



TESIS - RC 185401

**STUDI PERILAKU KOLOM BETON BERTULANG YANG  
DIKEKANG MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCE  
POLYMER (CFRP)* DENGAN BEBAN AKSIAL EKSENTRIS.**

**ANGGA BAYU CHRISTIANTO**  
03111850020006

Dosen Pembimbing  
Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D.  
Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T.  
Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.

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





TESIS - RC 185401

**STUDI PERILAKU KOLOM BETON BERTULANG YANG  
DIKEKANG MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCE  
POLYMER (CFRP)* DENGAN BEBAN AKSIAL EKSENTRIS.**

**ANGGA BAYU CHRISTIANTO  
03111850020006**

**Dosen Pembimbing  
Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D.  
Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T.  
Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.**

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





THESIS - RC 185401

**STUDY OF CARBON FIBER REINFORCE POLYMER (CFRP)  
CONFINED REINFORCED CONCRETE COLUMN UNDER  
ECCENTRIC LOAD**

**ANGGA BAYU CHRISTIANTO**  
03111850020006

Supervisor  
Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D.  
Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T.  
Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.

Civil Engineering Department  
Faculty Of Civil, Planning, and Geo Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**ANGGA BAYU CHRISTIANTO**

**NRP: 03111850020006**

Tanggal Ujian: 6 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui Oleh:

**Pembimbing :**

1. Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D. ....

NIP: 19840318 200812 1 002

2. Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T. ....

NIP: 19730208 199802 1 001

3. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D. ....

NIP: 19630605 198903 1 004

**Penguji :**

1. Dr. Candra Irawan, S.T., M.T. ....

NIP: 19900823 201504 1 001

2. Harun Alrasyid, S.T., M.T., Ph.D. ....

NIP: 19830808 200812 1 005

Kepala Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan



**Dr.techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.**

**NIP: 19721202 199802 1 001**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**STUDI PERILAKU KOLOM BETON BERTULANG YANG  
DIKEKANG MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCE  
POLYMER (CFRP)* DENGAN BEBAN AKSIAL EKSENTRIS**

**ABSTRAK**

Nama Mahasiswa : Angga Bayu Christianto  
NRP : 03111850020006  
Dosen Pembimbing : 1. Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D.  
2. Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T.  
3. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.

**ABSTRAK**

Seiring dengan berjalannya waktu, seringkali terjadi peningkatan beban, berubahnya fungsi struktur dan struktur beton yang telah mengalami kerusakan, sehingga mengakibatkan terjadinya penurunan kapasitas struktur. Oleh karena itu struktur tersebut memerlukan perkuatan untuk mengembalikan atau meningkatkan kapasitasnya. Perkuatan struktur dapat dilakukan dalam beberapa metode. salah satunya adalah penyelubungan dengan material ringan komposit yaitu *Carbon Fiber Reinforce Polymer*. CFRP adalah serat karbon yang didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% berat karbon. Serat karbon merupakan jenis material yang ringan dan mempunyai kuat tarik yang tinggi. Dalam tesis ini terfokuskan pada pemodelan dan perilaku *confinement* kolom beton menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* yang dibebani dengan beban aksial eksentris. Analisa model menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)*, selanjutnya hasil analisa dibandingkan dengan hasil eksperimental yang tersedia dalam literatur dan dari analisa didapatkan hasil yang cukup baik.

**Kata Kunci** : Beban Eksentris, Kolom, Pengekangan, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**STUDY OF CARBON FIBER REINFORCE POLYMER (CFRP)  
CONFINED REINFORCED CONCRETE COLUMN UNDER  
ECCENTRIC LOAD**

**ABSTRACT**

By : Angga Bayu Christianto  
Student Identity Number : 03111850020006  
Supervisor : 1. Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D.  
2. Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T.  
3. Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D.

**ABSTRACT**

Due to increasing load capacity of old building there for its necessary. Therefore, the structure requires reinforcement to restore or increase its capacity. Structural strengthening can be done in several methods. One of them is confined with a lightweight composite material, named Carbon Fiber Reinforce Polymer. CFRP is carbon fiber that is defined as fiber that contains at least 90% carbon weight. Carbon fiber is a lightweight material with high tensile strength. This tesis focuses on modelling and confinement behavior of concrete columns using Carbon Fiber Reinforced Polymer that is loaded with eccentric axial loads. Analysis of the model uses the Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA), then the results of the analysis are compared with the experimental results available in the literature and the results of the analysis are quite close.

**Key words :** Carbon Fiber Reinforced Polymer, Confinement, Eccentric Load, Concrete, Column.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS .....	i
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.2.1. Permasalahan Utama .....	2
1.2.2. Detail Permasalahan .....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat Studi .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1. Umum .....	5
2.2. Perkuatan Struktur .....	8
2.3. Fiber Reinforced Polymer (FRP) .....	9
2.3.1 Carbon .....	9
2.3.2 Glass .....	10
2.3.3 Aramid .....	11
2.4. Keunggulan dan Kekurangan FRP .....	11
2.4.1 Keunggulan FRP .....	11
2.4.2 Kekurangan FRP .....	11
2.5. Model Konstitutif .....	12
2.6. Perumusan Model Plastis .....	14
2.7.1 Beban Permukaan .....	14
2.7.2 Fungsi Kenaikan .....	16
2.7.3 Fungsi Penurunan .....	17
2.7.4 Parameter Modulus Lateral ( $E_L$ ) .....	18

2.7.5	Perumusan Laju Perubahan Plastis ke Arah Lateral.....	20
2.7.6	Fungsi Potensial Plastis .....	23
2.7.7	<i>Return Mapping Algorithm</i> .....	28
BAB 3	METODE PENELITIAN .....	31
3.1	Bagan Alir Penyelesaian Penelitian .....	31
3.2	Pengumpulan Data dan Studi Literatur .....	32
3.3	Pemodelan Kolom.....	37
3.4	Merekap dan Menginput Data Geometri Hasil Pemodelan .....	40
3.5	Analisa Perilaku Model.....	42
3.6	Analisa Hasil.....	43
3.7	Validasi Hasil.....	44
3.8	Kesimpulan .....	45
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	47
4.1.	Umum .....	47
4.2.	Material Properties Kolom.....	47
4.3.	Pemodelan dan Pembebanan Kolom .....	47
4.4.	Kontrol Kesesuaian Hasil .....	49
4.4.1	Spesimen dari Bisby dan Ranger (2010) .....	49
4.4.2	Spesimen dari Fitzwilliam dan Bisby (2010) .....	63
4.4.3	Spesimen dari Wu dan Jiang (2013).....	74
4.4.4	Spesimen dari Jiang et al. (2014).....	79
BAB 5	KESIMPULAN .....	97
5.1.	Kesimpulan .....	97
5.2.	Saran .....	98
DAFTAR	PUSTAKA.....	99
BIODATA	.....	103

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Interaction diagrams of column .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Strengthening the column using concrete jacketing .....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Strengthening the column using steel jacketing .....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Strengthening the column using carbon fiber reinforced polymer ..	10
<b>Gambar 2.5</b>	Strengthening the column using glass fiber reinforced polymer .....	10
<b>Gambar 2.6</b>	Strengthening the column using aramid fiber reinforced polymer ..	11
<b>Gambar 2.7</b>	Uniaxial plastic dilation rate at peak .....	21
<b>Gambar 2.8</b>	Plastic dilation rate prediction .....	22
<b>Gambar 2.9.</b>	Stress-strain prediction for biaxial compression using constant and nonconstant plastic dilation rate.....	28
<b>Gambar 2.10.</b>	Illustration of the return direction from initial plastic compaction to plastic dilation .....	29
<b>Gambar 3.1</b>	Flow chart .....	31
<b>Gambar 3.2</b>	Flow chart (continue).....	32
<b>Gambar 3.3</b>	Side view and cross section .....	33
<b>Gambar 3.4</b>	Stress - strain curve of CFRP material .....	36
<b>Gambar 3.6</b>	Stress - strain curve of rebar material .....	36
<b>Gambar 3.7</b>	Stress - strain curve of steel plate material .....	37
<b>Gambar 3.8</b>	Model of column element which is confinement by using CFRP ...	38
<b>Gambar 3.9</b>	Model of concrete element .....	38
<b>Gambar 3.10</b>	Model of CFRP element .....	39
<b>Gambar 3.11</b>	Model of steel plate element.....	39
<b>Gambar 3.12</b>	Full model of the solid element (concrete, CFRP and steel plate)	39
<b>Gambar 3.13</b>	Model of rebar element.....	40
<b>Gambar 3.14</b>	Meshing of solid element.....	40
<b>Gambar 3.15</b>	Input excel file in the 3D-NLFEA program .....	42
<b>Gambar 3.16</b>	Result of the 3D-NLFEA program .....	43
<b>Gambar 3.17</b>	Example of the column to be processed by paraview program .....	43

<b>Gambar 3.18</b> Result of the column that have been processed by paraview program .....	44
<b>Gambar 3.19</b> Example of axial load–lateral displacement curves of columns with load eccentricities. ....	44
<b>Gambar 4.1</b> Column specimen details .....	48
<b>Gambar 4.2</b> Specimen meshed model of a typical column under eccentric loading .....	49
<b>Gambar 4.3.</b> Schematic eccentric load from C5 specimen .....	51
<b>Gambar 4.4.</b> The C5 specimen volume with the EL contour.....	51
<b>Gambar 4.5</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C5 with 5 mm load eccentricities. ....	52
<b>Gambar 4.6.</b> Schematic eccentric load from C10 specimen .....	53
<b>Gambar 4.7.</b> The C10 specimen volume with the EL contour.....	53
<b>Gambar 4.8</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C10 with 10 mm load eccentricities. ....	54
<b>Gambar 4.9.</b> Schematic eccentric load from C20 specimen .....	55
<b>Gambar 4.10.</b> The C20 specimen volume with the EL contour.....	55
<b>Gambar 4.11</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C20 with 20 mm load eccentricities. ....	56
<b>Gambar 4.12.</b> Schematic eccentric load from C30 specimen .....	57
<b>Gambar 4.13.</b> The C30 specimen volume with the EL contour.....	57
<b>Gambar 4.14</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C30 with 30 mm load eccentricities. ....	58
<b>Gambar 4.15.</b> Schematic eccentric load from C40 specimen .....	59
<b>Gambar 4.16.</b> The C40 specimen volume with the EL contour.....	59
<b>Gambar 4.17</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C40 with 40 mm load eccentricities. ....	60
<b>Gambar 4.18</b> Ductility index calculation of column – tipe C30 .....	61
<b>Gambar 4.19</b> Ductility index calculation of column – tipe C40 .....	61
<b>Gambar 4.20.</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Bisby dan Ranger (2010).....	63
<b>Gambar 4.21.</b> Schematic eccentric load from 300C-1-0-A specimen .....	64



<b>Gambar 4.22.</b> The 300C-1-0-A specimen volume with the EL contour .....	65
<b>Gambar 4.23</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 300C-1-0-A with 20 mm load eccentricities .....	66
<b>Gambar 4.24.</b> Schematic eccentric load from 600C-1-0-A specimen.....	67
<b>Gambar 4.25.</b> The 600C-1-0-A specimen volume with the EL contour .....	67
<b>Gambar 4.26</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 600C-1-0-A with 20 mm load eccentricities .....	68
<b>Gambar 4.27.</b> Schematic eccentric load from 900C-1-0-A specimen.....	69
<b>Gambar 4.28.</b> The 900C-1-0-A specimen volume with the EL contour .....	70
<b>Gambar 4.29</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 900C-1-0-A with 20 mm load eccentricities .....	71
<b>Gambar 4.30.</b> Schematic eccentric load from 1200C-1-0-B specimen .....	71
<b>Gambar 4.31.</b> The 1200C-1-0-B specimen volume with the EL contour.....	72
<b>Gambar 4.32</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 1200C-1-0-B with 20 mm load eccentricities .....	73
<b>Gambar 4.33.</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Fitzwilliam and Bisby (2010) .....	74
<b>Gambar 4.34.</b> Schematic eccentric load from A1E10/B1E10 specimen.....	75
<b>Gambar 4.35.</b> The A1E10/B1E10 specimen volume with the EL contour .....	76
<b>Gambar 4.36</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns A1E10/B1E10 with 10 mm load eccentricities .....	77
<b>Gambar 4.37.</b> Schematic eccentric load from A2E10/B2E10 specimen.....	77
<b>Gambar 4.38.</b> The A2E10/B2E10 specimen volume with the EL contour .....	78
<b>Gambar 4.39</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns A2E10/B2E10 with 10 mm load eccentricities .....	78
<b>Gambar 4.40.</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Wu and Jiang (2013).....	79
<b>Gambar 4.41.</b> Schematic eccentric load from L1E10A/L1E10B specimen .....	81
<b>Gambar 4.42.</b> The L1E10A/L1E10B specimen volume with the EL contour ....	81
<b>Gambar 4.43</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E10A/L1E10B with 10 mm load eccentricities .....	82
<b>Gambar 4.44.</b> Schematic eccentric load from L1E20A/L1E20B specimen .....	82

<b>Gambar 4.45.</b> The L1E20A/L1E20B specimen volume with the EL contour .....	83
<b>Gambar 4.46</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E20A/L1E20B with 20 mm load eccentricities .....	83
<b>Gambar 4.47.</b> Schematic eccentric load from L1E30A/L1E30B specimen .....	84
<b>Gambar 4.48.</b> The L1E30A/L1E30B specimen volume with the EL contour .....	84
<b>Gambar 4.49</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E30A/L1E30B with 30 mm load eccentricities .....	85
<b>Gambar 4.50.</b> Schematic eccentric load from L1E40A/L1E40B specimen .....	85
<b>Gambar 4.51.</b> The L1E40A/L1E40B specimen volume with the EL contour .....	86
<b>Gambar 4.52</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E40A/L1E40B with 40 mm load eccentricities .....	87
<b>Gambar 4.53.</b> Schematic eccentric load from L2E10A/L2E10B specimen .....	87
<b>Gambar 4.54.</b> The L2E10A/L2E10B specimen volume with the EL contour .....	88
<b>Gambar 4.55</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E10A/L2E10B with 10 mm load eccentricities .....	89
<b>Gambar 4.56.</b> Schematic eccentric load from L2E20A/L2E20B specimen .....	89
<b>Gambar 4.57.</b> The L2E20A/L2E20B specimen volume with the EL contour .....	90
<b>Gambar 4.58</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E20A/L2E20B with 20 mm load eccentricities .....	90
<b>Gambar 4.59.</b> Schematic eccentric load from L2E30A/L2E30B specimen .....	91
<b>Gambar 4.60.</b> The L2E30A/L2E30B specimen volume with the EL contour .....	91
<b>Gambar 4.61</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E30A/L2E30B with 30 mm load eccentricities .....	92
<b>Gambar 4.62.</b> Schematic eccentric load from L2E40A/L2E40B specimen .....	92
<b>Gambar 4.63.</b> The L2E40A/L2E40B specimen volume with the EL contour .....	93
<b>Gambar 4.64</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E40A/L2E40B with 40 mm load eccentricities .....	94
<b>Gambar 4.65.</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Jiang et al. (2014) on specimen using 1layer CFRP wrap ..	95
<b>Gambar 4.66.</b> Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Jiang et al. (2014) on specimen using 2layer CFRP wrap ..	95

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Basic Input Geometry and Material Properties .....	34
<b>Tabel 3.2</b> Input Material Properties for The Concrete Material .....	35
<b>Tabel 3.3.</b> Input Material Properties for The CFRP Material.....	35
<b>Tabel 3.4</b> Input Material Properties for The Rebar Material.....	36
<b>Tabel 3.5</b> Input Material Properties for The Steel Plate Material .....	37
<b>Tabel 3.6</b> Defining The Concrete Material.....	40
<b>Tabel 3.7</b> Defining The Rebar Material .....	41
<b>Tabel 3.8</b> Defining The Steel Plate Material .....	41
<b>Tabel 3.9</b> Defining The CFRP Material .....	41
<b>Tabel 3.10</b> Label and Element Node Coordinate of Concrete, CFRP and Plate Definition .....	41
<b>Tabel 3.11</b> Label and Element Node Coordinate of Rebar Definition .....	41
<b>Tabel 3.12</b> Label and Node Coordinate of Restraint Definition .....	41
<b>Tabel 3.13</b> Label and Node Coordinate of Displacement Definition.....	42
<b>Tabel 4.1.</b> Property Specimen Data from Bisby and Ranger (2010).....	50
<b>Tabel 4.2.</b> Total Number of Elements and Node from Specimens.....	50
<b>Tabel 4.3.</b> Property Specimen Data from Fitzwilliam and Bisby (2010).....	64
<b>Tabel 4.4.</b> Total Number of Elements and Node from Specimens.....	64
<b>Tabel 4.5.</b> Property Specimen Data from Wu and Jiang (2013). .....	75
<b>Tabel 4.6.</b> Total Number of Elements and Node from Specimens.....	75
<b>Tabel 4.7.</b> Property Specimen Data from Jiang et al. (2014). .....	80
<b>Tabel 4.8.</b> Total Number of Elements and Node from Specimens.....	80

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “Studi Perilaku Kolom Beton Bertulang yang Dikekang Menggunakan *Carbon Fiber Reinforce Polymer (CFRP)* Dengan Beban Aksial Eksentris”. Penulis memilih judul tersebut agar dapat memberikan informasi mengenai perilaku *confinement* kolom beton menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* yang dibebani dengan beban aksial eksentris, serta dapat mengetahui perbandingan antara hasil eksperimental dengan hasil analisa elemen non linear.

Tersusunnya Tesis ini tidak lepas dukungan dan motivasi dari berbagai pihak. Ucapan terimakasih saya sampaikan kepada :

1. Kedua Orang tua, istri dan anak beserta saudara-saudara tercinta, sebagai penyemangat terbesar bagi saya, yang telah banyak memberikan dukungan moril maupun materil, serta doanya.
2. Bapak Bambang Piscesa, S.T., M.T., Ph.D., Dr.techn. Pujo Aji, S.T., M.T. dan Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D. Selaku dosen pembimbing tesis yang telah berkenan meluangkan waktu untuk asistensi pada tesis ini
3. Teman-teman terdekat saya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuan dan saran-saran yang telah diberikan selama proses pengerjaan Tesis ini,

Saya menyadari bahwa dalam penyusunan Tesis ini masih banyak kekurangan, untuk itu saya mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan Tesis ini.

Akhir kata, semoga apa yang saya sajikan dalam laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, penulis, dan semua pihak.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Struktur beton bertulang sudah banyak diaplikasikan pada berbagai sarana dan prasarana umum seperti struktur gedung, jembatan, dan lain sebagainya. Seiring dengan berjalannya waktu, seringkali terjadi peningkatan beban yang harus dipikul suatu struktur bangunan, misalnya struktur gedung yang beralih fungsi, atau struktur beton yang telah mengalami kerusakan, seperti kerusakan yang diakibatkan beban gempa. Dalam konsep kolom kuat balok lemah harus dipahami bahwa kerusakan besar harus terjadi pada area sendi plastis dimana area tersebut berada pada muka balok dan tidak terjadi pada kolom, agar penghuni yang berada pada gedung dapat menyelamatkan diri terlebih dahulu sebelum gedung runtuh (Sumirin 2006). Dalam pernyataan tersebut dapat dijelaskan bila kolom mengalami kerusakan maka dapat menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas struktur dalam menahan beban bahkan dapat menyebabkan keruntuhan struktur secara *brittle*. Oleh karena itu struktur tersebut memerlukan perkuatan untuk meningkatkan kapasitas dalam menahan beban (Soenaryo, Hidayat et al. 2012).

Perkuatan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai rencana. Perkuatan struktur dapat dilakukan dalam beberapa metode. Metode perkuatan struktur bisa dilakukan dengan cara penyelubungan dengan beton atau *Concrete Jacketing*, penyelubungan dengan baja atau *Steel Jacketing* dan penyelubungan dengan material ringan komposit yaitu *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* (Piscesa, Attard et al. 2018).

*Fiber Reinforced polymer (FRP) jacketing/wrapping* merupakan Teknik perkuatan yang sering digunakan untuk memperkuat kapasitas dari kolom beton bertulang (Teng, Chen et al. 2002, Holloway 2008). Peningkatan kekuatan dan daktilitas pada kolom beton bertulang dengan menggunakan FRP *jacketing* untuk pengekanan lateral secara bertahap dapat ditingkatkan. Untuk memungkinkan

desain yang aman dan tepat dari penggunaan FRP *jacket*, banyak penelitian telah dilakukan pada perilaku beton yang menggunakan FRP untuk pengekangan pada kolom (Lin and Teng 2017). Selain itu FRP adalah jenis material yang ringan, mempunyai kuat tarik yang tinggi, dan mudah dalam pelaksanaannya di lapangan (Binici 2008). FRP dapat terbuat dari 3(tiga) bahan komposit, yaitu Carbon, Glass, dan Aramid. Untuk studi kalini dilakukan perkuatan dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP).

CFRP adalah serat karbon yang didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% berat karbon. Serat karbon tidak menunjukkan korosi pada suhu kamar. Fungsi perkuatan dengan system CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas. (Bisby, Dent et al. 2005).

Pada tesis kali ini berfokuskan pada pemodelan dan perilaku pada pengekangan kolom beton dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dibebani dengan beban aksial eksentris, dimana kolom beton diberi pengekangan pada bagian luarnya dengan menggunakan CFRP *jacketing*. Analisis model *non linear* yang akan dilakukan menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)* yang dikembangkan oleh (Piscesa 2017, Piscesa 2018, Piscesa, Attard et al. 2018, Piscesa, Attard et al. 2019) dan untuk mengetahui deformasi visual yang terjadi pada elemen akan menggunakan program ParaView. Hasil tesis ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai perilaku pengekangan kolom beton menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* yang dibebani dengan beban aksial eksentris, serta dapat mengetahui perbandingan antara hasil eksperimental dengan hasil analisa elemen non linear.

## **1.2. Perumusan Masalah**

### **1.2.1. Permasalahan Utama**

Bagaimana melakukan Analisa non linear untuk mendapatkan perilaku hubungan kurva beban dengan perpindahan pada kolom beton yang diberi pengekangan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dibebani dengan beban aksial eksentris.



### **1.2.2. Detail Permasalahan**

1. Bagaimana bentuk hubungan kurva beban dengan perpindahan pada masing-masing kolom yang diinvestigasi menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)*. ?
2. Bagaimana bentuk kontur modulus lateral pada masing-masing kolom yang diinvestigasi menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)* dan program *ParaView*. ?
3. Bagaimana perbandingan antara hasil eksperimental dengan analisa elemen menggunakan program *3D-NLFEA* ?

### **1.3. Tujuan**

Tujuan secara umum studi ini adalah untuk mendapatkan hasil Analisa non linear berupa hubungan kurva beban dengan perpindahan pada kolom beton yang diberi pengekangan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* yang dibebani dengan beban aksial eksentris.

Adapun tujuan secara rinci dari studi ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan bentuk hubungan kurva beban dengan perpindahan pada masing-masing kolom yang diinvestigasi menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)*.
2. Mendapatkan bentuk kontur modulus lateral pada masing-masing kolom yang diinvestigasi menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)* dan program *ParaView*.
3. Mendapatkan hasil perbandingan antara hasil eksperimental dengan analisa elemen menggunakan program *3D-NLFEA*.

### **1.4. Batasan Masalah**

Dalam tesis ini permasalahan akan dibatasi dengan batasan – batasan sebagai berikut :

1. Hanya dilakukan pemodelan pada elemen kolom dengan menggunakan program *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis (3D-NLFEA)*.
2. Tidak melakukan *Cyclic Loading mode*.

3. Tidak menganalisa selain penampang silinder.

### **1.5. Manfaat Studi**

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari thesis ini adalah untuk dapat mengetahui seberapa besar pengaruh pengekangan struktur kolom beton bertulang menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP).

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1. Umum**

Beton sebagai salah satu material yang banyak digunakan pada struktur bangunan sipil mempunyai perilaku yang spesifik yaitu memiliki kuat tarik yang jauh lebih kecil dari kuat tekannya. Oleh karena itu material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kuat tarik besar, seperti baja tulangan atau baja profil sehingga merupakan kesatuan struktur yang komposit beton bertulang (Kanti Pangestuti 2006).

Struktur beton bertulang sudah banyak diaplikasikan pada berbagai sarana dan prasarana umum seperti struktur gedung, jembatan, dan lain sebagainya. Seiring dengan berjalannya waktu, seringkali terjadi peningkatan beban yang harus dipikul oleh suatu struktur bangunan, misalnya struktur gedung yang beralih fungsi, atau struktur beton yang telah mengalami kerusakan, seperti kerusakan yang diakibatkan beban gempa sehingga dapat menyebabkan penurunan kapasitas struktur yang ada. Oleh karena itu struktur tersebut memerlukan perkuatan untuk mengembalikan atau meningkatkan kapasitas dalam menahan beban yang ada (Noorhidana and Purwanto 2012).

Dalam konsep kolom kuat balok lemah harus dipahami bahwa kerusakan besar harus terjadi pada area sendi plastis dimana area tersebut berada pada muka balok dan tidak terjadi pada kolom, karena kolom merupakan komponen utama, maka keruntuhan pada kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya lantai yang bersangkutan atau bahkan merupakan batas runtuh total keseluruhan struktur bangunan (Sumirin 2006). Oleh karena itu, dalam merencanakan struktur kolom harus memperhitungkan secara cermat dengan memberikan cadangan kekuatan lebih tinggi dari pada untuk komponen struktur lainnya, terlebih lagi karena keruntuhan pada kolom yang lebih didominasi keruntuhan tekan tidak memberikan peringatan awal yang cukup jelas (Nawy, Surjaman et al. 1990).

Apabila beban tekan aksial pada kolom bertambah, maka retak akan banyak terjadi di seluruh tinggi kolom pada lokasi-lokasi tulangan transversal. Dalam keadaan batas keruntuhan, selimut beton diluar tulangan transversal akan lepas sehingga tulangan memanjangnya akan mulai kelihatan. Apabila bebannya terus bertambah, maka terjadi keruntuhan dan tekuk lokal (*local buckling*) tulangan longitudinal pada panjang tak tertumpu tulangan transversal. Dapat dikatakan bahwa dalam keadaan batas keruntuhan, selimut beton lepas dahulu sebelum lekatan baja-beton hilang. Dalam hal ini kekuatan kolom dievaluasi berdasarkan prinsip-prinsip sebagai berikut :

1. Distribusi regangan pada tebal kolom bersifat linier.
2. Tidak ada slip antara beton dengan tulangan baja (berarti regangan pada baja sama dengan regangan pada beton).
3. Regangan beton maksimum yang diijinkan pada keadaan gagal adalah 0,003.
4. Kekuatan tarik beton tidak digunakan dalam perhitungan.

Pada umumnya kolom tidak hanya bertugas menahan beban tekan aksial saja, namun pada kenyataannya kolom bertugas menahan kombinasi beban tekan aksial dan momen lentur. Dengan kata lain, kolom harus diperhitungkan untuk menyangga beban tekan aksial dengan eksentrisitas tertentu. Eksentrisitas beban dapat terjadi akibat timbulnya momen yang antara lain disebabkan oleh kekangan pada ujung-ujung kolom yang dicetak secara monolit dengan komponen lain, pemasangan yang kurang sempurna, ataupun penggunaan mutu bahan yang tidak merata. Bahkan sering dijumpai kolom dalam bangunan gedung yang menopang balok-balok sama besar dengan bentang sama, tetapi kolom menerima beban tidak sama berat dari kedua balok karena pola beban yang berbeda.

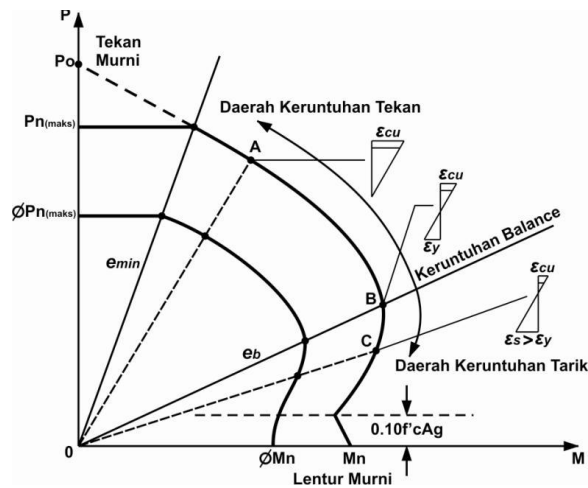
Apabila beban aksial berimpit dengan sumbu memanjang kolom, berarti tanpa eksentrisitas, perhitungan teoritis menghasilkan tegangan tekan merata pada permukaan penampang lintangnya dapat disebut kolom dengan beban aksial tekan eksentrisitas kecil. Perhitungan kuat kolom terhadap beban aksial eksentrisitas kecil dianggap bahwa akibat bekerjanya beban atas (ultimit), beton akan mengalami tegangan sampai nilai  $0,85 f'c$  dan tulangan bajanya akan mencapai tegangan luluh  $f_y$ . Maka kuat beban aksial nominal dengan eksentrisitas kecil dapat dihitung langsung dengan menjumlahkan gaya-gaya dalam dari beton dan tulangan baja

pada saat mengalami tegangan pada tingkat kuat maksimum. Sedangkan untuk kondisi kolom dengan beban aksial tekan eksentrisitas besar, gaya aksial bekerja disuatu tempat berjarak  $e$  tertentu terhadap sumbu memanjang, kolom akan cenderung melentur seiring dengan timbulnya momen  $M=P(e)$ . Sehingga tegangan tekan yang terjadi tidak merata pada seluruh permukaan penampang tetapi akan timbul lebih besar pada satu sisi terhadap sisi lainnya. Jarak  $e$  dinamakan eksentrisitas gaya terhadap sumbu kolom. Dengan perbedaan kondisi diatas, diperlukan pembatasan eksentrisitas minimum yang harus diperhitungkan (Dipohusodo 1994).

Pada dasarnya pola keruntuhan penampang kolom dapat dibagi menjadi dua kondisi awal, yaitu keruntuhan tarik yang diawali dengan lelehnya tulangan yang tertarik dan keruntuhan tekan yang diawali dengan hancurnya beton yang tertekan. Kondisi keseimbangan terjadi apabila keruntuhan diawali dengan lelehnya tulangan yang tertarik atau tulangnya mengalami regangan leleh sekaligus juga hancurnya beton yang tertekan dengan mengalami regangan batasnya (0,003). Perlu ditekankan bahwa dalam setiap masalah analisis, besarnya  $P_{nb}$ ,  $M_{nb}$ , dan juga  $eb$  harus dievaluasi untuk digunakan dalam penyelidikan apakah keruntuhan yang terjadi merupakan keruntuhan tekan atau tarik. Apabila  $P_n$  adalah beban aksial dan  $P_{nb}$  adalah beban aksial pada kondisi keseimbangan, maka :

1. Keruntuhan tarik  $P_n < P_{nb}$ ,  $e > eb$ , tegangan leleh  $f_y$  sebagai tegangan pada tulangan tarik dan tegangan  $f'_s$  pada tulangan tekan dapat lebih kecil atau sama dengan tegangan leleh baja.
2. Keruntuhan seimbang (*balance*)  $P_n = P_{nb}$ .
3. Keruntuhan tekan  $P_n > P_{nb}$ ,  $e < eb$ , tegangan pada tulangan tariknya lebih kecil dari tegangan lelehnya.

Dari pembahasan diatas dapat diduga bahwa kapasitas penampang beton bertulang untuk menahan kombinasi beban tekan aksial dan momen lentur yang sesuai dengan lokasi sumbu netralnya, dapat digambarkan dalam bentuk suatu kurva interaksi antara kedua gaya dalam tersebut. Diagram interaksi dapat dibagi menjadi daerah keruntuhan tarik dan daerah keruntuhan tekan seperti pada Gambar 2.1. (Nawy, Surjaman et al. 1990).



**Gambar 2.1** Interaction diagrams of column

(sumber: Nawy, Surjaman et al. (1990). Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar)

## 2.2. Perkuatan Struktur

Perkuatan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai rencana. Perkuatan struktur dapat dilakukan dalam beberapa metode diantaranya perkuatan struktur bisa dilakukan dengan cara penyelubungan dengan beton atau *Concrete Jacketing* (Gambar 2.2), dengan cara penyelubungan dengan baja atau *Steel Jacketing* (Gambar 2.3) dan dengan penyelubungan dengan material ringan komposit yaitu *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) (Sudjati, Tarigan et al. 2015).



**Gambar 2.2** Strengthening the column using concrete jacketing

(sumber: [https://www.researchgate.net/figure/Classic-way-of-repair-of-RC-columns-by-jacketing\\_fig12\\_283121702](https://www.researchgate.net/figure/Classic-way-of-repair-of-RC-columns-by-jacketing_fig12_283121702))



**Gambar 2.3** Strengthening the column using steel jacketing

(sumber: <https://picswe.net/pics/steel-jacketing-aa.html>)

### **2.3. Fiber Reinforced Polymer (FRP)**

FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). FRP adalah jenis material yang ringan, mempunyai kuat tarik yang tinggi, dan mudah dalam pelaksanaannya di lapangan. Elemen struktur beton yang dapat diperkuat dengan FRP adalah balok, pelat, dan kolom beton bertulang (Kanti Pangestuti 2006). *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) terbuat dari bahan yang ringan, tidak korosif, dan mampu menahan kuat tarik tinggi. FRP dapat terbuat dari 3(tiga) bahan komposit, yaitu *carbon*, *glass*, dan *aramid* (Sudjati, Tarigan et al. 2015).

#### **2.3.1 Carbon**

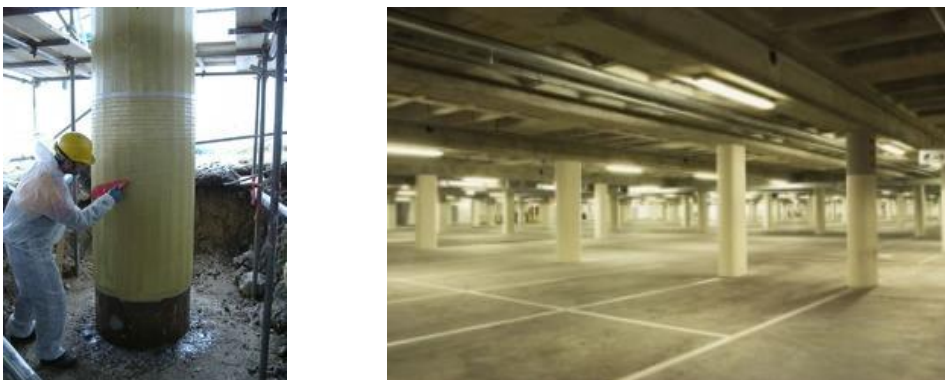
*Carbon Fiber Reinforce Polymer* (CFRP) adalah serat karbon, yang didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% berat karbon. Serat karbon tidak menunjukkan korosi pada suhu kamar. Fungsi perkuatan dengan sistem CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas. Cara pemasangan CFRP adalah dengan melilitkannya mengelilingi permukaan perimeter elemen struktur yang diperkuat dengan menggunakan perekat epoxy resin seperti pada Gambar 2.4. (Achmad, Agoes et al. 2013).



