43	0.528	51.61	2.11	3.25



Gambar pengujian balok spesimen B-H200-F2%

Tabel Rekapitulasi

Nama Spesimen	Kondisi pre-crack		Kondisi ultimit		Daktilitas $\delta_{ultimit} / \delta_{pre-crack}$
	P (kN)	$\delta$ (mm)	P (kN)	$\delta$ (mm)	
B -H200-F 2%-1	35.02	1.299	52.55	2.34	0.56
B-H200-F 2%-2	32.743	1.152	52.19	2.21	3.25

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIOGRAFI PENULIS



Nama : Maksum  
Tempat, Tanggal lahir : Trenggalek, 17 Desember 1993  
Jenis Kelamin : Laki-Laki  
Alamat: Dsn/ Ds. Karangturi, Kec. Munjungan, Kab.  
Trenggalek, Jawa Timur  
Email : [maksumozil@yahoo.co.id](mailto:maksumozil@yahoo.co.id)  
Pendidikan Formal : SD Negeri 1 Karangturi (tamat 2006)  
SMP Negeri 1 Munjungan (tamat 2009)  
SMA Negeri 2 Trenggalek (tamat 2012)  
Institut Teknologi Nasional Malang (2016)  
Publikasi Jurnal : *Materials Science and Engineering*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*