**Gambar 2.4** Strengthening the column using carbon fiber reinforced polymer (sumber: <http://www.materialsperformance.com/articles/material-selection-design/2016/07/gas-plant-uses-carbon-fiber-reinforced-polymer-wrap-to-strengthen-concrete-columns>)

### 2.3.2 Glass

*Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* adalah serat halus dari kaca. Jenis kekuatan GFRP memiliki kekuatan yang lebih rendah dari serat karbon dan kurang kaku. Bahannya sangat ringan tetapi juga lebih rapuh. Dalam pemasangannya menggunakan perekat epoxy resin sama dengan CFRP seperti pada Gambar 2.5. Selain dipakai untuk perkuatan balok, kolom, dan struktur lainnya, GFRP juga dapat digunakan untuk interior maupun eksterior ruangan karena GFRP adalah bahan yang tahan akan segala jenis cuaca (Sudjati, Tarigan et al. 2015).



**Gambar 2.5** Strengthening the column using glass fiber reinforced polymer (sumber: <https://www.indiamart.com/proddetail/carbon-fiber-strengthening-systems-8921690573.html>)



### 2.3.3 Aramid

Serat Aramid juga dikenal sebagai serat kaveler adalah serat yang juga memiliki kekuatan tinggi, kaveler biasa digunakan di dalam jaket anti peluru. Serat Aramid memiliki kekuatan sekitar lima kali lebih kuat dari baja dengan berat yang sama, tahan panas, dan memiliki kuat tarik yang tinggi. Pemasangan *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (AFRP) yaitu dengan menempelkan pada permukaan elemen struktur yang membutuhkan perkuatan dengan menggunakan perekat epoxy resin seperti pada Gambar 2.6. (More and Kulkarni 2014).



**Gambar 2.6** Strengthening the column using aramid fiber reinforced polymer (sumber : [https://www.researchgate.net/figure/Confining-column-with-Aramid-Fiber-sheet-JBDPA-report-2005\\_fig3\\_237841803](https://www.researchgate.net/figure/Confining-column-with-Aramid-Fiber-sheet-JBDPA-report-2005_fig3_237841803))

## 2.4. Keunggulan dan Kekurangan FRP

### 2.4.1 Keunggulan FRP

Keunggulan FRP antara lain, FRP tahan terhadap korosi, tidak menghantar listrik jika tidak bersentuhan langsung dengan baja, tahan panas, dan pemasangannya lebih mudah. Selain itu FRP juga memiliki umur yang panjang, sehingga dalam jangka panjang perkuatan struktur dengan menggunakan FRP akan terjaga kualitasnya, (Parvin and Brighton 2014).

### 2.4.2 Kekurangan FRP

Kekurangan FRP adalah dalam hal biaya, karena FRP masih jarang di produksi di Indonesia. Sehingga untuk mendapatkan FRP dengan kualitas tinggi masih harus mendatangkan dari luar negeri dimana biaya yang diperlukan juga lebih mahal (Sudjati, Tarigan et al. 2015).

## 2.5. Model Konstitutif

Untuk memodelkan kolom beton yang ditekang menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) dengan benar, masing – masing elemen penyusunnya memerlukan model konstitutif yang tepat dan akurat. Baja tulangan memiliki model konstitutif sangat akurat yang didasarkan pada *Von-Misses yield surface*. Material CFRP memiliki sifat elastis, namun penggunaannya dalam pemodelan harus dipertimbangkan dan diperlakukan secara hati – hati karena bila terdapat kegagalan sifatnya bisa berubah menjadi getas. Material beton bertulang merupakan salah satu material yang memiliki perilaku paling kompleks karena tidak hanya bergantung pada kekuatan tapi juga pada keefisienan pengekangan (Pantazopoulou 1995, Piscesa, Attard et al. 2016). Model konstitutif untuk material beton bervariasi mulai dari yang sederhana (model empiris) hingga model konstitutif yang kompleks (model plastisitas, model kegagalan plastis dan model bidang mikro). Dengan melihat secara singkat pembentukan model konstitutif pada setiap material, maka keberhasilan utama dalam pemodelan kolom beton yang diperkuat dengan pengekangan eksternal adalah pada pemilihan model konstitutif yang tepat untuk material beton.

(Piscesa, Attard et al. 2016, Piscesa, Attard et al. 2016) mengusulkan model plastisitas untuk pengekangan beton yang berperilaku secara baik bagi pengekangan aktif dan pasif. Dari penelitiannya ditunjukkan bahwa model yang diusulkan memberikan kinerja yang sangat baik dalam memprediksi perilaku beton dengan pengekangan aktif ataupun pasif. Beberapa penjelasan singkat tentang fitur unik dari model plastisitas yang diusulkan Piscesa et al. adalah :

- Nilai puncak dan tegangan sisa dari bidang kegagalan dapat disesuaikan menggunakan perumusan empiris apapun dimana perumusan tersebut dimasukkan kedalam bidang kegagalan menggunakan parameter simpangan friksi (Piscesa, Attard et al. 2016).
- Komposisi volumetrik plastis awal yang terjadi pada awal keretakan local telah terbentuk dengan menggunakan formula laju pelebaran plastis yang tidak konstan (Piscesa, Attard et al. 2016).

- Komposisi volumetrik plastis yang terjadi ketika kekakuan yang cukup tinggi dari bahan pengeang yang digunakan, dilambangkan dengan nilai absolut dari laju pelebaran plastis yang memiliki nilai kurang dari 0.5, telah berhasil dimodelkan.
- Rumus laju pelebaran plastis ( $\beta$ ) bergantung pada tekanan pengeang dan modulus lateral ( $E_L$ ). Nilai dari modulus lateral sendiri didasarkan pada tegangan yang dihitung dari *return mapping*. Oleh karena itu, baik laju pelebaran plastis dan modulus lateral saling berhubungan.

*Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis* (3D-NLFEA) digunakan untuk memvalidasi model plastisitas yang diusulkan oleh (Piscesa, Attard et al. 2016, Piscesa, Attard et al. 2016) terhadap kolom beton yang dikeang menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Berbeda dengan model *finite element* yang terdapat dalam literatur, *eight-node hexahedral* digunakan untuk mensimulasikan elemen solid secara penuh (material beton dan CFRP). Elemen *hexahedral* merupakan perumusan yang digunakan untuk mensimulasikan elemen baja tulangan. Untuk memodelkan konfigurasi tulangan sengkang, elemen baja tulangan dapat di *mesh* menjadi potongan – potongan kecil. Dalam satu elemen *hexahedral*, dapat menampung seratus buah baja tulangan. Matriks kekakuan elemen CFRP didasarkan pada kekakuan dari material isotropik transversal. Arah masing – masing elemen dari mesh CFRP perlu ditetapkan. Dalam menyelesaikan keseimbangan global, modifikasi dari (Lawther 1980) digunakan untuk metode kekakuan awal. Untuk menghindari *mesh-dependencies* ketika menghitung modulus lateral dari pengeangan ( $E_L$ ), sebuah perumusan *non-lokal Gaussian* (Bažant and Lin 1988) digunakan untuk memperkirakan nilai modulus lateral ( $E_L$ ). Selain itu pembaruan koordinat nodal pada setiap step berhasil dilakukan untuk memperhitungkan displasemen besar dengan mempertahankan asumsi regangan kecil.

Dari penyelidikan yang dilakukan oleh (Piscesa, Attard et al. 2018) telah ditemukan terdapat tiga factor utama yang mempengaruhi nilai modulus lateral, yaitu kondisi batas, tingkat perubahan plastis dari model konstitutif, dan poisson's ratio dari material CFRP. Banyak informasi yang diperoleh dengan menggunakan analisa non linear tiga dimensi yang baru dikembangkan (3D-NLFEA), seperti :

1. Dapat mengetahui leleh pertama dari tulangan longitudinal dan transversal.
2. Dapat mengidentifikasi bagian kerusakan besar dari elemen beton.
3. Dapat mengetahui lokasi yang tidak terbebani dan kegagalan local.
4. Dapat mengetahui keadaan pengekangan yang termasuk dalam pengekangan aktif atau pasif.

## 2.6. Perumusan Model Plastis

Dalam bagian ini secara singkat membahas perumusan model plastis yang diusulkan (Piscesa, Attard et al. 2018). Beberapa bagian dari perumusan asli tidak dirubah, seperti permukaan yang terbebani, fungsi penguatan dan penurunan, fungsi potensial plastis dan bentuk umum dari perumusan laju perubahan plastis. Modifikasi rumus terdiri dari beberapa metode perhitungan yang digunakan untuk menghitung modulus lateral dalam penyusunan *Three Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis* (termasuk *smoothing technique*), meningkatkan nilai pelebaran plastis uniaxial untuk menjelaskan efek dari kuat tekan beton, mengimplementasikan perumusan laju perubahan plastis yang tidak konstan ke dalam kasus tekanan *equibiaxial* dan meningkatkan kembali *mapping algorithm* untuk mendapatkan peningkatan stabilitas.

### 2.7.1 Beban Permukaan

Beban permukaan didasarkan pada modifikasi dari Menetrey dan Willam's yang diusulkan oleh (Piscesa, Attard et al. 2016, Piscesa, Attard et al. 2016). Parameter gesekan di lambangkan dengan ( $\alpha$ ) untuk menyesuaikan nilai puncak dan tegangan sisa dari beban permukaan. Bentuk umum dari beban permukaan, ditulis dalam bentuk koordinat silinder dari *Haigh-Westergard* ( $\zeta, \rho, \theta$ ), adalah sebagai berikut :

$$f(\rho, \zeta, \theta) = \left( \frac{\sqrt{1.5}\rho}{f'c} \right)^2 + \alpha m q_h \left[ \frac{\rho}{\sqrt{6}f'c} r(\theta, e) + \frac{\zeta}{\sqrt{3}f'c} \right] - q_h^2(k) q_s(k) \leq 0 \quad (1)$$

Dimana :

$\zeta$  = Panjang hidrostatik

$\rho$  = Panjang deviatorik

- $\theta$  = Sudut beban  
 $f'_c$  = Kuat tekan beton  
 $k$  = Parameter kenaikan  
 $q_h(k)$  = Fungsi kenaikan  
 $q_s(k)$  = Fungsi penurunan  
 $\alpha$  = Parameter laju gesekan  
 $r(\theta, e)$  = Fungsi elips.  
 $e$  = *Out of roundness eccentricity* yang mengontrol bentuk kegagalan pada *deviatoric plane*.

Tiga koordinat silinder diberikan dalam bentuk invariant ( $I_1, J_2, J_3$ ) dan ditulis dalam bentuk berikut :

$$\zeta = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{2J_2} = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}} \right)$$

$$J_3 = \left( \sigma_1 - \frac{I_1}{3} \right) \left( \sigma_2 - \frac{I_1}{3} \right) \left( \sigma_3 - \frac{I_1}{3} \right) \quad (4)$$

Dimana :

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  = Tegangan utama.  
 $m$  = Parameter gesekan.  
 $f_t$  = Kekuatan tarik beton.  
 $f'_c$  = Kekuatan tekan beton.

(Papanikolaou and Kappos 2007) mengusulkan bentuk umum dari parameter gesekan seperti berikut :

$$m = 3 \frac{q_h^2 f_c'^2 - f_t^2}{q_h f_c' f_t} \frac{e}{e + 1} \quad (5)$$

Nilai parameter dari *out of roundness eccentricity* mempengaruhi prediksi dari kegagalan akibat beban pada kolom biaksial. Perumusan yang menunjukkan bahwa nilai  $r$  merupakan fungsi dari  $\theta$  dan  $e$  adalah :

$$r(\theta, e) = \frac{4(1 - e^2)\cos^2\theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2)\cos\theta + (2e - 1)\sqrt{4(1 - e^2)\cos^2\theta + 5e^2 - 4e}} \quad (6)$$

untuk,  $0.5 \leq e \leq 1$

Nilai  $\alpha$ , yang ditentukan menggunakan persamaan empiris yang mendefinisikan kegagalan dan *residual surface* dalam kasus uniaksial/triaksial. Persamaan empiris yang diusulkan oleh (Attard and Setunge 1996) dan (Samani and Attard 2012) masing – masing digunakan untuk memprediksi nilai puncak dan tegangan sisa. Perumusan interpolasi linear untuk parameter penurunan “ $\alpha$ ” diusulkan oleh (Piscesa, Attard et al. 2016), seperti berikut :

$$\alpha = (\alpha_{peak}q_s(k) + \alpha_{res}(1 - q_s(k)))$$

$$\alpha_{peak} = \frac{(f_{cc} - f_r)^2 - f_c'^2}{mf_r f_c'}, \text{ Untuk } f_r = 0, \text{ maka:}$$

$$\alpha_{peak} = \frac{2.5(f_c')^{0.79}}{mf_r} - \frac{2}{m} \quad (7)$$

$$\alpha_{res} = \frac{(f_{res} - f_r)^2}{mf_r f_c'}, \text{ Untuk } f_r = 0, \text{ maka:}$$

$$\alpha_{res} = 0$$

Dimana :

$f_{cc}$  = Tegangan puncak pada beton didalam pengekan.

$f_{res}$  = Tegangan sisa pada beton didalam pengekan.

### 2.7.2 Fungsi Kenaikan

Selama pada area plastis, bentuk dan perubahan dari *loading surface* dapat dikontrol dengan menggunakan fungsi kenaikan ( $q_h$ ) dan penurunan ( $q_s$ ) yang didefinisikan dalam parameter kenaikan/penurunan ( $k$ ). Jika laju perubahan diasumsikan konstan, maka parameter kenaikan sama dengan rasio regangan plastis volumetrik ( $\varepsilon_v^p = \varepsilon_1^p + \varepsilon_2^p + \varepsilon_3^p$ ) terhadap nilai regangan plastis volumetrik ketika

puncak ( $\varepsilon_{v,peak}^p$ ). Fungsi kenaikan yang diusulkan oleh (Carrazedo, Mirmiran et al. 2013) dapat dilihat seperti berikut :

$$q_h(k) = \left[ \sigma_{cr} + \frac{[1 - \sigma_{cr}]r_1 k}{r_1 - 1 + k^{r_1}} \right]^{0.5}$$

$$k = \frac{\varepsilon_v^p}{\varepsilon_{v,peak}^p}, \text{ untuk } 0 \leq k, q_h \leq 1$$

$$r_1 = \frac{E_a}{E_a - E_b} \tag{8}$$

$$E_b = 1 - \sigma_{cr}$$

$$\sigma_{cr} = \left( \frac{\sigma_{3pr}}{f'_c} \right)^2$$

Dimana :

$E_a$  = Initial tangent modulus dari kurva q – k (untuk fungsi kenaikan nilai  $E_a$  biasanya diambil 4).

$\sigma_{3pr}$  = Tegangan normal yang mewakili batas elastis pada beban uniaxial (nilainya bervariasi dari 0.3 – 0.45  $f'_c$ ).

### 2.7.3 Fungsi Penurunan

Hasil perumusan yang diusulkan oleh (Samani and Attard 2012) untuk fungsi respon penurunan pasca puncak adalah sebagai berikut :

$$q_s(k) = q_{si} \left( \frac{k-1}{k_i-1} \right)^2, \text{ untuk } k \geq 1, 0 \leq q_s \leq 1 \tag{9}$$

Dimana :

$q_{si}$  = Parameter penurunan pada titik perubahan.

$k_i$  = Parameter kenaikan pada titik perubahan.

Dua variabel diatas mengontrol perubahan dari penurunan dan dapat diambil dari data eksperimen menggunakan titik referensi yang dipilih pada kurva penurunan. Variable  $q_{si}$  dan  $k_i$  mengontrol laju dari penurunan dan dikalibrasikan dari data eksperimen menggunakan titik referensi yang dipilih pada kurva penurunan. Berikut bentuk perumusan dari parameter penurunan pada titik perubahan.

$$q_{si} = \frac{(f_i - f_r)^2 - \alpha_{res} m f_r f'_c}{((\alpha_{peak} - \alpha_{res}) m f_r f'_c + f'_c{}^2)}, \text{ untuk } k \geq 1, 0 \leq q_s \leq 1 \quad (10)$$

Pada persamaan diatas  $f_i$  adalah titik acuan pada pengekanan dalam tekanan aksial dan untuk parameter kenaikan pada titik perubahan ( $k_i$ ) dalam persamaan (9) dapat dirumuskan seperti berikut :

$$k_i = 1 + \frac{(\varepsilon_{3i}^p - \varepsilon_{3c}^p)(1 + 2\beta_i)}{\varepsilon_{v,peak}^p}, \text{ untuk } k \geq 1, 0 \leq q_s \leq 1 \quad (11)$$

Diaman :

$\varepsilon_{3i}^p$  = Regangan plastis pada titik yang ditinjau.

$\varepsilon_{3c}^p$  = Regangan plastis pada puncak.

$\varepsilon_{v,peak}^p$  = Plastic volumetric strain pada puncak.

$\beta_i$  = Tingkat perubahan plastis pada titik yang ditinjau.

#### 2.7.4 Parameter Modulus Lateral ( $E_L$ )

Dari hasil yang didapat oleh (Piscesa, Attard et al. 2016) untuk nilai modulus lateral ( $E_L$ ) yang digunakan dalam analisa elemen hingga yang disederhanakan dan ditentukan dari nilai minimum dari rasio tegangan tambahan untuk pertambahan regangan utama. Penyederhanaan ini dapat ditulis seperti berikut :

$$E_L = \min\{E_{L1}, E_{L2}, E_{L3}\} \\ E_L = \min\left\{\frac{-\Delta\sigma_1^*}{\Delta\varepsilon_1}, \frac{-\Delta\sigma_2^*}{\Delta\varepsilon_2}, \frac{-\Delta\sigma_3^*}{\Delta\varepsilon_3}\right\} \quad (12)$$

Pada persamaan diatas untuk nilai tegangan ( $\Delta\sigma_1^*, \Delta\sigma_2^*, \Delta\sigma_3^*$ ) dihitung dalam arah yang sama atau berhimpit dengan tiga regangan utama. Namun rasio tegangan-regangan utama disetiap arah hanya digunakan jika arah regangan utama positif, hal tersebut menunjukkan bahwa beton mengalami pemampatan. Oleh karena itu jika salah satu regangan berada pada arah regangan utama maka hal tersebut tidak memenuhi kondisi diatas, nilai untuk kekakuan lateral dalam arah tersebut tidak termasuk dalam persamaan (12) diatas. Sebagai contoh jika regangan utama ketiga memiliki nilai negatif ( $\Delta\varepsilon_3 < 0$ ) dan regangan utama yang lain positif, maka persamaan (12) berubah menjadi :



$$E_L = \min \left\{ \frac{-\Delta\sigma_1^*}{\Delta\varepsilon_1}, \frac{-\Delta\sigma_2^*}{\Delta\varepsilon_2} \right\} \quad (13)$$

Selanjutnya jika nilai tegangan positif maka nilai rasio tegangan-regangan utama adalah nol. Sebagai contoh jika nilai dari  $\Delta\sigma_2^*$  dalam persamaan (13) lebih besar dari nol maka persamaan tersebut menjadi :

$$E_L = \min \left\{ \frac{-\Delta\sigma_1^*}{\Delta\varepsilon_1}, 0 \right\} \quad (14)$$

Seperti yang sudah dibahas oleh (Piscesa, Attard et al. 2016, Piscesa, Attard et al. 2016) nilai modulus lateral ( $E_L$ ) dapat digunakan untuk menentukan apakah pengekanan termasuk dalam pengekan aktif atau pasif. Nilai positif dari modulus lateral ( $E_L$ ) menunjukkan secara spesifik elemen dari titik gauss pada pengekan pasif dimana tekanan pengekan meningkat secara bersamaan dengan modulus lateral secara bertahap. Didapatkannya nilai nol dari modulus lateral memiliki tiga kemungkinan. Yang pertama jika kenaikan tegangan pada *time step* ( $t$ ) saat ini hampir sama dengan nol ( $\Delta\sigma_{max}^t \approx 0$ ) dan nilai tegangan sebelumnya negatif ( $\sigma_{max}^{t-1} < 0$ ), maka termasuk dalam keadaan pengekan aktif, yang kedua jika kenaikan tegangan pada *time step* ( $t$ ) saat ini adalah positif ( $\Delta\sigma_{max}^t > 0$ ) dan nilai tegangan sebelumnya negatif ( $\sigma_{max}^{t-1} < 0$ ), maka keadaan pengekan akan tergantung pada penjumlahan dari kenaikan tegangan pada *time step* saat ini dan tegangan sebelumnya dapat dikonversikan menjadi ( $\sigma_{max}^t = \sigma_{max}^{t-1} + \Delta\sigma_{max}^t$ ). Jika hasil penjumlahan tersebut memberikan nilai positif maka keadaan pengekan mejadi uniaksial, jika tidak maka akan termasuk pada pengekan aktif. Terakhir jika kenaikan tegangan pada *time step* ( $t$ ) saat ini adalah nol maka nilai modulus lateral adalah positif ( $\Delta\sigma_{max}^t > 0$ ) dan nilai tegangan sebelumnya positif ( $\sigma_{max}^{t-1} > 0$ ) maka keadaan pengekan akan menjadi uniaksial.

Dalam Finite Elemen Analysis diketahui bahwa di dekat batas atau tepi yang runcing terdapat konsentrasi tegangan atau tegangan yang terpusat dalam elemen. Masalah tersebut juga dapat terjadi akibat penggunaan ukuran mesh yang sangat berbeda, sehingga menyebabkan terjadinya tegangan yang jauh lebih besar pada elemen tertentu dibandingkan dengan elemen lain di sekitarnya. Hal tersebut membuat bentuk kontur tegangan menjadi tidak seragam. Jika pengekanan termasuk pada pengekan pasif, maka hal tersebut akan memberikan peningkatan

nilai modulus lateral untuk elemen tertentu yang pada saatnya mungkin memberikan hasil yang tidak masuk akal. Untuk menghindari hal tersebut dengan mengontrol kinerja Finite Elemen Analysis, metode non-local yang diberikan oleh (Bažant and Lin 1988) digunakan hanya untuk menghitung nilai modulus lateral. Skala untuk Panjang internal ( $l_c$ ) diambil antara 2.5 – 3 kali ukuran agregat.

Rumus eksponensial Gauss untuk fungsi beban ( $\alpha_L$ ) digunakan, dengan rumus seperti berikut :

$$\alpha_L = e^{-a_L}$$

$$a_L = \left( \frac{k_L l_x}{l_c} \right)^2 \quad (15)$$

Dimana :

$k_L$  = Nilai konstan sama dengan 2 .

$l_x$  = Jarak radial yang dicari antara titik gauss dan daerah disekitar radius  $l_c$ .

Meskipun *smoothing technique* yang baik telah ditemukan, bahwa dengan pengaturan batas maksimum untuk modulus lateral memberikan distribusi kontur yang lebih baik. Selain itu kekakuan tambahan dari batas limit dan karena hal tersebut memberikan nilai modulus lateral yang lebih masuk akal untuk elemen yang dekat dengan batasnya. Nilai maksimum untuk modulus lateral disarankan tidak lebih dari 100 kali kuat tekan beton, dimana kurang lebihnya adalah  $E_L / f'_c = 100$ .

### 2.7.5 Perumusan Laju Perubahan Plastis ke Arah Lateral

Rumus laju perubahan plastis didasarkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh (Piscosa, Attard et al. 2016). Bentuk umum untuk rumus laju perubahan plastis adalah sebagai berikut :

$$\beta = \beta_0 + (\beta_{core} - \beta_0) \tanh \left( a \left( \frac{f_r}{f'_c} \right)^b \right) \quad (16)$$

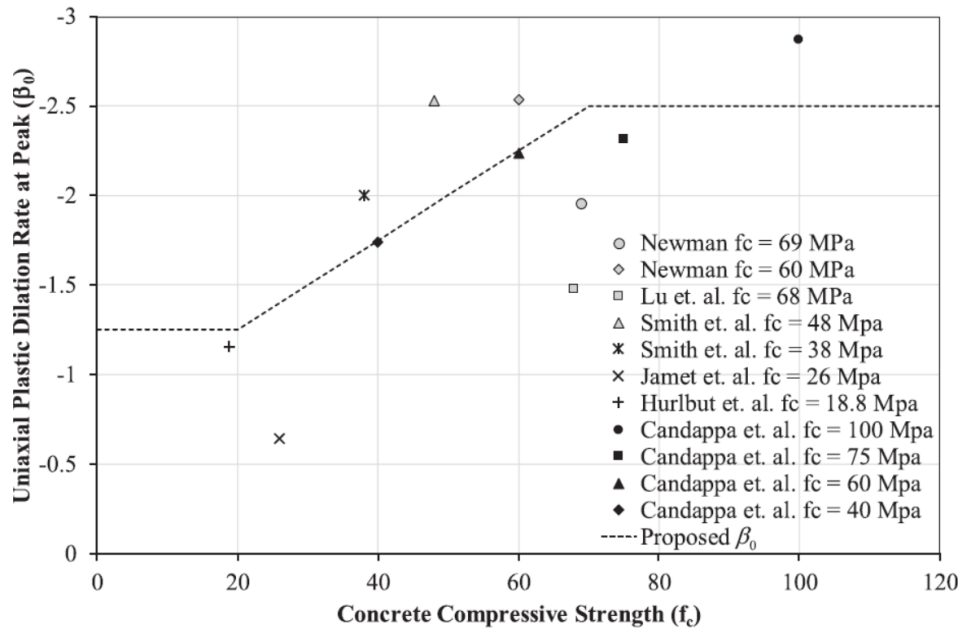
Dimana :

$\beta_0$  = *Uniaxial plastic dilation rate*.

$\beta_{core}$  = Batas atas *plastic dilation rate*.

$a$  &  $b$  = koefisien (parameter).

(Samani and Attard 2014) menyarankan nilai untuk  $\beta_0$  adalah -2.5. Namun telah ditemukan bahwa nilai yang disarankan untuk  $\beta_0$  ialah lebih tinggi pada kuat tekan beton mutu normal hingga medium. Karena alasan tersebut maka rumus untuk  $\beta_0$  ditinjau kembali dan memperhatikan lebih dekat pada hasil eksperimen yang telah dilakukan.



**Gambar 2.7** Uniaxial plastic dilation rate at peak

(Sumber: Piscesa et al. (2018). 3D Finite element modeling of circular reinforced concrete columns confined with FRP using a plasticity based formulation)

Gambar 2.7 menunjukkan kurva  $\beta_0 - f'_c$  yang telah diperbaiki lagi dari hasil percobaan yang dilakukan oleh (Newman 1979, Jamet, Millard et al. 1984, Hurlbut 1985, Smith, Willam et al. 1989, Candappa, Sanjayan et al. 2001, Lu and Hsu 2007). Asumsi eksponensial digunakan untuk menentukan nilai  $\beta_0$ . Dari hasil penyelidikan eksperimen didapat nilai  $\beta_0$  untuk kuat tekan beton mutu normal hingga medium lebih rendah dari pada kuat tekan beton mutu tinggi. Oleh karena itu hubungan linear untuk  $\beta_0$  yang berpengaruh pada kuat tekan beton diatas 20 MPa dirumuskan seperti berikut :

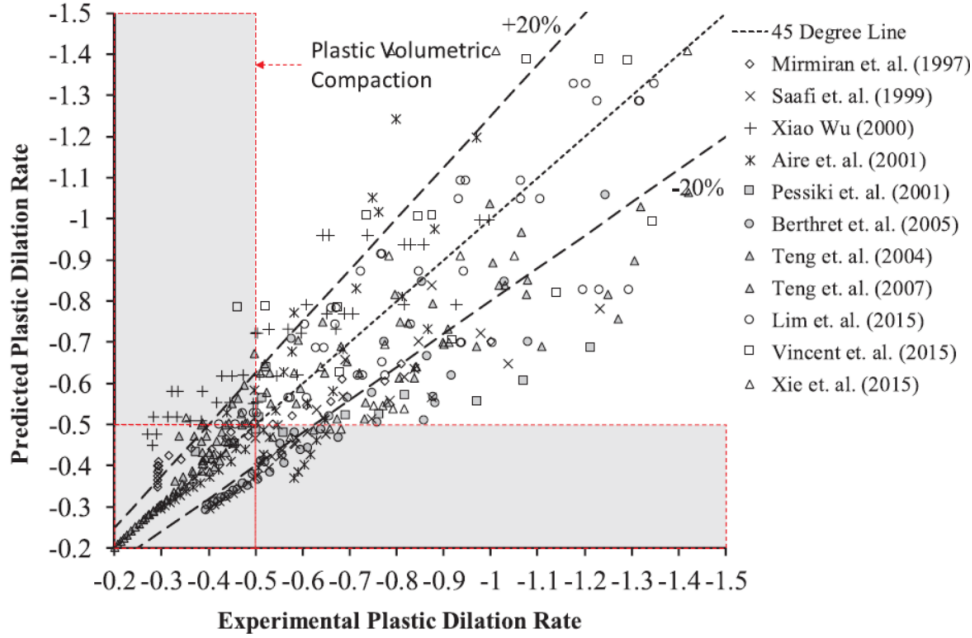
$$\beta_0 = -1.25 - \frac{f'_c - 20}{40} \geq -2.5 \quad (17)$$

Bentuk perumusan untuk batas atas *plastic dilation rate* ( $\beta_{core}$ ) didasarkan pada perumusan sebelumnya dan ditulis disini dalam bentuk :

$$\beta_{core} = -0.5 + 0.0275\Phi \leq \mu_{FRP}$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{f_r E_L}{f'_c f'_c}} \quad (18)$$

Dari prumusan diatas didapat,  $\mu_{FRP}$  adalah *poisson's ratio* elastis dari material FRP, dimana nilainya dapat diambil antara 0.2 – 0.3.



**Gambar 2.8** Plastic dilation rate prediction

(Sumber: Piscesa et al. (2018). 3D Finite element modeling of circular reinforced concrete columns confined with FRP using a plasticity based formulation)

Karena nilai dari  $\beta_0$  diperbarui maka parameter pada perumusan (16) perlu dikalibrasi ulang. Untuk tujuan tersebut maka dasar data eksperimental yang sama seperti pada penelitian (Piscesa, Attard et al. 2016) digunakan. Dengan menggunakan persamaan algoritma maka parameter yang dioptimalkan untuk koefisien  $a$  dan  $b$  adalah :

$$a = 2.5 + 0.25 \sqrt{\frac{E_L}{f'_c}} \quad (19)$$

$$b = 0.1 \sqrt{f'_c} \exp[-0.0225\Phi(f'_c - 73)]$$

Gambar 2.8 menunjukkan perbandingan dari hasil laju perubahan plastis yang telah diperbarui dengan data tingkat laju perubahan plastis eksperimen yang telah diamati. Telah ditemukan bahwa dengan menyesuaikan  $\beta_0$  dan parameter kalibrasi ulang  $a$  dan  $b$ , didapatkan laju perubahan plastis yang telah diprediksi masih menunjukkan kemiripan dari hasil eksperimen. Selanjutnya dengan membandingkan hasil dari Gambar 2.8 dengan perumusan sebelumnya didapatkan nilai  $\beta_0$  adalah sama untuk semua mutu beton, beberapa perbaikan dari hasil komparasi dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh (Mirmiran and Shahawy 1997, Xiao and Wu 2000, Lam and Teng 2004, Teng, Huang et al. 2007) untuk kuat tekan beton mutu normal telah terbukti.

### 2.7.6 Fungsi Potensial Plastis

Fungsi potensial plastis yang digunakan diambil dari hasil penelitian (Piscosa, Attard et al. 2016, Piscosa, Attard et al. 2016). Namun terdapat beberapa perbaikan yang telah dilakukan oleh (Piscosa, Attard et al. 2018) untuk menambahi perumusan laju perubahan plastis yang tidak konstan pada keadaan biaksial. Bentuk umum dari fungsi potensial plastis adalah sebagai berikut:

$$g = \left( B + \frac{1}{2} (A - B) (1 - \cos 3\theta) \right) \left( \frac{\rho}{f'_c q_h \sqrt{q_s}} \right)^2 + \left( 1 + \frac{1}{2} (\alpha_{p0} - 1) (1 - \cos 3\theta) \right) \left( \frac{\xi}{f'_c q_h \sqrt{q_s}} \right) \quad (20)$$

Dimana koefisien A dan B masing – masing perlu dilakukan kalibrasi menggunakan regangan aksial pada puncak tegangan maksimum dalam tekanan uniaksial/triaksumial dan tekanan *equibiaxial*. Vector kecenderungan regangan plastis tambahan untuk pembebanan uniaksial/triaksumial ( $\psi_1$ ) dan *equibiaxial* ( $\psi_2$ ) dimasukkan dengan mengambil gradien dari potensial plastis yang berhubungan dengan sumbu deviatoriknya.

$$\psi_1 = 2A \left( \frac{\rho_1}{f'_c} \right), \text{ dimana nilai } A \text{ adalah } A = \frac{\psi_1}{2} \left( \frac{f'_c}{\rho_1} \right) \quad (21)$$

$$\psi_2 = 2B \left( \frac{\rho_2}{f'_c} \right), \text{ dimana nilai } B \text{ adalah } B = \frac{\psi_2}{2} \left( \frac{f'_c}{\rho_2} \right)$$

Dimana :

$\rho_1$  = Jarak yang di normalisasi dari vector deviatoric dalam beban uniaksial/triakhsial.

$\rho_2$  = *Equibiaxial compression loading cases*

Bentuk dari parameter diatas adalah :

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} |f_{cc} - f_r|$$

$$\rho_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} |f_{bc}|$$
(22)

Dimana :

$f_{bc}$  = Tekanan *equibiaxial* pada tegangan puncak.

Untuk beban uniaksial, nilai dari  $f_r = 0 \rightarrow f_{cc} = f'_c$ , maka:  $\rho_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} |f'_c|$ .

Vector kecenderungan regangan plastis diturunkan dari persamaan panjang hidrostatik ( $\zeta^P$ ) dan deviatoric ( $\rho^P$ ) dari regangan plastis pada tegangan puncak. Bentuk regangan plastis tambahan dari vector kecenderungan ini ketika laju perubahan plastis konstan adalah :

$$\psi_1 = \frac{\rho^P}{\xi^P} = \sqrt{2} \frac{|\varepsilon_{3c}^P - \varepsilon_{1c}^P|}{\varepsilon_{v,peak}^P}$$
(23)

pada kasus uniaksial :  $f_r = 0 \rightarrow \varepsilon_{3c}^P = \varepsilon_{3u}^P, \varepsilon_{1c}^P = \varepsilon_{1u}^P$

$$\psi_2 = \frac{\rho^P}{\xi^P} = \sqrt{2} \frac{|\varepsilon_{3b}^P - \varepsilon_{1u}^P|}{\varepsilon_{v,peak}^P}$$
(24)

Dimana :

$\varepsilon_{3c}^P$  = Regangan aksial plastis untuk *compression loading* triaksial.

$\varepsilon_{3u}^P$  = Regangan aksial plastis untuk *compression loading* uniaksial.

$\varepsilon_{3b}^P$  = Regangan aksial plastis untuk *compression loading equibiaxial*.

$\varepsilon_{1c}^P$  = Regangan lateral plastis untuk *compression loading* triaksial.

$\varepsilon_{1u}^P$  = Regangan lateral plastis untuk *compression loading* uniaksial.

$\varepsilon_{1u}^P$  = Regangan lateral plastis untuk *compression loading equibiaxial*.

(Piscesa, Attard et al. 2016) menunjukkan bahwa tingkat perubahan keadaan plastis dari beton dapat menunjukkan pemampatan awal dari keadaan plastis pada awal *plastic flow* dan mencapai tingkat perubahan plastis maksimum pada tegangan puncak. Setelah tegangan puncak tercapai, tingkat perubahan plastis diasumsikan konstan (Samani and Attard 2014). Untuk menetapkan aturan tersebut dengan memperhitungkan laju perubahan plastis yang tidak konstan, (Piscesa, Attard et al. 2016) menggunakan nilai baru untuk vector regangan plastis tambahan pada kasus beban uniaksial/triakhsial.

$$\psi_1^{(k)} = \frac{\rho^P_{(k)}}{\xi^P_{(k)}} = -\sqrt{2} \frac{|(1 - \beta_{(k)})|}{(2\beta_{(k)} + 1)} \quad (25)$$

Pada perumusan diatas nilai (k) menunjukkan bahwa semua parameter plastis selalu diperbarui pada setiap waktu tertentu. Parameter  $\beta_{(k)}$  adalah fungsi laju perubahan plastis berdasarkan fungsi dasar dari fungsi skala sederhana antara nol dan laju perubahan plastis pada tegangan puncak ( $\beta$ ). Perumusan dari  $\beta_{(k)}$  dapat ditulis seperti berikut :

$$\beta_{(k)} = k^{\sqrt{n}} \beta, \text{ jika } k \geq 1 \text{ maka } \beta_{(k)} = \beta \quad (26)$$

$$n = \frac{((2\beta + 1)\varepsilon_{3c,peak}^P + \varepsilon_{vc,peak}^e)^2}{(\varepsilon_{3c,peak}^P + \varepsilon_{vc,peak}^e)^2} \quad (27)$$

Untuk memastikan bahwa rumus laju perubahan plastis dan aturan aliran konsisten, maka nilai parameter kontrol laju perubahan plastis ( $\alpha_{P0}$ ) juga perlu diperhitungkan (Piscesa, Attard et al. 2016, Piscesa, Attard et al. 2016).

Tekanan pengikat ( $f_t$ ) harus diambil sebagai tegangan utama maksimum di semua arah yang tidak boleh lebih besar dari nol ( $f_t = k \{-\max[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]\}$ ). Namun, secara tekanan equibiaxial, tekanan batas ekivalen ( $f_t = f_{tb}$ ) harus digunakan sebagai gantinya. Untuk kasus pembebanan antara beban uniaksial / triaksial dimana sudut lode sama dengan 60 dan tekanan equibiaxial dimana sudut lode sama dengan 0, interpolasi tekanan pengeangan yang harus digunakan :

$$f_t = f_{rb} + \{0,5 + [(-\max[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]) - f_{rb}][1.0 - \cos 3\theta]\} \quad (28)$$

Untuk laju perubahan plastis tidak konstan hanya berlaku untuk kasus beban uniaksial/triakhsial. Dalam kasus beban equibiaxial, ada dua pilihan. Pertama adalah menggunakan laju perubahan plastis yang konstan. Kedua adalah menggunakan

non-konstan tingkat perubahan plastis diperoleh dengan memperkirakan regangan volumetric elastis yang setara pada tegangan puncak dalam kasus beban equibiaxial dengan beban triaksial. Perlu diperhatikan bahwa ketika menyamakan regangan volumetric elastis dalam kasus beban triaksial, tekanan terbatas yang setara terkait dengan tegangan puncak dalam beban equibiaxial harus digunakan. Tekanan batas ekuivalen ini berasal dari permukaan kegagalan, yaitu :

$$f_{rb} = \left( \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) \quad a = 9 \quad b = -[amf'_c - 6\sqrt{3\xi}] \quad (29)$$

$$c = 3\xi^2 - f_c^2$$

pada perumusan diatas,  $\xi = -2f_{bc}/\sqrt{3}$ . Dengan menggunakan tekanan keliling yang setara, volumetric regangan elastis pada tegangan puncak untuk kasus beban triaksial dan equibiaxial adalah sama ( $\varepsilon_{vc,peak}^e = \varepsilon_{vb,peak}^e$ ). Pada tegangan puncak, diasumsikan bahwa regangan volumetric sama dengan nol. Demikian dapat ditulis regangan volumetric untuk kedua kasus dengan mempertimbangkan bahwa  $\varepsilon_{vc,peak}^e = \varepsilon_{vb,peak}^e$

$$\varepsilon_{vc,peak}^p + \varepsilon_{vc,peak}^e = \varepsilon_{vb,peak}^p + \varepsilon_{vb,peak}^e \quad (30)$$

Perhatikan bahwa istilah yang dihilangkan dalam persamaan (30) berarti bahwa itu dibatalkan karena  $\varepsilon_{vc,peak}^e$  sama dengan  $\varepsilon_{vb,peak}^e$ .

Mengembangkan persamaan (30) untuk menjadi hanya aksial dan regangan lateral elastis, yaitu :

$$(2\beta_{(k)} + 1)\varepsilon_{3c}^p = (2 + \beta_{(k)}^b)\varepsilon_{3b}^p \quad (31)$$

Dengan memecahkan untuk tingkat pelebaran plastic dalam kasus beban equibiaxial ( $\beta_{(k)}^b$ ), yaitu :

$$(\beta_{(k)}^b) = (2\beta_{(k)} + 1) \frac{\varepsilon_{3c}^p}{\varepsilon_{3b}^p} - 2 \leq 0 \quad (32)$$

Pada awal aliran plastis, nilai untuk  $\beta_{(k)}$  sama dengan nol dan karenanya persamaan (32) menjadi :

$$(\beta_{(k)}^b) = \frac{\varepsilon_{3c}^p}{\varepsilon_{3b}^p} - 2 \leq 0 \quad (33)$$

Jika rasio regangan plastis aksial dalam persamaan diatas lebih besar dari 2, nilai untuk  $\beta_{(k)}^b$  akan lebih besar dari nol yang mana lebih tidak disukai. Oleh karena



itu, batas maksimum untuk perubahan plastis tingkat dalam bebann equibiaxial di persamaan (32) diatur ke nol. Perhatikan bahwa dalam kasus beban equibiaxial, parameter control laju perubahan plastis ( $a_{p0}$ ) tidak memiliki efek apapun. Karenanya setelah tingkat perubahan plastis maksimum dalam beban equibiaxial tercapai, perubahan plastis dinilai tidak akana diberlakukan seperti pada kasus beban uniaksial/triakhsial. Namun hal itu akan disesuaikan menggunakan persamaan aturan aliran untuk parameter “B”, ditentukan dari puncak tingkat perubahan plastis dalam beban equibiaxial.

Pada akhirnya, untuk kasus beban equibiaxial dapat dihitung sebagai berikut :

$$\psi_2^{(k)} = \frac{\rho_{(k)}^p}{\xi_{(k)}^p} = -\sqrt{2} \frac{|(1 - \beta_{(k)}^b)|}{(\beta_{(k)}^b + 2)} \quad (34)$$

Perhatikan bahwa pada setiap langkah waktu, nilai  $\varepsilon_{v,k}^p$  selalu berubah dan didasarkan pada nilai parameter tingkat pelebaran plastis. Dengan demikian parameter kekerasan ( $k$ ) perlu dihitung menggunakan rumus berikut :

$$k^i = k^{i-1} + \frac{\Delta\varepsilon_v^{p,i}}{\varepsilon_{v,k}^p} \quad \text{ith - time step}; \quad \Delta\varepsilon_v^p = \Delta\lambda \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 m_{ij} \delta_{ij} \quad (35)$$

Dimana :

$\Delta\lambda$  = Faktor pengali keadaan plastis.

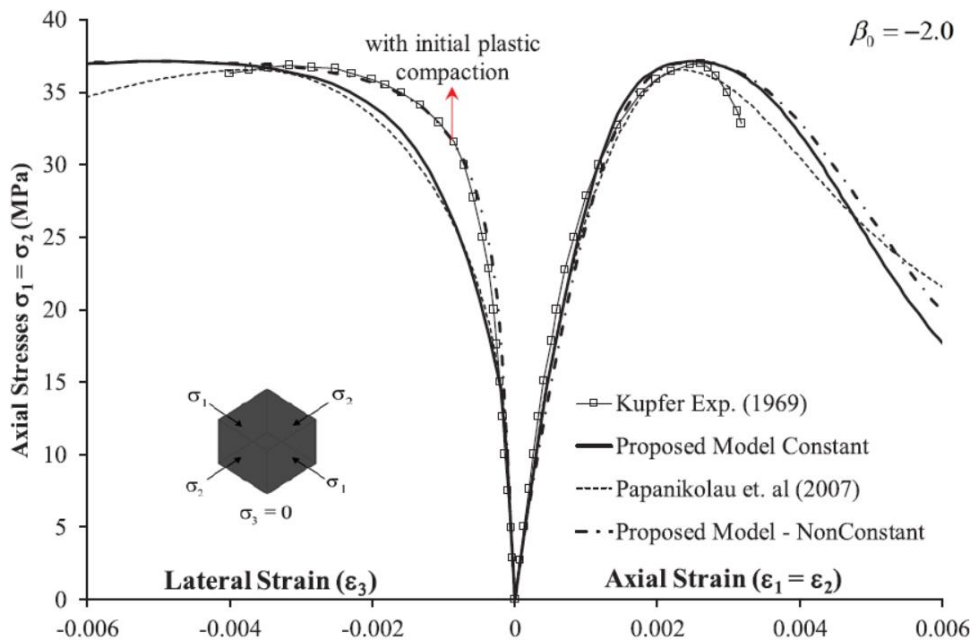
$m_{ij}$  = Turunan pertama dari aturan aliran pada tegangan.

$\delta_{ij}$  = *Kronecker delta*.

Selanjutnya dari persamaan (30) rumus untuk  $\varepsilon_{v,k}^p$  ditentukan pada kasus uniaksial/triakhsial yang bisa digunakan secara langsung pada kasus *equibiaxial*.

Gambar 2.9 menunjukkan perbandingan dari model yang diusulkan oleh piscesa et al. dengan hasil eksperimen untuk beton yang terbebani beban *equibiaxial*. Terlihat bahwa prediksi dari model yang menggunakan laju perubahan plastis tidak konstan memiliki hasil yang lebih baik dari pada menggunakan laju perubahan plastis yang konstan. Hal tersebut ditunjukkan pada eksperimen, selama fase kenaikan nilai regangan lateral dapat diprediksi dengan baik menggunakan model yang diusulkan oleh piscesa et al. Dengan menerapkan rumus laju perubahan plastis non konstan untuk beban uniaksial/triakhsial dan biaksial, respon lateral untuk beton yang

terbebani beban aksial sudah lengkap dan diharapkan model tersebut dapat digunakan untuk melakukan analisa tiga dimensi secara lengkap.

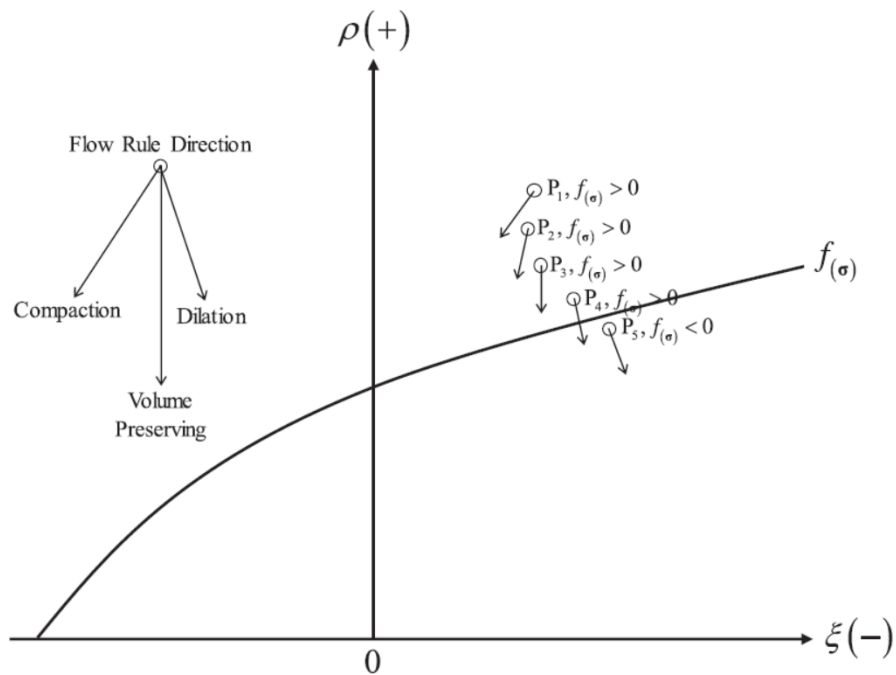


**Gambar 2.9.** Stress-strain prediction for biaxial compression using constant and nonconstant plastic dilation rate

(Sumber: Piscesa et al. (2018). 3D Finite element modeling of circular reinforced concrete columns confined with FRP using a plasticity based formulation)

### 2.7.7 Return Mapping Algorithm

Dari perumusan (25) untuk arah tegangan yang kembali sebelum tegangan puncak tergantung pada parameter kenaikan yang selalu bertambah. Oleh karena itu pemetaan algoritma secara detail memperhitungkan perubahan dari arah pengembalian secara cepat, terutama dari pemadatan volumetrik plastis awal ke pembesaran volumetrik plastis harus dirumuskan dengan tepat. Pemetaan pengembalian implisit, dimana semua perumusan plastis diperbarui menggunakan tegangan balik akhir.



**Gambar 2.10.** Illustration of the return direction from initial plastic compaction to plastic dilation

(Sumber: Piscesa et al. (2018). 3D Finite element modeling of circular reinforced concrete columns confined with FRP using a plasticity based formulation)

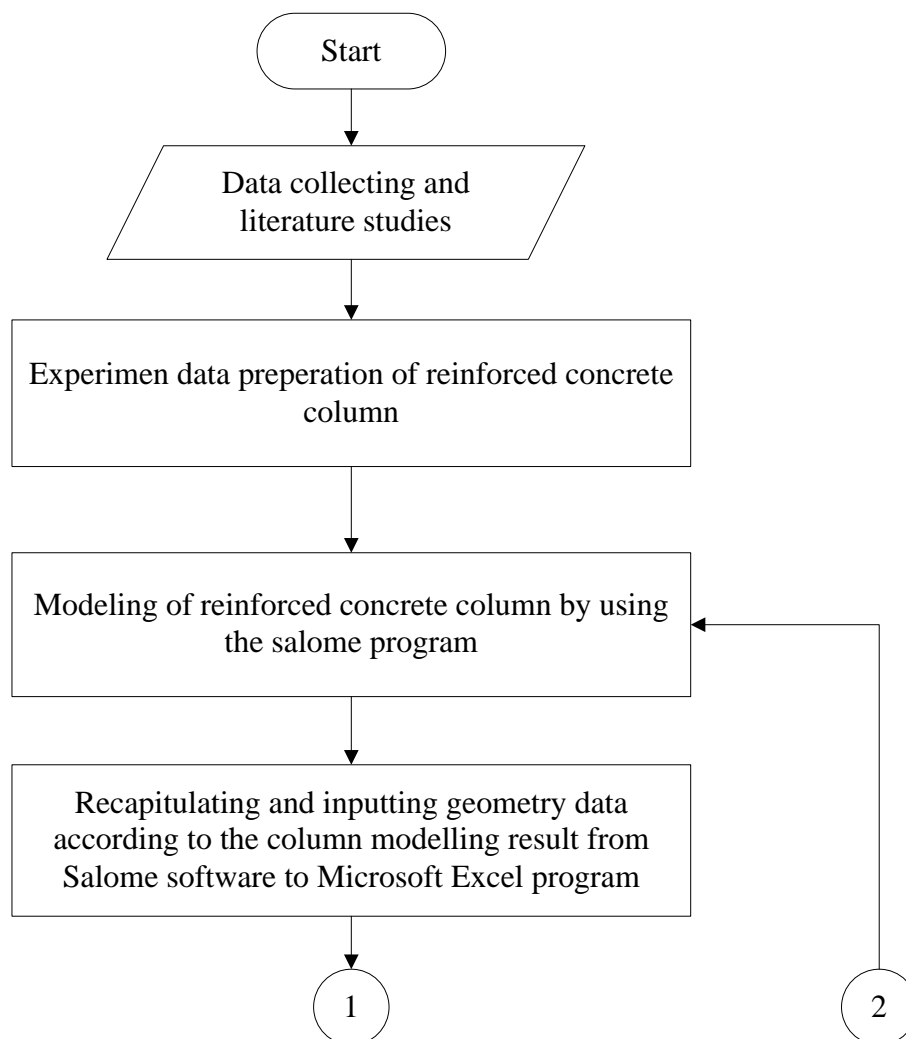
Untuk saat ini pemetaan algoritma dikembangkan menggunakan metode Regula-False oleh (Piscesa, Attard et al. 2016). Namun jika algoritma gagal karena perubahan yang cepat dalam arah aturan aliran, metode *bisection* kemudian digunakan. Metode *bisection* membutuhkan percobaan parameter kenaikan ( $k_{n+1}$ ) yang memberikan tegangan didalam permukaan kegagalan ( $f(\sigma) < 0$ ). Untuk mendapatkan nilai ( $k_{n+1}$ ), beberapa langkah terbatas dari ( $\Delta k=0.05$ ) secara berturut – turut ditambahkan ke dalam  $k_n$  dan permukaan kegagalan dievaluasi sampai  $f(\sigma) < 0$ . Perhatikan bahwa pada setiap langkah, semua parameter plastis dan tegangan di perbarui sebelum mengevaluasi permukaan kegagalan. *Plastic multiplier* dihitung dengan menata ulang persamaan (35) dan mensubstitusikan  $k^i = k_{n+1}$ . Gambar 2.10 menunjukkan perilaku algoritma yang diusulkan dalam bidang *hydrostatic-deviatoric*. Pada Gambar 2.10 setiap titik (P1 – P5) menunjukkan lokasi tegangan, arah balik dan nilai permukaan kegagalan yang dievaluasi. Perhatikan bahwa permukaan kegagalan juga bertambah karena perubahan dalam parameter

kenaikan. Untuk lebih jelasnya hanya permukaan kegagalan yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Setelah kondisi  $f_{(\sigma)} < 0$  terpenuhi, *bisection algorithm* dapat digunakan. Diperlukan dua titik dengan parameter kenaikan yang memberikan tanda berbeda pada fungsi yang dievaluasi. Sebagai contoh, pada Gambar 2.10 point pertama dan kedua ( $k_a$ ,  $k_b$ ) dari parameter kenaikan dapat dihubungkan dengan titik P4 ( $k_4$ ) dan titik P5 ( $k_5$ ). Setelah kedua titik ditetapkan, titik tengah antara  $k_a$  dan  $k_b$  berfungsi sebagai parameter kenaikan baru. Kemudian permukaan kegagalan dievaluasi dan jika nilai dari  $f_{(\sigma)} > 0$ , maka nilai  $k_a$  perlu diganti dengan parameter kenaikan baru. Jika tidak nilai  $k_b$  yang perlu diganti dengan parameter kenaikan baru. Metode ini dijalankan berulang kali sampai nilai absolut dari  $f_{(\sigma)}$  jatuh dibawah toleransi spesifik. Dengan menggunakan metode ini, dijamin bahwa peralihan antara *plastic volumetric compaction* dan *plastic volumetric dilation* akan berhasil ditemukan.

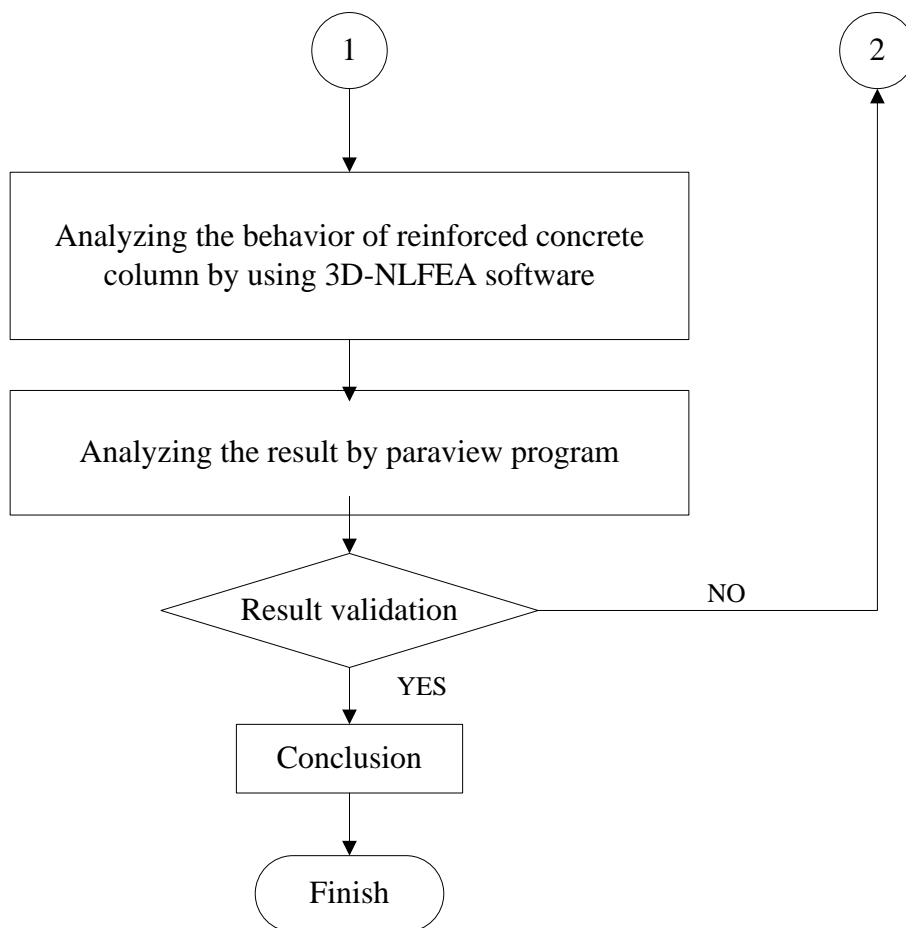
## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Bagan Alir Penyelesaian Penelitian

Bagan alir merupakan gambaran umum dari tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian ini, dimana dalam penyelesaian penelitian ini bagan alir akan tersaji dalam Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



**Gambar 3.1** Flow chart

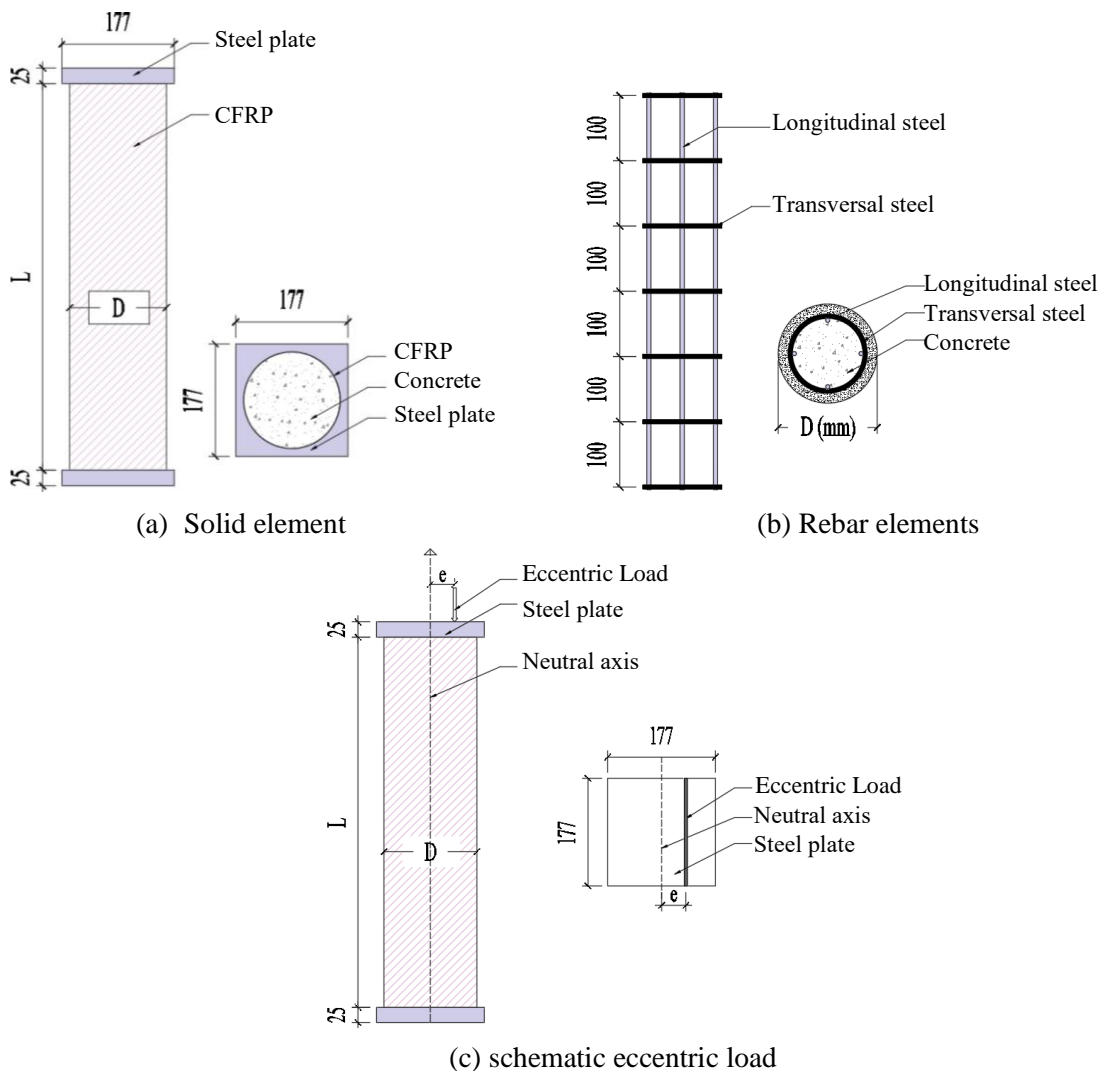


**Gambar 3.2** Flow chart (continue)

### 3.2 Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Pengumpulan data dan studi literatur dilakukan untuk memperdalam pemahaman terhadap elemen yang diangkat sebagai topik penelitian. Berdasarkan beberapa sumber, baik dari jurnal penelitian terdahulu, eksperimental, buku maupun permodelan sehingga sumber tersebut dapat dijadikan pedoman dalam melakukan penelitian.

Data properti dan geometri penampang yang digunakan dalam penilitan numerik ini adalah merupakan data eksperimental yang telah dilakukan oleh (Bisby and Ranger 2010, Fitzwilliam and Bisby 2010, Wu and Jiang 2013, Jiang, Zhang et al. 2014). Dimana data – data hasil eksperimental tersebut dapat digambarkan dan ditabelkan seperti Gambar 3.3 dan Tabel 3.1 – Tabel 3.5.



**Gambar 3.3** Side view and cross section

Dari hasil penelitian eksperimental, total spesimen yang akan dimodelkan dan dianalisa pada penelitian numerik kali ini adalah 19 spesimen dengan data spesifikasi seperti pada Tabel 3.1 – Tabel 3.5 dan berikut merupakan keterangan dari notasi yang ada :

D	=	Diameter Kolom	rho	=	Kepadatan Beton
L	=	Tinggi Kolom	Ec	=	Modulus Elastisitas Beton
$t_f$	=	Tebal Nominal CFRP	$f_y$	=	Tegangan Leleh Baja.
d	=	Diameter Tulangan	pos	=	Poisson rasio
n	=	Jumlah dari Tulangan	Es	=	Modulus Elastisitas Baja
s	=	Jarak Antar Tulangan	$E_f$	=	Modulus Elastisitas CFRP

$e$	= Eksentrisitas Beban	$f_{yf}$	= Kuat Tarik CFRP
$f'_c$	= Kuat Tekan Beton	$f_{uf}$	= Kuat Putus CFRP
$f_t$	= Kuat Tarik Beton	$\varepsilon_f$	= Regangan Putus CFRP

Tabel 3.1 menunjukkan informasi dasar dari sifat – sifat geometri dan material untuk setiap spesimen. Perlu dicatat untuk memasukkan nilai kuat tekan silinder beton ( $f_{c_0}'$ ) ke dalam kuat tekan kolom ( $f_c'$ ) perlu dikalikan dengan faktor reduksi sebesar 0.85 karena efek ukuran dari silinder ke kolom dan juga perbedaan antara kekuatan tekan silinder beton dengan beton yang cor ditempat atau *cast in situ*.

**Tabel 3.1** Basic Input Geometry and Material Properties

Source	Specimen ID	D	L	d	n	s	e	f <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)
Bisby dan Ranger (2010)	C5	152	608	6.4	4	100	5	33.2	710
	C10	152	608	6.4	4	100	10	33.2	710
	C20	152	608	6.4	4	100	20	33.2	710
	C30	152	608	6.4	4	100	30	33.2	710
	C40	152	608	6.4	4	100	40	33.2	710
Fitzwilliam dan Bisby (2010)	300C-1-0-A	152	300	6.4	4	100	20	30.5	693
	600C-1-0-A	152	600	6.4	4	100	20	30.5	693
	900C-1-0-A	152	900	6.4	4	100	20	30.5	693
	1200C-1-0-B	152	1200	6.4	4	100	20	30.5	693
Wu dan Jiang (2013)	A1E10/B1E10	150	300	-	-	-	10	28.7	-
	A2E10/B2E10	150	300	-	-	-	10	30.1	-
Jiang et al. (2014)	L1E10A/L1E10B	150	300	-	-	-	10	38.1	-
	L1E20A/L1E20B	150	300	-	-	-	20	38.1	-
	L1E30A/L1E30B	150	300	-	-	-	30	38.1	-
	L1E40A/L1E40B	150	300	-	-	-	40	38.1	-
	L2E10A/L2E10B	150	300	-	-	-	10	39.4	-
	L2E20A/L2E20B	150	300	-	-	-	20	39.4	-
	L2E30A/L2E30B	150	300	-	-	-	30	39.4	-
	L2E40A/L2E40B	150	300	-	-	-	40	39.4	-

(Source: Bisby and Ranger 2010;Fitzwilliam and Bisby 2010;Wu and Jiang 2013;Jiang et al. 2014)



Tabel 3.2 menunjukkan input yang lebih rinci untuk material beton yang digunakan sebagai parameter input dalam model plastisitas yang digunakan.

**Tabel 3.2** Input Material Properties for The Concrete Material

Source	$f_{co}$	$f'_c$	RHO	$f_t$	$E_c$
	(Mpa)	(Mpa)	(kg/m <sup>3</sup> )	(Mpa)	(Mpa)
Bisby and Ranger (2010)	33.2	28.22	2000	3.557	20431.11
Fitzwilliam and Bisby (2010)	30.5	25.925	2000	3.409	19582.71
Wu and Jiang (2013)	28.7	24.395	2000	3.307	18996.07
	30.1	25.585	2000	3.387	19453.88
Jiang et al. (2014)	38.1	32.385	2000	3.811	21886.96
	39.4	33.49	2000	3.875	22257.23

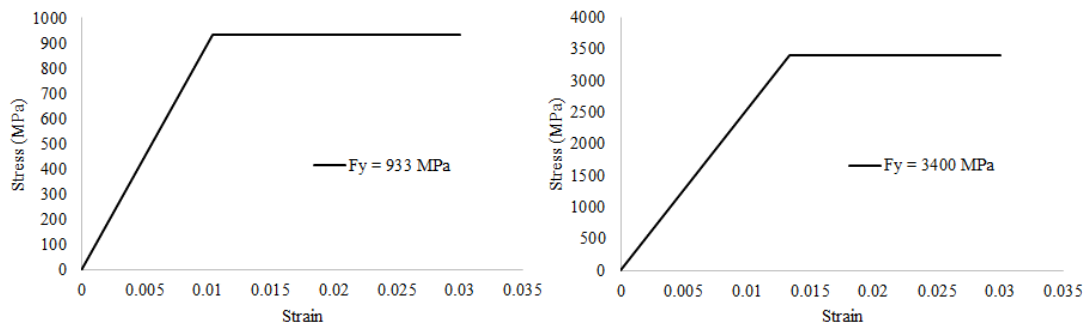
(Source: Bisby and Ranger 2010; Fitzwilliam and Bisby 2010; Wu and Jiang 2013; Jiang et al. 2014)

Pada bahan CFRP, karena matriks kekakuan yang digunakan untuk bahan isotropic transversal, maka modulus elastisitas utama dalam arah CFRP lateral dan modulus elastis kecil yang tegak lurus terhadap arah CFRP lateral harus diberikan. Dalam kasus ini tidak ada data yang disediakan untuk arah minor yang tegak lurus dari arah CFRP lateral, maka digunakan nilai minimum antara 10 persen dari modulus elastis CFRP arah lateral hingga 10 GPa untuk mendefinisikan kekakuannya. Pada Tabel 3.3 menunjukkan input dari data material CFRP yang digunakan pada model.

**Tabel 3.3.** Input Material Properties for The CFRP Material

Source	$t_f$	$f_{yf}$	$f_{uf}$	$E_f$	POS	$\epsilon_f$
	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(%)
Bisby dan Ranger (2010)	0.38	933	1014	90000	0.3	1.12
Fitzwilliam dan Bisby (2010)	0.381	933	1014	88200	0.3	1.12
Wu dan Jiang (2013)	0.167	3400	4192	254000	0.3	1.84
Jiang et al. (2014)	0.11	3400	4192	268000	0.3	1.84

(Source: Bisby and Ranger 2010; Fitzwilliam and Bisby 2010; Wu and Jiang 2013; Jiang et al. 2014)



**Gambar 3.4** Stress - strain curve of CFRP material

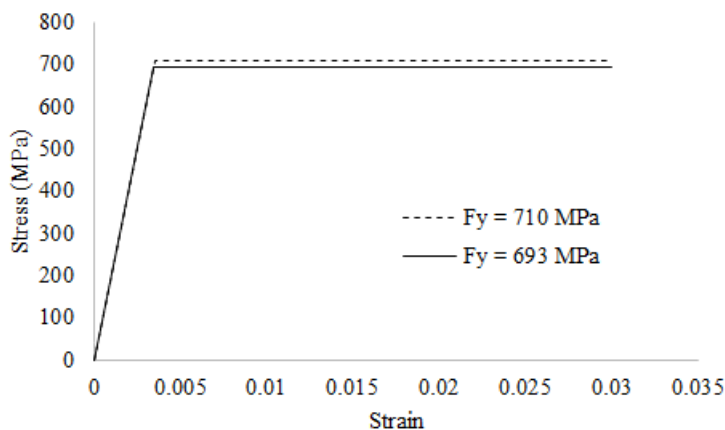
Dalam input data material pelat baja dan tulangan baik transversal maupun longitudinal pada program 3D-NLFEA menggunakan *bi-linier von misses* dengan data material seperti pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5.

**Tabel 3.4** Input Material Properties for The Rebar Material

Source	d	fy	POS	Es
	(mm)	(MPa)		(MPa)
Bisby dan Ranger (2010)	6.4	710	0.25	200000
Fitzwilliam dan Bisby (2010)	6.4	693	0.25	200000

(Source: Bisby and Ranger 2010; Fitzwilliam and Bisby 2010)

Pada penelitian kali ini akan digunakan dua kekuatan tulangan yang berbeda sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Bisby dan Ranger (2010) dan Fitzwilliam dan Bisby (2010), akan digunakan mutu tulangan 710 MPa dan 639 MPa (lihat Gambar 3.5).



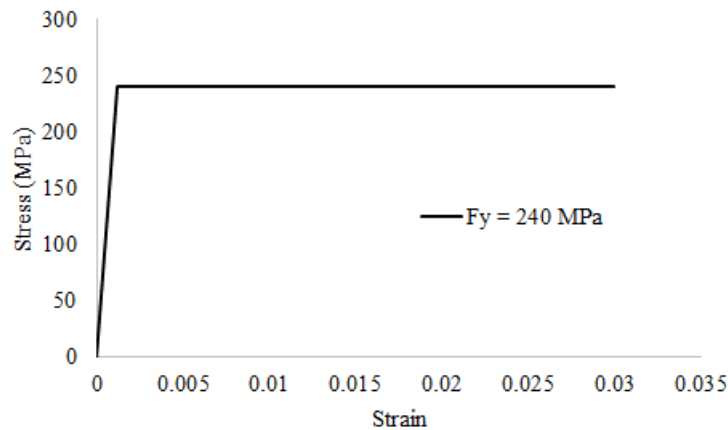
**Gambar 3.5** Stress - strain curve of rebar material

**Tabel 3.5** Input Material Properties for The Steel Plate Material

Source	t	fy	POS	Es
	(mm)	(MPa)		(MPa)
Bisby dan Ranger (2010)	25	240	0.3	200000
Fitzwilliam dan Bisby (2010)	25	240	0.3	200000
Wu dan Jiang (2013)	25	240	0.3	200000
Jiang et al. (2014)	25	240	0.3	200000

(Source: Bisby and Ranger 2010; Fitzwilliam and Bisby 2010; Wu and Jiang 2013; Jiang et al. 2014)

Pada penelitian kali ini akan digunakan kekuatan leleh untuk pelat baja adalah BJ37 dengan kuat leleh sebesar 240 MPa (lihat Gambar 3.6).

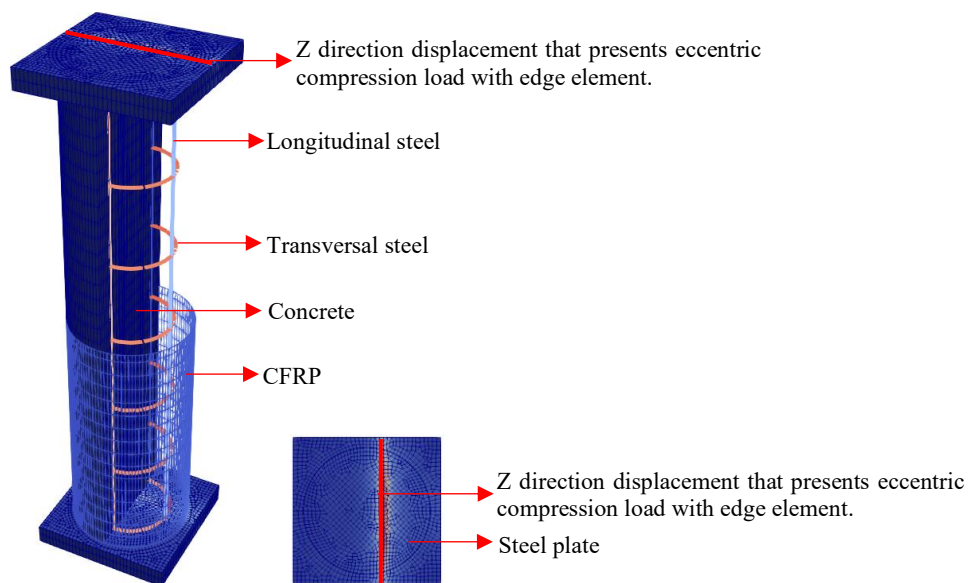


**Gambar 3.6** Stress - strain curve of steel plate material

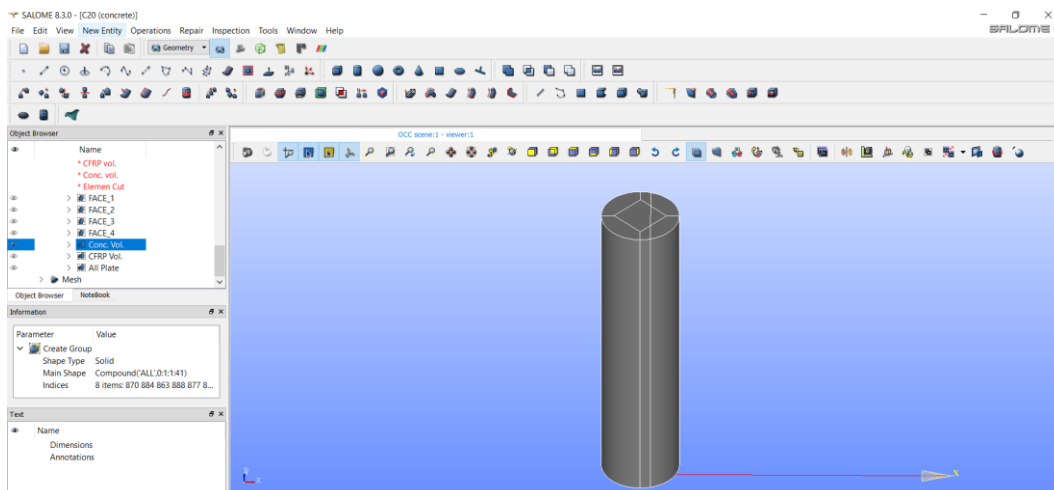
### 3.3 Pemodelan Kolom

Program bantu yang digunakan untuk memodelkan penampang geometri kolom ini menggunakan SALOME. Model penampang geometri kolom ini terdiri dari 2 model. Model pertama yaitu pemodelan elemen solid yang terdiri dari model elemen Beton, CFRP dan Pelat yang dibuat pada penampang atas dan bawah kolom sebagai landasan untuk beban eksentris, dimana ketiga elemen tersebut dibuat dalam satu model. Model kedua adalah pemodelan elemen tulangan dimana model ini terdiri dari tulangan longitudinal dan transversal yang dibuat dalam satu model. Input yang diberikan pada SALOME adalah data geometri tiap elemen kolom. Setelah 2 tipe model diatas selesai dibuat lalu dilakukan MASE pada tiap model yang ada. Beban yang diberikan berupa kontrol simpangan (*displacement control*) dengan peningkatan (*increment*) -0.01 mm searah sumbu Z sesuai Tabel 3.13.

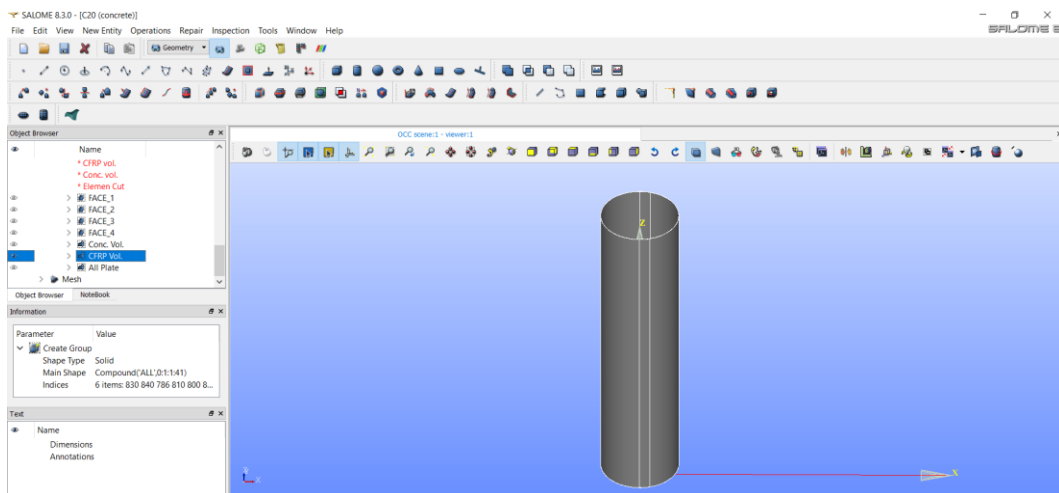
*Displacement control* tersebut mempresentasikan beban tekan yang ditampilkan lewat *reaction forced* dari tumpuan yang dibebani dengan eksentrisitas yang berbeda-beda (Gambar 3.7) sesuai dengan tipe spesimen yang digunakan. Sementara perletakan diatur sebagai jepit pada dasar spesimen yang di tahan (*restrain*) terhadap sumbu X, Y dan Z sesuai Tabel 3.12. Output dari permodelan menggunakan program Salome ini berbeda untuk masing – masing elemennya. Untuk elemen beton output yang didapat adalah data geometri restraint, displacement, inti dan cover, dan untuk elemen tulangan baik longitudinal dan transversal maupun elemen CFRP berupa jumlah dan label *Node* serta koordinat pada masing – masing *Node* tersebut.



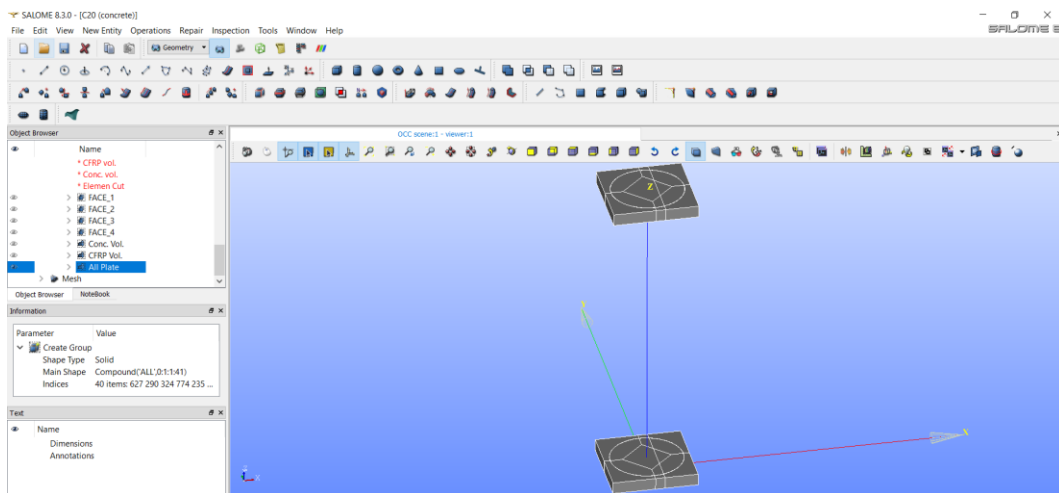
**Gambar 3.7** Model of column element which is confinement by using CFRP



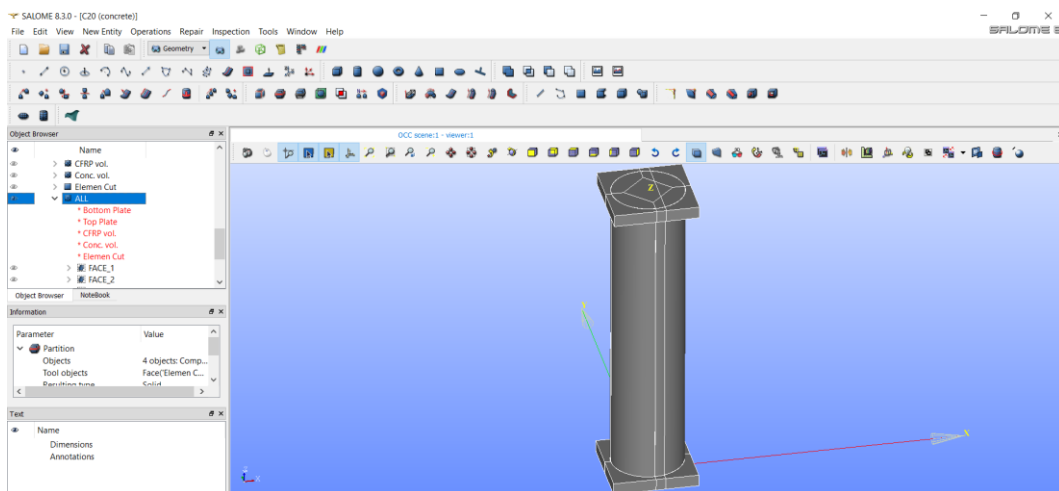
**Gambar 3.8** Model of concrete element



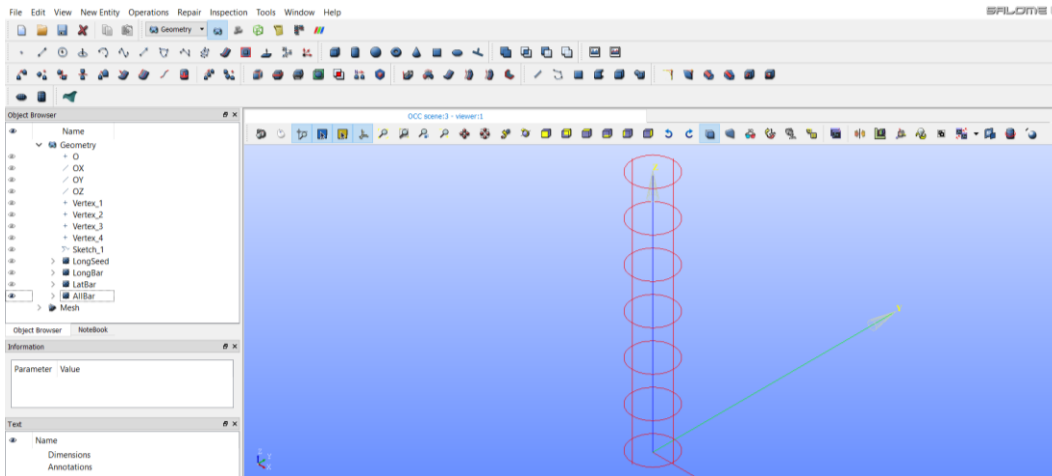
**Gambar 3.9** Model of CFRP element



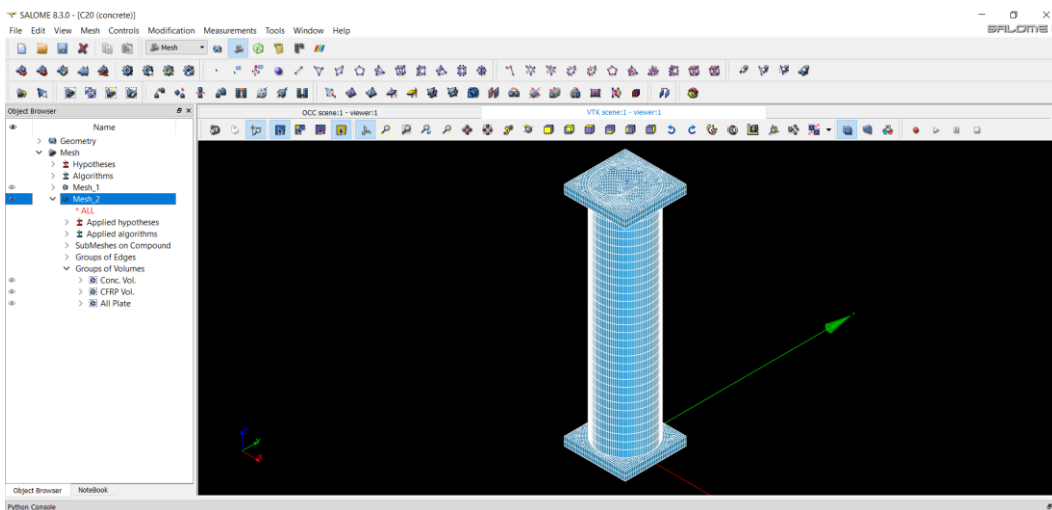
**Gambar 3.10** Model of steel plate element



**Gambar 3.11** Full model of the solid element (concrete, CFRP and steel plate)



**Gambar 3.12** Model of rebar element



**Gambar 3.13** Meshing of solid element

### 3.4 Merekap dan Menginput Data Geometri Hasil Pemodelan

Data geometri yang didapat dari program Salome dan dituangkan dalam bentuk Notepad kemudian akan diinput pada excel yang kemudian akan menjadi file input pada program 3D-NLFEA. Selain data geometri yang telah diinput pada excel juga akan dilakukan pendefinisian material pada masing-masing elemen juga properti tulangan longitudinal dan transversal maupun properti dari CFRP.

**Tabel 3.6** Defining The Concrete Material

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	
1	33.2	0	1	2000	1	5	0.2025	4	0.52	1.2	22161	3.858	0.002659	

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.7** Defining The Rebar Material

BI-LINEAR STRESS STRAIN [REBAR]				
ACTIVE:	2	ID: BAR_BILINEAR_?		
NO	FY	POS	ES	ESH
1	710.00	0.25	200000.00	0.00
2	710.00	0.25	200000.00	0.00

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.8** Defining The Steel Plate Material

BI-LINEAR VON MISES MATERIAL [SOLID]				
ACTIVE:	1	ID: MISES_?		
NO	FY	POS	ES	ESH
1	240.00	0.30	200000.00	0.00
2	200.00	0.25	100000.00	0.00

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.9** Defining The CFRP Material

TRANSVERSELY ISOTROPIC FRP MATERIAL [SOLID]												
ACTIVE:	1	ID: FRP_?										
NO	FY	POS_XY	POS_YZ	POS_ZX	ES_X	ES_Y	ES_Z	G_XY	G_YZ	G_ZX	ESH_X	
1	933	0.3	0.3	0.3	90000	5000	5000	1923	1923	1923	0	
2	2000	0.3	0.3	0.3	81200	8000	8000	3077	3077	3077	0	

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.10** Label and Element Node Coordinate of Concrete, CFRP and Plate Definition

ID	TYPE	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	LOCAL	MAT	CONC_TYPE
1	308	189	190	191	192	7085	6908	7599	8439	8439	PISCESA_1	CORE
2	308	7085	6908	7599	8439	7081	6907	7627	8440	8440	PISCESA_1	CORE
3	308	7081	6907	7627	8440	7077	6906	7655	8441	8441	PISCESA_1	CORE
28893	308	4233	5062	5705	5586	20644	33189	38641	38581	38581	FRP_1	CORE
28894	308	20644	33189	38641	38581	20645	33190	38642	38582	38582	FRP_1	CORE
28895	308	20645	33190	38642	38582	20646	33191	38643	38583	38583	FRP_1	CORE
32489	308	1	2	3	4	6665	6662	6686	6714	6714	MISES_1	CORE
32490	308	6665	6662	6686	6714	189	190	191	192	192	MISES_1	CORE
32491	308	5	1	4	6	6666	6665	6714	6715	6715	MISES_1	CORE

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.11** Label and Element Node Coordinate of Rebar Definition

ID	LOCAL 1	LOCAL 2	MAT	AREA	STEP_ACTIVE
1	29	1	BAR_BILINEAR_1	32.16991	1
2	1	485	BAR_BILINEAR_1	32.16991	1
3	485	486	BAR_BILINEAR_1	32.16991	1
489	1	37	BAR_BILINEAR_2	32.16991	1
490	37	38	BAR_BILINEAR_2	32.16991	1
491	38	39	BAR_BILINEAR_2	32.16991	1

(Source: Calculation Results)

**Tabel 3.12** Label and Node Coordinate of Restraint Definition

SEQS:	1	ROW:		3	COUNT:			642
ID	NODE NUMBER	REST-X	REST-Y	REST-Z	VAL-X	VAL-Y	VAL-Z	
1	23.00	1	1	1	0	0	0	
2	24.00	1	1	1	0	0	0	
3	25.00	1	1	1	0	0	0	
4	26.00	1	1	1	0	0	0	
5	27.00	1	1	1	0	0	0	

(Source: Calculation Results)

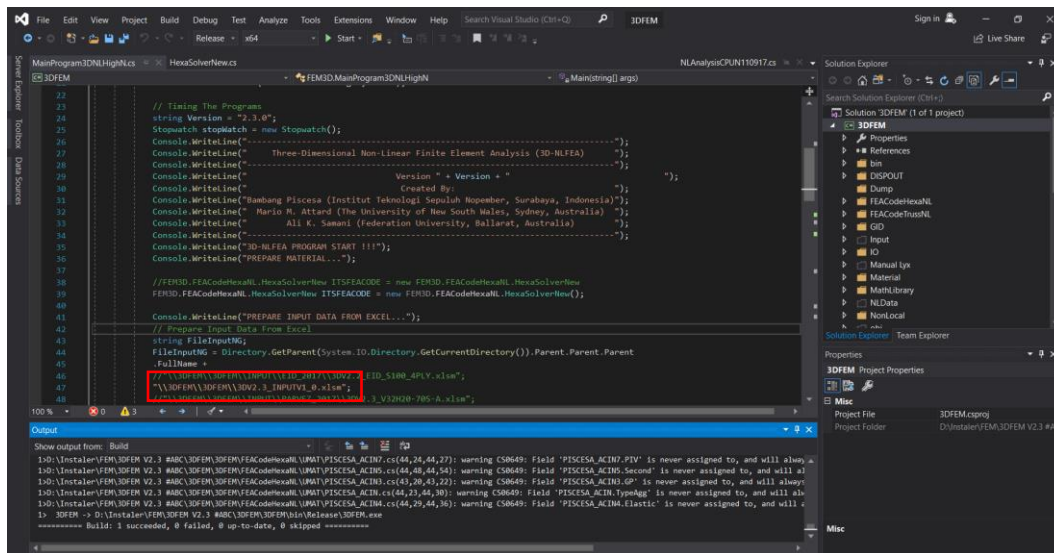
**Tabel 3.13** Label and Node Coordinate of Displacement Definition

SEQS:	1	ROW:	3	COUNT:	321		
ID	NODE NUMBER	REST-X	REST-Y	REST-Z	VAL-X	VAL-Y	VAL-Z
1	1.00E+00	0	0	1	0	0	-0.01
2	2.00E+00	0	0	1	0	0	-0.01
3	3.00E+00	0	0	1	0	0	-0.01
4	4.00E+00	0	0	1	0	0	-0.01
5	5.00E+00	0	0	1	0	0	-0.01

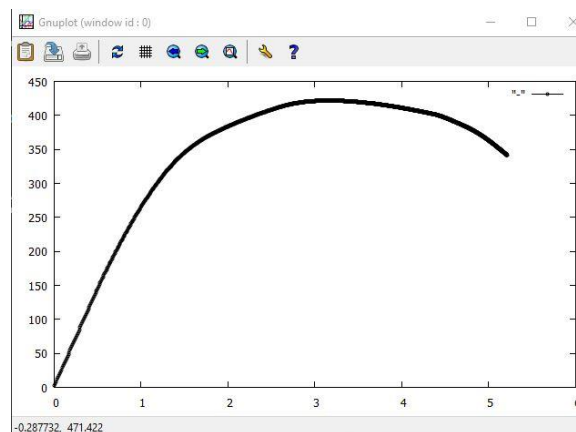
(Source: Calculation Results)

### 3.5 Analisa Perilaku Model

Data-data geometri dan properti yang telah diinput pada excel akan diinputkan dalam Program 3D-NLFEA untuk memperoleh kurva hubungan beban dengan perpindahan (P vs  $\Delta$ ) dari Tiap Spesimen kolom beton yang dikekang secara eksternal menggunakan *Carbon Fiber Reinforce Polymer* (CFRP) dengan beban aksial eksentris yang telah dimodelkan.



**Gambar 3.14** Input excel file in the 3D-NLFEA program





```

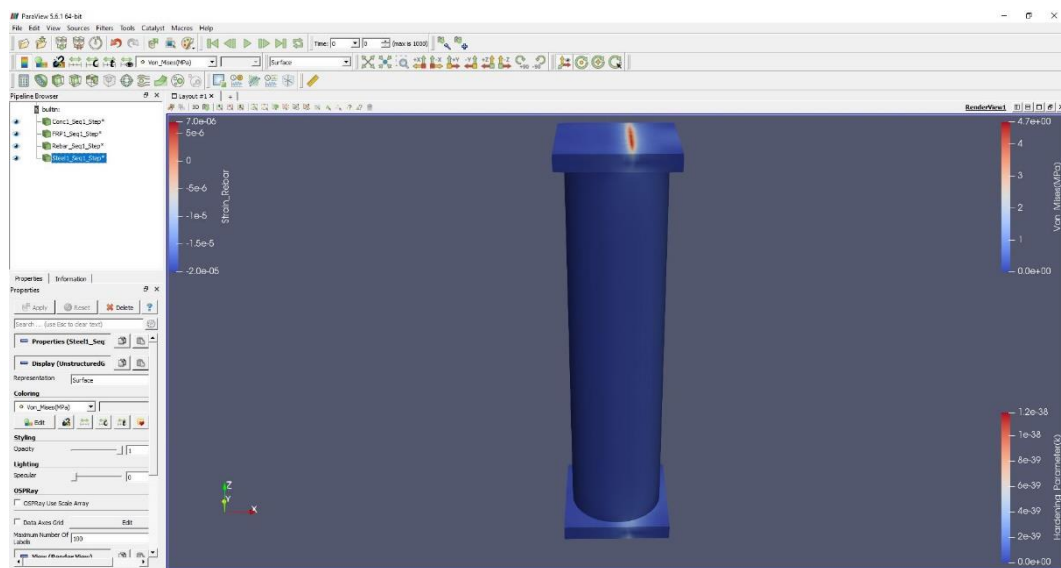
C:\3DNLFEA\3DFEM V2.3 #ABC_2.R2\3DFEM\3DFEM\bin\Release\3DFEM.exe
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 24 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 25 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 26 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 27 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 28 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 29 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 30 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 31 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 32 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 33 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 34 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 35 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 36 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 37 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 38 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 ENFORCED BOUNDARY CONDITION - DISPLACEMENT CONTROL 39 OF 39
STEP 2000 SUB-ITERATION 1 STAGE 1 TOL = 2.000950E-002 TOL1 = 1.825002E+002 K = 0.000000E+000 LambdaTot = 1.999105E+003 L
F = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 2000 SUB-ITERATION 2 STAGE 1 TOL = 3.841203E-004 TOL1 = 1.341311E+002 K = 0.000000E+000 LambdaTot = 1.999105E+003 L
F = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 2000 SUB-ITERATION 3 STAGE 1 TOL = 3.491044E-004 TOL1 = 1.042194E+002 K = 0.000000E+000 LambdaTot = 1.999105E+003 L
F = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 2000 SUB-ITERATION 4 STAGE 1 TOL = 3.806323E-004 TOL1 = 8.403214E+001 K = 0.000000E+000 LambdaTot = 1.999105E+003 L
F = 1.000000E+000 ETA = 1.000000E+000
STEP 2000 FINAL DISPLACEMENT = -5.21081135382866 MM
SOLVER FINISHED (3D-NLFEA Version 2.3.0)...
PREPARE OUTPUT DATA...
PREPARE OUTPUT DATA >> EXTRACT TO GID...
PROGRAM FINISHED !!!...

```

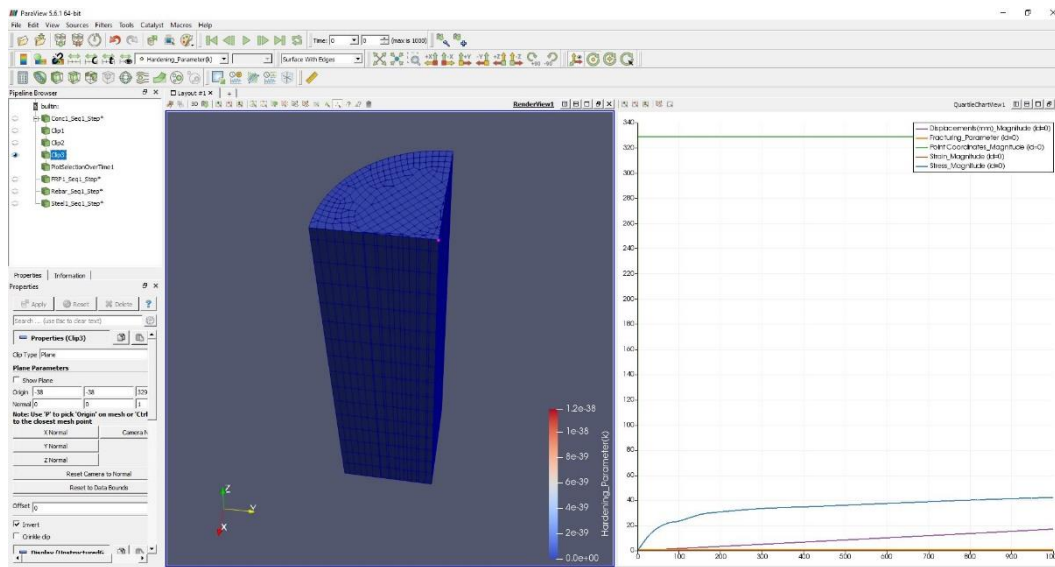
Gambar 3.15 Result of the 3D-NLFEA program

### 3.6 Analisa Hasil

Setelah dilakukan running model dengan program 3D-NLFEA didapatkan hasil running model kolom beton bertulang yang dikekang secara external menggunakan *Carbon Fiber Reinforce Polymer* (CFRP) pada program 3D-NLFEA berupa kurva hubungan beban dengan perpindahan ( $P$  vs  $\Delta$ ) pada titik yang ditinjau yaitu pada permukaan atas penampang, kemudian hasil tersebut akan diolah kembali dengan program Paraview untuk mendapatkan data deformasi lateral dipertengahan tinggi kolom.



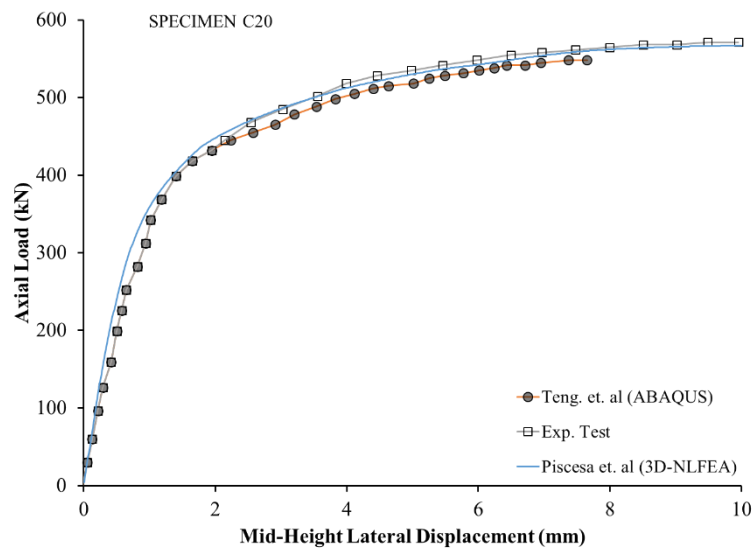
Gambar 3.16 Example of the column to be processed by paraview program



**Gambar 3.17** Result of the column that have been processed by paraview program

### 3.7 Validasi Hasil

Validasi hasil dilakukan setelah hasil dari program 3D\_NLFEA selesai diolah dari program Paraview yang berupa data deformasi lateral dipertengahan tinggi kolom. Selanjutnya hasil output tersebut akan divalidasi dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh (Bisby and Ranger 2010, Fitzwilliam and Bisby 2010, Wu and Jiang 2013, Jiang, Zhang et al. 2014) yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan beban dengan perpindahan ( $P$  vs  $\Delta$ ).



**Gambar 3.18** Example of axial load–lateral displacement curves of columns with load eccentricities.

### **3.8 Kesimpulan**

Membuat kesimpulan akhir dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, sehingga dapat diketahui bahwa bentuk kolom, rasio kelangsingan, jenis serat, pengaruh tulangan baik longitudinal maupun transversal, ketebalan lapisan dan orientasi lapisan CFRP serta perbedaan eksentrisitas beban dapat mempengaruhi bentuk dari kurva beban dengan perpindahan, sehingga diharapkan hasil yang didapat dari analisa program mendekati hasil eksperimental.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Umum**

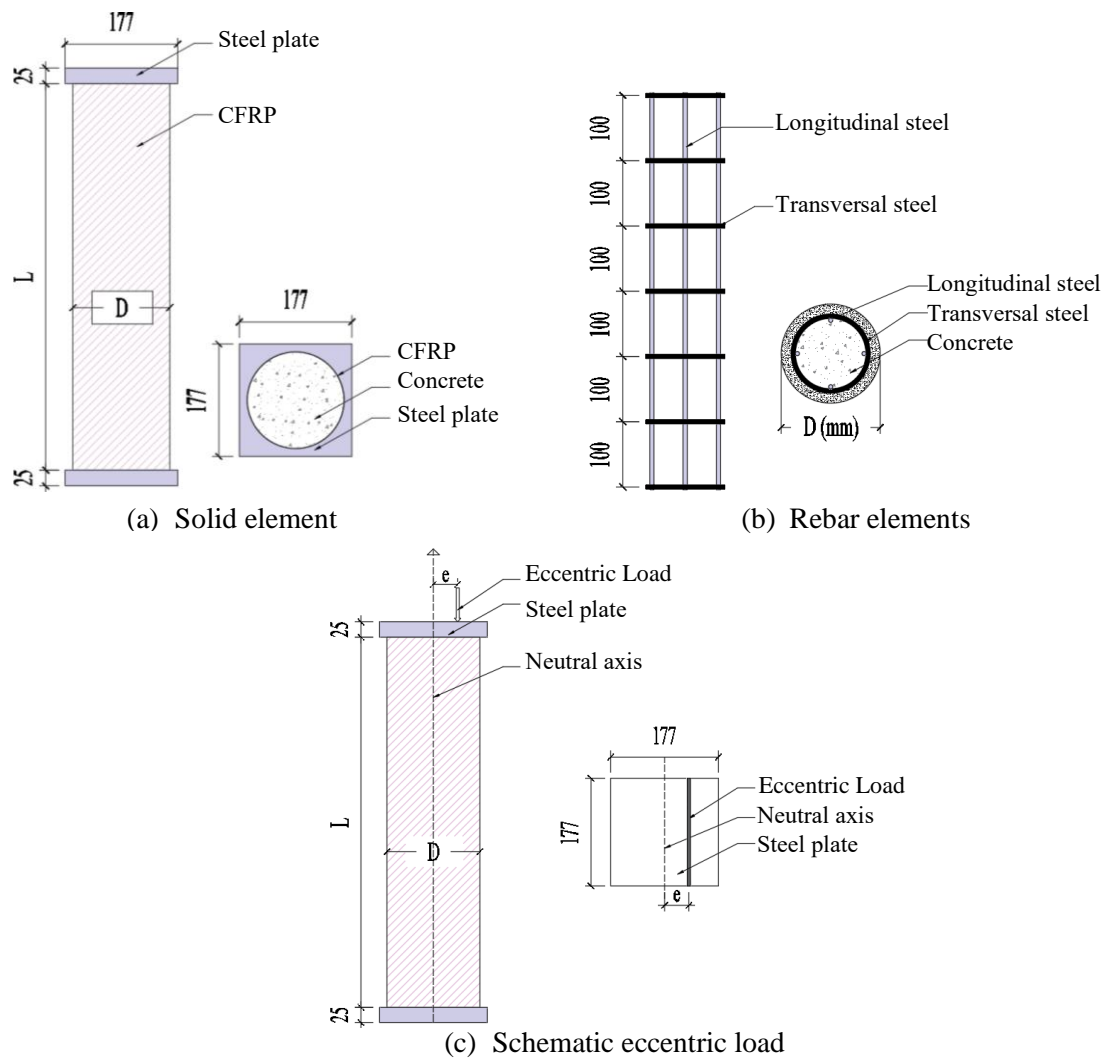
Pada bab ini akan disajikan hasil pemodelan kolom beton yang diberi pengekangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) berupa kurva beban (P) terhadap perpindahan ( $\Delta$ ) akibat beban aksial eksentris dengan menggunakan program bantu *3 Dimensional Non Linier Finite Elemen Analysis* (3D-NLFEA). Hasil analisis 3D-NLFEA dari beberapa spesimen kolom beton yang dimodelkan diverifikasi dengan hasil eksperimental yang dilakukan oleh (Bisby and Ranger 2010, Fitzwilliam and Bisby 2010, Wu and Jiang 2013, Jiang, Zhang et al. 2014). Dari keseluruhan hasil eksperimen diatas juga dilakukan analisa mengenai distribusi kontur modulus lateral dari tiap spesimen yang ada.

#### **4.2. Material Properties Kolom**

Parameter-parameter yang diinput ke definisi perilaku material pada excel yang menjadi file input pada Program 3D-NLFEA dapat disajikan pada Tabel 3.1 – Tabel 3.5. Parameter-parameter tersebut diinputkan sesuai dengan jenis dari material yang digunakan sesuai pada sub Bab 3.4 sebelumnya.

#### **4.3. Pemodelan dan Pembebanan Kolom**

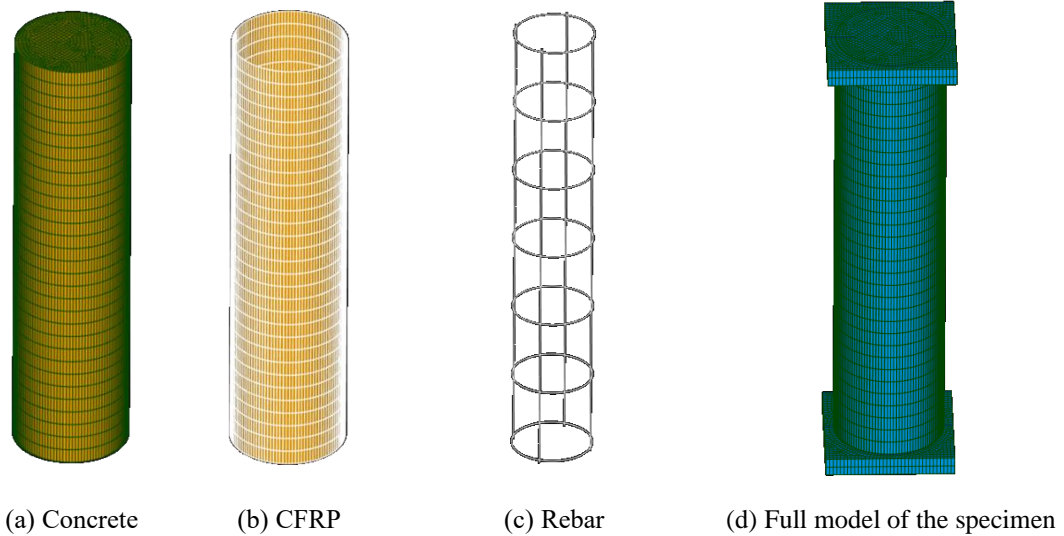
Pemodelan spesimen kolom beton dalam 3D menggunakan program bantu Salome sebagai data pengolah. Spesimen diberikan beban, berupa kontrol simpangan (*displacement control*) dengan peningkatan (*increment*) -0.01 mm searah sumbu Z sesuai Tabel 3.13. Kontrol simpangan tersebut mempresentasikan beban tekan yang ditampilkan lewat reaction forced dari tumpuan yang dibebani dengan eksentrisitas yang berbeda-beda (Gambar 4.1) sesuai dengan tipe spesimen yang digunakan. Sementara perletakan diatur sebagai jepit pada dasar spesimen yang di tahan (*restrain*) terhadap sumbu X, Y dan Z sesuai Tabel 3.12 agar perilakunya sama seperti eksperimen ketika diuji tekan.



**Gambar 4.1** Column specimen details

Gambar 4.2 menunjukkan contoh 3D model meshing dari spesimen kolom C20. Gambar 4.2.(a) menunjukkan mesh dari elemen beton, Gambar 4.2.(b) menunjukkan mesh dari elemen CFRP yang dimodelkan menggunakan *solid 3D hexahedral element*, Gambar 4.2.(c) menunjukkan mesh dari elemen tulangan transversal dan longitudinal yang dimodelkan menggunakan *embedded truss elements* dan Gambar 4.2.(d) menunjukkan mesh dari keseluruhan elemen kolom beton yang dikekang menggunakan CFRP. Total dari jumlah elemen adalah 39,088 dan total jumlah untuk nodes adalah 42,060 kemudian kedua nilai tersebut diinputkan pada excel sesuai dengan sub Bab 3.4 sebelumnya. Jumlah elemen dan

nodes tersebut dapat bertambah atau berkurang tergantung dari properties spesimen yang digunakan.



**Gambar 4.2** Specimen meshed model of a typical column under eccentric loading

#### 4.4. Kontrol Kesesuaian Hasil

Pada kontrol ini akan dilakukan validasi dengan perbandingan diagram beban dengan perpindahan ( $P-\Delta$ ) antara hasil 3D-NLFEA dengan hasil eksperimen dan Abaqus yang sudah dilakukan sebelumnya oleh (Lin and Teng 2017). Dan juga pada bab ini akan dilakukan perhitungan terhadap modulus lateral pada elemen beton untuk mengetahui tentang ke efektifitasan penggunaan pengekanan apakah kolom beton terkekang secara aktif atau pasif. Untuk kolom beton yang terkekang secara aktif, nilai dari tekanan pengekan (*confining pressure*) adalah konstan dan nilai dari modulus lateral adalah nol. Sedangkan kolom beton yang terkekang secara pasif nilai dari modulus lateral bervariasi tergantung dari laju beton, adanya tekanan pengekan dan kekakuan dari material pengekan.

##### 4.4.1 Spesimen dari Bisby dan Ranger (2010)

Kolom C5, C10, C20, C30 dan C40 dimodelkan seperti spesimen pada saat eksperimen dengan properti seperti pada Tabel 4.1. Pemodelan dari kelima spesimen yang digunakan tersebut terdiri dari 2 tahap model yaitu model elemen solid dan model elemen tulangan. Hasil pemodelan yang berupa kurva beban

dengan perpindahan (P- $\Delta$ ) didapatkan dengan jumlah elemen dan node pada masing – masing elemen solid dan elemen tulangan di tiap spesimen yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.1.** Property Specimen Data from Bisby and Ranger (2010).

Specimen	D	L	t <sub>f</sub>	d	n	s	e	f <sub>c</sub>	f <sub>y</sub>	E <sub>f</sub>	f <sub>yf</sub>
	mm	mm	mm	mm		mm	mm	MPa	MPa	GPa	MPa
C5	152	608	0.38	6.4	4	100	5	33.2	710	90	933
C10	152	608	0.38	6.4	4	100	10	33.2	710	90	933
C20	152	608	0.38	6.4	4	100	20	33.2	710	90	933
C30	152	608	0.38	6.4	4	100	30	33.2	710	90	933
C40	152	608	0.38	6.4	4	100	40	33.2	710	90	933

(Source: Bisby and Ranger 2010)

**Tabel 4.2.** Total Number of Elements and Node from Specimens.

Specimen	Solid		Rebar	
	Nodes	Volumes	Nodes	Edges
C5	26,688	24,772	940	964
C10	27,288	25,455	940	964
C20	42,060	39,088	940	964
C30	27,702	25,805	940	964
C40	27,084	25,214	940	964

(Source: Calculation Results)

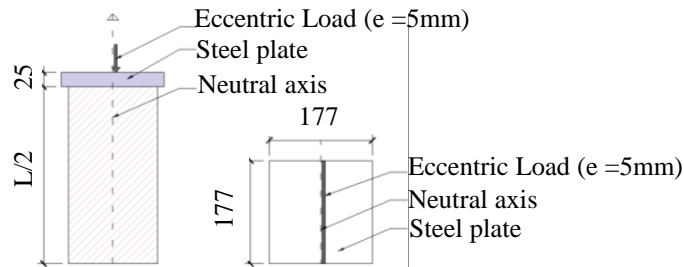
#### ❖ Hasil Spesimen C5

Data properti spesimen C5 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 5 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.3.

Gambar 4.4.(a) menunjukkan modulus lateral dari spesimen C5 pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D dari modulus lateral dalam keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya

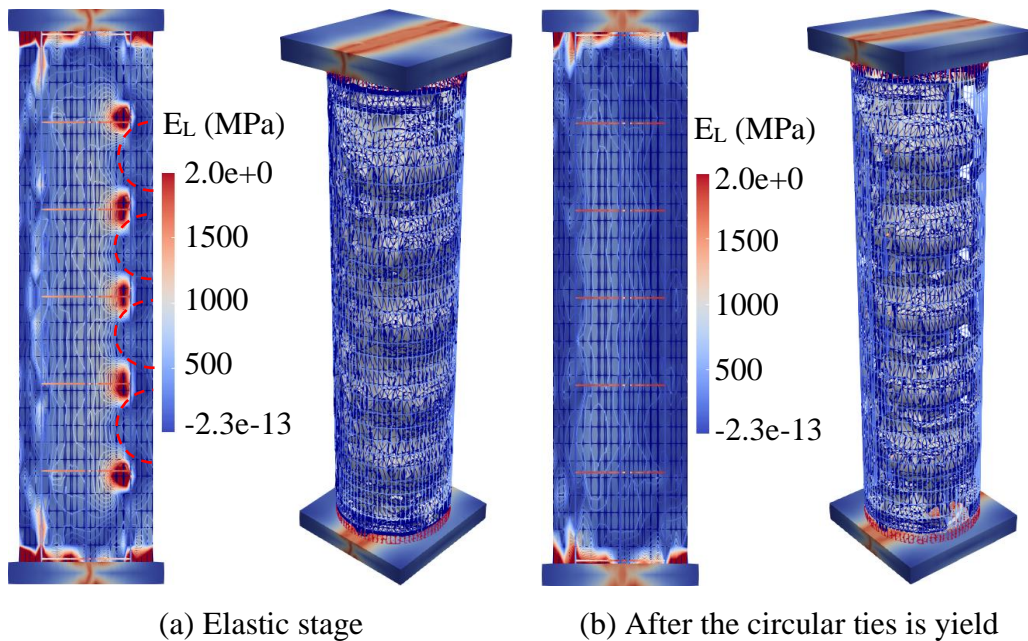


adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP.



**Gambar 4.3.** Schematic eccentric load from C5 specimen

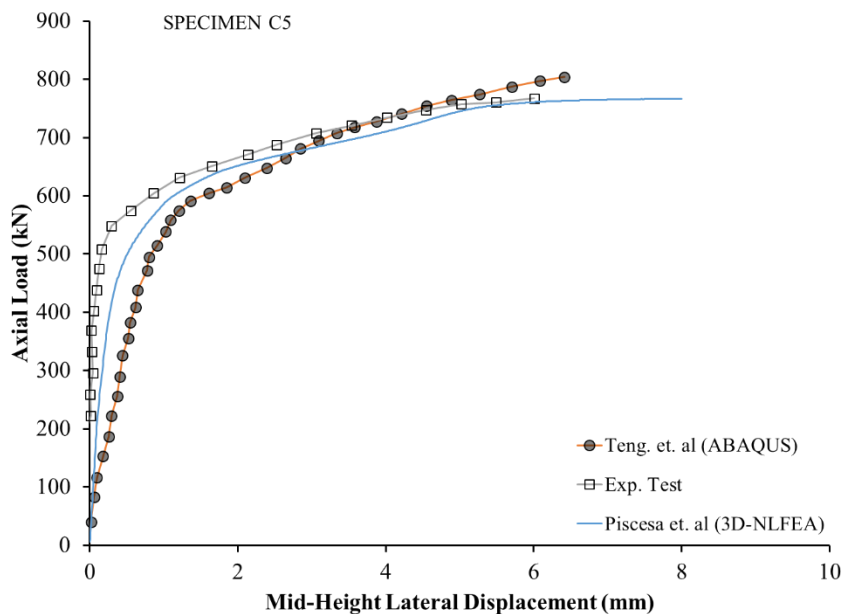
Pada inti beton nilai dari modulus lateral selalu lebih tinggi dari pada di luar inti beton (cover). Hal tersebut mudah untuk diidentifikasi karena beton pada intinya lebih terkekang baik oleh tulangan transversal maupun CFRP wrap dari pada diluar inti beton yang hanya terkekang oleh CFRP wrap saja. Perbedaan dari nilai modulus lateral tersebut akan memberikan perbedaan nilai dari laju kearah lateral pada beton. Pada inti beton laju kearah lateral beton jauh lebih rendah dari pada di cover. Hal tersebut menyebabkan terjadinya efek negatif pada cover beton dengan ditunjukkanya aksi lengkung pada kontur modulus lateral yang terlihat jelas dan ditandai dengan garis putus – putus berwarna merah. Aksi lengkung tersebut hanya terlihat pada area beton yang terbebani beban tekan saja.



**Gambar 4.4.** The C5 specimen volume with the EL contour

Gambar 4.4.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C5 pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D dari modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Nilai dari modulus lateral pada daerah ini juga lebih kecil dengan ditunjukkannya efek negatif dari laju kearah lateral plastis yang terjadi di inti beton dan diluar inti beton (cover).

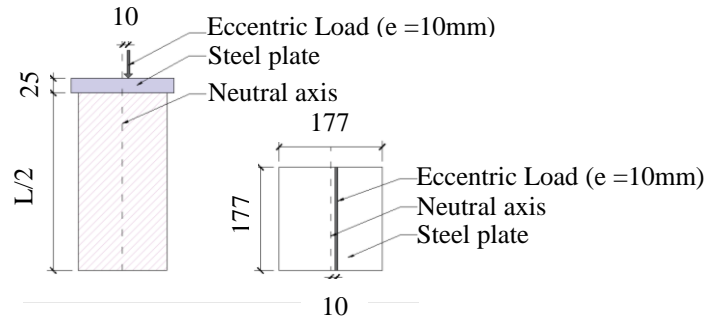
Gambar 4.5 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen C5. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen cukup tinggi, sedangkan hasil dari model Abaqus menunjukkan respon awal yang lebih rendah dari model 3D-NLFEA. Hasil dari model 3D-NLFEA menunjukkan kurva yang lebih kaku dari model Abaqus namun tidak lebih kaku dari hasil eksperimen. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa sedangkan untuk hasil analisa dari Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.



**Gambar 4.5** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C5 with 5 mm load eccentricities.

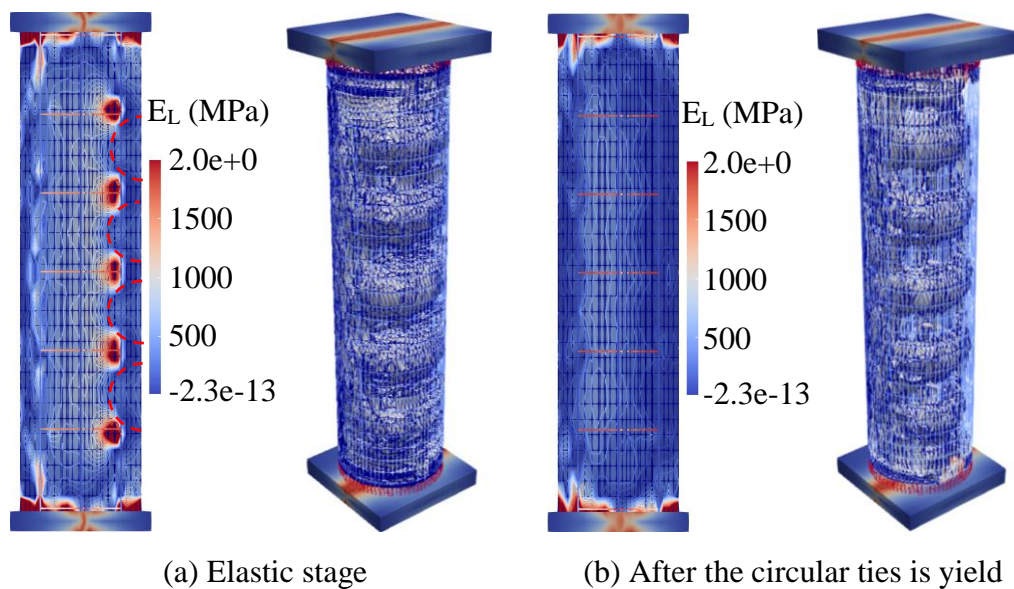
❖ Hasil Spesimen C10

Data properti spesimen C10 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 10 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6.** Schematic eccentric load from C10 specimen

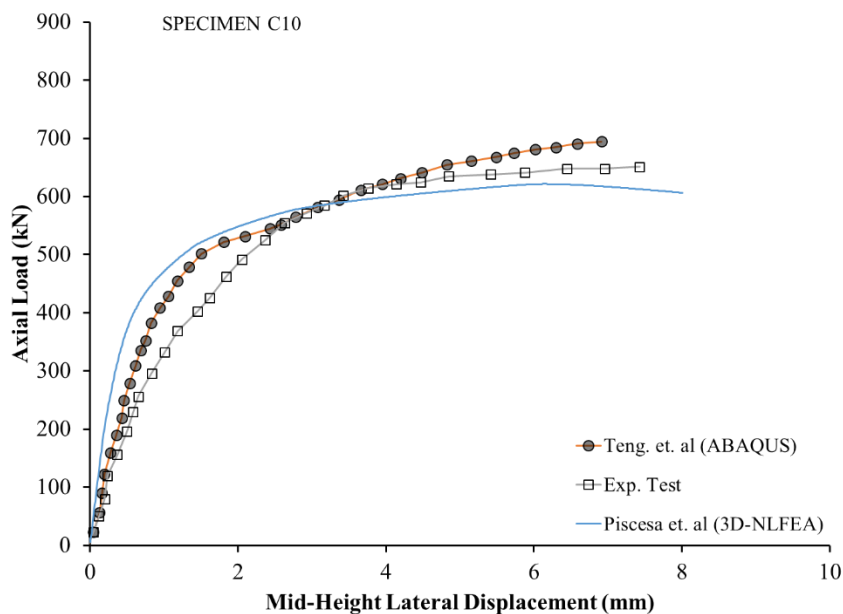
Gambar 4.7.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C10 dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP warp dan hasil dari analisa spesimen C10 pada keadaan elastis ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(a).



**Gambar 4.7.** The C10 specimen volume with the EL contour

Gambar 4.7.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C10 dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen C10 pada keadaan leleh ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(b).

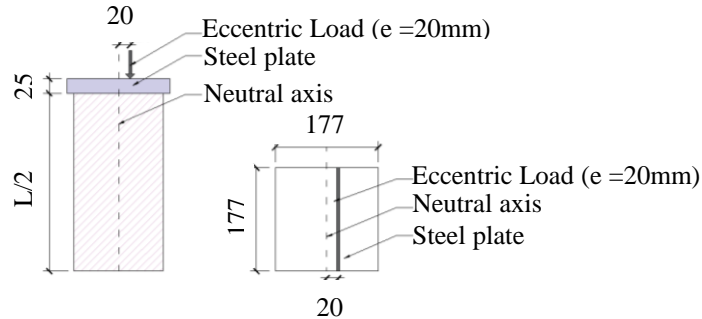
Gambar 4.8 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen C10. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen lebih rendah, sedangkan hasil dari model Abaqus menunjukkan respon awal yang lebih tinggi namun tidak lebih tinggi dari hasil model 3D-NLFEA. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa namun hasil dari 3D-NLFEA lebih rendah dari hasil eksperimen sedangkan untuk hasil analisa dari Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.



**Gambar 4.8** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C10 with 10 mm load eccentricities.

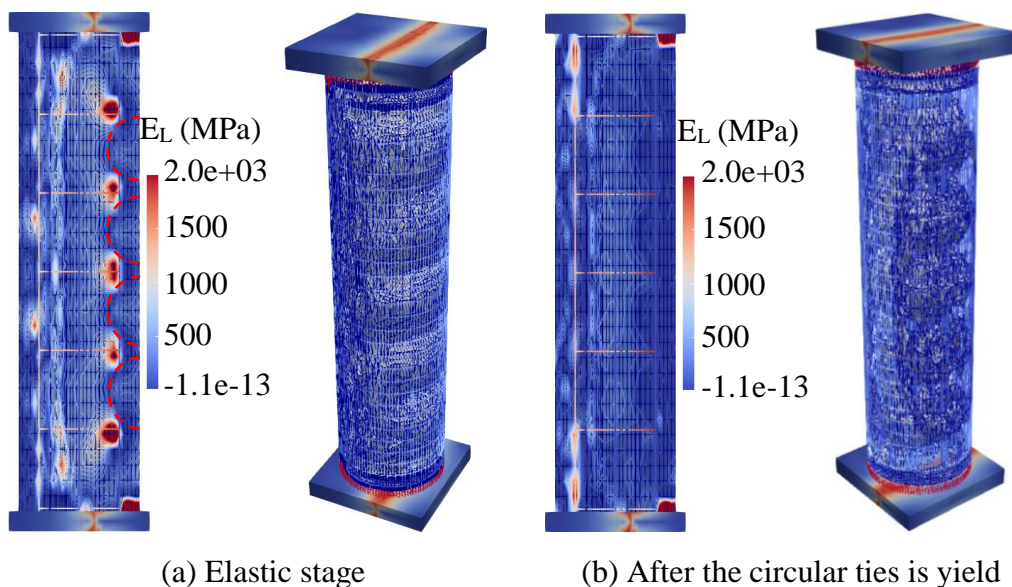
❖ Hasil Spesimen C20

Data properti spesimen C20 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9.** Schematic eccentric load from C20 specimen

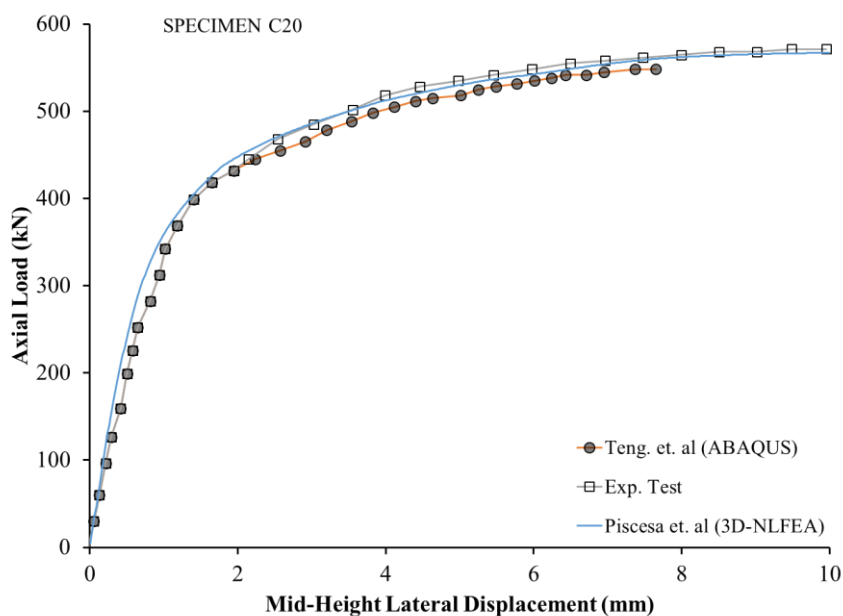
Gambar 4.10.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C20 dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP wrap dan hasil dari analisa spesimen C20 pada keadaan elastis ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(a).



**Gambar 4.10.** The C20 specimen volume with the EL contour

Gambar 4.10.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C20 dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen C20 pada keadaan leleh ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(b).

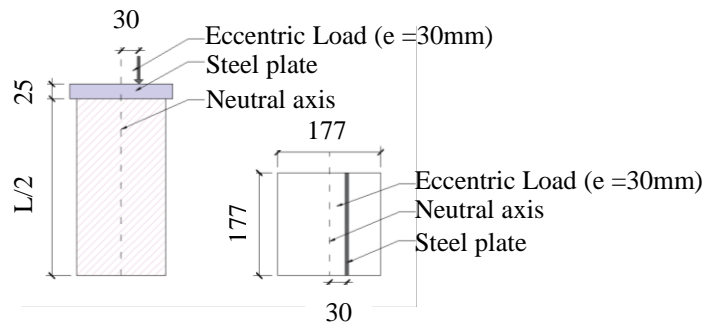
Gambar 4.11 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen C20. Tidak seperti kedua eksperimen sebelumnya, hasil analisa dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen.



**Gambar 4.11** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C20 with 20 mm load eccentricities.

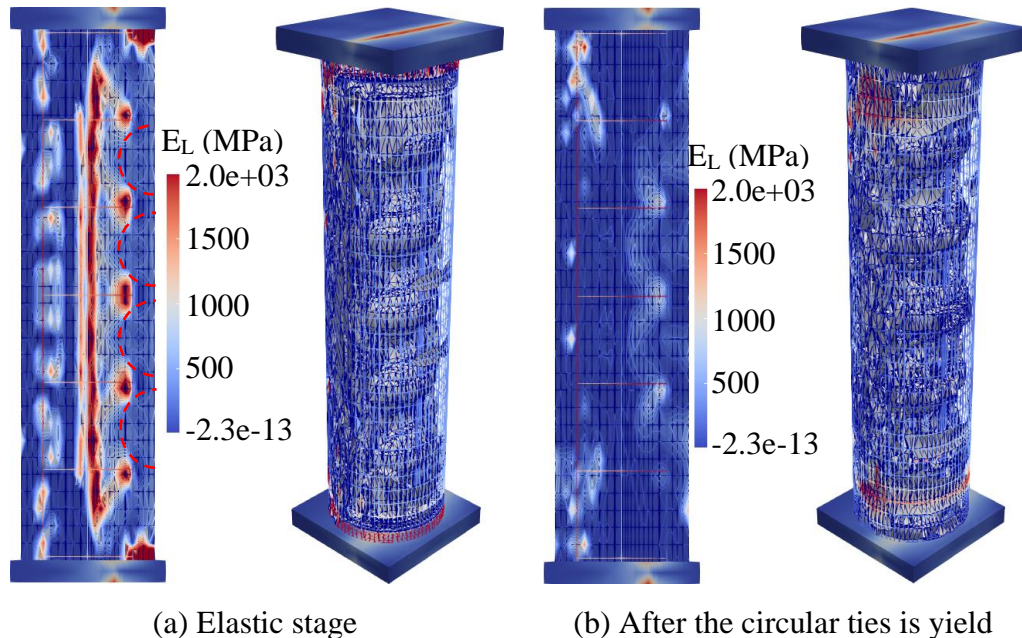
❖ Hasil Spesimen C30

Data properti spesimen C30 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 30 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.12.** Schematic eccentric load from C30 specimen

Gambar 4.13.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C30 dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP warp dan hasil dari analisa spesimen C30 pada keadaan elastis ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(a).

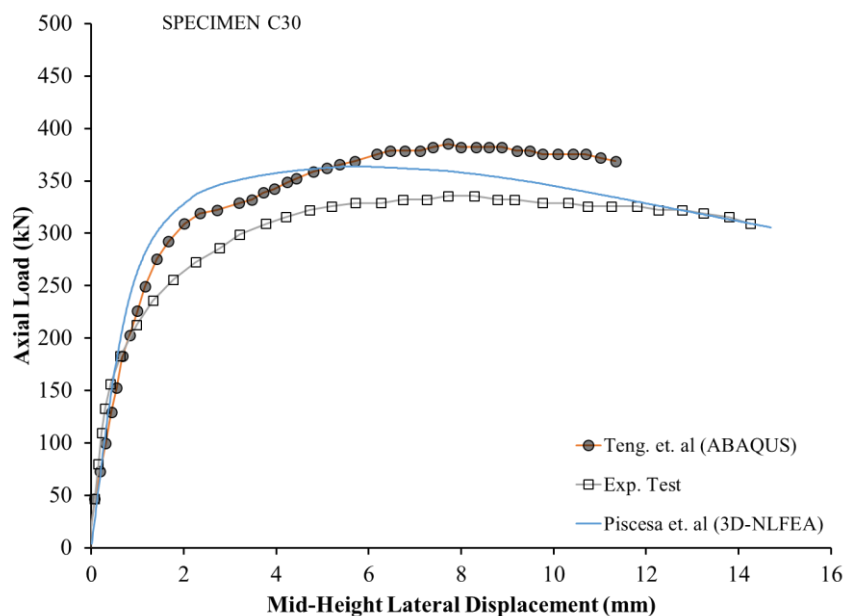


**Gambar 4.13.** The C30 specimen volume with the EL contour

Gambar 4.13.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C30 dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai

leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen C30 pada keadaan leleh ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(b).

Gambar 4.14 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen C30. Hasil dari model Abaqus dan 3D-NLFEA di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari Abaqus dan 3D-NLFEA berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen. Untuk perilaku hardening model dari 3D-NLFEA menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi dari eksperimen namun tidak setinggi dari hasil Abaqus.

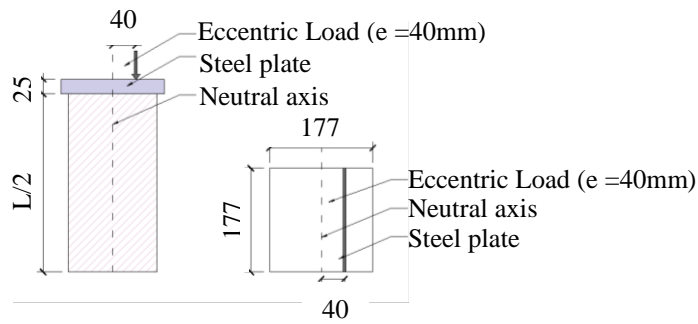


**Gambar 4.14** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C30 with 30 mm load eccentricities.

❖ Hasil Spesimen C40

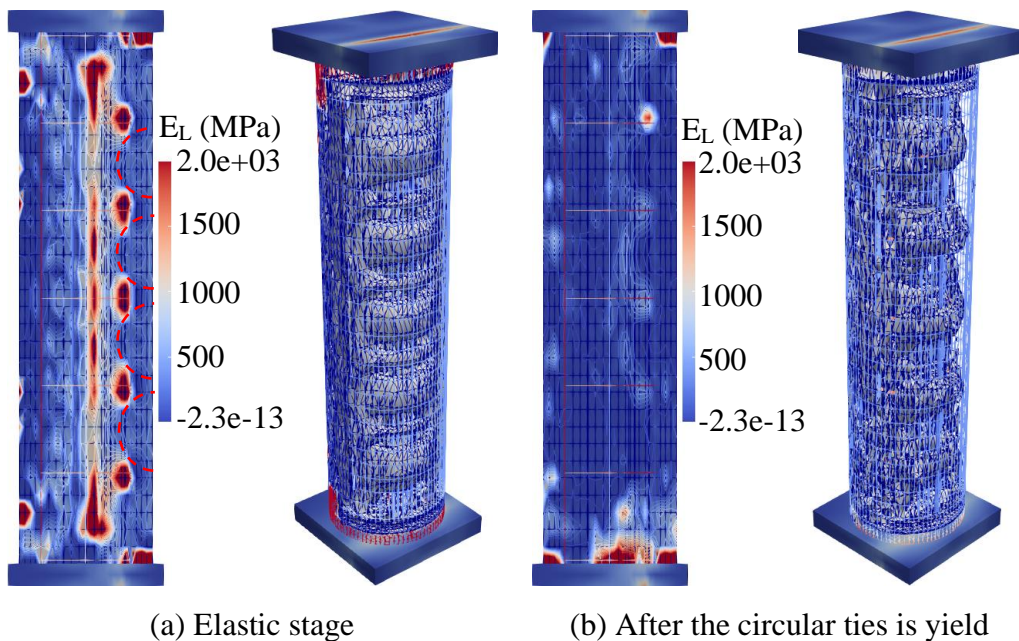
Data properti spesimen C40 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 40 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.15.





**Gambar 4.15.** Schematic eccentric load from C40 specimen

Gambar 4.16.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C40 dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelepasan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP wrap dan hasil dari analisa spesimen C40 pada keadaan elastis ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(a).

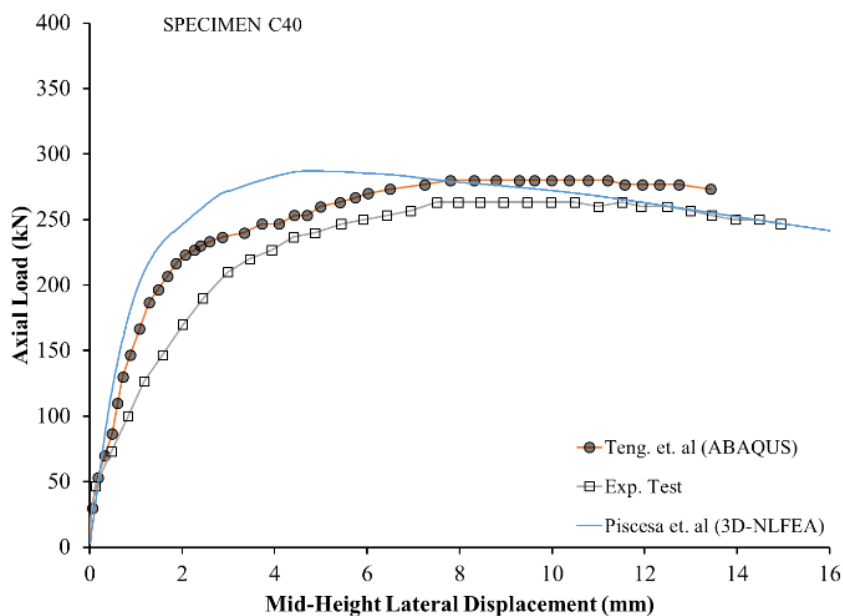


**Gambar 4.16.** The C40 specimen volume with the EL contour

Gambar 4.16.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen C40 dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai

leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen C40 pada keadaan leleh ini sama seperti pada hasil dari spesimen C5 di Gambar 4.4.(b).

Gambar 4.17 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen C40. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen lebih rendah, sedangkan hasil dari model Abaqus menunjukkan respon awal yang lebih tinggi namun tidak lebih tinggi dari hasil model 3D-NLFEA. Untuk perilaku hardening model dari Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi dari eksperimen namun tidak setinggi dari hasil 3D-NLFEA.

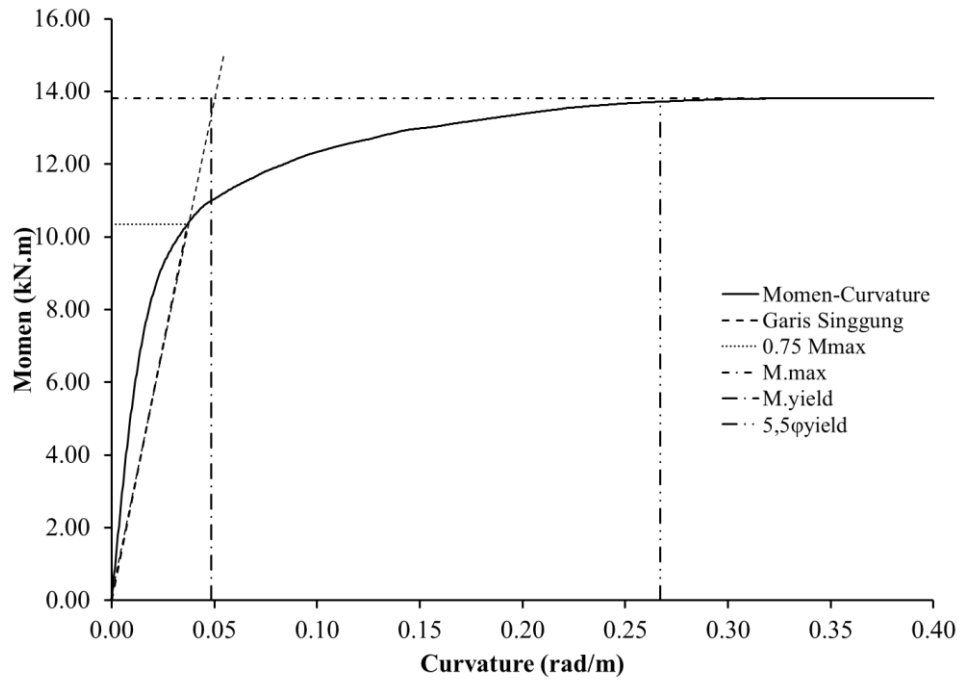


**Gambar 4.17** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns C40 with 40 mm load eccentricities.

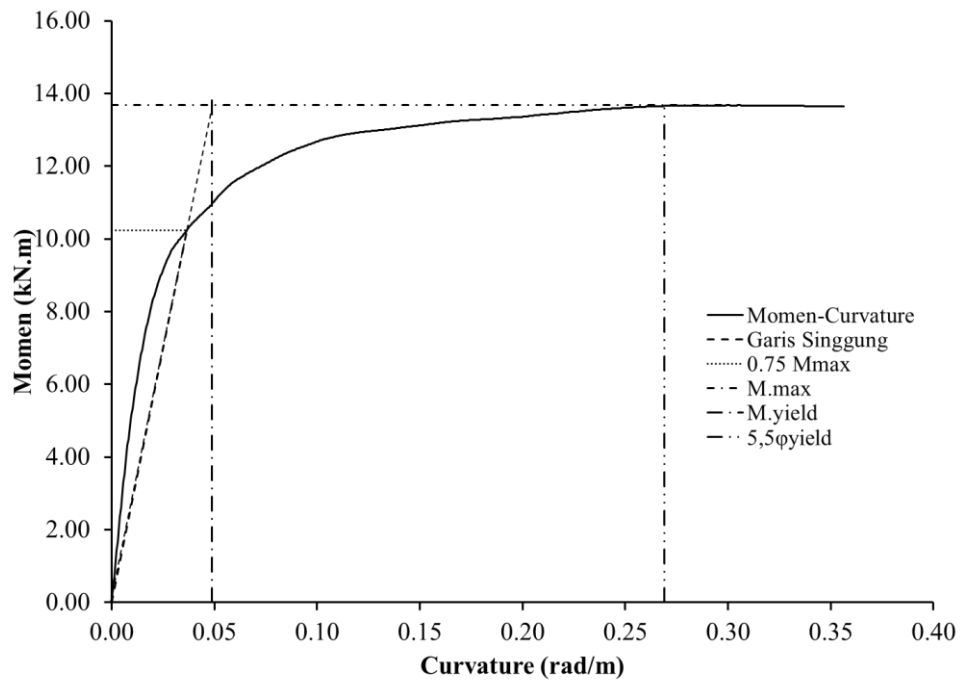
❖ **Daktilitas penampang kolom**

Berdasarkan hubungan Momen – Curvature pada spesimen kolom yang telah diperoleh dari hasil analisa 3D-NLFEA, daktilitas pada kolom dapat

diperoleh dengan metode grafis yang dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



**Gambar 4.18** Ductility index calculation of column – tipe C30



**Gambar 4.19** Ductility index calculation of column – tipe C40

Dari Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 curvature pada perpotongan antara garis singgung dengan puncak momen adalah curvature leleh pada kolom tipe C30 dan C40. Dan untuk menghitung daktilitas, dibutuhkan informasi curvature beton pada 5.5 kali curvature leleh kolom. Kemudian daktilitas dapat dihitung dengan mengetahui luasan energy dibawah kurva sebagai berikut:

C30 :

$$A = \text{Luas kurva hingga } 5.5 \varepsilon_y = 3.195$$

$$B = \text{Luas kurva hingga } \varepsilon_y = 0.386$$

$$\text{Daktilitas} = \frac{A}{B} = \frac{3.195}{0.386} = 8.284$$

C40 :

$$A = \text{Luas kurva hingga } 5.5 \varepsilon_y = 3.242$$

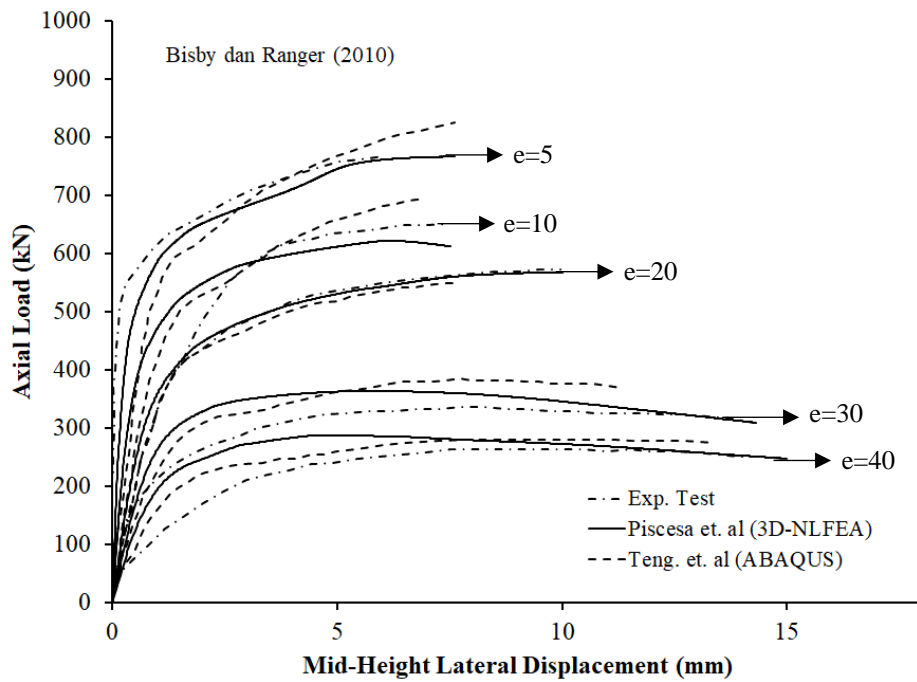
$$B = \text{Luas kurva hingga } \varepsilon_y = 0.384$$

$$\text{Daktilitas} = \frac{A}{B} = \frac{3.242}{0.384} = 8.434$$

Berdasarkan perhitungan diatas didapat nilai daktilitas untuk spesimen tipe C30 dengan eksentrisitas 30 mm memiliki nilai daktilitas lebih kecil dari spesimen tipe C40 dengan eksentrisitas 40 mm. Dari kedua perhitungan tersebut dapat ditarik kesimpulan bila kolom memiliki eksentrisitas beban yang terus bertambah maka tingkat daktilitas dari kolom akan bertambah juga.

❖ Kesimpulan dari hasil perbandingan :

Kurva perbandingan dari Gambar 4.20 menunjukkan ketika eksentrisitas beban bertambah maka daya dukung beban aksial pada kolom berkurang. Namun penurunan daya dukung beban aksial tersebut berimbas pada naiknya tingkat daktilitas beton yang dapat dilihat pada perhitungan daktilitas penampang diatas. Hal tersebut dapat dengan mudah dipahami sebagai mode perubahan kegagalan dari keadaan tekan yang didominasi beban aksial atau *compression control* ke dalam keadaan lentur atau *tension control*. Seperti yang diketahui dalam desain sebaiknya menggunakan desain *under reinforced* atau yang sekarang disebut sebagai *tension control* untuk mencegah terjadinya kegagalan secara tiba – tiba (getas).



**Gambar 4.20.** Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperimen by Bisby dan Ranger (2010)

#### 4.4.2 Spesimen dari Fitzwilliam dan Bisby (2010)

Kolom 300C-1-0-A, 600C-1-0-A, 900C-1-0-A dan 1200C-1-0-B dimodelkan seperti spesimen pada saat eksperimen dengan properti seperti pada Tabel 4.3. Pemodelan dari keempat spesimen yang digunakan tersebut terdiri dari 2 tahap model yaitu model elemen solid dan model elemen tulangan. Hasil pemodelan yang berupa kurva beban dengan perpindahan ( $P-\Delta$ ) didapatkan dengan jumlah elemen dan node pada masing – masing elemen solid dan elemen tulangan di tiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.3.** Property Specimen Data from Fitzwilliam and Bisby (2010).

Specimen	D	L	$t_r$	d	n	s	e	$f'_c$	$f_y$	$E_r$	$f_{yf}$
	mm	mm	mm	mm		mm	mm	MPa	MPa	GPa	MPa
300 C-1-0-A	152	300	0.38	6.4	4	100	20	30.5	693	88.2	933
600 C-1-0-A	152	600	0.38	6.4	4	100	20	30.5	693	88.2	933
900 C-1-0-A	152	900	0.38	6.4	4	100	20	30.5	693	88.2	933
1200 C-1-0-B	152	1200	0.38	6.4	4	100	20	30.5	693	88.2	933

(Source: Fitzwilliam and Bisby 2010)

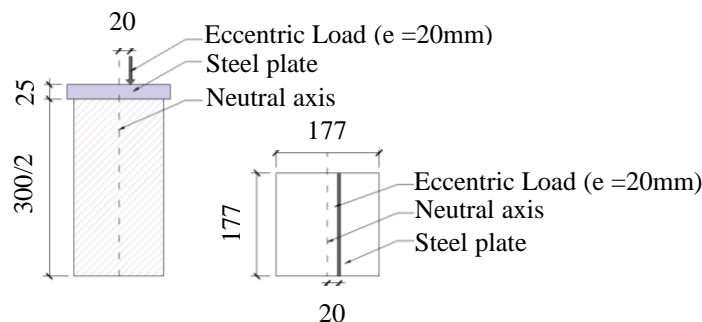
**Tabel 4.4.** Total Number of Elements and Node from Specimens.

Specimen	Solid		Rebar	
	Nodes	Volumes	Nodes	Edges
300C-1-0-A	24,882	22,265	500	512
600C-1-0-A	40,932	38,042	932	956
900C-1-0-A	57,148	53,994	1,300	1,332
1200C-1-0-B	94,611	90,528	1,732	1,776

(Source: Calculation Results)

❖ Hasil Spesimen 300C-1-0-A

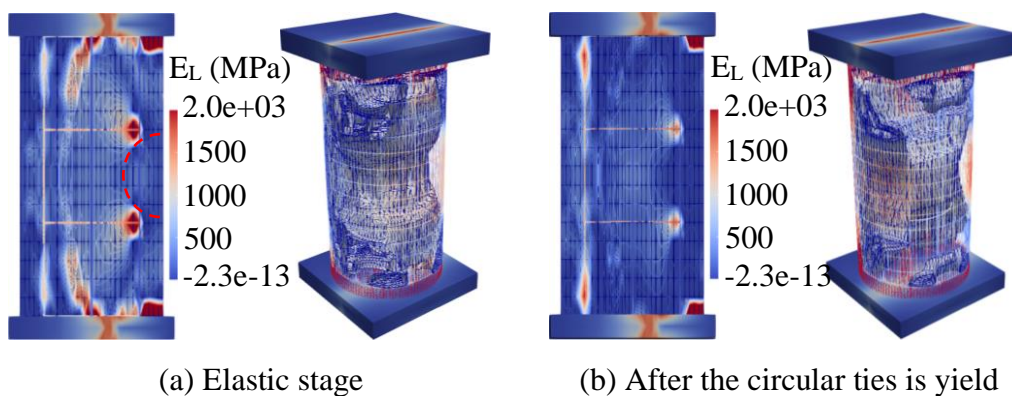
Data properti spesimen 300C-1-0-A dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.21.



**Gambar 4.21.** Schematic eccentric load from 300C-1-0-A specimen

Gambar 4.22.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 300C-1-0-A pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D dari modulus lateral dalam keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP wrap.

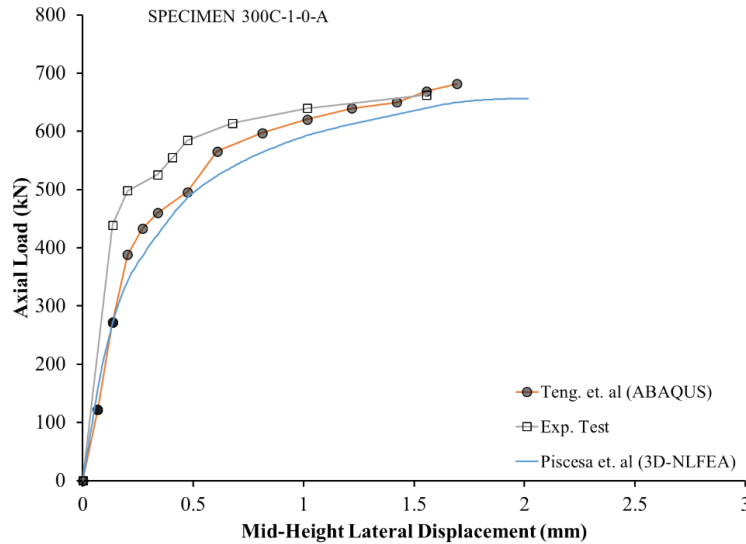
Pada inti beton nilai dari modulus lateral selalu lebih tinggi dari pada di luar inti beton (cover). Hal tersebut mudah untuk diidentifikasi karena beton pada intinya lebih terkekang baik oleh tulangan transversal maupun CFRP wrap dari pada diluar inti beton yang hanya terkekang oleh CFRP wrap saja. Perbedaan dari nilai modulus lateral tersebut akan memberikan perbedaan nilai dari laju kearah lateral pada beton. Pada inti beton laju kearah lateral beton jauh lebih rendah dari pada di cover. Hal tersebut menyebabkan terjadinya efek negatif pada cover beton dengan ditunjukkannya aksi lengkungan pada kontur modulus lateral yang terlihat jelas dan ditandai dengan garis putus – putus berwarna merah. Aksi lengkungan tersebut hanya terlihat pada area beton yang terbebani beban tekan saja.



**Gambar 4.22.** The 300C-1-0-A specimen volume with the  $E_L$  contour

Gambar 4.22.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 300C-1-0-A pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D dari modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi

lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Nilai dari modulus lateral pada daerah ini juga lebih kecil dengan ditunjukkannya efek negatif dari laju kearah lateral plastis yang terjadi di inti beton dan diluar inti beton (cover).



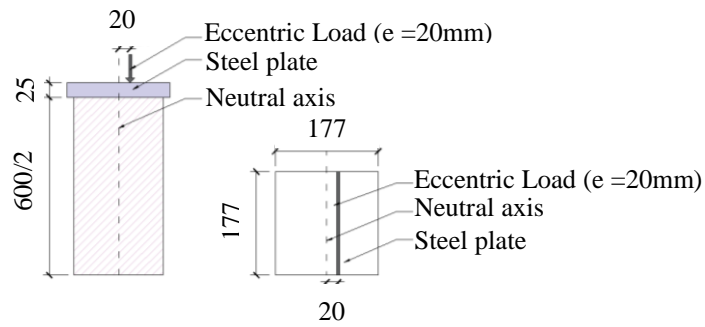
**Gambar 4.23** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 300C-1-0-A with 20 mm load eccentricities

Gambar 4.23 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen 300C-1-0-A. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen cukup tinggi, sedangkan hasil dari model 3D-NLFEA menunjukkan respon awal yang lebih rendah dari model Abaqus. Hasil dari model Abaqus menunjukkan kurva yang lebih kaku dari model 3D-NLFEA namun tidak lebih kaku dari hasil eksperimen. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan Abaqus menunjukkan bentuk kurva yang serupa sedangkan untuk hasil analisa dari 3D-NLFEA menunjukkan perilaku hardening yang lebih rendah. Dalam penjelasan tersebut dapat dikatakan bahwa model dari 3D-NLFEA memiliki hasil yang lebih konservatif.

❖ Hasil Spesimen 600C-1-0-A

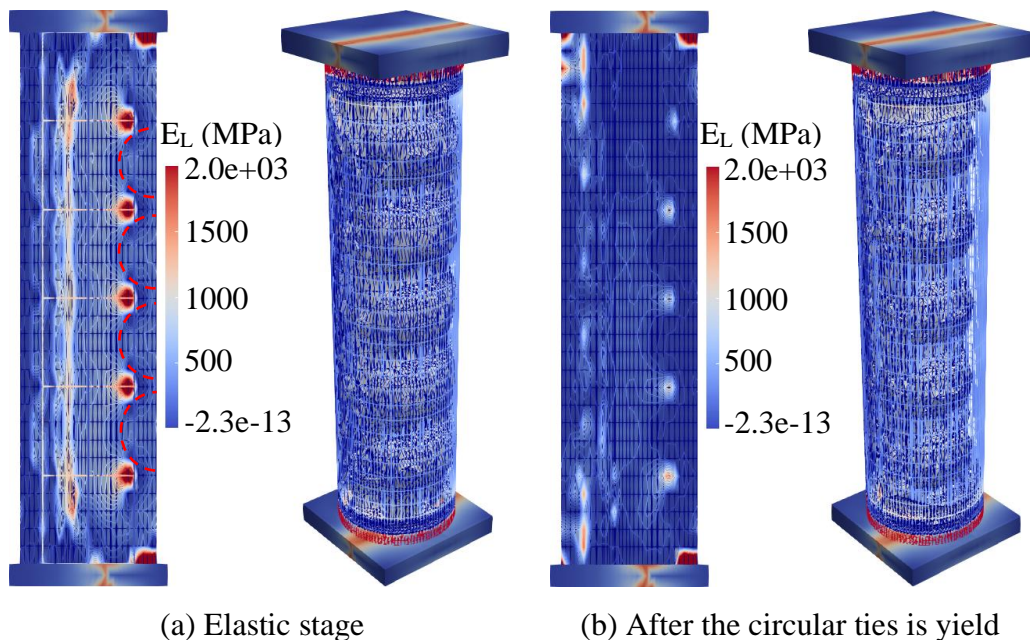
Data properti spesimen 600C-1-0-A dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.24.





**Gambar 4.24.** Schematic eccentric load from 600C-1-0-A specimen

Gambar 4.25.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 600C-1-0-A dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP warp dan hasil dari analisa spesimen 600C-1-0-A pada keadaan elastis ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(a).

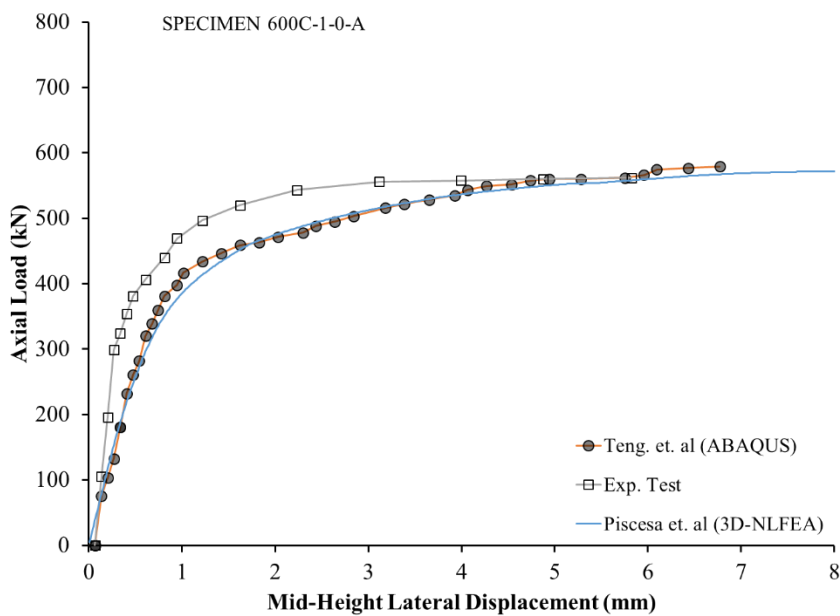


**Gambar 4.25.** The 600C-1-0-A specimen volume with the EL contour

Gambar 4.25.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 600C-1-0-A dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada

tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen 600C-1-0-A pada keadaan leleh ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(b).

Terdapat sedikit perbedaan pada tipe spesimen ini yaitu pada tinggi spesimen yang berimbas pada bertambahnya jumlah tulangan transversal. Hal tersebut berpengaruh pada bentuk kontur modulus lateral dimana dengan bertambahnya jumlah tulangan transversal dengan konfigurasi yang sama maka akan bertambah juga jumlah efek negatif pada cover beton dengan ditunjukkannya aksi lengkungan pada kontur modulus lateral yang terlihat jelas dan ditandai dengan garis putus – putus berwarna merah (Gambar 4.25.(a)).



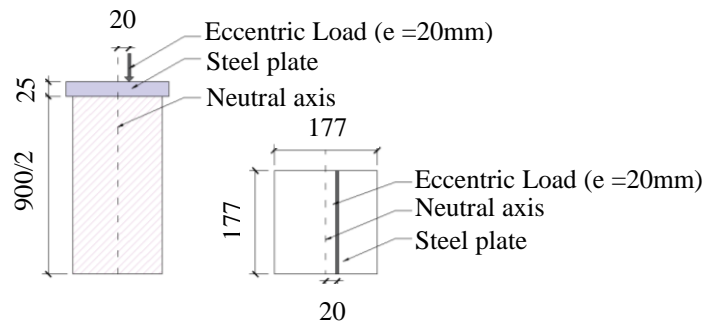
**Gambar 4.26** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 600C-1-0-A with 20 mm load eccentricities

Gambar 4.26 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen 600C-1-0-A. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen cukup tinggi, sedangkan hasil dari model 3D-NLFEA dan Abaqus menunjukkan respon awal yang lebih rendah dengan kekakuan yang hampir sama. Untuk perilaku hardening model dari 3D-NLFEA dan Abaqus

menunjukkan perilaku yang hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen meskipun model dari 3D-NLFEA lebih rendah. Dalam penjelasan tersebut dapat dikatakan bahwa model dari 3D-NLFEA memiliki hasil yang lebih konservatif.

❖ Hasil Spesimen 900C-1-0-A

Data properti spesimen 900C-1-0-A dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.27.

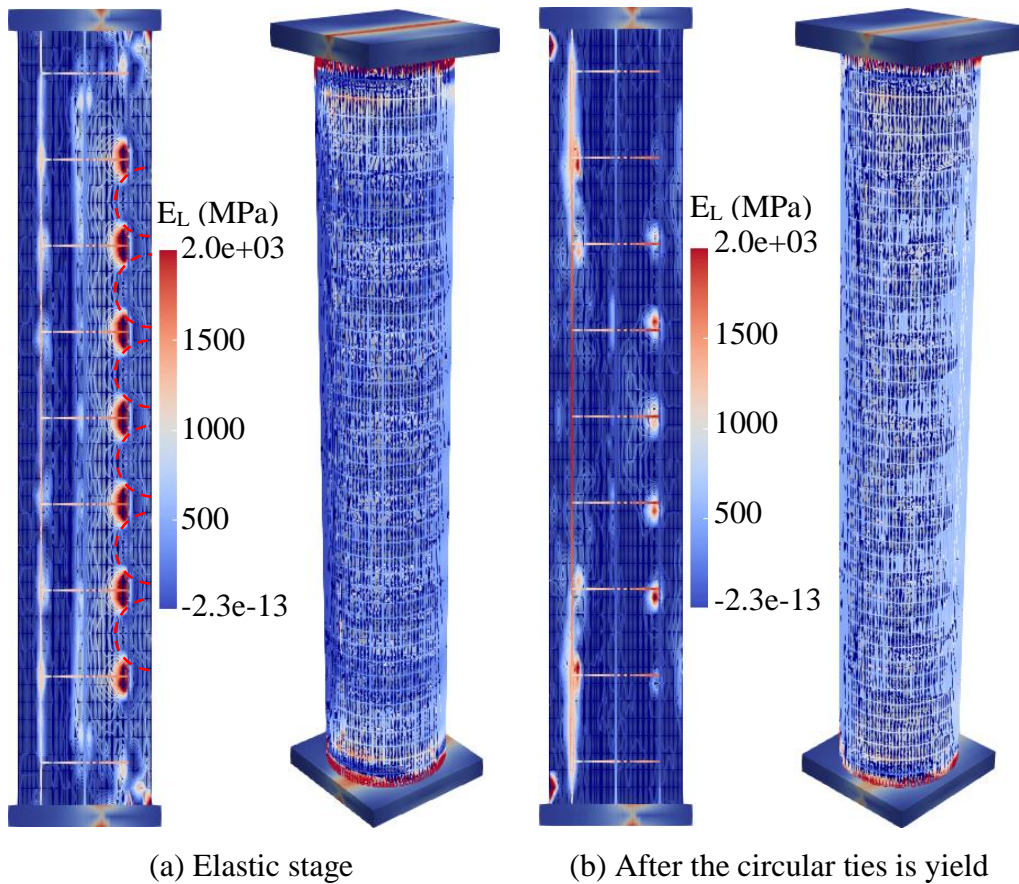


**Gambar 4.27.** Schematic eccentric load from 900C-1-0-A specimen

Gambar 4.28.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 900C-1-0-A dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelepasan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP warp dan hasil dari analisa spesimen 900C-1-0-A pada keadaan elastis ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(a).

Gambar 4.28.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 900C-1-0-A dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen 900C-1-0-A pada keadaan leleh

ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(b).

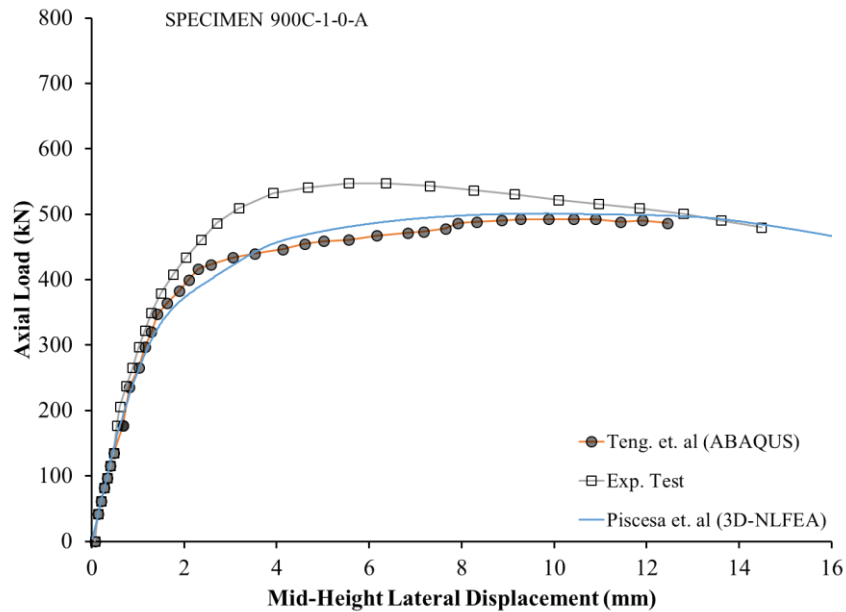


**Gambar 4.28.** The 900C-1-0-A specimen volume with the EL contour

Terdapat sedikit perbedaan pada tipe spesimen ini yaitu pada tinggi spesimen yang berimbas pada bertambahnya jumlah tulangan transversal. Hal tersebut berpengaruh pada bentuk kontur modulus lateral dimana dengan bertambahnya jumlah tulangan transversal dengan konfigurasi yang sama maka akan bertambah juga jumlah efek negatif pada cover beton dengan ditunjukkannya aksi lengkungan pada kontur modulus lateral yang terlihat jelas dan ditandai dengan garis putus – putus berwarna merah (Gambar 4.28.(a)).

Gambar 4.29 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen 900C-1-0-A. Hasil dari model Abaqus dan 3D-NLFEA di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari Abaqus dan 3D-NLFEA berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen. Untuk perilaku hardening model dari 3D-

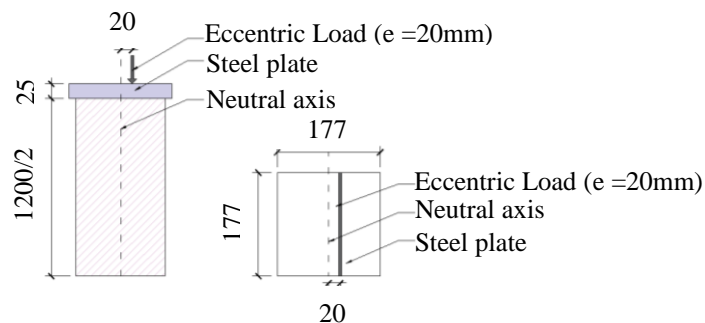
NLFEA menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi dari model Abaqus namun tidak setinggi dari hasil eksperimen.



**Gambar 4.29** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 900C-1-0-A with 20 mm load eccentricities

❖ Hasil Spesimen 1200C-1-0-B

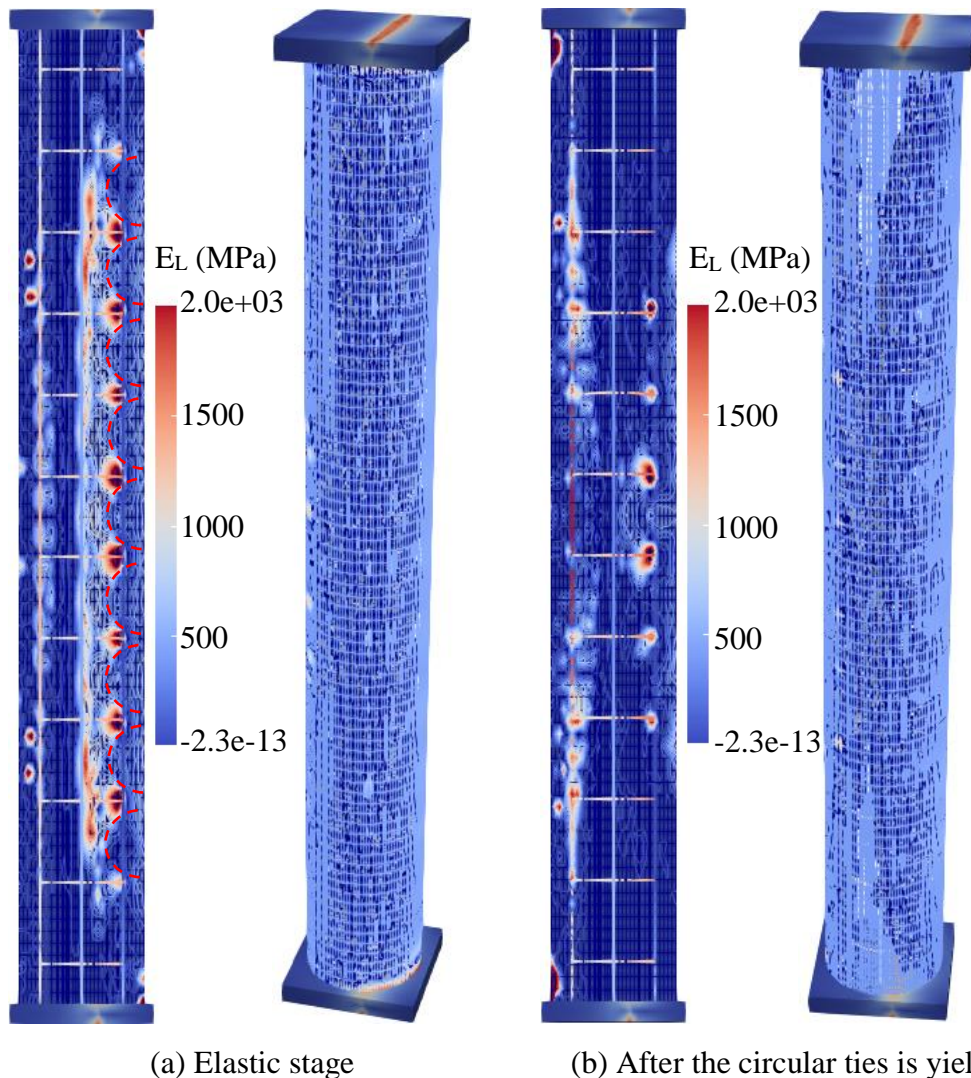
Data properti spesimen 1200C-1-0-B dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.30.



**Gambar 4.30.** Schematic eccentric load from 1200C-1-0-B specimen

Gambar 4.31.(a) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 1200C-1-0-B dan 3D volume modulus lateral pada keadaan elastis dimana tulangan transversal belum mengalami pelelehan. Pada gambar juga terlihat nilai terbesar dari modulus lateral berada pada tulangan transversal di area beton

yang terbebani beban tekan dengan ditunjukkannya adanya konsentrasi  $E_L$  pada tulangan transversal di area beton, hal tersebut jelas menunjukkan bahwa kekakuan dari tulangan transversal lebih tinggi dari CFRP warp dan hasil dari analisa spesimen 1200C-1-0-B pada keadaan elastis ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(a).

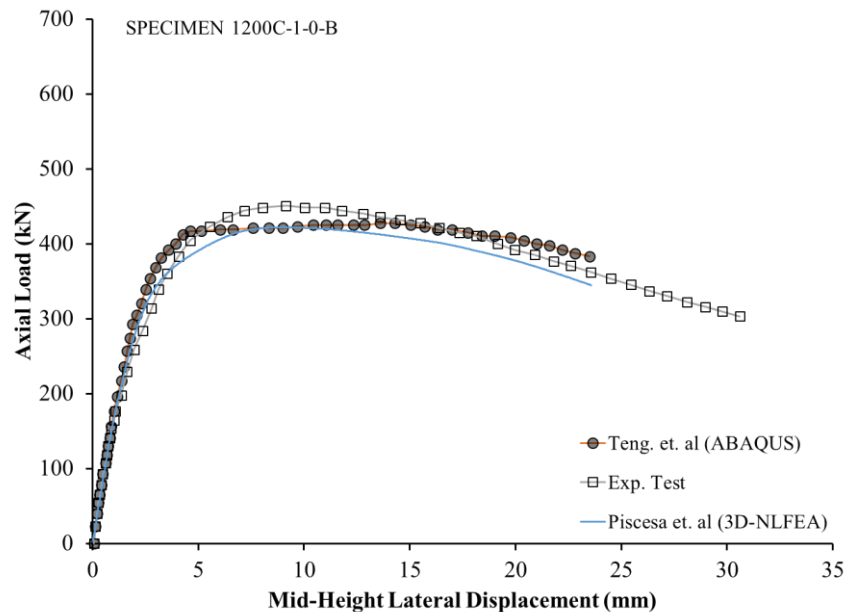


**Gambar 4.31.** The 1200C-1-0-B specimen volume with the  $E_L$  contour

Gambar 4.31.(b) menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen 1200C-1-0-B dan 3D volume modulus lateral ketika tulangan transversal sudah mencapai leleh, dengan ditunjukkan hilangnya konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal. Selain itu aksi lengkung yang terjadi antara tulangan transversal menjadi lebih besar dan hanya terjadi pada area beton yang terbebani

beban tekan saja. Hasil dari analisa spesimen 1200C-1-0-B pada keadaan leleh ini pada dasarnya sama seperti pada hasil dari spesimen 300C-1-0-A di Gambar 4.22.(b).

Terdapat sedikit perbedaan pada tipe spesimen ini yaitu pada tinggi spesimen yang berimbang pada bertambahnya jumlah tulangan transversal. Hal tersebut berpengaruh pada bentuk kontur modulus lateral dimana dengan bertambahnya jumlah tulangan transversal dengan konfigurasi yang sama maka akan bertambah juga jumlah efek negatif pada cover beton dengan ditunjukkannya aksi lengkungan pada kontur modulus lateral yang terlihat jelas dan ditandai dengan garis putus – putus berwarna merah (Gambar 4.31.(a)).

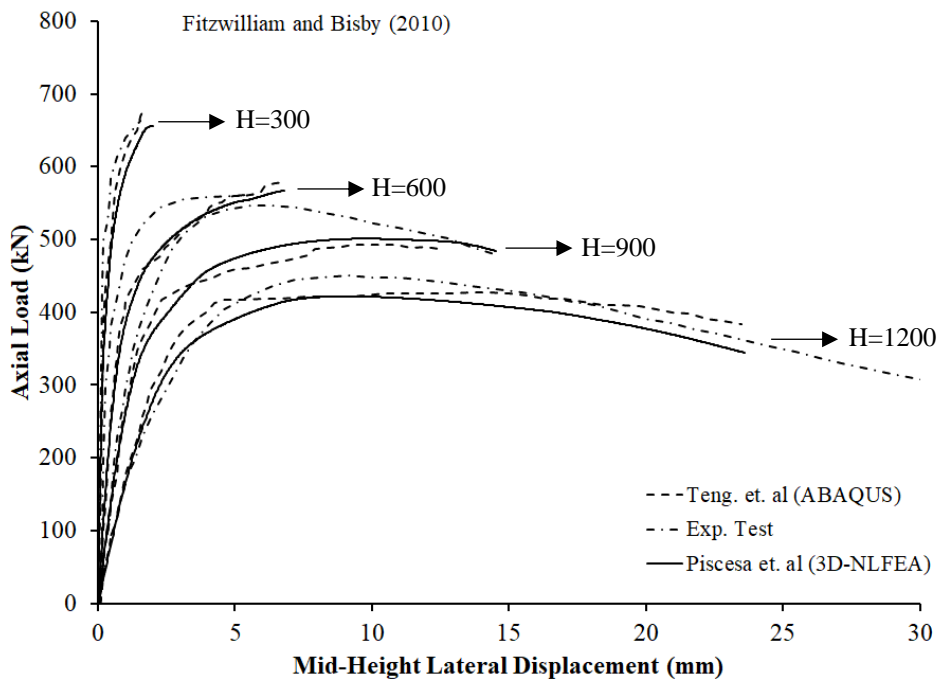


**Gambar 4.32** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns 1200C-1-0-B with 20 mm load eccentricities

Gambar 4.32 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen 1200C-1-0-B. Hasil dari Model Abaqus dan 3D-NLFEA di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari Abaqus dan 3D-NLFEA berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen. Untuk perilaku hardening dari hasil analisa model 3D-NLFEA dan Abaqus menunjukkan hasil yang serupa sedangkan untuk hasil eksperimen menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.

❖ Kesimpulan dari hasil perbandingan :

Kurva perbandingan dari Gambar 4.33 menunjukkan ketika kelangsingan kolom bertambah maka daya dukung beban aksial pada kolom berkurang. Namun penurunan daya dukung beban aksial tersebut berimbas pada naiknya tingkat daktilitas aksial beton. Hal tersebut dapat dengan mudah dipahami sebagai mode perubahan kegagalan dari keadaan tekan yang didominasi beban aksial atau *compression control* ke dalam keadaan lentur atau *tension control*. Seperti yang diketahui dalam desain sebaiknya menggunakan desain *under reinforced* atau yang sekarang disebut sebagai *tension control* untuk mencegah terjadinya kegagalan secara tiba – tiba (getas).



**Gambar 4.33.** Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperimen by Fitzwilliam and Bisby (2010)

#### 4.4.3 Spesimen dari Wu dan Jiang (2013)

Kolom A1E10/B1E10 dan A2E10/B2E10 dimodelkan seperti pada eksperimen. Perbedaan antara kedua spesimen tersebut berada pada jumlah lapis CFRP yang digunakan dimana untuk spesimen A1E10/B1E10 menggunakan 1 lapis dan untuk spesimen A2E10/B2E10 menggunakan 2 lapis dengan properti tiap spesimen seperti pada Tabel 4.5. Pemodelan dari kedua spesimen yang digunakan



tersebut hanya terdiri dari model elemen solid saja karena pada eksperimen yang dilakukan oleh Wu dan Jiang tidak menggunakan tulangan transversal maupun longitudinal sebagai pengekangan internalnya. Hasil pemodelan yang berupa kurva beban dengan perpindahan ( $P-\Delta$ ) didapatkan dengan jumlah elemen dan node pada elemen solid di tiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.5.** Property Specimen Data from Wu and Jiang (2013).

Specimen	D	L	$t_f$	e	$f_c$	$E_f$	$f_{yf}$
	mm	mm	mm	mm	MPa	GPa	MPa
A1E10/B1E10	150	300	0.167	10	28.7	254	4192
A2E10/B2E10	150	300	0.334	10	30.1	254	4192

(Source: Wu and Jiang 2013)

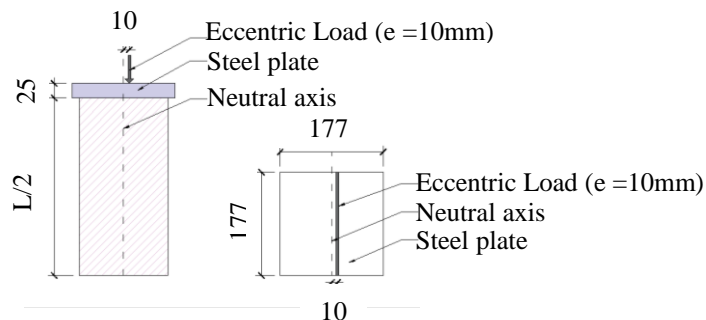
**Tabel 4.6.** Total Number of Elements and Node from Specimens.

Specimen	Solid	
	Nodes	Volumes
A1E10/B1E10	24,492	21,710
A2E10/B2E10	24,252	21,574

(Source: Calculation Results)

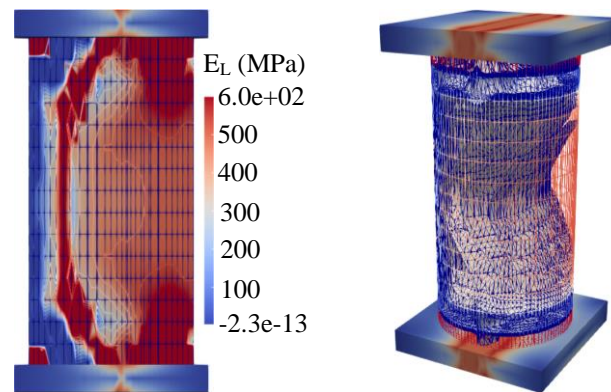
❖ Hasil Spesimen A1E10/B1E10

Data properti spesimen A1E10/B1E10 dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 10 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.34.



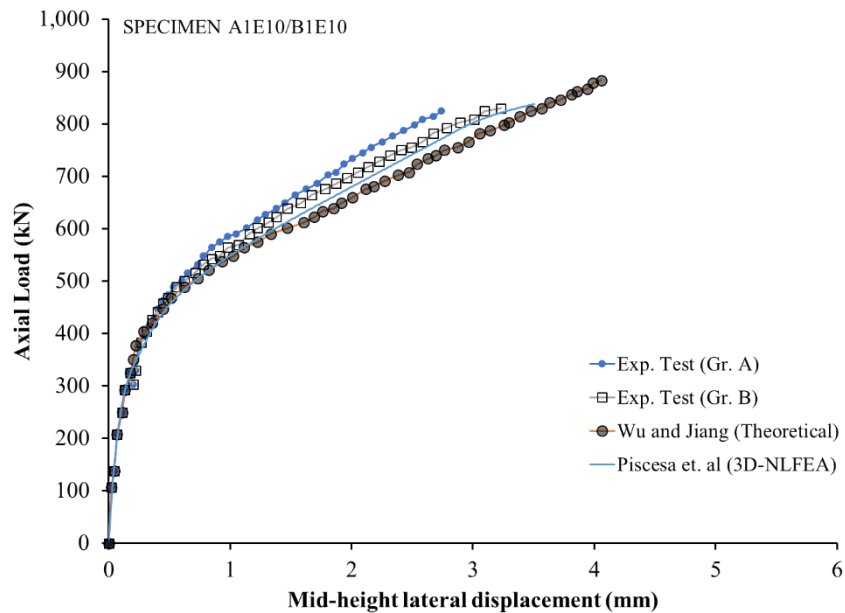
**Gambar 4.34.** Schematic eccentric load from A1E10/B1E10 specimen

Gambar 4.35 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen A1E10/B1E10 pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hal tersebut diakibatkan karena perbedaan dari nilai modulus lateral yang mengakibatkan perbedaan dari nilai laju kearah lateral pada beton. Pada inti beton di area yang terbebani beban tekan nilai dari modulus lateral lebih besar, perbedaan dari nilai modulus lateral tersebut akan memberikan perbedaan nilai dari laju kearah lateral pada beton hal tersebut lah yang menyebabkan terjadinya efek negatif pada beton.



**Gambar 4.35.** The A1E10/B1E10 specimen volume with the EL contour

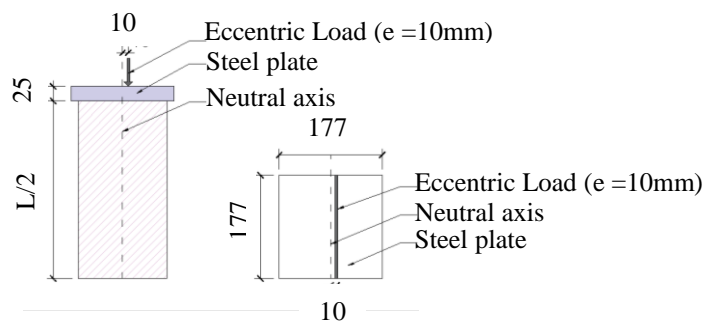
Gambar 4.36 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen A1E10/B1E10. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari 3D-NLFEA dan teoretis berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening baik dari hasil eksperimen, teoretis dan analisa model 3D-NLFEA menunjukkan hasil yang serupa namun untuk hasil dari ke dua eksperimen tersebut menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi. Sedangkan perilaku hardening dari teoretis menunjukkan hasil yang lebih rendah dari 3D-NLFEA.



**Gambar 4.36** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns A1E10/B1E10 with 10 mm load eccentricities

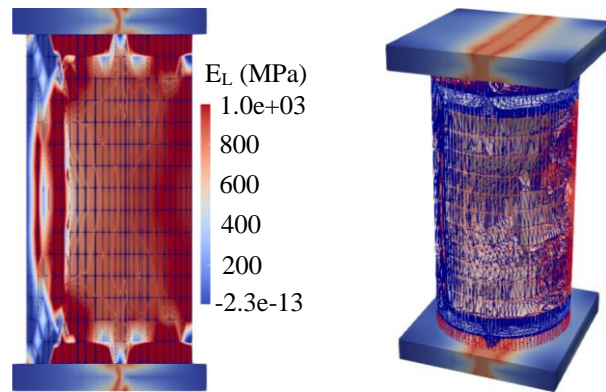
❖ Hasil Spesimen A2E10/B2E10

Data properti spesimen A2E10/B2E10 dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 10 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.37.



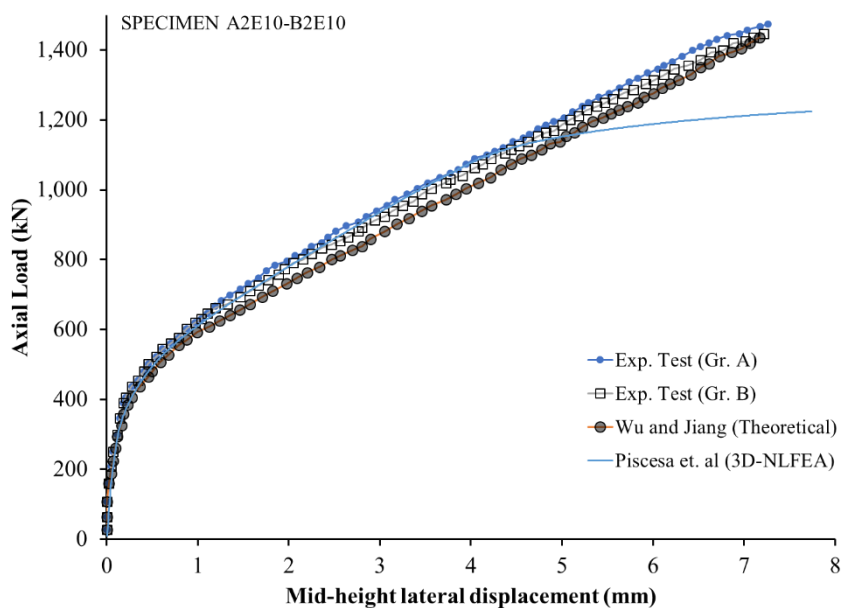
**Gambar 4.37.** Schematic eccentric load from A2E10/B2E10 specimen

Gambar 4.38 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen A2E10/B2E10 pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkanya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa spesimen A2E10/B2E10 pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen A1E10/B1E10 di Gambar 4.35.



**Gambar 4.38.** The A2E10/B2E10 specimen volume with the EL contour

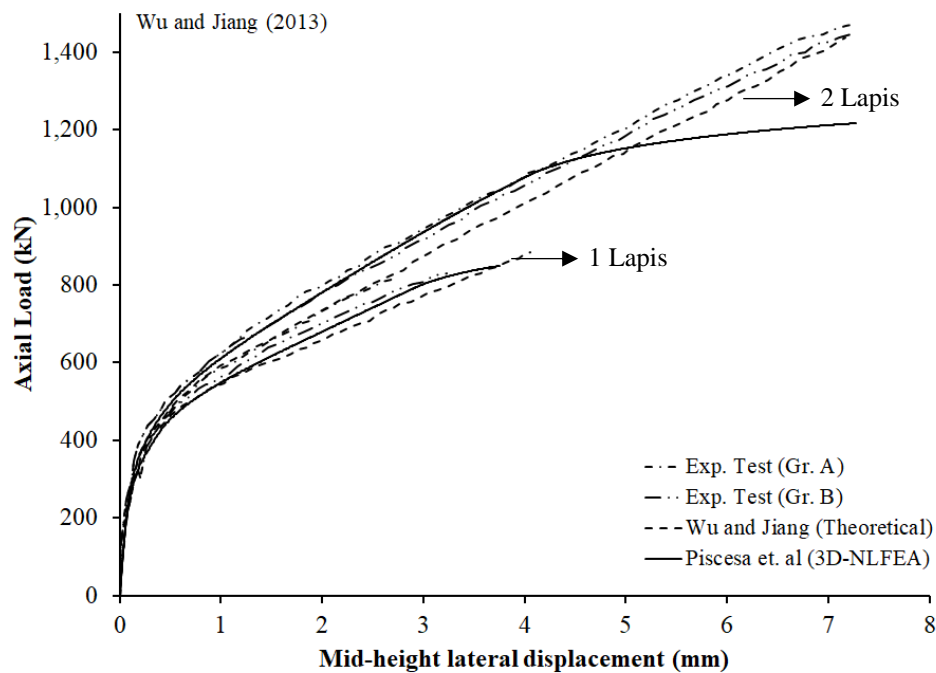
Gambar 4.39 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen A2E10/B2E10. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari 3D-NLFEA dan teoretis berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening baik dari hasil eksperimen, teoretis dan analisa model 3D-NLFEA menunjukkan hasil yang serupa hingga displacement mencapai kisaran 5 mm perilaku hardening dari model 3D-NLFEA menurun sedangkan nilai dari kedua eksperimen dan teoretis terus bertambah.



**Gambar 4.39** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns A2E10/B2E10 with 10 mm load eccentricities

❖ Kesimpulan dari hasil perbandingan :

Kurva perbandingan dari Gambar 4.40 menunjukkan pengaruh dari penambahan lapis CFRP wrap dapat menyebabkan kenaikan daya dukung beban aksial pada kolom. Selain itu juga dapat menambah tingkat daktilitas aksial beton. Hanya saja hasil yang didapat dari model 3D-NLFEA sedikit berbeda dari eksperimen dan teoretis pada spesimen A2E10/B2E10 yang menggunakan 2 lapis CFRP wrap, perbedaan perilaku hardening tersebut mungkin bisa disebabkan karena terdapat overlap dari lapis CFRP wrap pada area tekan yang menyebabkan terus naiknya dari kapasitas beban aksial.



**Gambar 4.40.** Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperimen by Wu and Jiang (2013)

#### 4.4.4 Spesimen dari Jiang et al. (2014)

Terdapat 8 tipe spesimen kolom beton yang dimodelkan seperti pada eksperimen. Dari 8 tipe kolom tersebut terdapat 4 tipe yang menggunakan 1 lapis dari CFRP wrap dan sisannya menggunakan 2 lapis CFRP wrap dengan properti tiap spesimen seperti pada Tabel 4.7. Pemodelan dari kedua spesimen yang digunakan tersebut hanya terdiri dari model elemen solid saja karena pada eksperimen yang dilakukan oleh (Jiang, Zhang et al. 2014) tidak menggunakan

tulangan transversal maupun longitudinal sebagai pengekang internalnya. Hasil pemodelan yang berupa kurva beban dengan perpindahan ( $P-\Delta$ ) didapatkan dengan jumlah elemen dan node pada elemen solid di tiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.7.** Property Specimen Data from Jiang et al. (2014).

Specimen	D	L	$t_f$	e	$f'_c$	$E_f$	$f_{yf}$
	mm	mm	mm	mm	MPa	GPa	MPa
L1E10A/L1E10B	150	300	0.11	10	38.1	268	4192
L1E20A/L1E20B	150	300	0.11	20	38.1	268	4192
L1E30A/L1E30B	150	300	0.11	30	38.1	268	4192
L1E40A/L1E40B	150	300	0.11	40	38.1	268	4192
L2E10A/L2E10B	150	300	0.22	10	39.4	266.5	4192
L2E20A/L2E20B	150	300	0.22	20	39.4	266.5	4192
L2E30A/L2E30B	150	300	0.22	30	39.4	266.5	4192
L2E40A/L2E40B	150	300	0.22	40	39.4	266.5	4192

(Source: Jiang et al. 2014)

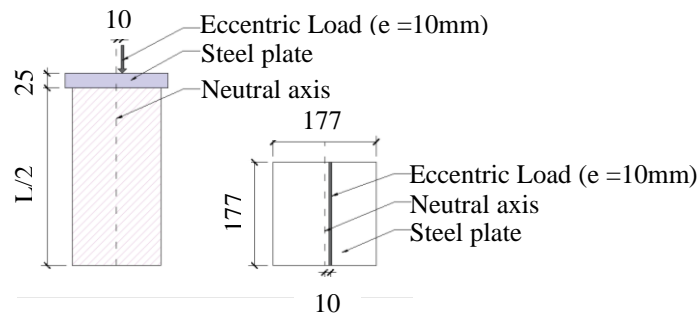
**Tabel 4.8.** Total Number of Elements and Node from Specimens.

Specimen	Solid	
	Nodes	Volumes
L1E10A/L1E10B	24,360	21,573
L1E20A/L1E20B	24,606	21,953
L1E30A/L1E30B	24,368	21,703
L1E40A/L1E40B	23,976	21,268
L2E10A/L2E10B	24,430	21,686
L2E20A/L2E20B	24,638	22,027
L2E30A/L2E30B	24,024	21,368
L2E40A/L2E40B	23,784	21,140

(Source: Calculation Results)

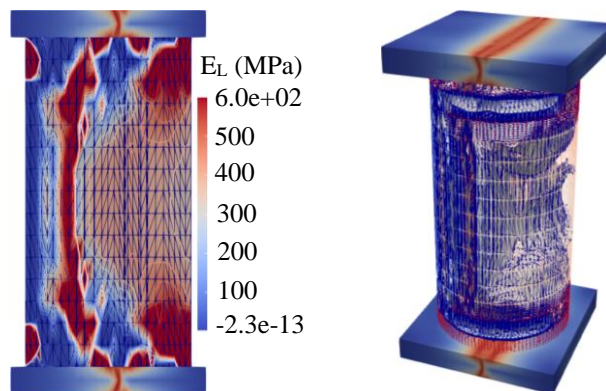
❖ Hasil Spesimen L1E10A/L1E10B

Data properti spesimen L1E10A/L1E10B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 10 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.41.



**Gambar 4.41.** Schematic eccentric load from L1E10A/L1E10B specimen

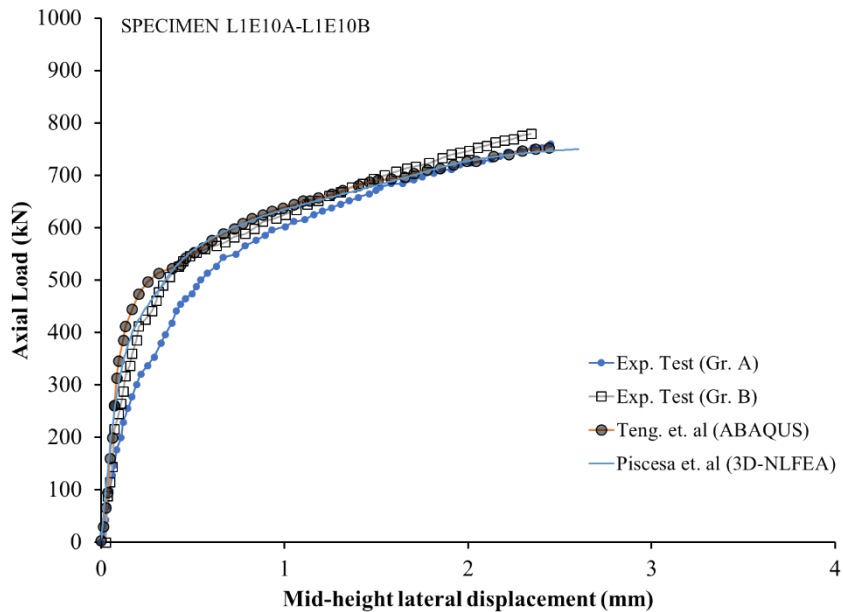
Gambar 4.42 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L1E10A/L1E10B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hal tersebut diakibatkan karena perbedaan dari nilai modulus lateral yang mengakibatkan perbedaan dari nilai laju kearah lateral pada beton. Pada inti beton di area yang terbebani beban tekan nilai dari modulus lateral lebih besar, perbedaan dari nilai modulus lateral tersebut akan memberikan perbedaan nilai dari laju kearah lateral pada beton hal tersebut lah yang menyebabkan terjadinya efek negatif pada beton.



**Gambar 4.42.** The L1E10A/L1E10B specimen volume with the EL contour

Gambar 4.43 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L1E10A/L1E10B. Hasil eksperimen di kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari eksperimen tipe A lebih rendah, sedangkan hasil dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen tipe B. Untuk perilaku hardening baik dari hasil eksperimen, teoretis dan analisa

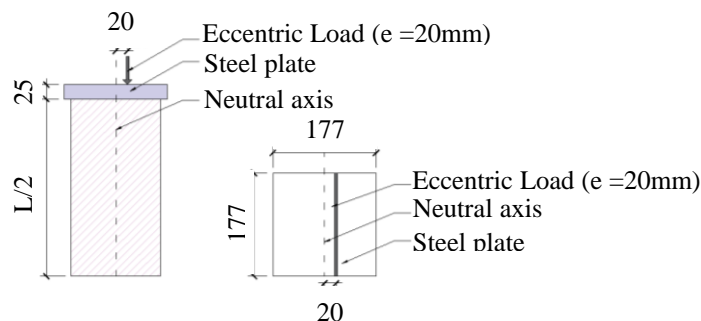
model 3D-NLFEA menunjukkan hasil yang serupa namun untuk hasil dari eksperimen tipe B menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.



**Gambar 4.43** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E10A/L1E10B with 10 mm load eccentricities

❖ Hasil Spesimen L1E20A/L1E20B

Data properti spesimen L1E20A/L1E20B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.44.

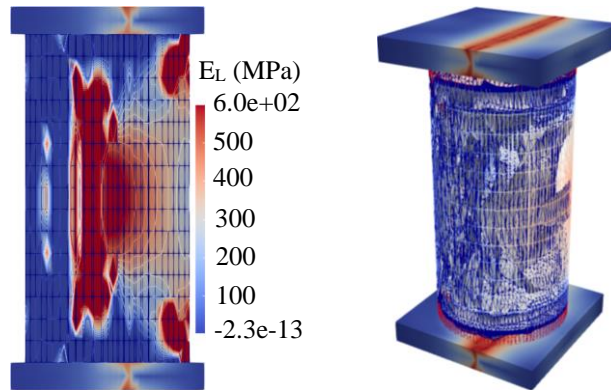


**Gambar 4.44.** Schematic eccentric load from L1E20A/L1E20B specimen

Gambar 4.45 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L1E20A/L1E20B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa

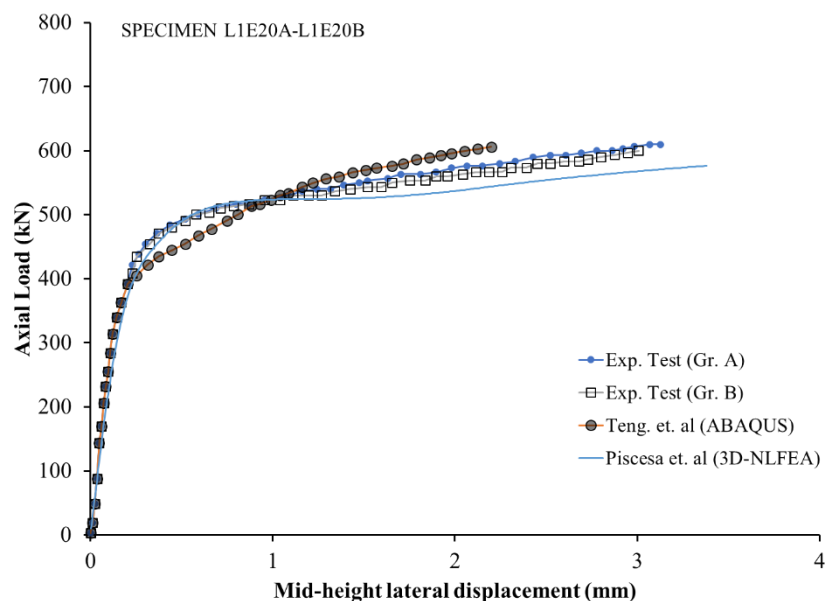


spesimen L1E20A/L1E20B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L1E10A/L1E10B di Gambar 4.42.



**Gambar 4.45.** The L1E20A/L1E20B specimen volume with the EL contour

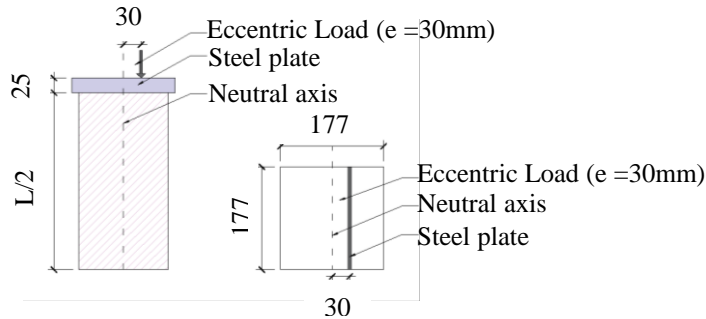
Gambar 4.46 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L1E20A/L1E20B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa namun hasil dari 3D-NLFEA lebih rendah dari hasil eksperimen sedangkan untuk hasil dari model Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.



**Gambar 4.46** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E20A/L1E20B with 20 mm load eccentricities

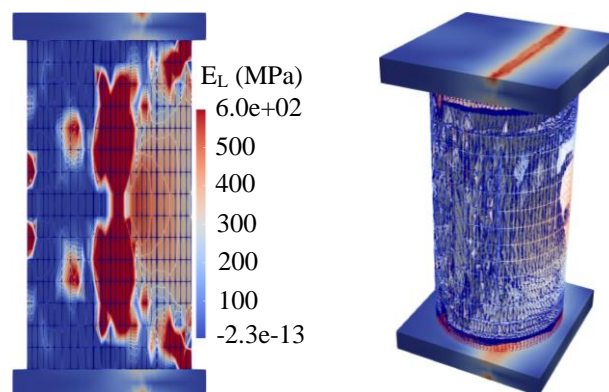
❖ Hasil Spesimen L1E30A/L1E30B

Data properti spesimen L1E30A/L1E30B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 30 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.47.



**Gambar 4.47.** Schematic eccentric load from L1E30A/L1E30B specimen

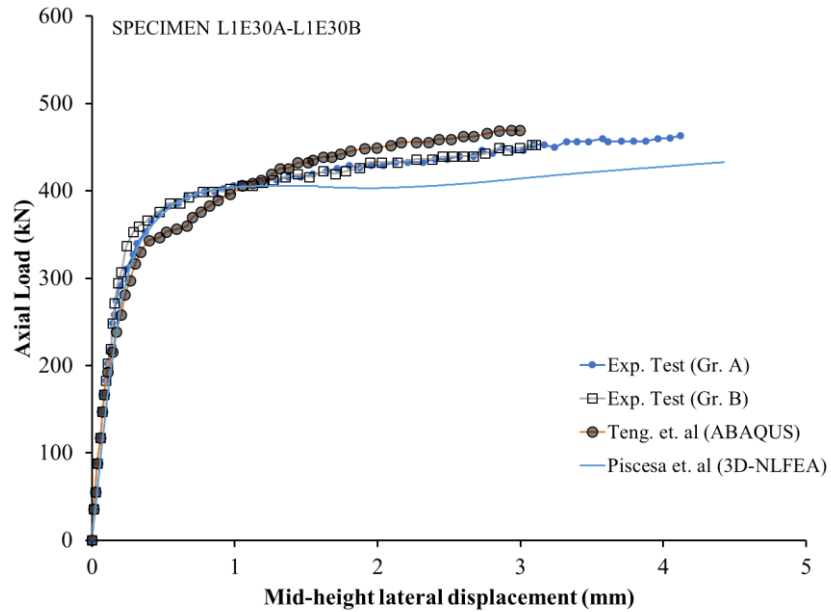
Gambar 4.48 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L1E30A/L1E30B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa spesimen L1E30A/L1E30B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L1E10A/L1E10B di Gambar 4.42.



**Gambar 4.48.** The L1E30A/L1E30B specimen volume with the EL contour

Gambar 4.49 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L1E30A/L1E30B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening dari

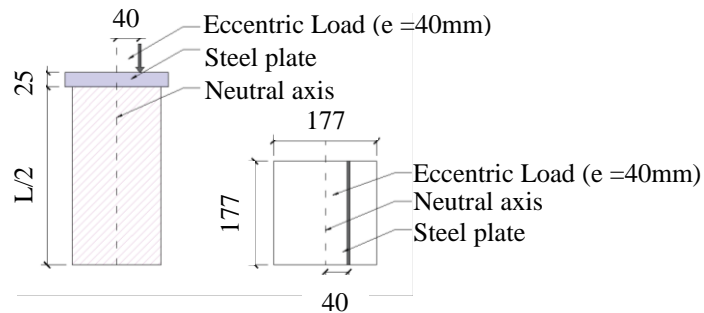
hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa namun hasil dari 3D-NLFEA lebih rendah dari hasil eksperimen sedangkan untuk hasil dari model Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi.



**Gambar 4.49** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E30A/L1E30B with 30 mm load eccentricities

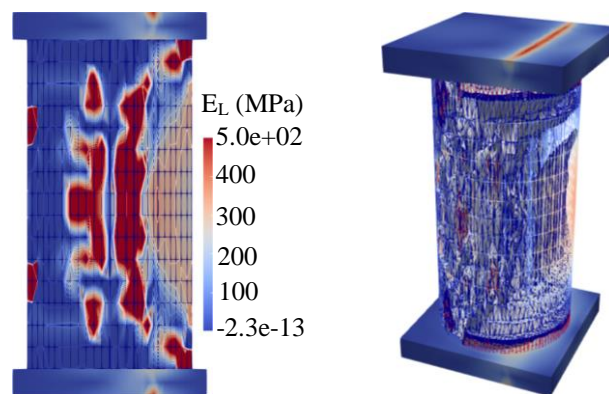
❖ Hasil Spesimen L1E40A/L1E40B

Data properti spesimen L1E40A/L1E40B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 40 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.50.



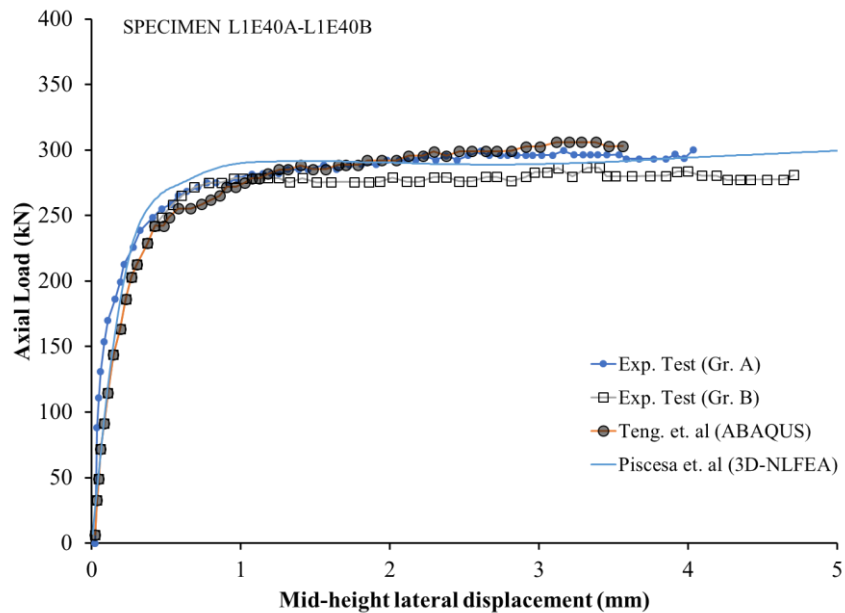
**Gambar 4.50.** Schematic eccentric load from L1E40A/L1E40B specimen

Gambar 4.51 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L1E40A/L1E40B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa spesimen L1E40A/L1E40B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L1E10A/L1E10B di Gambar 4.42.



**Gambar 4.51.** The L1E40A/L1E40B specimen volume with the EL contour

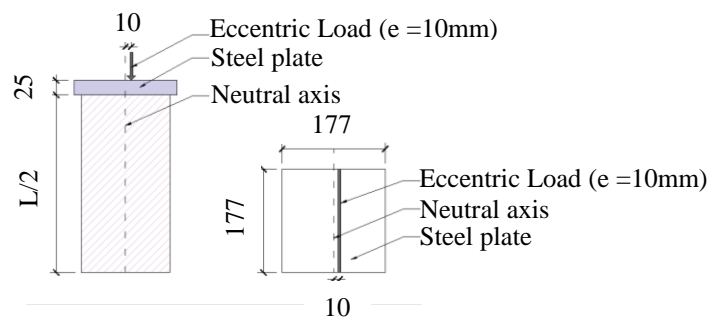
Gambar 4.52 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L1E40A/L1E40B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa namun hasil dari eksperimen tipe B lebih rendah sedangkan untuk hasil dari model Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi begitu juga dengan hasil eksperimen tipe A namun tidak lebih tinggi dari Abaqus.



**Gambar 4.52** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L1E40A/L1E40B with 40 mm load eccentricities

❖ Hasil Spesimen L2E10A/L2E10B

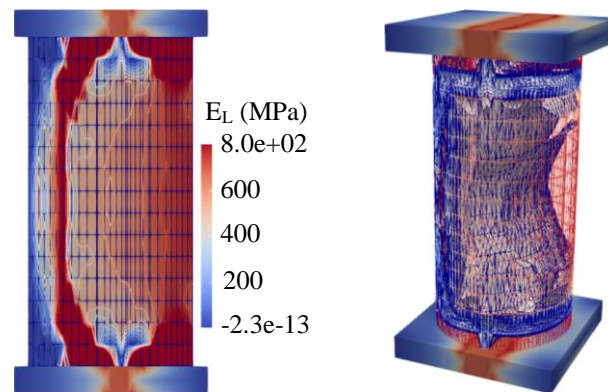
Data properti spesimen L2E10A/L2E10B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 10 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.53.



**Gambar 4.53.** Schematic eccentric load from L2E10A/L2E10B specimen

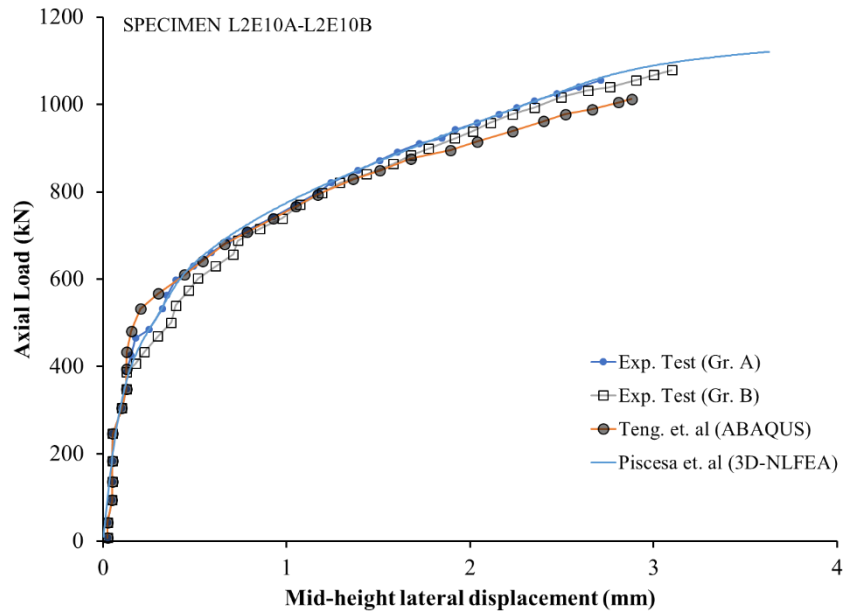
Gambar 4.54 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L2E10A/L2E10B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hal tersebut diakibatkan karena perbedaan dari nilai modulus lateral yang mengakibatkan

perbedaan dari nilai laju kearah lateral pada beton. Pada inti beton di area yang terbebani beban tekan nilai dari modulus lateral lebih besar, perbedaan dari nilai modulus lateral tersebut akan memberikan perbedaan nilai dari laju kearah lateral pada beton hal tersebut lah yang menyebabkan terjadinya efek negatif pada beton.



**Gambar 4.54.** The L2E10A/L2E10B specimen volume with the EL contour

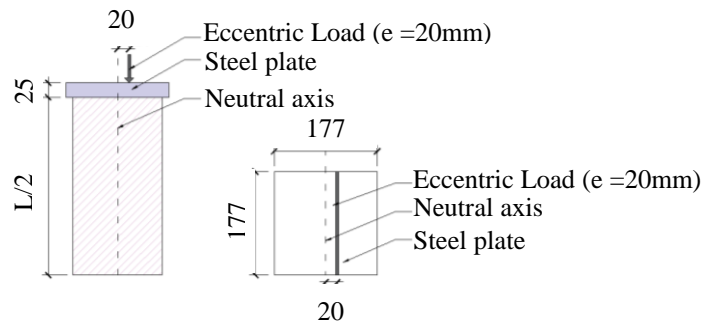
Gambar 4.55 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L2E10A/L2E10B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen tipe A dan model 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa berbeda dengan hasil dari eksperimen tipe B yang menunjukkan perilaku hardening lebih rendah, namun nilainya tidak lebih rendah dari model Abaqus meskipun memiliki bentuk kurva yang sama.



**Gambar 4.55** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E10A/L2E10B with 10 mm load eccentricities

❖ Hasil Spesimen L2E20A/L2E20B

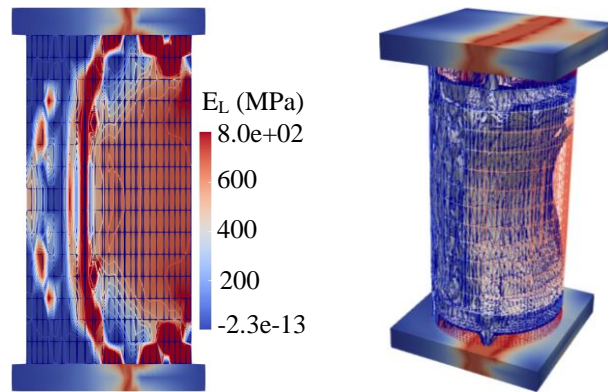
Data properti spesimen L2E20A/L2E20B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejauh 20 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.56.



**Gambar 4.56.** Schematic eccentric load from L2E20A/L2E20B specimen

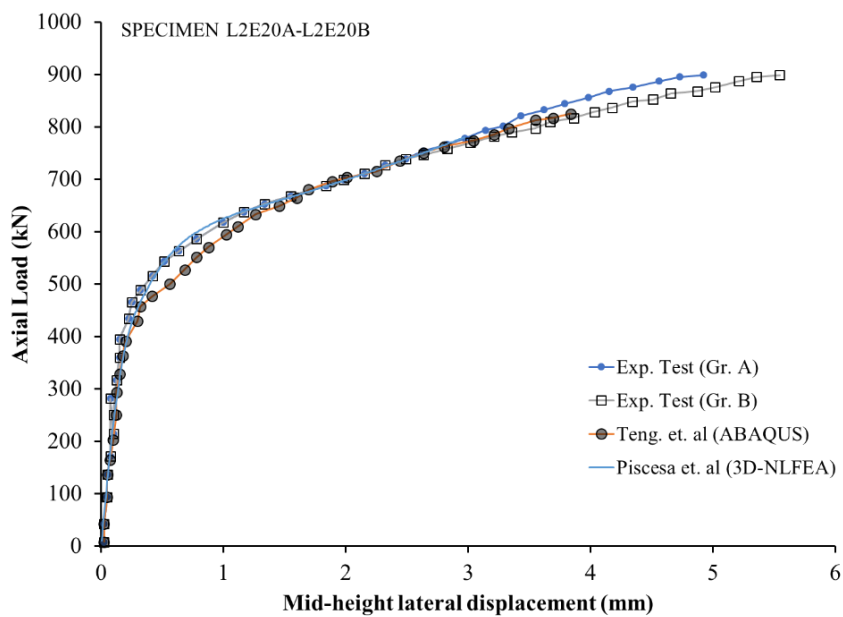
Gambar 4.57 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L2E20A/L2E20B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa

spesimen L2E20A/L2E20B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L2E10A/L2E10B di Gambar 4.54.



**Gambar 4.57.** The L2E20A/L2E20B specimen volume with the EL contour

Gambar 4.58 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L2E20A/L2E20B. Tidak seperti beberapa eksperimen sebelumnya, hasil analisa dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen.

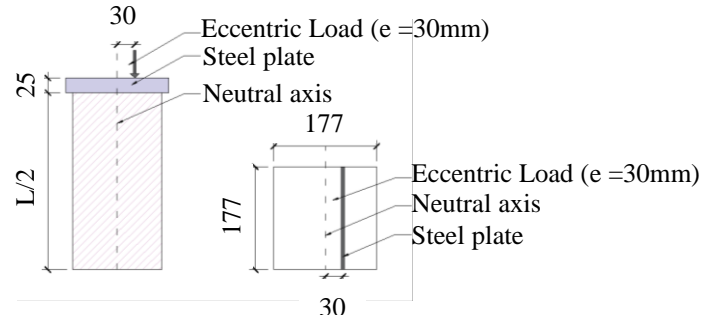


**Gambar 4.58** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E20A/L2E20B with 20 mm load eccentricities



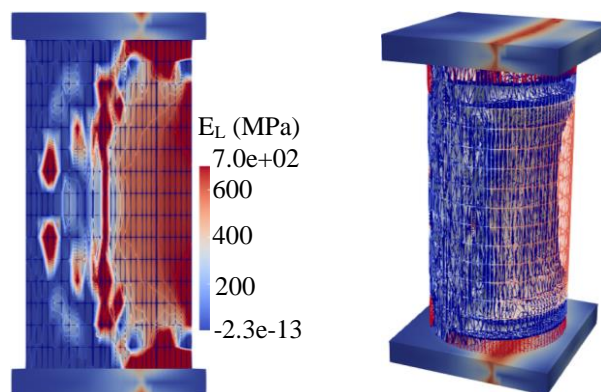
❖ Hasil Spesimen L2E30A/L2E30B

Data properti spesimen L2E30A/L2E30B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 30 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.59.



**Gambar 4.59.** Schematic eccentric load from L2E30A/L2E30B specimen

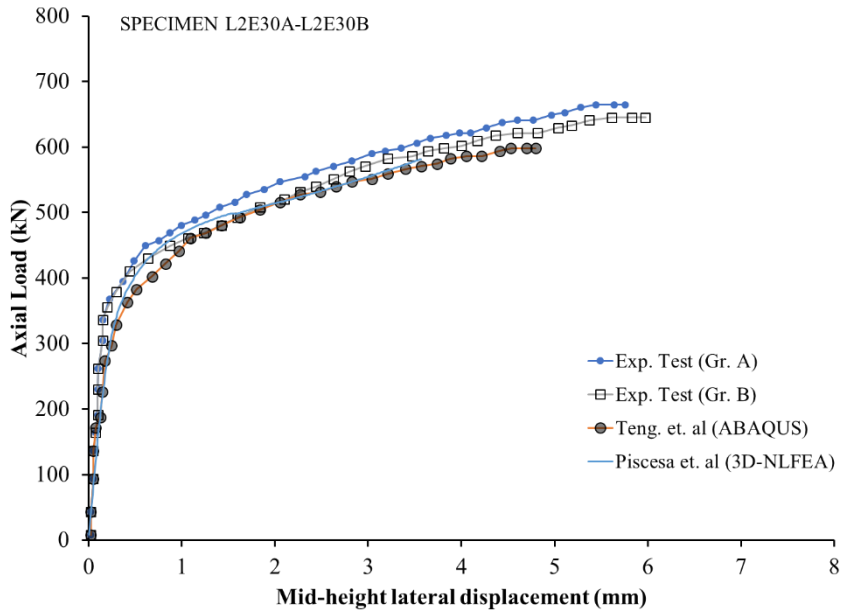
Gambar 4.60 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L2E30A/L2E30B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkung pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa spesimen L2E30A/L2E30B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L2E10A/L2E10B di Gambar 4.54.



**Gambar 4.60.** The L2E30A/L2E30B specimen volume with the EL contour

Gambar 4.61 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L2E30A/L2E30B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model

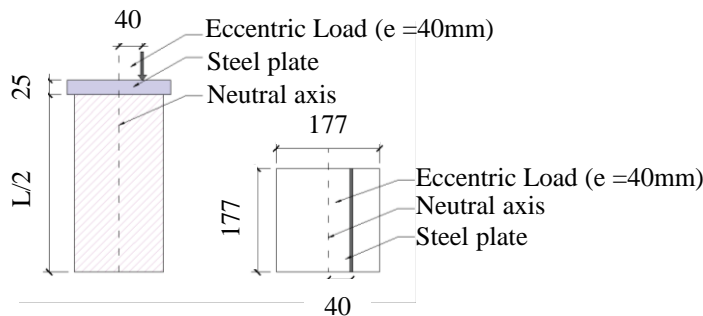
3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening model dari 3D-NLFEA menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi dari model Abaqus namun tidak setinggi dari hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B.



**Gambar 4.61** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E30A/L2E30B with 30 mm load eccentricities

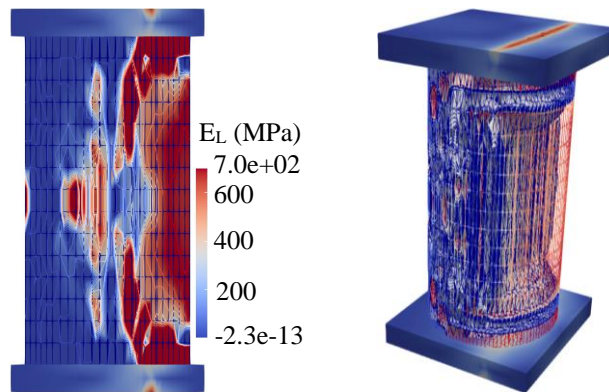
❖ Hasil Spesimen L2E40A/L2E40B

Data properti spesimen L2E40A/L2E40B dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan beban aksial eksentris yang digunakan pada spesimen ini sejarak 40 mm dari garis netral dengan skema beban seperti pada Gambar 4.62.



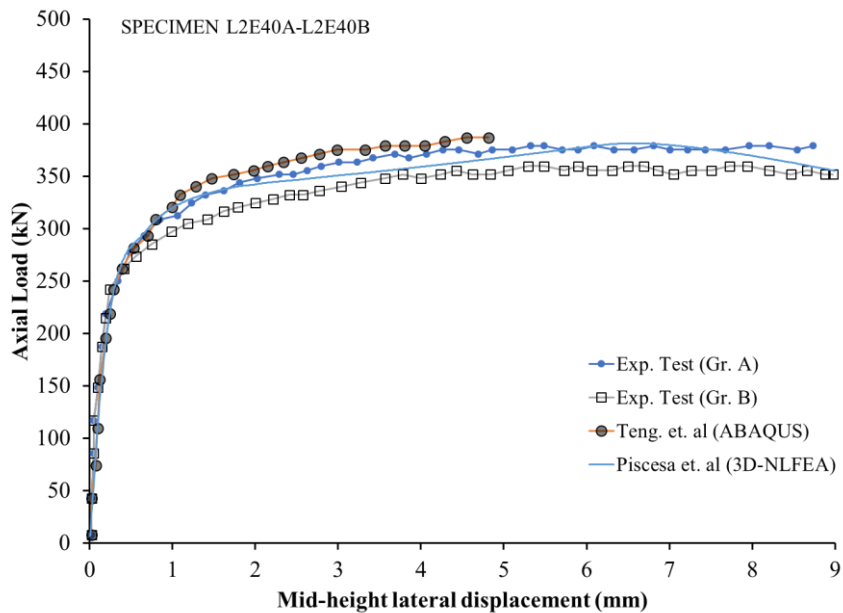
**Gambar 4.62.** Schematic eccentric load from L2E40A/L2E40B specimen

Gambar 4.63 menunjukkan kontur modulus lateral dari spesimen L2E40A/L2E40B pada penampang vertical dan permukaan kontur 3D. Pada gambar tersebut juga terlihat terjadinya efek negatif pada beton dengan ditunjukkannya aksi lengkungan pada kontur modulus lateral. Hasil dari analisa spesimen L2E40A/L2E40B pada keadaan ini sama seperti pada hasil dari spesimen L2E10A/L2E10B di Gambar 4.54.



**Gambar 4.63.** The L2E40A/L2E40B specimen volume with the EL contour

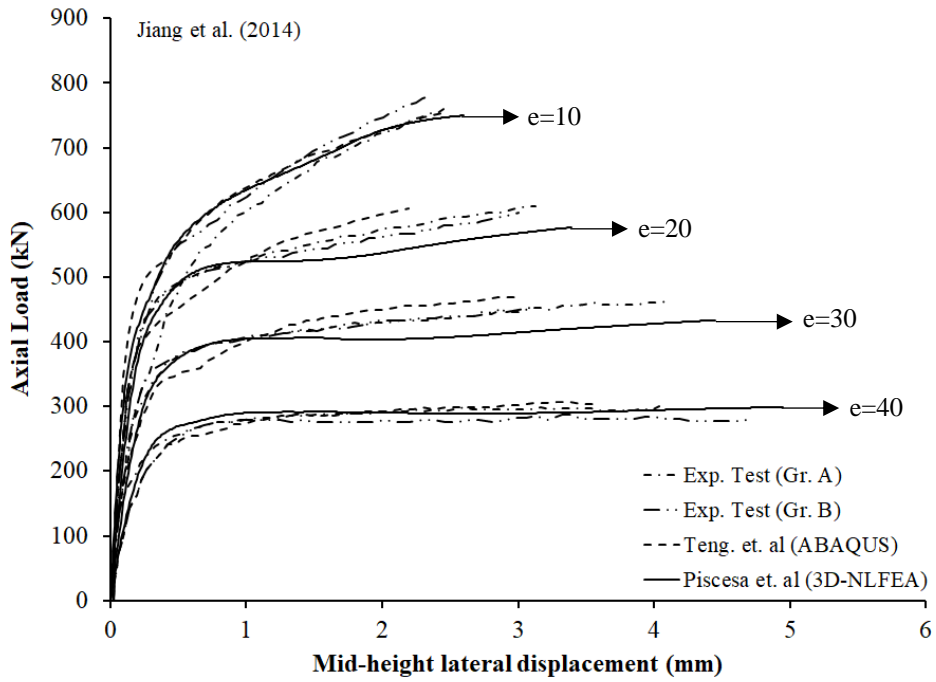
Gambar 4.64 menunjukkan kurva perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi pada spesimen L2E40A/L2E40B. Hasil pada kurva tersebut menunjukkan, pada respon awal kekakuan dari model 3D-NLFEA dan Abaqus berperilaku hampir sama dan sesuai dengan hasil eksperimen baik eksperimen tipe A ataupun B. Untuk perilaku hardening dari hasil eksperimen dan 3D-NLFEA menunjukkan bentuk kurva yang serupa namun hasil dari eksperimen tipe B lebih rendah sedangkan untuk hasil dari model Abaqus menunjukkan perilaku hardening yang lebih tinggi begitu juga dengan hasil eksperimen tipe A namun tidak lebih tinggi dari Abaqus.



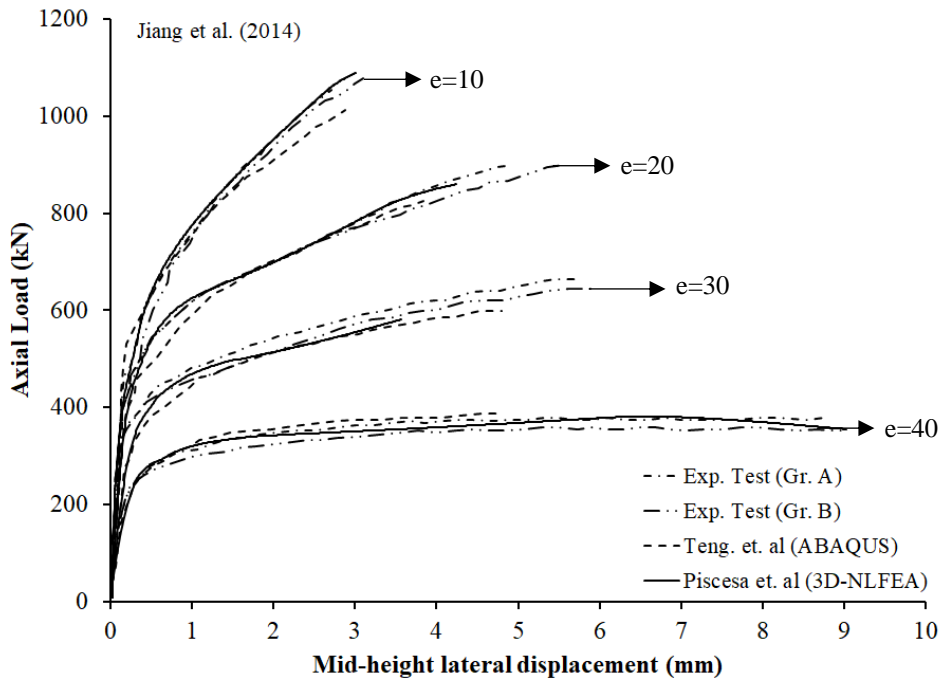
**Gambar 4.64** Comparison of axial load–lateral displacement curves of columns L2E40A/L2E40B with 40 mm load eccentricities

❖ Kesimpulan dari hasil perbandingan :

Kurva perbandingan dari Gambar 4.65 dan Gambar 4.66 menunjukkan ketika eksentrisitas beban bertambah maka daya dukung beban aksial pada kolom berkurang. Namun penurunan daya dukung beban aksial tersebut berimbas pada naiknya tingkat daktilitas aksial beton (Gambar 4.18 dan Gambar 4.19). Dan juga pada Gambar 4.66 dapat dilihat penggunaan 2 lapis CFRP wrap dapat meningkatkan daya dukung beban aksial beserta dapat bertambahnya tingkat daktilitas aksial pada beton. Hal tersebut dapat dengan mudah dipahami sebagai mode perubahan kegagalan dari keadaan tekan yang didominasi beban aksial atau *compression control* ke dalam keadaan lentur atau *tension control*. Seperti yang diketahui dalam desain sebaiknya menggunakan desain *under reinforced* atau yang sekarang disebut sebagai *tension control* untuk mencegah terjadinya kegagalan secara tiba – tiba (getas).



**Gambar 4.65.** Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Jiang et al. (2014) on specimen using 1layer CFRP wrap



**Gambar 4.66.** Comparison of axial load–lateral displacement curves of all columns from eksperiment by Jiang et al. (2014) on specimen using 2layer CFRP wrap

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Pada penelitian ini telah dianalisa mengenai perilaku kolom beton bertulang yang dikekang menggunakan *Carbon Fiber Reinforce Polymer (CFRP)* dengan beban aksial eksentris dimana spesimen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data eksperimen yang telah dilakukan oleh (Bisby and Ranger 2010, Fitzwilliam and Bisby 2010, Wu and Jiang 2013, Jiang, Zhang et al. 2014). 3 *Dimensional Non Linier Finite Elemen Analysis (3D-NLFEA)* digunakan sebagai program untuk memprediksi respon dan spesimen yang diuji. Berdasarkan analisa diatas beberapa kesimpulan penting dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Salah satu temuan yang menarik tentang efek negatif dari kolom beton yang di kekang secara eksternal telah dibahas sebelumnya. Efek negatif dari pengekangan eksternal ini disebabkan oleh perbedaan yang signifikan antara laju kearah lateral beton pada inti dan diluar inti (cover). Pada tahap elastis terdapat konsentrasi modulus lateral pada tulangan transversal di area beton yang terbebani beban aksial. Setelah tulangan mengalami pelelehan konsentrasi dari modulus lateral tersebut menghilang. Hal tersebut dapat dihubungkan dengan efek negatif dari pengekangan.
2. Dari hasil perbandingan beban aksial sebagai fungsi dari perpindahan lateral di pertengahan tinggi menunjukkan bahwa untuk beban yang memiliki eksentrisitas kecil, hasil analisa 3D-NLFEA menunjukkan respon awal yang lebih kaku dari pada hasil analisa menggunakan Abaqus dan juga hasil yang didapat lebih mendekati hasil eksperimen. Namun ketika eksentrisitas beban bertambah hasil dari model 3D-NLFEA ini hampir serupa dengan hasil eksperimen, namun hanya pada spesimen tipe C30 dan C40 dari (Bisby and Ranger 2010) saja yang perilaku hardeningnya berbeda dengan eksperimen.
3. Beberapa faktor yang mempengaruhi naiknya tingkat daktilitas aksial dari beton adalah bertambahnya eksentrisitas dari beban dan kelangsingan dari

kolom. Faktor tersebut juga berpengaruh pada turunnya kapasitas daya dukung beban aksial pada kolom. Hal tersebut dapat dengan mudah dipahami sebagai mode perubahan kegagalan dari keadaan tekan yang didominasi beban aksial atau *compression control* ke dalam keadaan lentur atau *tension control*. Seperti yang diketahui dalam desain sebaiknya menggunakan desain *under reinforced* atau yang sekarang disebut sebagai *tension control* untuk mencegah terjadinya kegagalan secara tiba – tiba (getas).

## **5.2. Saran**

Berdasarkan studi ini, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan variasi dimensi, jumlah lapis dan eksentrisitas beban yang lebih beragam. Selain itu, kondisi pembebanan dapat ditingkatkan dengan penambahan beban lateral. Simulasi numerik lebih lanjut juga harus dilakukan untuk mempelajari perilaku kolom beton yang terkekang menggunakan CFRP dengan beban aksial eksentris. Dan juga perlunya untuk mempelajari lebih lanjut tentang distribusi tekanan pengekang untuk mengembangkan pendekatan yang disederhanakan untuk kolom beton bertulang yang terkekang dengan CFRP.



## DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, K., S. Agoes and T. Tavio (2013). "Metode Eksperimental Struktur Kolom Beton Bertulang Tahan Gempa Menggunakan CFRP Sebagai Eksternal Confinement." *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)* **1**(1).
- ACI (American Concrete Institute). (2008). "*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*". ACI 440-08, Farmington Hills, MI.
- Attard, M. M. and S. Setunge (1996). "Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete." *Materials Journal* **93**(5): 432-442.
- Bazant, Z. P. and F.-B. Lin (1988). "Nonlocal smeared cracking model for concrete fracture." *Journal of Structural Engineering* **114**(11): 2493-2510.
- Binici, B. (2008). "Design of FRPs in circular bridge column retrofits for ductility enhancement." *Engineering Structures* **30**(3): 766-776.
- Bisby, L. and M. Ranger (2010). "Axial-flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns." *Construction and Building Materials* **24**(9): 1672-1681.
- Bisby, L. A., A. J. Dent and M. F. Green (2005). "Comparison of Confinement Models for FRP Wrapped Concrete." *ACI Structural Journal*: 62-72.
- Candappa, D., J. Sanjayan and S. Setunge (2001). "Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* **13**(3): 209-215.
- Carrazedo, R., A. Mirmiran and J. B. de Hanai (2013). "Plasticity based stress-strain model for concrete confinement." *Engineering Structures* **48**: 645-657.
- Dipohusodo, I. (1994). *Struktur beton bertulang: berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI*, Gramedia Pustaka Utama.
- Fitzwilliam, J. and L. A. Bisby (2010). "Slenderness effects on circular CFRP confined reinforced concrete columns." *Journal of Composites for Construction* **14**(3): 280-288.
- Hollaway, L. (2008). *Fibre-reinforced polymer (FRP) composites used in rehabilitation. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites*, Elsevier: 45-82.
- Hurlbut, B. J. (1985). *Experimental and computational investigation of strain-softening in concrete*, University of Colorado.
- Jamet, P., A. Millard and G. Nahas (1984). *Triaxial behaviour of a micro-concrete complete stress-strain curves for confining pressures ranging from 0 to 100 MPa*, CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay.
- Jiang, T., X. Zhang, J. Yao and Y. Luo (2014). *Stress-strain behaviour of FRP-confined concrete subjected to eccentric compression. The 13th International Symposium on Structural Engineering*.
- Kanti Pangestuti, E. (2006). *Pengaruh Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Terhadap Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang*, Magister Teknik Sipil.

- Lam, L. and J. Teng (2004). "Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete." *Journal of Composites for Construction* **8**(6): 539-548.
- Lawther, R. (1980). "Modification of iterative processes for improved convergence characteristics." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **15**(8): 1149-1159.
- Lin, G. and J. Teng (2017). "Three-dimensional finite-element analysis of FRP-confined circular concrete columns under eccentric loading." *Journal of Composites for Construction* **21**(4): 04017003.
- Lu, X. and C.-T. T. Hsu (2007). "Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression." *Journal of materials in civil engineering* **19**(3): 261-268.
- Mirmiran, A. and M. Shahawy (1997). "Dilation characteristics of confined concrete." *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures* **2**(3): 237-249.
- More, R. U. and D. Kulkarni (2014). "Flexural behavioural study on RC beam with externally bonded aramid fiber reinforced polymer." *International Journal of Research in Engineering and Technology* **3**: 316-321.
- Nawy, E. G., T. Surjaman and B. Suryoatmono (1990). *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar*, PT. Eresco, Bandung.
- Newman, J. (1979). "Concrete under complex stress." In: Lydon F, editor. *Developments in Concrete Technology-I1979*. p: 151-219.
- Noorhidana, V. A. and E. Purwanto (2012). "Daktilitas Kolom Yang Diperkuat Dengan CFRP." *Jurnal Teknik Sipil* **3**(2).
- Pantazopoulou, S. J. (1995). "Role of expansion on mechanical behavior of concrete." *Journal of structural engineering* **121**(12): 1795-1805.
- Papanikolaou, V. K. and A. J. Kappos (2007). "Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression." *International Journal of Solids and Structures* **44**(21): 7021-7048.
- Parvin, A. and D. Brighton (2014). "FRP composites strengthening of concrete columns under various loading conditions." *Polymers* **6**(4): 1040-1056.
- Piscesa, B. (2017). "Numerical Investigation on The Behaviour of Concrete-Filled-Steel-Tube Column under Eccentric Loading." presented at the The Third International Conference on Civil Engineering Research (ICCER), Surabaya, Indonesia, 1-2 August 2017, 2017.
- Piscesa, B. (2018). *Modeling confined concrete using plasticity formulation*, PhD. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2018.
- Piscesa, B., M. Attard, A. Samani and S. Tangaramvong (2016). "A Plasticity Constitutive Model For The Stress-Strain Relationship of Confined Concrete." *ACI Struct J* 2016. [Accepted for publication].
- Piscesa, B., M. Attard, A. Samani and S. Tangaramvong (2016). "A Plasticity Constitutive Model For The Stress-Strain Relationship of Confined Concrete." *ACI Structural Journal - Revision Sent*. 2016.
- Piscesa, B., M. M. Attard, D. Prasetya and A. K. Samani (2019). "Modeling cover spalling behavior in high strength reinforced concrete columns using a plasticity-fracture model." *Engineering Structures* **196**: 109336.

- Piscesa, B., M. M. Attard and A. K. Samani (2016). "A lateral strain plasticity model for FRP confined concrete." *Composite Structures* **158**: 160-174.
- Piscesa, B., M. M. Attard and A. K. Samani (2018). "3D Finite element modeling of circular reinforced concrete columns confined with FRP using a plasticity based formulation." *Composite Structures* **194**: 478-493.
- SALOME - The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation.* <http://www.salome-platform.org/>. (2017). [Online]. Available: <http://www.salome-platform.org/>
- Samani, A. K. and M. M. Attard (2012). "A stress–strain model for uniaxial and confined concrete under compression." *Engineering Structures* **41**: 335-349.
- Samani, A. K. and M. M. Attard (2014). "Lateral strain model for concrete under compression." *ACI Structural Journal* **111**(2): 441-451.
- Smith, S. S., K. J. Willam, K. H. Gerstle and S. Sture (1989). "Concrete over the top--or, is there life after peak?" *Materials Journal* **86**(5): 491-497.
- Soenaryo, A., M. T. Hidayat and H. Siswanto (2012). "Perbaikan Kolom Beton Bertulang Menggunakan Concrete Jacketing dengan Prosentase Beban Runtuh yang Bervariasi." *Rekayasa Sipil* **3**(2): 91-100.
- Sudjati, J. J., R. A. Tarigan and I. B. M. Tresna (2015). "Perbaikan Kolom Beton Bertulang Menggunakan Glass Fiber Jacket Dengan Variasi Tingkat Pembebanan." *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9 (KoNTekS 9). Komda VI BMPTTSSI -Makassar, 2015.*
- Sumirin, S. (2006). "Kajian Kekuatan dan Daktilitas Kolom Bertulang." *Media Komunikasi Teknik Sipil* **14**(1): 63-72.
- Teng, J., J.-F. Chen, S. T. Smith and L. Lam (2002). "FRP: strengthened RC structures." *Frontiers in Physics*: 266.
- Teng, J., Y. Huang, L. Lam and L. Ye (2007). "Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete." *Journal of composites for construction* **11**(2): 201-210.
- Wu, Y.-F. and C. Jiang (2013). "Effect of load eccentricity on the stress–strain relationship of FRP-confined concrete columns." *Composite Structures* **98**: 228-241.
- Xiao, Y. and H. Wu (2000). "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *Journal of materials in civil engineering* **12**(2): 139-146.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA



Penulis bernama lengkap Angga Bayu Christianto. Lahir di Surabaya pada tanggal 12 Juli 1994. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Kurniawati Surabaya, SD Negeri 57 Surabaya, SMP Negeri 38 Surabaya, SMA Negeri 7 Surabaya. Setelah lulus SMA pada tahun 2012, penulis mengikuti Tes Masuk Program Diploma III Teknik yang diselenggarakan oleh ITS Surabaya dan diterima di jurusan Diploma III Teknik Sipil FTSP-ITS tahun 2012 dan terdaftar dengan NRP 3112030012 di Jurusan Diploma III Teknik Sipil penulis mengambil bidang studi Bangunan Gedung. Setelah merampungkan program diploma III pada tahun 2015 dengan gelar A.Md, penulis melanjutkan pendidikan Sarjana pada program Lintas Jalur jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan terdaftar dengan NRP 3115105052. Di jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS Surabaya, penulis adalah mahasiswa Program Sarjana (S1) dengan bidang studi Struktur. Pasca lulus penulis bekerja di PT. Inti Teknik Solusi Cemerlang (PT.ITSC) di Kota Surabaya sebagai *tenaga ahli struktur* hingga saat ini. Ditengah masa kerja karena dukungan dari berbagai pihak, akhirnya pada tahun 2018 penulis mengikuti ujian masuk program pasca sarjana (S2) Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember bidang keahlian Struktur, yang terdaftar dengan NRP. 03111850020006.